



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

제1장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라는 지난 수 십 년 동안 국토 균형발전과 국가 경쟁력 확보를 위하여 도로·철도·공항·댐 등의 사회기반시설을 확충하여 왔다. 더욱이 최근에는 인구증가와 산업발달로 시설물의 신설 및 확장사업이 활발하여, 시설물 규모 및 사업부지 활용도를 높이기 위한 절·성토사면이 크게 증가하고, 이로 인한 산사태 및 낙석 등의 사면파괴가 발생하여 많은 인명과 재산상의 피해가 증대되고 있는 실정이다.

사면파괴는 지질·토질·지질구조·지형 등 내적요인(잠재적 요인)과 강우·용설·지하수·침식·지진·절토 등과 같은 자연적·인위적 요인과 같은 외적요인(직접적 요인)이 서로 복합적으로 다양하게 발생된다. 이러한 사면파괴에 대한 안정성은 사면자체의 지질학적·지형학적·지반공학적 특성에 따라 좌우되지만 주변의 환경에 따라 영향을 받을 수 있으므로 사면의 안정성에 영향을 미치는 내적·외적요인 뿐만 아니라 여러 가지 요인들을 조사·분석하여 큰 영향을 미칠 수 있는 요인들을 선정하여야 한다.

토사사면은 미시적으로는 불연속적인 토립자로 구성된 집합체이나 전체적으로 볼 때 하나의 연속체로 간주할 수 있다. 따라서 특별한 지층(연약층)이 분포하지 않는 경우의 파괴는 임의의 최소 활동저항면을 따라 발생한다는 점을 염두에 두고 안정성 평가가 이루어지는 것이 보통이다. 또한 안정성 평가에 필요한 주요소 중 하나인 지반정수 측면에서 볼 때 토사층의 경우 구성토질 및 조성상태 등 크게 두 가지에 요인에 따라 지반정수 값이 달라지고 사면안정 검토 시 이에 대한 면밀한 파악이 필요하게 된다.

암반사면의 경우 극히 불 균질할 뿐만 아니라 암석 고유의 특성, 풍화의 정도, 성층상태 및 불연속면의 특성 등에 따라 암반의 거동이 현저하게 다르기 때문에 암석역학과 암반공학의 모든 이론에 근거하여 그 상태를 정량적 지표로 평가할 수 없는 경우가 많다. 또한 암반사면의 절취구배를 결정하는 현행 방법은 불연속면의 방향·거칠기·간격·연속성·틈새·충진 물질·강도 등의 공학적 특성을 전혀 고려하지 않고 주로 풍화암, 연암, 보통암 및 경암 등의 암석강도에 따라 일률적으로 절취구배를 결정하고 있어 많은 붕괴사고를 유발하여 안정성에 대한 많은 문제점

을 내포하고 있어, 합리적인 암반사면 설계와 이를 안정하게 유지하기 위해서는 암반 내에 존재하는 불연속면의 역학적 특성을 정확하게 파악하여 불연속면이 암반 거동에 미치는 영향을 면밀히 검토해야 한다.

이와 같이 현재의 토사 및 암반사면에 대한 설계 및 시공은 수학적·물리학적 법칙에 기초해서 만든 다양한 공학적 기법의 모델링과 전산화에 의해 자동화시스템의 개발이 정착단계에 도달하였으나, 실제 각 사면의 안정성평가는 사면내부의 다양한 인자와 불확실성을 내포하고 있으므로 조사자의 주관적 판단에 크게 의존하는 인간의 한계를 극복하지 못한 실정이다. 이에 사면의 안정성평가는 전문가의 조사자료 및 시험자료 등을 토대로 하여 보다 체계적이고 합리적인 평가와 판단이 가능한 평가방법의 개발이 필요하다.

또 최근 구조물의 대형화·복잡화 경향에 따라 경제적이고 합리적인 최적 설계방안이 요구되면서 신뢰성 분석을 기반으로 하는 확률론적 설계방법이 세계적인 추세가 되어가고 있는 실정이다. 이에 따른 경험적 연구로 구축된 데이터베이스에 대한 신뢰성 분석을 통해 파괴확률 및 신뢰성지수를 산정하고, 이를 이용하여 구조물의 안전도를 정량적으로 평가함으로써 합리적이고 경제적인 설계가 되도록 하고 있다(한국지반공학회, 2002).

특히, 북미와 유럽을 중심으로 구조물의 설계와 관련하여 확률론적 설계방법의 기준이 정비되었으며, 구조공학 분야뿐만 아니라 지반공학 분야의 설계에도 도입이 시도되고 있으며, 최근 국제표준화기구의 설계표준뿐만 아니라 미국연방도로국의 시방기준 및 유럽연합의 설계코드에서 신뢰성이론에 의한 설계가 포함된 것이 그 예이며, 지속적인 연구개발을 통한 국내의 대비가 필요한 시점이다(곽기석 등, 2006). 따라서 사면안정 문제에 있어서도 현행 확정론적 설계방법의 불합리성을 지양하고, 안정성과 경제성을 확률적으로 고려한 사면의 안정성 평가방법의 개발이 필요하다.

이에 본 연구는 토사사면과 암반사면의 물성치 및 제반 변수들을 이용한 수치해석적 평가방법인 정량적 해석과 조성상황과 물리적 특성을 이용한 경험적 평가해석 등의 기존 사면안정성 평가방법과 신뢰성이론에 의한 해석 및 퍼지이론에 의한 해석, 그리고 인공신경망 이론 및 퍼지-신경망 이론에 의한 확률론적인 안정성 평가방법을 제안하므로 여러 가지 변수들의 불확실성을 동시에 고려하여 기존의 사면안정의 해석방법들과 비교·분석함으로써 사면의 안정성 평가에 대해 보다 객관적인 평가방법을 제시하고자 함에 그 목적이 있다.

1.2 연구동향

토사사면의 안정해석에 사용되는 한계평형방법은 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체의 안정성을 해석하는 것으로서 유용성과 신뢰성은 현재까지 축적된 경험을 통하여 잘 알려져 있다. 한계평형방법과 흙 췌기해석법(Duncan and Wright: 1980), Fellenius방법(1927, 1936), Bishop(1955)의 간편법, 일반한계평형, 절편법(Fredlund and Krahn 1977) 등의 방법들이 많이 사용되어지고 있으며, Whitman and Baily(1967)등은 이러한 방법들에 대한 비교 연구 결과를 발표한 바 있다.

암반사면의 경우 불연속면을 파악하기 위하여 지표지질조사 및 실험에 의하여 얻어진 절취면의 방향, 절리면의 방향, 절리면의 전단각 등을 고려하여 신속하고 개략적인 암반사면의 안정성을 분석하기 위하여 평사투영법을 사용하는데, 근래에는 Hoek & Bray(1981) 등의 공헌에 의해 암반의 불연속면을 대상으로 한 구조적해석에 널리 이용되고 있다. 또 일반적으로 이용되는 암반분류법이나 사면평점법 등에 의한 암반사면의 파괴가능성에 대한 평가는 Terzaghi(1946), 그 후 Deere(1988)는 암석의 압축강도와 그 변형 정도에 따라 무결암을 분류하는 방법을 발표하여 단축압축강도를 극경암에서 극연암까지 5등급으로 나누어 A~E로 분류하였다. 그리고 Lauffer(1958), Barton(1974), Bieniawski(1979) 등에 의해 합리적인 암반분류 체계가 개발되어 터널 설계 방법의 기초가 되었으며, Terzaghi · Lauffer(1958)에 의한 초기방법은 정성적 분류방법, Bieniawski, Barton 등에 의한 방법은 정량적 방법으로 사면의 안정성평가의 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

신뢰성해석 이론은 1947년 Freudenthal이 처음으로 발표하여, 그 후 확률이론의 중요성이 널리 인식되어 오다가 1969년 Cornell이 평균 제1계 2차모멘트 방법을 발표한 이래 신뢰성방법의 적용에 대한 연구가 빠른 속도로 진행되었다. 그러나 Cornell(1969)의 MFOSM방법은 확률분포의 범위가 정규분포라야 한다는 제한과 한계상태 함수의 표현 형태에 따른 해의 유일성 결여 등이 문제점이 있어 사용상에 한계가 있었다. 1974년 Hasofer & Lind가 이 표현 형태에 따른 문제를 해결하였고, 1978년 Rackwitz and Fiessler가 비정규분포를 등가정규분포로 변환하는 알고리즘을 개발하여 확률변수의 분포에 대한 제한문제를 해결하였다. 1983년 Shinozuka가 이때까지의 연구에 확률변수의 상관관계를 포함시켜 AFOSM방법을 완성하였으며, 그 후 구조물의 신뢰성해석에 적용되고 있다.

지반공학과 관련된 신뢰성 연구로는 Lumb(1966), Meyerhof(1970), Schultze(1971) 등이 토질정수에 대하여 통계학적 자료 분석을 수행하였으며, 그 후 Singh(1971), Matsuo(1974), Ang & Tang(1975), Vanmarcke(1977), Tobutt(1979), Yucemen(1983) 등에 의한 연구가 진행되었다. 사면의 신뢰성해석은 Freudenthal(1966), Ang(1969), Wu and Kraft(1970), Cornell(1974), Craver(1982), Carter(1983) 등에 의해 수행되었으며, Catalan and Cornell(1970) 등은 흙댐의 신뢰성해석을 수행한 바 있다. 기초구조물의 신뢰성해석은 Wu and Kraft(1967) 등이 기초의 안전율에 대한 확률 산정법을 발표하였으며, Whitman(1984) 등은 지반구조물의 안정성에 영향을 미치는 인자들의 불확실성을 고려하기 위하여 신뢰성계수를 도입한 바 있다.

우리나라에서는 조효남·정태송·전재명(1983) 등이 신뢰성이론에 의한 R.C옹벽의 안정해석 및 설계기준에 대한 연구를 수행하였으며, 이송(1985)에 의해 얇은 기초의 안정성에 대한 확률론적 해석이 연구되었다. 심태섭(1990)은 지진시 미소변위를 허용하는 옹벽의 신뢰성 연구를 수행하였으며, 양우식(1992)은 FOSM방법을 이용한 사면의 신뢰도 해석이 연구된 바 있다. 특히 주승완(2001)은 신뢰성 이론에 의한 암반사면의 안정성 해석에 대한 연구를 하였으며, 최근에는 안종필·김규덕(2007, 2008) 등이 측방유동을 받는 교대 말뚝기초의 신뢰성해석에 관한 연구 및 측방유동을 받는 교대 기초의 PEM해석에 관한 연구 등을 수행하였으나, 현재까지는 기초분야 에서 신뢰성 연구의 성과가 부족한 실정이다.

퍼지이론에 관한 연구추세를 살펴보면 Jianmin-Kungzhang(1991)의 퍼지신뢰성에 관한 연구와 Chou-Yuan(1992)의 퍼지-베이스 근사법 등 퍼지관계 근사법에 의한 신뢰성해석 연구를 다수 수행한 바 있다. Fairhurst and Lin(1985)은 퍼지이론을 RMR분류법에 적용하였고, 일본에서도 기초단계로 Shoji(1990), Kunimasa(1992) 등을 비롯하여 암반사면이나 터널의 안정성평가에 있어 퍼지이론을 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 사면, 옹벽, 항만구조물에 대한 다양한 파괴요인을 체계적이고 합리적으로 해석할 수 있는 방법으로 西邦正(1992)나 박병길(2000), 안종필(1998, 2002), 박용훈(2004), 유덕찬(2007) 등에 의해 퍼지이론을 응용하는 연구가 이루어지고 있다.

1.3 연구방법 및 범위

사면의 안정성 평가는 지층의 구성상태, 지형조건, 용출수의 유·무, 토질 및 암반의 공학적 특성, 사면의 안정성 및 경제성, 보강공법의 적용 여부 등을 종합적으로 검토하여 결정되므로 사면의 안정성을 장기적으로 유지하기 위해서는 체계적이고 합리적인 분석과정을 거쳐야 한다. 이에 본 연구는 기존의 토사 및 암반사면의 안정성 평가방법과 본 연구에서 제안하는 안정성 예측 방법을 실제 토사 및 암반사면에 대해 적용하여 평가하여 상호 비교·분석하였다.

토사사면의 안정성 평가에 사용되는 기존의 평가방법은 한계평형해석방법, 경험적인 사면 안정성 평가방법을 적용하였으며, 안정성 예측방법으로는 점추정법에 의한 신뢰성 해석방법, 퍼지근사추론법에 의한 평가방법, 인공신경망이론에 의한 평가방법, 퍼지-신경망에 의한 방법을 실제 토사사면 4개 구간에 적용하여, 상호 비교·분석하여 각 사면에 대한 안정성평가와 신뢰성 및 타당성 등을 검토하였다. 토사사면 안정 해석은 토사사면 4개구간에 대한 시추조사, 표준관입시험, 실내시험 등의 결과를 이용하여 안정성 평가를 실시하여 비교·분석하였다.

암반사면의 안정성 평가에 사용되는 기존의 평가방법은 평사투영해석법, 한계평형 해석법, 암반분류법을 적용하였으며, 안정성 예측방법으로는 토사사면과 동일하게 점추정법에 의한 신뢰성 해석방법, 퍼지근사추론법에 의한 평가방법, 인공신경망이론에 의한 평가방법, 퍼지-신경망에 의한 방법을 실제 암반사면에 적용하여 상호 비교·분석하였다. 암반사면 안정해석 대상은 토사사면과 같이 4개 구간에 대해 RMR 및 SMR과 SSR 등의 결과를 바탕으로 비교·분석하였다.

본 연구에서 제시한 안정성 예측 방법 중 점추정법에 의한 신뢰성 해석방법은 기존의 신뢰성 해석방법에 비하여 복잡한 미분방정식의 계산이 필요치 않으며, 기존의 확정론적 방법에서 제안된 한계상태함수식에 사면의 안정성에 영향을 주는 몇 가지 인자 등에 대한 평균값과 표준편차를 이용하여 사면의 신뢰성지수와 안전율을 계산할 수 있고, 신속한 계산을 위해서 컴퓨터 프로그램으로 수행되어진다.

퍼지이론에 의한 사면의 안정성 평가는 사면의 손상 및 파괴요인을 경험적 방법에 따른 외적요인과 사면의 지반정수 값에 의한 내적요인으로 구분하고, 이러한 요인에 대한 전문기술자의 주관적 판단을 퍼지언어 변수로 표현하는 퍼지 근사추론 구조화를 이용하여 사면의 안정성을 수행하게 된다. 그리고 인공신경망 이론에 의한 사면의 안

정성 평가방법은 사면의 손상 및 파괴에 대한 내적요인과 외적요인을 기준으로 선별한 신뢰성 있는 현장계측 자료를 토대로 인공신경망 모델의 학습검증을 사용하게 되며, 학습은 최급강하법을 기초로 하는 역전파 알고리즘을 이용하여 안정성 평가를 수행하게 된다.

마지막으로 본 연구에서 사면 안정성 평가에 대해 신속하고 정확한 해석 및 평가를 수행하기 위해 현장에서 관측된 자료와 실험결과에서 도출된 파괴가능성에 대한 주관적 불확실성을 처리하기 위해 퍼지논리에 결합수분석 기법을 접목하여, 수치정보 및 언어정보에 의해 해석이 가능하도록 한 퍼지 결합수분석 기법과 추론 및 판단에 대한 신속성 및 정확성으로 안정성 평가 예측에 효과적인 역할이 가능한 인공신경망이론에 의해 사면안정 해석이 가능한 퍼지-신경망 사면 안정성 평가 시스템(일명 CITYSNF.m)을 개발하여 MATLAB(Matrix Laboratory) 프로그램에서 구현되도록 하였다.

퍼지-신경망 사면안정 평가 시스템은 한 번의 입력 값으로 인공신경망과 퍼지로직에 의한 사면안정 평가를 동시에 할 수 있도록 프로그램 한 사면안정 평가 시스템으로 인공신경망 기반 결합수기법(ANN-FTA)과 퍼지로직 기반 결합수기법(FLG-FTA) 그리고 인공신경망 기반 퍼지결합수기법(ANN-FFTA)과 퍼지로직 기반 퍼지결합수기법(FLG-FFTA)을 이용하여 신뢰성 해석을 할 수 있도록 시스템화 하여 최소안전율 해석 및 평가가 가능한 방법으로 신속하고 정확한 계산이 가능하며, 애매성 및 모호성을 갖는 주관적 상태 평가를 객관화 시킬 수 있고 내적 또는 외적손상요인을 인공신경망으로 산정하므로 합리적이고 과학적인 사면안정 평가가 가능하도록 시스템화 되어 있어 이를 실제 토사 및 암반사면에 대해 적용함으로써 다양한 측면에 대한 분석을 통해 보다 합리적인 사면의 안정성 평가 방법을 제시하고자 하였다.

제2장 사면의 안정성 평가방법 고찰

2.1 사면안정의 메커니즘과 파괴형태

2.1.1 사면안정의 메커니즘

사면안정에 대한 역학적 특성은 암반이나 토체의 마찰각과 점착력 및 단위중량이 큰 비중을 차지한다. 마찰각과 점착력은 암반내의 불연속면을 따라 미끄러짐을 발생 시키는데 필요한 전단응력과 수직응력의 관계로서 표현되며, 이는 절리와 같은 지질학적 불연속면을 가진 암석시편이 불연속면을 따라 미끄러짐을 유발시키는 하중을 받는 경우에 얻어지는 결과들을 단순하게 표현한 것이다.

미끄러짐을 유발시키는 전단응력은 수직응력이 증가함에 따라 함께 증가한다. 마찰각은 전단응력과 수직응력의 관계를 나타내는 직선의 기울기로 정의된다. 대표적인 암석표면이나 흙 시료의 경우 전단응력은 식(2.1)과 같이 표현된다.

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \quad (2.1)$$

여기서, c : 점착력, σ : 가상 파괴면에 작용하는 수직응력, ϕ : 내부마찰각이다.

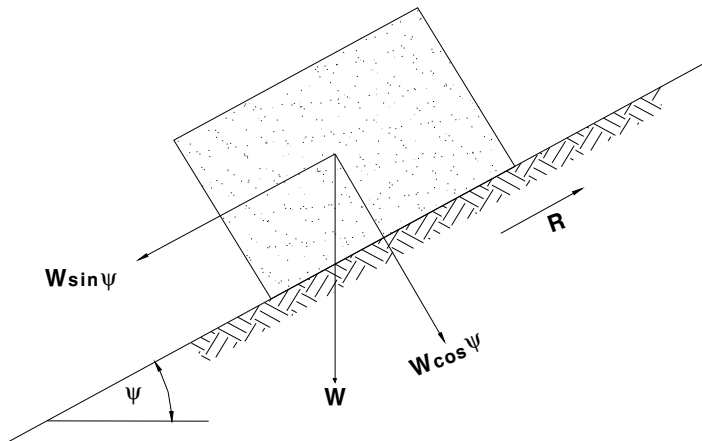


그림 2.1 경사면에 작용하는 수직응력과 전단응력의 관계

수평에 대해 ψ 의 각도를 갖는 경사면 위에 놓여있는 중량 W 의 블록을 고려할 때 블록에는 중력만 작용하므로 중량 W 는 그림 2.1에서와 같이 연직방향으로 작용하게 된다.

이때 블록의 미끄러짐을 유발시키는 중량 W 의 분해성분은 $W\sin\psi$ 이고, 경사면에 수직으로 작용하여 블록을 안정화시키는 성분은 $W\cos\psi$ 이므로 잠재적인 미끄러짐면에 작용하는 수직응력은 식(2.2)와 같이 표현된다.

$$\sigma = \frac{W\cos\psi}{A} \quad (2.2)$$

여기서, A : 블록의 밑면적, ψ : 미끄러짐의 경사각, W : 블록의 중량이다.

식(2.2)를 식(2.1)에 대입하여 정리하면 식(2.3) 및 식(2.4)와 같이 된다.

$$\tau = c + \frac{W\cos\psi}{A}\tan\phi \quad (2.3)$$

$$R = cA + W\cos\psi\tan\phi \quad (2.4)$$

여기서, $R = \tau_A$ 는 미끄러짐에 저항하는 전단력이며, 경사면 아래로 미끄러지려는 힘이 저항력과 정확히 같을 때 미끄러짐이 일어나려는 순간, 즉 극한평행 상태에 있게 한다.

사면의 안정해석은 활동면상에 있는 암괴 또는 토체의 극한평행조건에 의해 실시되고, 활동면상에서 활동을 일으키고자 하는 합력에 대한 활동에 저항하고자 하는 합력의 비율로 정의되는 안전율로 표시되며, 이는 식(2.5)에서와 같이 가상활동면을 따라 동원되는 전단응력에 대한 지반의 전단강도로 표시된다.

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (2.5)$$

토목공사에 있어 절취사면의 지층 분포는 일부의 토사층과 암반층이 복합적으로 출현되며, 이는 토사층과 암반층이 각각의 붕괴 특성이 다소 차이가 있으므로 토사층과 암반층으로 구분하여 안정성 평가를 해야 할 필요가 있다. 토사층의 경우 미시적으로는 불연속적인 토립자들로 구성된 집합체이나 전체적으로 볼 때 하나의 연속체를 간주할 수 있는 반면, 암반사면의 경우 대부분 암반 내 단층, 절리, 엽리, 층리 등과 같은 불연속면들이 존재하므로 불연속면에 의해 분리된 암체들의 집합체로 간주할 수 있다.

그러므로 토사사면의 경우 연속체로 간주될 수 있음에 따라 특별한 지층(연약층)이 분포하지 않은 경우의 파괴는 임의의 최소활동저항면을 따라 발생한다는 점을 염두에 두고 안정성 평가를 실시하고, 암반사면의 경우는 분포하고 있는 불연속면의 특성 즉, 주연속면의 방향, 경사, 거칠기, 틈새, 연장성, 풍화정도, 충전물질 유·무 등과 같은 불연속면의 공학적인 특성에 의해 붕괴가 발생하기 때문에 안정성 평가 시 토사사면의 경우와 비교할 때 복잡한 분석 및 계산을 필요로 한다.

또한, 안정성 평가에 필요한 주요소 중 하나인 지반정수 값이 달라지므로 암반층에 대한 안정해석에 필요한 지반정수 값은 불연속면의 풍화상태, 거칠기, 충전물질 유·무, 불연속면 강도 등과 같은 여러 가지 요소에 따라 좌우되어 대표 값의 판단 및 결정이 쉽지 않다. 따라서 사면안정 검토 시 토사사면은 구성토질 및 조성상태 등의 파악이 중요한 반면, 암반사면은 사면붕괴에 영향을 미칠 가능성이 큰 우세한 지질구조 또는 기층에 분포된 많은 불연속면에 대한 평가가 중요하다는 점에서 차이가 있다.

사면경사는 지층의 구성상태, 지형조건, 용출수의 유·무, 토질 및 암반의 공학적 특성, 사면의 안정성 및 경제성, 보강공법의 적용 여부 등을 종합적으로 검토하여 결정되므로 사면의 안정성을 장기적으로 유지하기 위해서는 체계적이고 합리적인 분석과정을 거쳐야 한다. 절토사면의 표준경사는 사면을 구성하는 지층의 종류, 상태 및 사면 높이에 따라 표 2.1, 표 2.2와 같이 적용하고 있다.

사면의 안정성은 안전율(Factor of Safety)을 근거로 하여 판단하고 있어 산정된 안전율이 1.0보다 크면 안정하지만 지반정수, 하중조건 및 파괴모델의 불확실성으로 인하여 허용안전율(Allowable Factor of Safety) 이상이 되어야 안전한 것으로 평가하여 명확한 규정 없이 1.5를 선택하고 있다. 그러나 Duncan and Buchignai(1975)은 사면파괴에 따른 인명과 재산의 피해정도 및 복구비용 그리고 전단강도 측정치에 관한 신뢰도에 따라 1.25~2.0의 허용안전율을 제시하였고, Duncan(1992)은 완공직후 및 다단계

재하의 경우는 1.3, 장기 재하의 경우 1.5, 수위 급강하의 경우 1.0~1.2의 허용안전율을 제안하고 있다. 또 국·내외 허용안전율에 대한 설계기준은 지역과 발주처, 공사내용에 따라 상이하나 대체로 1.1~1.5정도의 범위이며 한국도로공사의 적용기준은 표 2.3과 같다.

표 2.1 원지반 토질에 대한 비탈면 경사의 범위(건설교통부, 1996)

원 지 반 의 토 질		흙막기 높이	경 사	비 고 (통일분류법)
모 래	밀실하지 않고 입도분포가 나쁜 것		1:1.5 이상	SW, SP
사 질 토	밀실 한 것	5m 이하	1:0.8 ~ 1:1.0	SM, SP
		5~10 m	1:1.0 ~ 1:1.2	
	밀실하지 않고 입도분포가 나쁜 것	5m 이하	1:1.0 ~ 1:1.2	
		5~10 m	1:1.2 ~ 1:1.5	
자갈 또는 암피 섞인 사질토	밀실하고 입도분포가 좋은 것	10m 이하	1:0.8 ~ 1:1.0	SM, SC
		10~15 m	1:1.0 ~ 1:1.2	
	밀실하지 않거나 입도분포가 나쁜 것	10m 이하	1:1.0 ~ 1:1.2	
		10~15 m	1:1.2 ~ 1:1.5	
점 성 토		0~10 m	1:0.8 ~ 1:1.2	ML, MH, CL, CH
암피 또는 호박돌 섞인 점성토		5m 이하	1:1.0 ~ 1:1.2	GM, GC
		5~10 m	1:1.2 ~ 1:1.5	

표 2.2 절토사면 경사의 설계기준(건설교통부, 1996)

구 분		경 사	비 고
토 사	0 ~ 5 m	1 : 1.2	5m 마다 소단 1m 설치
	5m 이상	1 : 1.5	
암 반	리 핑	1:0.7 ~ 1:1.2	절토 20m 마다 소단 3m 설치
	발 파	1:0.5 ~ 1:0.7	

표 2.3 절·성토 사면의 최소안전율

구 분		최소안전율	참 조
철도	건 기	$F_s \geq 1.5$	<ul style="list-style-type: none"> - NAVFC-DM 7.1-p329: 하중이 오래 작용할 경우 - 일본도로공단(도로설계요령) - 한국도로공사: 일축, 삼축압축시험으로 강도를 구한 경우(도로설계요령, 1976)
	우 기	$F_s \geq 1.1 \sim 1.2$	- 영국 National Coal Board
성토	축조기간중	$F_s \geq 1.2$	<ul style="list-style-type: none"> - 일본토질공학회 - 일반적인 구조물인 경우
	공용개시후	$F_s \geq 1.3$	- 한국도로공사

표 2.4 안정검토를 필요로 하는 성토사면(건설교통부, 1996)

구 분	흩 쌓 기 조 건
흩 쌓 기 자체의 조건	<ul style="list-style-type: none"> - 흩쌓기 높이가 15m를 넘는 고성토의 경우 - 비탈면 구배가 표준치 보다 급한 경우 - 흩쌓기 재료의 함수비가 높고, 특히 전단강도가 낮은 경우 - 흩쌓기 재료가 실트와 같이 간극수압이 증가하기 쉬운 흩인 경우
외적조건	<ul style="list-style-type: none"> - 붕괴되면 인접 시설물 등에 중대한 손상을 주는 경우(철도 등) - 흩쌓기의 기초지반이 연약지반이거나 사면활동이 염려되는 경우(연약지반, 산사태) - 붕괴되면 복구에 장기간을 요하고, 도로기능을 현저하게 저해하는 경우 - 지형조건에 의해 체제속으로 물의 침투가 많은 경우(경사지반상의 흩쌓기, 계곡사이의 흩쌓기 등) - 홍수시에 침수되거나 비탈끝이 침식되는 경우(연못가운데의 흩쌓기 등)

사면의 안정성 검토구간 선정은 성토사면의 경우 높이가 15m이상 되는 사면을 원칙으로 하되 그 이하에 대해서도 표 2.4와 같은 현장조건에 따라 안정성 분석을 시행한다. 또 절토사면의 경우 높이가 20m이상 되는 사면을 원칙으로 안정성 검토를 실시하되 구성 지반이 붕적층인 경우 와 표 2.5와 같은 조건에서는 20m이하에서도 현장조건에 따라 안정성 분석을 시행한다.

표 2.5 안정검토를 필요로 하는 절토사면(한국도로공사, 1996)

조 건	검 토 사 항
침식에 약한 토질	수침시 전단강도에 의한 풍화토의 안정검토
고결도가 낮은 토사나 강한 풍화암	배수대책, 실내시험에 의한 안정검토
풍화가 급속히 진행된 암석	풍화가 빠른 암반에서의 안정 검토
구성지반이 붕적층 혹은 퇴적층인 경우	배수대책, 실내시험에 의한 안정검토
Land sliding 등의 붕괴 이력이 있는 지반	현장 정밀조사 후 안정검토
지하수위가 높고 용수가 많은 곳	배수대책, 안정검토
주변의 기존구조물에 나쁜 영향을 미칠 것으로 예상되는 경우	보강대책

2.1.2 사면의 파괴형태

1. 토사사면의 파괴형태

토사사면의 파괴형상은 원호형, 대수나선형, 직선형 등 수없이 많으므로 이것을 한마디로 단정하기 힘들다. 원칙적으로 말하면, 균질한 사면에 있어서는 활동면이 원호에 가까우므로 원호활동으로 가정하여 사면안정해석을 할 수 있다. 그러나 전단강도가 깊이에 따라서 증가하는 무한사면의 경우는 병행활동을 하므로 이와 부합하

는 안정해석을 우선적으로 해야 하며, 만일 사면 내에 얇게 약한 층이 존재할 때에는 이 면을 따라 활동되기도 한다. 이와 같이 활동현상은 다양함으로 해석에 앞서서 예상되는 활동면에 대한 여러 가지 경우를 충분히 검토하여 활동 가능성이 가장 높은 경우에 대해 검토하는 것이 중요하다. 토사사면의 종류는 사면의 형태에 따라 직립사면, 무한사면, 단순사면 등으로 분류하며, 표 2.6은 토사사면의 파괴의 종류 및 파괴형태를 간략하게 정리한 것이다.

표 2.6 토사사면의 파괴종류 및 파괴형태

파괴의 종류	파괴 형태
사면내 파괴	얇은 표층의 붕괴
사면선단 파괴	원호, 대수나선 형태의 활동
저면 파괴	깊고 광범위한 Land Sliding

사면의 불안정 요인에 관해 Terzaghi(1950)는 그 원인을 외적요인과 내적요인으로 나누어 다음과 같이 제시하였다.

(1) 외적요인

- 지형의 기하학적 변화(인위적인 절토, 유수에 의한 침식 등)
- 토피 하중의 제거(침식작용 및 인위적인 절토 등)
- 하중의 증가(하중증가, 사면높이증가, 수위상승에 의한 흙 무게 증가 등)
- 충격과 진동
- 인접한 호수 또는 저수지의 수위강하

(2) 내적요인

- 진행성 파괴
- 풍화작용(동결융해, 건조수축 등)
- 물의 침투에 의한 용해작용(용해에 의한 침식, 파이핑현상 등)

토사사면의 파괴원인은 크게 저항력의 감소와 작용력의 증가에 의해서 파괴되는 경우가 많으며, 파괴원인에 대해서는 표 2.7에 정리하였다.

표 2.7 사면파괴의 저항력 감소와 작용력 증가

저항력 감소	작용력의 증가
<ul style="list-style-type: none"> - 수압증가 - 다짐 불충분(성토사면) - 수축, 팽창 또는 인장으로 인하여 발생하는 미세한 균열발생 - 동토나 빙결Land의 융해 - 느슨한 토립자의 진동 	<ul style="list-style-type: none"> - 함수비의 증가에 따른 흙의 단위중량 증가 - 지진, 발파 등에 의한 진동 - 균열내에 작용하는 수압

사면의 붕괴형태는 자연적인 원인과 인위적인 행위에 의하여 발생되며 이러한 원인들이 복합적으로 작용되기 때문에 실제 발생하는 붕괴형태는 대단히 복잡하다. 사면의 붕괴형태는 붕괴면의 형태와 붕괴의 직접적인 원인이 되는 지질구조 및 응력상태 등을 기준으로 분류하게 된다.

2. 암반사면의 파괴형태

암반사면의 파괴형태에 대한 추정에는 사면의 해석이나 평가, 사면의 거동, 이동의 예측, 시공 후의 유지관리 및 파괴 징후시의 대책에 이르는 전체의 흐름 중에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 그러나 암반사면의 거동은 일반적으로 암석 고유의 특성과 불연속면을 포함한 구조체로서의 특성에 따르며, 암반사면의 파괴기구는 암석강도, 불연속면의 방향이나 빈도, 연속성 및 지하수상황 등의 많은 요인들에 의해 지배되기 때문에 파괴기구를 명확하게 해석하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 암반사면의 파괴형태에 대한 추정은 복잡한 상황을 단순화하여 문제해결을 도모하는 것이 일반적이다.

암반사면의 파괴형태는 사면과 불연속면들의 경사방향 및 경사각에 의하여 이루어지는 상관관계에 따라 결정할 수 있고, 이에 대해 Hoek and Bray(1979)에 의한 스테레오투영법 등을 사용함으로써 구체적인 파괴형태를 산출할 수 있으며, 다음의 표 2.8과 같이 활동파괴, 전도파괴, 좌굴파괴, 붕락변상 및 응력개방에 따른 변상 등의 형태로 분류할 수 있다.

암반사면의 파괴형태는 암반이나 지층의 생성과정 및 지각변동에 따른 변성 등에 따라 정해지는데 크게 지질조건에 의한 원인과 사면의 절취에 따라 생기는 암반의 변상, 지하수의 변동, 지표수의 침투 및 지진 등의 외적인 원인으로 구별된다. 지질조건으로는 고결도나 풍화 등의 원지반의 물성 및 응력, 절리, 편리, 단층 등의 지질구조상의 불연속성을 들 수 있으며, 외적인 요인으로 발파진동에 의한 암반의 변상, 응력개방에 의한 변상, 원지반의 노출 등에 의한 풍화, 지하수 또는 지표수의 침투 등이 암반사면의 안정성에 영향을 주는 주요 인자들이다.

암반사면의 파괴형태는 지질조건에 따라 여러 가지 형태로 발생하여 단순한 형태의 파괴는 적고, 몇 가지 형태의 파괴가 복합적으로 발생하는 경우가 많으며, 불연속면(절리, 층리, 편리, 단층)이 불규칙하게 많이 발달하여 있고, 뚜렷한 특징이 없으면 원호파괴가 발생하고, 불연속면이 한 방향으로 발달하여 있으면 평면파괴가 발생하며, 불연속면이 두 방향으로 발달하여 교차할 경우에는 썩기파괴가 발생한다. 그리고 절취면의 경사방향과 불연속면의 경사방향이 반대이고 불연속면이 급경사로 발달하여 기둥형태로 암반이 갈라진 경우에는 전도파괴가 발생한다.

이와 같은 암반사면의 파괴형태를 정확하게 추정하기 위해서는 암반분류 외에 불연속면의 조사를 필요로 한다. 불연속면의 조사는 지질 및 암반조사 자료를 이용하여 불연속면의 분포형태 즉, 방향, 간격, 길이, 연속성, 폭, 개소 및 거칠기 등의 정보를 스테레오투영법이나 개별요소법 혹은 블록이론 등에 의한 정성적 또는 정량적 기법으로 분석하여 얻을 수 있다.

그러나 이와 같은 불연속면의 분석방법이 현재로서는 확실하게 정립되어 있지 않고, 표시구분도 통일되어 있지 않은 실정이므로 암반사면 파괴형태의 정확한 추정을 위해서는 보다 다각적이고 면밀한 불연속면의 자료 분석과 함께 당초의 조사결과에 너무 집착하지 않는 재검토가 요구되어 진다. 그림 2.2는 암반사면의 여러 가지 파괴형태를 나타낸 것이다.

표 2.8 암반사면의 파괴형태(Markland, 1972)

파괴 형태		파괴 조건
활동 파괴	평면활동파괴	불연속면의 경사방향이 사면의 경사방향과 거의 일치하고 사면의 경사가 불연속면의 경사보다 급한 경우
	썩기활동파괴	두 불연속면의 교선의 경사방향이 사면의 경사방향과 거의 일치하고, 사면의 경사가 교선의 경사보다 급한 경우
	원호활동파괴	명백한 탁월방향이 없는 불연속면들이 무수히 산재하는 경우
전도파괴		불연속면의 경사방향이 사면의 경사방향과 거의 반대인 경우
좌굴파괴		산사태나 지진 및 중력활동에 의한 경우
붕락변상		낙석이나 활락에 의한 경우
응력개방에 따른 변상		사면의 절취과정에서 상재하중을 따라 발생하는 형태의 경우

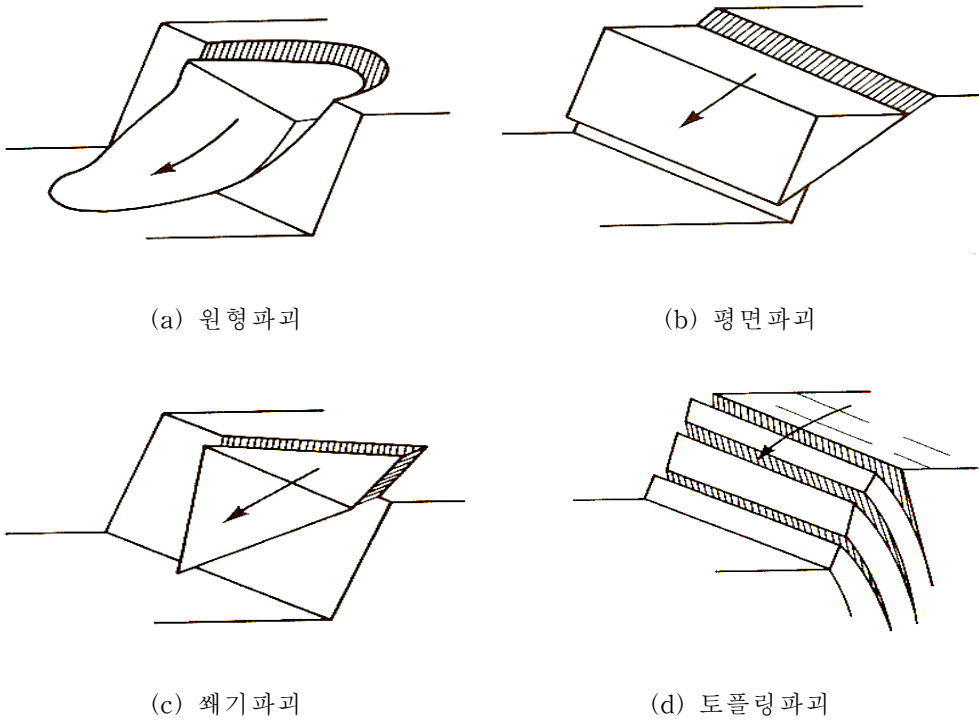


그림 2.2 암반사면의 파괴형태

2.2 토사사면의 안정 해석방법

2.2.1 정량적 해석방법

1. 한계평형해석법

일반적으로 토사사면에 사용되는 안정해석 방법으로 임계활동면에서 역학적인 평형 관계만을 해석하는 한계평형해석법이 있는데, 이는 근본 원리상 사면안정 해석뿐만 아니라 토압, 지지력 등과 같은 지반공학적 문제를 설명하고 해결하는데 기초를 이루는 방법으로 대상 지반을 하나의 토체로 간주하여 임의의 파괴면에 대한 힘 또는 모멘트의 평형조건을 고려하는 것이다.

한계평형해석법은 굴착에 따른 비탈면 내 응력변화 및 그에 수반되는 변형 거동 상태 해석이 가능한 일반적 수치해석 방법과는 달리 변형과 관련된 지반문제 해석에 있어서는 적용될 수 없다는 단점이 있으나, 이해가 쉽고 사용이 간편하다는 점과 과거 많은 사면안정 해석에 대한 적용사례로 그 신뢰성이 입증된 방법으로 사면안정 해석방법으로 가장 많이 사용되고 있다.

한계평형이론에 의한 사면안정 해석방법은 여러 가지 관점에 의해 분류될 수 있으나 크게 활동토체를 단일토체로 보는 방법과 활동토체를 여러 개의 수직절편으로 분할하는 절편법으로 구분할 수 있는데, 이중 절편법에 의한 사면안정 해석법이 널리 이용되고 있다. 절편법에 의한 사면안정 해석방법은 많은 연구자들에 의해 여러 가지 방법들이 제안되었으나, 안전율 산정을 위한 평형조건, 해석 활동면의 형상, 절편의 작용력 및 작용위치 가정 등에서 다소 차이가 있을 뿐 그 근본적 방법에는 차이는 없는 것으로 알려지고 있다.

일반적으로 토사사면의 안정성 해석에 널리 사용되고 있는 한계평형해석방법은 활동면을 따라 지반에 작용하는 전단응력과 전단저항력의 크기를 비교하여 사면의 안정성을 해석하는 방법으로 한계평형이론에 의한 사면안정 해석방법은 여러 가지가 있으나, 그 정확성은 강도정수와 사면의 기하학적인 조건의 정확도 및 각 해석 방법 고유의 정밀도에 따라 좌우되며, 여기서 기하학적인 조건은 파괴면의 형상을 결정하는 것으로서 파괴면이 평면, 원호, 임의의 불규칙한 면인가 또는 이들의 복합적인 형태인가를 결정하는 문제로서 토사사면의 파괴면은 일반적으로 곡면이지만 수평방향의 지층, 불연속면의 존재 시에는 평면파괴가 자주 일어나고 있다.

표 2.9 한계평형법을 이용한 토사사면 안정해석 방법의 종류

해석 방법	활동면 형상	평형 만족 조건				계산		비고	
		Overall of moment	Individual Slice moment	Vertical force	Horizontal force	수계산	컴퓨터 계산		
단일 활동토체 해석 방법	Infinite Slope (Skempton & Delory, 1957)	평면	-	-	0	0	0	0	· 지표면과 평행한 무한비탈면이 지표면과 평행한 평면적 파괴에 상시 적용
	Wedge Analysis	평면	-	-	0	0	0	0	· 비원호의 2개, 3개의 평면에 의한 파괴 예상시 적용
	Friction Circle method	원호	-	-	0	0	0	0	· 단일한 점성토 또는 사질토 지반의 비탈면 안정 해석에 유용 · 활동면상 반력 작용선은 활동원 중심으로 하는 마찰원에 접한다는 사항을 토대로 작용력과 저항력간의 평형조건으로부터 안전을 산정
수직 절편으로 분할하는 절편법	Fellenius method (Ordinary Slice Method) (Fellenius, 1927)	원호	0	-	-	-	0	0	· 절편법중 가장 간단한 방법임 · 완만비탈면에 대해 간극수압을 감안한 유효응력해석시 안전을 과소평가 · 깊은 원호 활동면이고 원호중심각(α)의 변화가 클 경우 해석결과 오차 증대
	Bishop's simplified method (Bishop, 1955)	원호	0	-	0	-	0	0	· 절편법중 가장 널리 이용되며 편리성과 신뢰성이 매우 양호함 · 선단부의 절편 저면 경사각 α 가 클 경우 안전율이 과대평가 · 본방법에 의한 안전율 Fellenius 방법에 의한 결과보다 다소 큼
	Janbu's simplified method (Janbu, 1968)	임의의 형상	-	-	0	0	0	0	· 절편양측면에 작용하는 수직전단 응력을 없는 것으로 가정하여 부정정 차수 감소 · 엄밀해석법을 계산의 간편성을 위해 힘의 평형조건만을 감안하여 간편화 시킨 방법으로 이로 인한 부정확성을 보정계수(f_0)를 감안해줌으로서 보완
	Spencer's method (Spencer, 1967)	임의의 형상	0	0	0	0	-	0	· 각 절편 경계면상의 작용하는 전단력을 별도로 감안치 않은 대신 합력으로서 양측에서 서로 평행한 수평력으로 감안 (작용각 θ 는 일정) · 해석적으로 정해에 가까운 안전율을 산정하므로 신뢰성 높음
G.L.E method (Fredlund & Krahn, 1977)	임의의 형상	0	0	0	0	-	0	· Bishop, Janbu, Spencer 방법 등을 포괄할 수 있는 해석방법 · 비원호 활동해석시 가상회전중심 (Frictional center of Rotation)을 사용하며 모멘트 평형, 힘의 평형을 개별로 고려하여 각각에 대한 안전을 산정이 가능	

일반적으로 사용되고 있는 한계평형법으로는 Fellenius법, Bishop법, Janbu법, Spencer법, Morgenstern-Price법 등이 있으며 본장에서는 주로 안정성 평가에 많이 사용되는 Fellenius법, Bishop법, Janbu법에 대해서 간략하게 정리하였다.

(1) Fellenius법

파괴가 점 O에 중심을 가진 원통형 절편의 회전에 의하여 발생하며 점 O에 대한 총모멘트 평형으로부터 안전율을 구한다. 그림 2.3과 같이 이 때 각 절편 사이의 힘의 합력은 절편의 바닥에 평행하다고 가정한다.

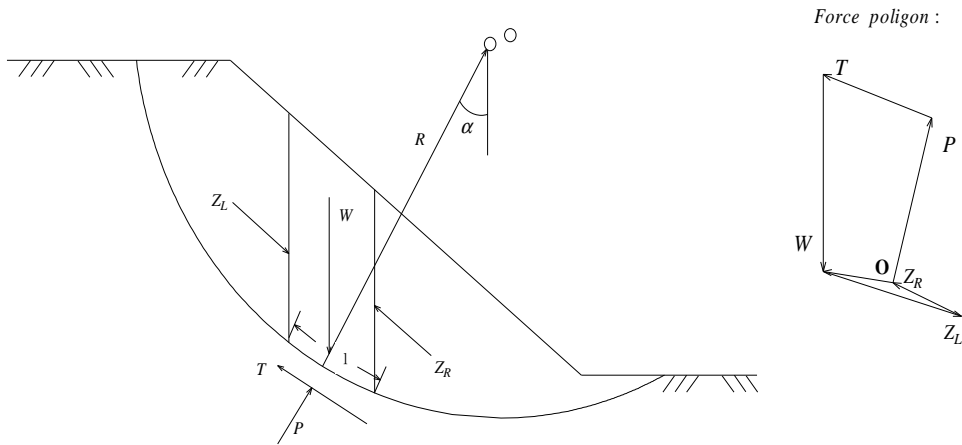


그림 2.3 Fellenius법에 의한 사면안정 해석

절편의 바닥에서 파괴식 $s = c + (\sigma - u)\tan\phi$ 이고, 활동 전단강도는 $\tau = s / F_s$ 로 표현할 수 있다(수직응력 σ , 전단응력 τ , 공극압 u).

여기서, $P = \sigma l$, $T = \tau l$ 이므로 $T = \frac{1}{F} (cl + (P - ul)\tan\phi)$ 이다.

절편사이의 힘의 합력이 절편의 바닥에 평행하다고 가정하면 $P = W\cos\alpha$ 이고 점 O에 대한 전체 모멘트의 평형으로부터 $\sum WR\sin\alpha = \sum TR$ 이 된다.

따라서 $\sum W\sin\alpha = \sum \frac{1}{F} (cl + (P - ul)\tan\phi)$ 이므로 안전율 F_s 는 식(2.6)과 같다.

$$F_s = \frac{\Sigma(cl + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi)}{\Sigma W \sin \alpha} \quad (2.6)$$

여기서, W : 절편 흙의 전체중량 (t/m^3), α : 경사각 ($^\circ$), c : 흙의 점착력 (t/m^2)
 l : 절편바닥 길이 (m), ϕ : 흙의 내부마찰각 ($^\circ$)

상기 식은 우측면에 안전율 F_s 를 포함하고 있지 않기 때문에 수작업으로 계산을 수월하게 할 수 있지만 절편 사이의 힘에 대한 가정에 오류가 있어 결과치가 최대 60%까지 오차가 있을 수 있다(Whitman and Bailey, 1967).

(2) Bishop 간편법

그림 2.4와 같이 파괴가 점 O 에 중심을 가진 원통형 절편의 회전에 의하여 발생하며 점 O 에 대한 총모멘트평형으로부터 안전율을 구한다. 이 때 각 절편 사이의 힘들은 수평 하다고 가정한다.

절편의 바닥에서 파괴식 $s = c + (\sigma - u) \tan \phi$ 이고, 활동 전단강도는 $\tau = s/F_s$ 로 표현할 수 있다.

여기서, $P = \sigma l$, $T = \tau l$ 이므로 $T = \frac{1}{F} [cl + (P - ul) \tan \phi]$ 이다.

수직방향의 힘에 대하여 $P \cos \alpha + T \tan \alpha = W - (X_R - X_L)$ 의 관계가 있는데 절편력 사이의 힘이 수평방향이라는 가정으로부터 $X_R = X_L = 0$ 이므로 절편 바닥에 수직하는 힘 P 는 식(2.7)과 같다.

$$P = [W - \frac{1}{F} (cl \sin \alpha - ul \tan \phi \sin \alpha)] / m_a \quad (2.7)$$

여기서, $m_a = \cos \alpha + \frac{\tan \phi \times \sin \alpha}{F_s}$ 이며 이를 그림으로 표현하면 그림 2.5와 같다.

점 O 에 대한 전체 모멘트의 평형으로부터 $\Sigma WR \sin \alpha = \Sigma TR$ 이 된다. 상기 식들을 정리하여 안전율 F_s 로 표현하면 다음과 같다.

$$F_s = \frac{\Sigma[(c b + (W - u b) \tan \phi] / m_a}{\Sigma W \sin \alpha} \quad (2.8)$$

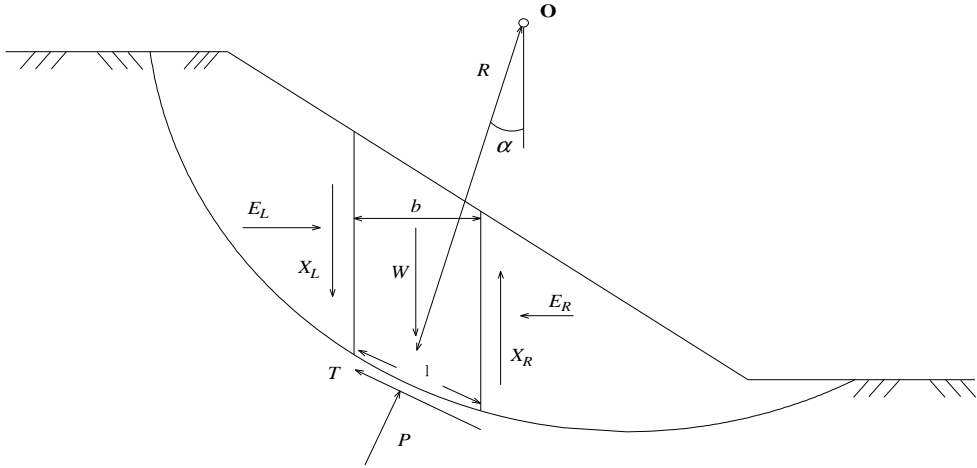


그림 2.4 Bishop법에 의한 사면안정 해석

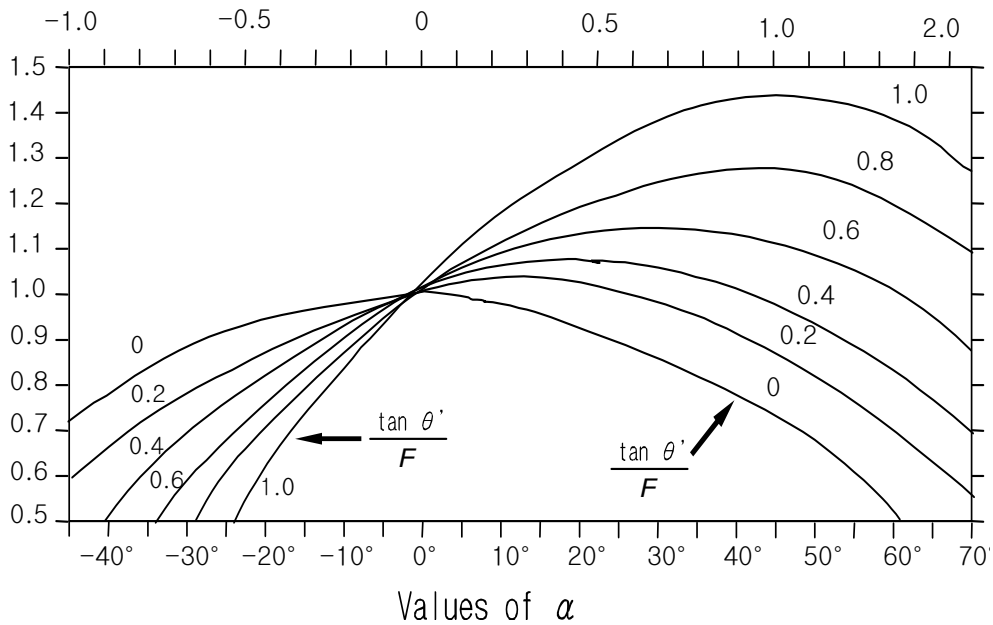


그림 2.5 절편 바닥의 경사와 m_a 와의 관계

(3) Janbu 간편법

그림 2.6과 같이 파괴가 비원호 파괴면에 대한 원통형 절편의 회전에 의하여 발생하며 총 힘의 평형으로부터 안전율을 구한다. 이때 각 절편 사이의 전단력이 0이라고 가정하기 때문에 각 절편의 바닥에 작용하는 총 수평력은 Bishop법과 동일하나 보정계수를 도입한다.

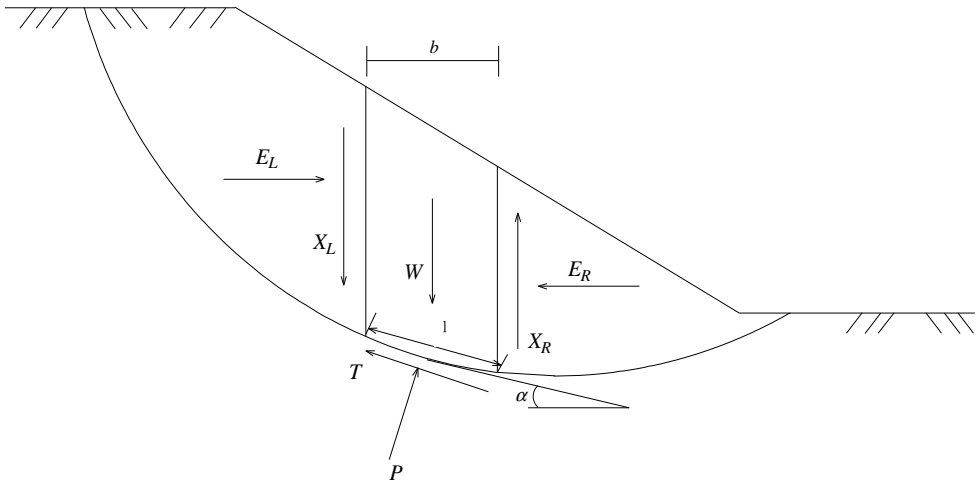


그림 2.6 Janbu법에 의한 사면안정 해석

절편의 바닥에서 파괴식 $s = c + (\sigma - u) \tan \phi$ 이고 활동 전단강도는 $\tau = s/F_S$ 로 표현할 수 있다.

여기서, $P = \sigma l$, $T = \tau l$ 이므로 $T = \frac{1}{F} (c l + (P - u l) \tan \phi)$ 이다.

수직방향의 힘에 대하여 $P \cos \alpha + T \sin \alpha = W - (X_R - X_L)$ 의 관계가 있는데 절편력 사이의 힘이 수평방향이라는 가정으로부터 $X_R = X_L = 0$ 이므로 절편 바닥에 수직하는 힘 P 는 식(2.8)과 같다.

$$P = [W - \frac{1}{F} (c l \sin \alpha - u l \tan \phi \sin \alpha)] / m_a \quad (2.9)$$

여기서, $m_a = \cos \alpha + \frac{\tan \phi \times \sin \alpha}{F_s}$ 이다.

절편바닥에 대하여 평행한 힘들은 $T + (E_R - E_L) \cos \alpha = (W - (X_R - X_L) \sin \alpha)$ 이다.

$X_R = X_L = 0$ 이므로 T 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$E_R - E_L = W \tan \alpha - \frac{1}{F} (cl + (P - ul) \tan \phi) \sec \alpha$$

전체힘의 평형상태에서 지표면에 하중이 작용하지 않는 경우에 $\sum (E_R - E_L) = 0$ 이므로

$$\sum (E_R - E_L) = \sum W \tan \alpha - \frac{1}{F} (cl + (P - ul) \tan \phi) \sec \alpha = 0 \text{ 이다.}$$

따라서 전체 힘의 평형력에 의한 안전율은 $F_o = \frac{\sum (cl + (P - ul) \tan \phi) \sec \alpha}{\sum W \tan \alpha}$ 이다.

절편사이의 전단력을 고려하기 위하여 Janbu는 보정계수 f_o 를 도입하여 안전율을 $F_s = f_o F_o$ 로 하였다.

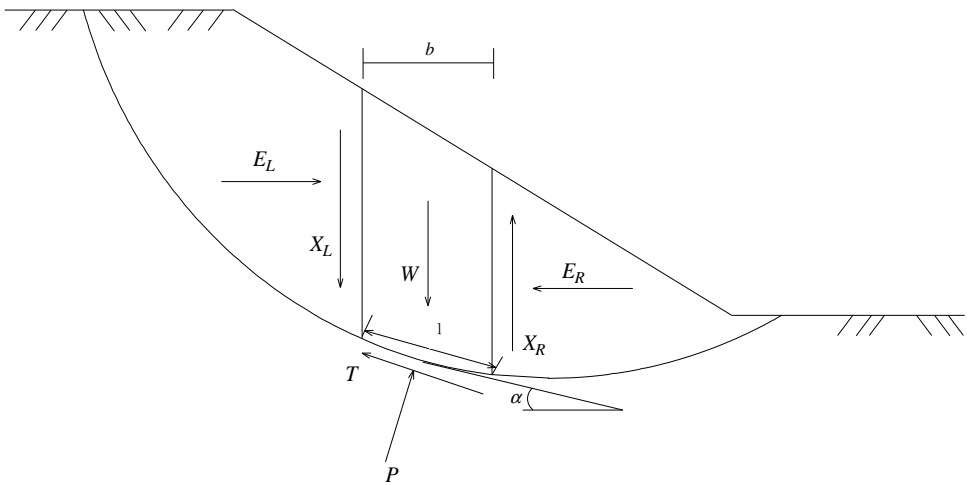


그림 2.7 Janbu법에서 사용되는 보정계수 f_o

절편법에 의하여 사면안정을 분석하는 방법들은 절편 측면에 작용하는 힘의 분력에 대한 가정을 달리하여 활동면의 수직응력과 전단응력을 다르게 산정함으로써 안전율이 다르게 산정되게 된다. 각 해석방법들의 평형식 조건 유무는 표 2.10과 같다. 그러나 각 해석방법으로 구한 안전율의 수치적 차이에 대한 연구결과에 따르면 그 차이는 그리 크지 않다고 보고되고 있다. 사면안정성 해석에서 큰 영향을 미치는 것은 해석방법보다는 강도정수의 정확한 산정 및 기하학적인 조건이다. 따라서 사면의 안전성 해석 시 지질학적인면을 고려하여 예상되는 활동면의 상태에 따라 활동 파괴시의 안전율을 비교하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 한계평형이론을 이용한 사면해석 프로그램은 표 2.10과 같다.

표 2.10 해석방법들의 한계평형조건

해석 방법	가 정	한 계 평 형 조 건		
		모멘트	수직력	수평력
Fellenius법	절편의 합력은 각 절편의 바닥에 평행	○	×	×
Bishop 간편법	절편의 합력은 수평방향	○	×	×
Janbu 간편법	절편축력은 수평방향	○	○	○
Spencer법	X/E 는 모든 사면에 대해 일정	○	○	○
Morgenstern-Price법	$X/E = \lambda \mathcal{A}(x)$	○	○	○

2. 프로그램 해석법

현행 원호활동에 대한 안정계산은 “CHAMP” 또는 “STABL” 등의 컴퓨터 프로그램을 이용하며, 이와 같은 프로그램 해석방법은 가상 원호활동면의 중심점으로 예상되는 부분에 Grid를 작성하여, Grid의 각 절점을 중심점으로 한 무수한 가상 원호활동면에 대하여 최소사면안전율이 구하여지는 곳을 찾는 방법이다.

원호활동에 대한 안정계산은 한계평형원리에 입각한 Fellenius방법이나 Bishop방

법 등의 사면안정 해석법을 적용하여 해석한다. 원호활동과괴에 대한 안전율은 다음의 식(2.9)와 같이 나타낼 수 있으며 활동토괴가 미끄러져 내려가려는 힘 F_d 혹은 M_d 와 이에 저항하려는 힘 F_r 혹은 모멘트 M_r 의 비로 안정성을 검토할 수 있다. 여기서, 저항력 F_r 혹은 모멘트 M_r 은 토괴가 활동시 발생하는 마찰력 및 점착력에 의한 전단저항력 F_{rs} 혹은 저항모멘트 M_{rs} 와 말뚝에 의한 저항력 F_{rp} 혹은 모멘트 M_{rp} 으로 활동모멘트 M_d 로 나누면 다음 식과 같다.

$$F_s = \frac{M_r}{M_d} = \frac{M_{rs} + M_{rp}}{M_d} = \frac{\sum(W \cos \alpha - ul) \tan \phi + \sum cd}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.10)$$

여기서, M_r 는 저항모멘트($M_{rs} + M_{rp}$), M_d 는 활동모멘트, W 는 토괴의 중량, u 는 간극수압, c 는 점착력, l 는 사면길이, $\tan \phi$ 는 내부마찰각, α 는 사면경사각이다.

표 2.11 사면해석 프로그램 개요

프로그램	개발자	해석방법	활동면 형태	활동면 추정 유무	외부중 적용 유무	간극수압	
						정수압	간극수압 계수
STABR	Guy Lefebvre (1971)	Fellenius Bishop	원호	○	×	○	×
STABGM	J.M. Duncan B.K. Low (1984)	Fellenius Bishop	원호	○	○	○	×
PCSTABL5	J.R Carpenter (1986)	Bishop Janbu Spencer	원호 비원호 Block	○	○	○	○
SLOPE8R	S.G. Wright J.M. Duncan (1968)	Spencer	비원호	×	×	○	×
PC-SLOPE	Fredlund Krahn (Geo-Slope)	Fellenius Janbu Bishop Morgenster n-Price Spencer	원호 비원호 Block	○	○	○	○

3. 수치해석법

일반적으로 토사사면에 사용되는 수치해석법으로는 유한요소법, 유한차분법, 개별요소법 등이 있다.

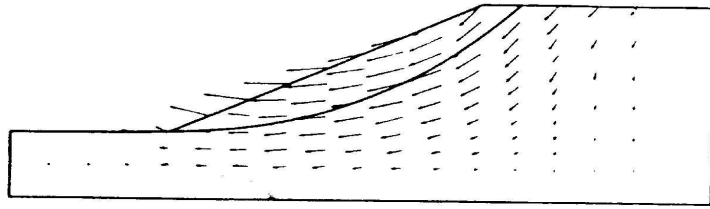
수치해석법은 지반의 변형특성을 고려한 탄성 또는 탄소성 해석방법으로 지반정수 산정 시 많은 현장시험 및 실내시험이 필요하며 해석상의 소요시간이 길고 그 결과에 대한 신뢰도가 떨어지는 단점이 있는 것으로 알려져 있다.

유한요소 해석은 사면 변형에 대한 예측에 가장 적합한 방법이라 할 수 있으며, 이 해석방법은 지반 내에서 발생하는 응력분포 및 변형의 크기와 방향을 계산할 수 있으므로 이를 통하여 그림 2.8에서 보는 바와 같이 변형의 크기와 형태를 예측할 수 있는 방법이다.

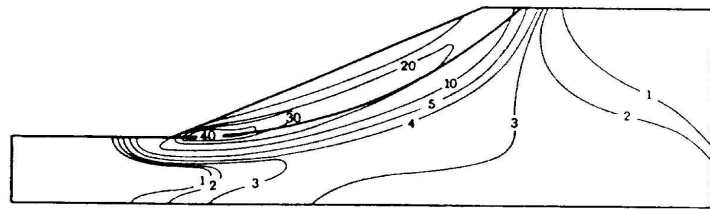
유한요소 해석은 1950년대에 구조 해석에 처음 도입되었고, 그 이후 토질공학에서는 1960년대부터 사용하여 거의 모든 토목구조물 뿐만 아니라 터널의 거동 해석에 이르기까지 광범위하게 이용되었다. 지금까지의 사면 안정에 이용된 유한요소해석은 성토사면 중 주로 댐의 안정문제의 검토에 많이 적용되었다. 최근에는 성토사면에 대한 검토 뿐 아니라, 도심지의 굴착과 관련된 굴착사면에 대한 변형 해석에도 적용되고 있다. 또 유한요소해석은 굴착사면의 변형을 공사 단계별로 예측할 수 있어 흙막이공의 설계에 많이 이용되며, 지금까지 검토된 사면해석을 보면 시공 단계별 안정에 대한 검토, 공사 직후 최종 단면의 안정에 대한 검토, 장기간의 안정에 대한 검토, 지진과 같은 동하중에 대한 검토 등이다.

사면안정의 평가에 있어서 유한요소 해석방법의 적용은 그리 간단한 문제는 아니지만 응력과 변형의 해석을 위하여 유한요소법의 이론은 미소 변형률의 개념을 근거로 한 탄성이론에 기초를 두고 있어 초기에는 지반을 탄성체로 가정한 탄성해석이 주도하였다. 이후, 지반은 탄성체가 아니므로 경우에 따라 큰 변형을 유발하고 있어 이러한 지반에 유한요소해석을 적용하기 위하여 기존의 해석에 다음 두 가지 문제를 고려하려는 노력을 해오고 있는데, 그 중 첫째는 큰 변형을 수용할 수 있는 유한요소 이론식의 정립이며, 둘째로 비선형 거동을 하는 지반에 대하여 정교한 응력-변형률의 거동식을 구성하는 것으로 아직까지 위의 두 가지 문제가 완벽하게 해결되지 못한 상태이다.

유한요소법은 본래 물리적 또는 공학적인 문제에서 성립된 미분방정식을 수치해석적으로 풀기 위한 방법으로 이용되고 있다. 이러한 미분방정식을 풀기 위해서



(a) 변위에 대한 벡터



(b) 소성 전단 변형률의 분포도

그림 2.8 사면에 대한 유한요소해석 결과에 따른 변위량

“Weighted Residual Methods” 라고 알려진 고전적인 방법으로 유한요소 해석을 위한 식이 정립되었다.

유한요소 해석은 변형에 대한 예측 이외에도 절토사면과 관련하여 제방의 인장 균열에 대한 예측, 과잉 간극수압으로 인한 제방의 균열에 대한 예측, 국부 파괴가 발생하는 지역 및 전반적인 사면안정에 대한 예측 등을 할 수 있으며 유한요소 해석에 의하여 얻어진 변위의 크기와 방향을 통하여 사면의 안정성의 여부를 직접적으로 판단할 수 있다.

위와 같이 유한요소 해석을 통한 사면안정 해석은 한계평형이론을 근거로 한 기존의 일반적인 절편법과 거의 비슷한 결과를 나타내고 있다. 그리고 유한요소 해석의 장점으로서는 시공단계별 사면의 변형에 대한 예측, 국부적인 파괴를 일으키는 지역의 예측, 변형 벡터를 통한 파괴형태의 예측 등을 들 수 있다.

유한요소 해석에서 가장 큰 과제는 토질의 거동을 정확히 나타낼 수 있는 거동 모델에 대한 연구이다. 즉, 토질의 거동모델에 따라 해석 결과는 차이를 보이고 있으며. 최근에 이러한 문제를 해결하기 위해 대단히 많은 거동모델들이 연구되어 유한요소 해석에 적용되고 있지만, 아직까지도 Hyperbolic모델, Mohr-Coulomb모델,

또는 Drucker-Prager모델 등이 많이 사용되고 있다. 이는 모델에 따른 토질정수를 결정하기가 쉽고 만족할 만한 해석 결과를 얻을 수 있기 때문이다.

2.2.2 정성적 해석방법

본 연구에 사용된 경험적인 방법에 의한 토사사면의 안정성 평가방법은 현실적으로 우리나라에 맞는 자료 및 연구가 미흡하여 외국에서 사용되고 있는 방법들을 정리하여 사용하였다. 본 연구에 주로 사용된 경험적인 방법은 가장 다양성이 있고 신뢰도가 높은 호주사면 안전도 평가표를 기준으로 하였으며, 참고로 사용된 방법들은 표 2.12~표 2.15와 같다.

표 2.12 호주사면 안전도 평가표(한국건설기술교육원,1988)

1. 사면경사각	a) 0 ~ 5° b) 6 ~ 15° c) 16 ~ 26° d) 27 ~ 42° e) > 42°	0 1 2 3 4
2. 식생상태	a) 촘촘히 있는 초목 b) 드문드문 있는 초목 c) 물 d) 초목 없음	0 1 2 3
3. 비탈을 도로로 절토		4
4. 비탈이 목초지		1 ~ 2
5. 지하수위와 근접 또는 용수		0 ~ 4
6. 강의 유수에 의한 침식		1
7. 절 리		1
8. 활동방향으로 지층경사		1 ~ 2
9. 과거의 활동 흔적		2
안정등급 평가기준	<ul style="list-style-type: none"> · 안정 < 5 · 불안잠재 6 ~ 9 · 불안 10 ~ 13 · 대단히 불안 14 ~ 15 	

표 2.13 홍콩사면 안전도 평가표(한국건설기술교육원,1988)

요 소	점 수	최대 점수	요 소	점 수	최대 점수									
a)사면높이 H(m)	흙사면, H x 1, 암사면, H x 0.5, 혼합사면, H x 1	무제한	j)사면상부에 물이 고일 수 있는 조건	사면상부에 물이 고일 수 있는 여건이 형성된 경우 = 5	5									
b)사면경사각	암사면 이외 사면 90° = 10 ≥60° = 20 ≥80° = 8 ≥55° = 15 ≥70° = 5 ≥50° = 10 ≥60° = 2 ≥45° = 5 ≥60° = 0 ≥35° = 3 ≤35° = 0	20	k)사면에 배수로가 있는 경우	전혀 없거나 완전하지 못함 = 10 완전하나 큰 균열이 있는 경우 = 5 완전한 경우 = 3	10									
c)사면상부의 경사 또는 사면위도로 유무	상부경사각, 도로유무 ≥ 45° = 15 ≥ 35° 또는 주요도로 = 10 ≥ 20° 또는 일반도로 = 5 ≥ 20° = 0	15	l)물을 이동시킬 수 있는 시설	높이 'H' 내에 있으면 = 5 없으면 = 0	5									
d)옹벽이 있는 경우	옹벽의 높이(m) x 2	무제한	m)용수 상태	<table border="1"> <thead> <tr> <th>위치</th> <th>극심</th> <th>보통</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>사면중간내 지상부</td> <td>15</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>사면하부</td> <td>10</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	위치	극심	보통	사면중간내 지상부	15	3	사면하부	10	2	15
위치	극심	보통												
사면중간내 지상부	15	3												
사면하부	10	2												
e)사면상태	느슨한 암편이 있는 경우 = 10 파괴의 징후가 있는 경우 = 8 사면상태가 불량 = 5	10	n)사면저부로 부터 구조물, 도로, 운동장과의 거리 (m)	구조물 = 실제거리 도로 = 거리 + 2 운동장 = 실제거리 또는 1/2 H	무제한									
f)사면과 옹벽의 결합상태	불량 = 10 보통 = 5 양호 = 0	10	o)사면의 상하부 상태	사면의 상단부에 = 0.5 확장사면이 있는 경우 사면의 상하단부에= 20 확장사면이 있는 경우	20									
g)사면방향과 일치하는 절리	사면방향과 일치하는 절리가 있는 경우	5												
h)지 질	붕적층이 부서진 암편들과 이루어진 얇은 토층 = 15 두꺼운 화산암토층=10 두꺼운 화강암토층=5 신선한 암(암반)=0	15	p)예상되는 피해구조물	병원, 학교, 주거지역= 2 공장, 운동장 = 1.5 주요도로 = 1.0 일반도로 = 0.5 확 트인 경우 = 0	2									
i) 불투수성 사면에 대한 지표수의 배수로	전혀 없음 = 15 50% (부분적)= 8 나쁨 = 5 양호 = 0	15	q)위험피해요소	인구밀집지역이나 산사태에 의해 구조물의 붕괴가 예상 = 1.25 그 외 = 1.0	1.25									

불안정점수 = $\sum\{a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k,l,m\}$

예상피해점수 = $q [20p(1.5(a+d)-n/1.5(a+d))+(40p)\{(a+d)-n/(a+d)-n/(a+d)\}+2(a+d)]$

표 2.14 일본국철의 절개사면 안전도 평가표(한국건설기술교육원,1988)

요 인		점 수	범 위	요 인		점 수	범 위	
토 질	경 압	-0.00109	0.020	위험판단	상	0.00177	0.002	
	연 압	-0.00126			중	0.00173		
	자갈	-0.00346			하	0		
	자갈+모래	-0.02005		0.009	용출수 상황	건 조	0.00325	0.003
	모 래	-0.00901				습 윤	0.00031	
	실 트	-0.00637				용출수	0	
	점 토	0						
사면의 노화	양 호	0.00909	0.009	사면 표면상태	양 호	0.00357	0.007	
	중 간	0.00501			보 통	0.00676		
	현 저	0			불 량	0		
경 사 높 이 (m)	~ 5	-0.00294	0.009	사면 보호공	옹 벽	-0.00207	0.002	
	~ 10	0.00331			장 공	-0.00095		
	~ 15	0.00205			쑏크리트	0		
	~ 20	0.00597			없 음	-0.00085		
	이상	0		연속 강우량 (mm)	~ 100	0.00037	0.004	
경 사 구 배 (할)	~ 0.3	0.00320	~ 200		0.00383			
	~ 0.5	0.00036	~ 300		0.00051			
	~ 1.0	0.00015	~ 400		0.00123			
	이상	0	400 이상		0			
최 대 강우량 (mm)	~ 20	0.02499	0.025	사면 주변상황	자 연	0.00031	0.005	
	~ 40	0.01594			임 지	0.00467		
	~ 60	0.01380			화 진	0.00094		
	~ 80	0.01406			논	0.00429		
	이상	0			기타	0		

인자별 점수합계가 -0.0082 보다 작으면 사면붕괴 위험 내재

2.3 암반사면의 안정 해석방법

2.3.1 정량적 해석방법

1. 평사투영해석법

경사는 그림 2.9의 수평면과 구조적 불연속면과의 최대경사각 ψ 로 정의된다. 경사방향 또는 경사방위는 α 로 표시한 경사선의 수평궤적의 방향으로서 북으로부터 시계방향으로 측정된다.

주향은 수평기준면과 경사면의 교선의 궤적으로 경사와 경사방향에 직각을 이룬다. 면의 주향은 암반의 수평면에서 관측할 수 있는 불연속면의 궤적이기 때문에 매우 중요하다. 암반사면 해석에서 어떤 면을 정의하기 위해 주향과 경사를 사용할 때는 그 면의 경사방향을 표기하는 것이 필수적이다.

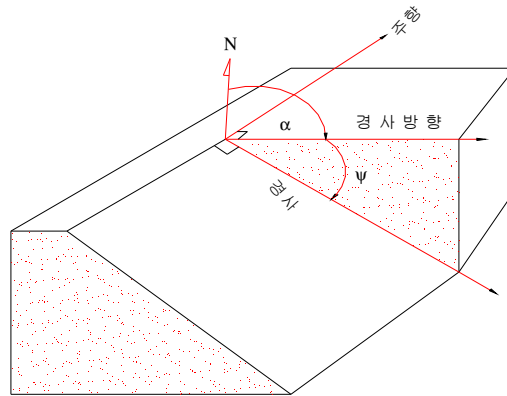


그림 2.9 기하학적 용어의 정의

(1) 평사투영 해석의 개요

평사투영법은 사면의 경사방향과 경사, 절리면의 경사방향과 경사 및 전단 저항각을 입력 자료로 암반사면의 안정성을 검토할 수 있는 방법이다. 따라서 평사투영법은 한계평형해석인 수치해석 등에 앞서 개략적이고 신속한 1차 해석의 용도로 암반사면의 경사결정, 암반사면의 파괴현상의 예측 및 원인규명, 파괴가 발생한 암

반사면의 개략적인 기울기 조정, 정밀분석이 어려운 소규모 안정성 분석에 편리하게 이용할 수 있다. 평사투영해석에 의해 작성된 Stereo net에는 Equal Area Net과 Equal Angle Net가 있다.

Equal Angle Net은 같은 면적의 단위로 나누어져 있고 구조자료를 통계처리하기에 편리하기 때문에 구조 지질학자들이 많이 이용하는 방법이며, Equal Angle Net은 공학적 문제의 해결을 위해 필요한 기하학적인 구조가 Equal Area Net보다 간단하기 때문에 공학자들이 많이 이용하는 방법이다.

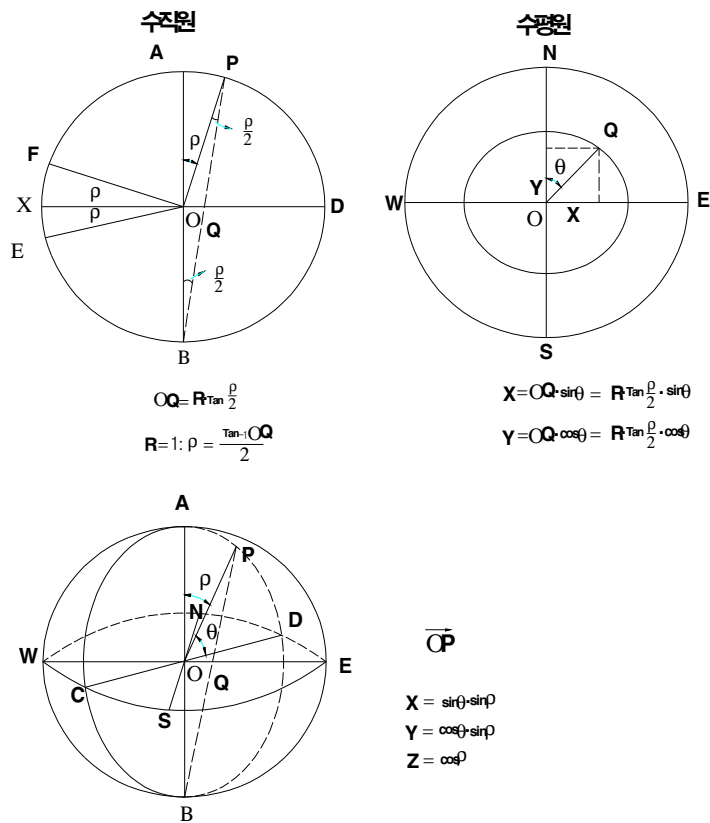


그림 2.10 점 P의 수직원상에서의 위치와 수평 원주상에서의 위치

한 개의 불연속면은 반구상에 한 점 P로 표시하며 그 점의 위치벡터(OP)는 그림 2.10과 같이 구면좌표, 수직, 수평 원상에 나타낼 수 있다. 불연속 평면을 대표하는

점 P의 위치벡터 \vec{OP} 는 식(2.11)과 같다. 또한 이 위치벡터를 평사투영망에 점으로 표시하면 식(2.12a), 식(2.12b)와 같다.

$$\vec{OP} = i \cdot R \cdot \sin\theta \cdot \sin\rho + j \cdot R \cdot \cos\theta \cdot \sin\rho + k \cdot R \cdot \cos\rho \quad (2.11)$$

$$X = R \cdot \tan\frac{\rho}{2} \cdot \sin\theta \quad (2.12a)$$

$$Y = R \cdot \tan\frac{\rho}{2} \cdot \cos\theta \quad (2.12b)$$

여기서, R : 구의 반경

또한, 임의의 두 위치 벡터 \vec{V}_1, \vec{V}_2 의 사이 각 δ 는 식(2.13)으로 부터 구해진다.

$$\delta = \cos \frac{\vec{V}_1 \cdot \vec{V}_2}{|\vec{V}_1| \cdot |\vec{V}_2|} \quad (2.13)$$

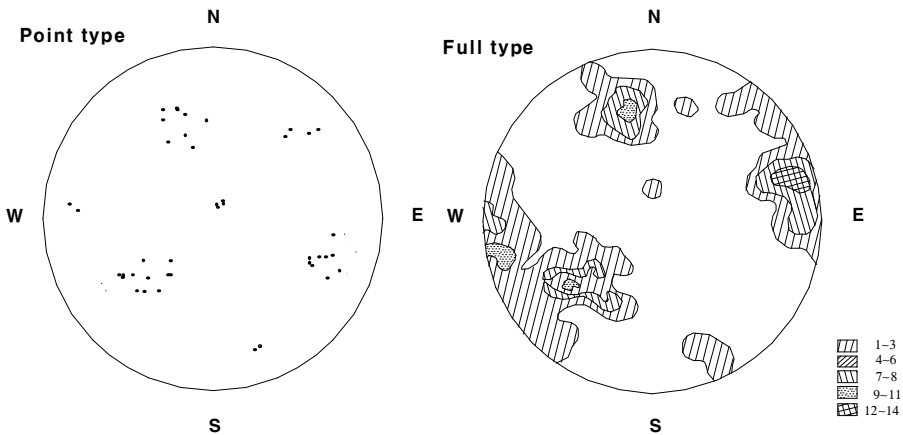


그림 2.11 불연속면의 조사에 의해 작성된 평사투영법의 Contour Diagram

평사투영망에 표시된 많은 자료를 처리하여 우세한 불연속의 방향을 알기 위해서는 Point type과 Full type계산법이 사용된다. Point type은 불연속면을 나타내는 한 점에 대하여 사이각 δ 가 반구상의 면적의 1%에 해당하는 9° 이내에 포함되는 점들

의 개수를 합하여 전체 평면 위치의 좌표에 표시하는 방법이다.

Full type은 좌표상의 각 지점의 벡터에 대하여 사이각 9°이내에 포함되는 점들의 개수를 합하여 전체 평면 수에 대한 백분율을 구하여 그 값에 해당되는 표시문자를 좌표 상에 표시하여 그림 2.11에서와 같이 Contour Diagram을 작성하는 것이다.

(2) 자료표시의 도해적 방법

그림 2.12의 Equal Area Net 투영법을 적용할 때에는 기준 구면상에서의 평면의 궤적이 그 면의 경사와 경사방향을 정의하도록 사용한다. 공간상에서 이동은 자유로우나 회전은 제한된 기준구를 생각해 보면, 표면상의 한 점과 구의 중심을 연결하는 반경선은 공간 내에 고정된 방향을 가지게 된다. 만약 구의 중심이 고려하고자 하는 평면에 놓이도록 이 구를 이동시킨다면 평면과 구의 교선이 그리는 대원은 공간에서 면의 경사와 방위를 유일하게 정의하게 될 것이다.

동일한 정보가 구의 상반부와 하반부에 모두 주어지므로 어느 한 부분만이 필요한데, 공학적인 적용에 있어서는 하반구가 자료의 표시에 이용된다. 대원 이외에도 평면의 경사와 방위를 그 면의 극점으로 정의할 수도 있다. 극점은 평면에 수직한 반경선이 구면을 관통한 점이다. 하반 구면상의 대원과 극점의 위치로서 주어진 정보를 전달하기 위해서는 수평 혹은 적도 기준면 위에 이 정보를 투영하여 2차원적 표시를 하게 된다.

평사투영의 해석 방법의 순서는 Stereo Net에 불연속면의 극점과 불연속면들의 교차점의 극점을 투영한 다음 사면의 Daylight Envelope와 불연속면의 내부 마찰각을

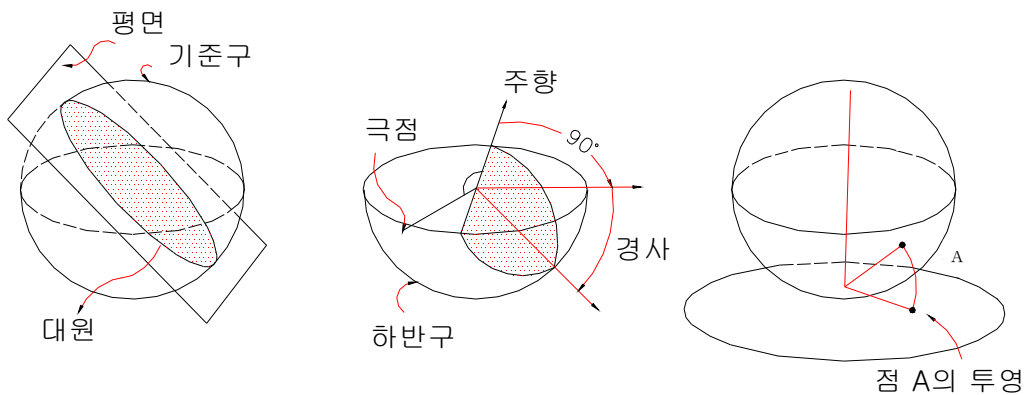


그림 2.12 평사투영 작도법

이용하여 마찰원을 작도하고 Toppling Envelope를 작도한다. 마지막으로 불안정 지역에 위치하는 불연속면의 극점이나 두 불연속면이 교차하는 점을 조사하여 이것으로 파괴를 일으킬 수 있는 위험 가능성을 예비 평가한다.

이상과 같은 과정은 DIPS와 같은 전산프로그램을 이용하면 편리하고 신속하게 분석할 수 있다. 이와 같은 평사투영법은 사면, 터널, 기초 등과 같은 암반구조물 해석에 유용한 수단이 되고, 평사투영법에 의한 암반사면의 안정성 평가로는 사면의 안정성을 예비적으로 평가하는 단계에서 쉽게 이용할 수 있다.

평사투영법에 의한 해석에 있어 파괴형태가 발생할 것으로 추정되는 조건을 보면 원호파괴는 주절리 방향이 존재하지 않는 불연속면이 무수히 산재할 경우에 발생하며, 평면파괴는 탁월한 불연속면이 1개 존재하고, 이 불연속면의 경사방향이 사면의 경사방향과 거의 일치하며 사면의 경사가 불연속면의 경사보다 급한 경우 발생하게 된다.

또한 썩기파괴는 두 불연속면의 교선의 경사방향이 사면의 경사방향과 거의 일치하고 사면의 경사가 두 불연속면의 경사보다 급할 경우 발생하며, 특히 사면의 경사각>교선의 경사각>불연속면의 내부 마찰각이 성립할 때 발생하게 된다. 전도파괴는 불연속면의 경사 방향이 사면의 경사방향과 거의 반대일 경우 발생한다.

네 가지 주요 파괴형태와 파괴가 발생하기 쉬운 지질조건의 전형적인 극점도표를 단순화하여 나타낸 것으로 주목해야 할 점은 안정성 평가에서 사면의 절단면이 평사투영도에 포함되어야 한다는 점인데, 그 이유는 미끄러짐이 굴착으로 인하여 형성된 자유면 쪽으로 이동함으로써 발생할 수 있기 때문이다.

실제 암반사면에서는 여러 가지 형태의 지질구조가 복합적으로 존재하므로, 이것이 부가적인 파괴를 발생시킬 수도 있다. 예를 들어 썩기형 암반의 미끄러짐을 일으킬 수 있는 면과 전도파괴를 초래할 수 있는 불연속면이 함께 존재할 때에는 인장균열에 의해 암반으로부터 분리되는 썩기형 블록의 미끄러짐이 발생될 수 있다.

지질구조 자료를 평사투영도에 표시하는 전형적인 야외조사에서 다수의 의미 있는 극점밀도가 존재할 수 있다. 그러므로 잠재적인 파괴면을 나타내는 극점들을 확인하고 사면파괴에 포함되지 않을 지질구조를 나타내는 극점들을 제거하는 것이 필요하다. John, Panet, McMahon, Markland(1972) 등이 중요한 극점밀도를 확인하는 방법을 고찰했다.

Markland(1972)의 방법은 2개의 평면 불연속면의 교선을 따라 미끄러짐이 발생하

는 썩기파괴의 가능성을 입증하기 위해 고안된 것이다. 또한 평면파괴는 썩기파괴의 특수한 경우이므로 이 방법에 포함된다. 양쪽 면에서의 접촉이 유지된다면 미끄러짐은 오직 교선을 따라 발생하므로 이 교선은 경사면에 노출되어야 한다.

썩기파괴에서의 사면의 안전율은 교선의 경사, 불연속면의 전단강도, 썩기의 기하학적 형상에 좌우된다. 극단적인 경우는 썩기형태가 평면으로 바뀌고, 두 면의 경사와 경사방향이 같아지고, 이 면의 전단강도가 오직 마찰에만 기인할 때이다.

이러한 조건하에서의 미끄러짐은 그 면의 경사가 마찰각을 초과할 때 발생하므로 썩기의 안정성에 대한 최초의 근사 해는 교선의 경사가 암반표면의 마찰각을 초과하는지를 고려함으로써 얻어진다.

2. 한계평형 해석법

(1) 평면파괴

암반사면에서 평면파괴는 비교적 드물게 발생하는데, 이는 실제사면에서 그런 파괴를 발생시키는데 필요한 모든 기하학적 조건이 만족되는 경우가 드물기 때문이다. 보통 기술자들은 평면파괴를 썩기파괴의 특수한 경우로 다루고 있다.

평면파괴는 다음과 같은 기하학적 조건이 성립될 경우 발생할 수 있다.

- 미끄러짐이 일어나는 면의 주향이 사면의 주향과 $\pm 20^\circ$ 범위에 있어야 한다.
- 파괴면의 경사각은 사면의 경사각 보다 작아야 한다. ($\psi_f > \psi_p$)
- 파괴면의 경사각은 마찰각 보다 커야 한다. ($\psi_p > \phi$)
- 파괴면의 측면 경계면이 무시할 정도로 작은 저항을 지닌다.

평면파괴에서 고려하는 사면의 형상은 그림 2.13처럼 사면의 상부에 인장균열이 있는 경우와 사면의 경사면에 인장균열이 있는 경우로 다루어져야 한다.

평면파괴에 대한 한계평형 해석을 하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 파괴면과 인장균열은 둘 다 경사면과 평행한 주향을 갖는다.
- 인장균열은 연직방향으로 나 있고 깊이 Z_w 까지 물이 차있다.
- 물은 인장균열 바닥을 통해 파괴면에 들어가서 그 면을 따라 침투하여 파괴면이 경사면에 노출되는 것에서 대기압 상태로 유출된다.

여기서, ψ_p : 파괴면의 경사각, ψ_f : 사면의 경사각, z_w : 인장균열에 물이 차 있는 깊이, A : 파괴면 면적이다.

인장균열이 사면상부에 있을 경우의 W는 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left(1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right) \cot \psi_p - \cot \psi_f \right] \quad (2.18)$$

인장균열이 경사면내에 있을 경우의 W는 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \cot \psi_p (\cot \psi_p \tan \psi_f - 1) \right] \quad (2.19)$$

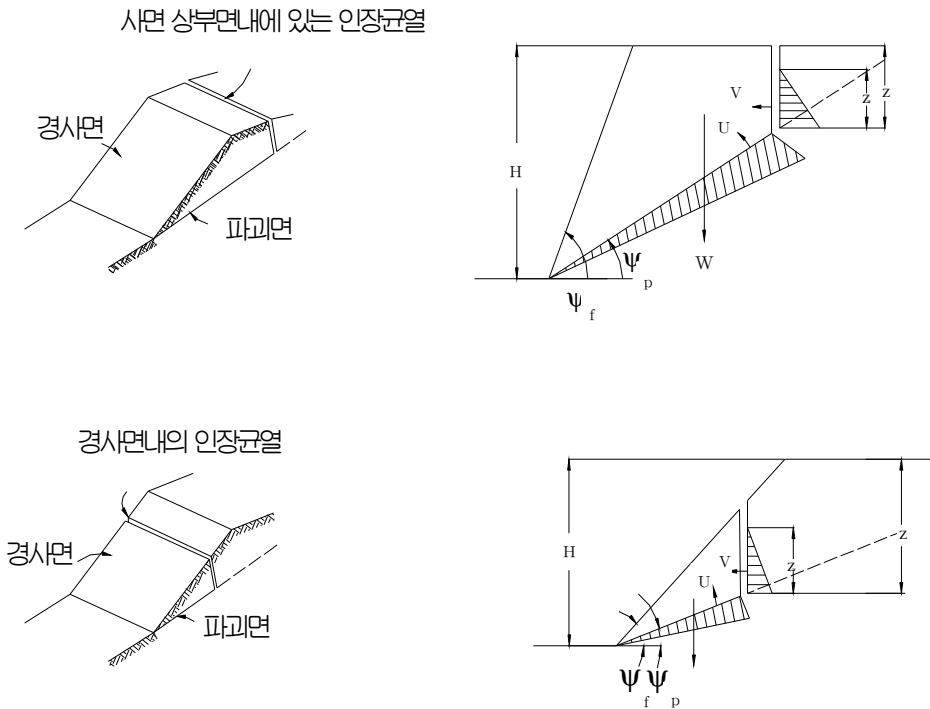


그림 2.14 인장균열을 갖는 사면의 기하학적 조건

사면의 기하학적인 형상과 인장균열 안에서의 물의 깊이를 알면 안전율의 계산은 아주 간단하다. 그러나 가끔 사면의 기하학적 형상, 물의 깊이, 서로 다른 전단강도의 영향 등을 비교할 필요가 있다.

(2) 원호활동파괴

원호활동파괴는 원호형태의 활동면 상부에 위치한 가상활동 토괴가 붕락하는 것으로서, 토사사면과 연약한 풍화암으로 구성된 암반사면에서 발생하는 파괴 형태이며, 이에 관한 안정성 해석법은 Fellenius(1936), Skempton(1948), Bishop(1955) 등에 의해 지금까지 폭넓게 연구되어 왔다.

원호활동에 대한 안정해석법은 크게 절편법과 일체법으로 대별되며 특히, 절편법은 가상활동파괴를 몇 개의 연직절편으로 나누고 각 절편에 작용하는 힘의 성분들을 계산하여 안전율을 산정하는 방법으로서 Fellenius방법과 Bishop의 간편법 등이 있다.

1) 절편법

Fellenius(1936)방법은 절편법 중 가장 기본적인 방법으로서 계산 과정이 비교적 간단하나 안정성 해석의 결과가 너무 보수적으로 나타나는 경향이 있어 현재 특수한 경우를 제외하고는 거의 사용되고 있지 않다. 반면 Bishop(1955)의 간편법은 Fellenius의 방법을 개선하여 각 절편간에 작용하는 수평작용력 성분들의 영향을 고려한 것으로서 현재까지 많이 이용되고 있다.

그림 2.15에서 원호 \widehat{AC} 는 가상활동면을 나타내는 원호이며, 이 면의 상부에 있는 토괴를 n개의 연직절편으로 나눈 것이다. 그림 2.16에서의 가상활동 토괴가 평행상태에 있다면 O점에 대한 회전모멘트 M_D 와 저항모멘트 M_R 은 서로 같으므로 식(2.20)과 같이 표시될 수 있다.

$$\sum_{n=0} = W_n \gamma \sin \alpha_n = \sum_{n=0} = T_r \gamma \quad (2.20)$$

여기서, N_r : 반력R의 수직성분, T_r : 반력R의 접선성분이다.

또한, 접선방향의 반력 T_r 을 구하면 식(2.21)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
Tr &= \tau_d \cdot \Delta L_n \\
&= \frac{1}{F}(c\Delta L_n + N_r \tan\phi) \\
&= \frac{1}{F} \left\{ c\Delta L_n + \left(\frac{W_n + \Delta T - \frac{c\Delta L_n \sin\alpha_n}{F}}{\cos\alpha_n + \frac{\tan\phi \sin\alpha_n}{F}} \right) \tan\phi \right\} \tag{2.21}
\end{aligned}$$

식(2.21)을 식(2.20)에 대입하여 안전율 F에 대해 정리하면 식(2.22)와 같이 된다.

$$F = \frac{\sum_{n=0}^p (cb_n + W_n \tan\phi + \Delta T \tan\phi) \frac{1}{m_\alpha(n)}}{\sum_{n=0}^p W_n \sin\alpha_n} \tag{2.22}$$

여기서, $m_\alpha(n) = \cos\alpha_n + \frac{\tan\phi \sin\alpha_n}{F}$

간단히 하기 위해 $\Delta T=0$ 이라 두면 식(2.23)과 같이 된다.

$$F = \frac{\sum_{n=0}^p (cb_n + W_n \tan\phi) \frac{1}{m_\alpha(n)}}{\sum_{n=0}^p W_n \sin\alpha_n} \tag{2.23}$$

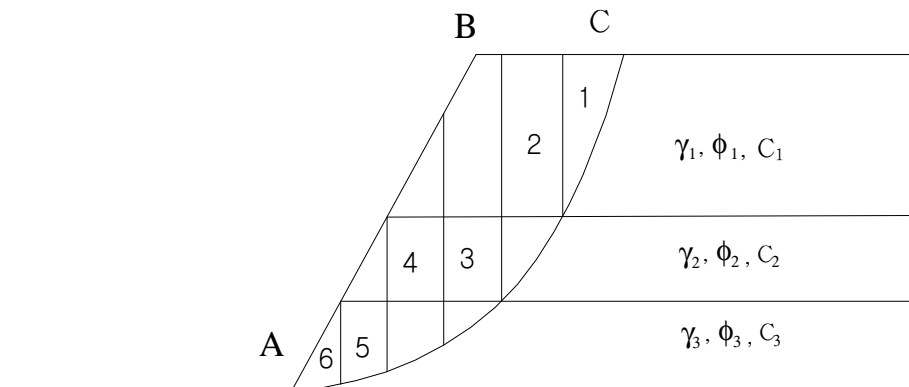


그림 2.15 절편법에 의한 원호활동해석

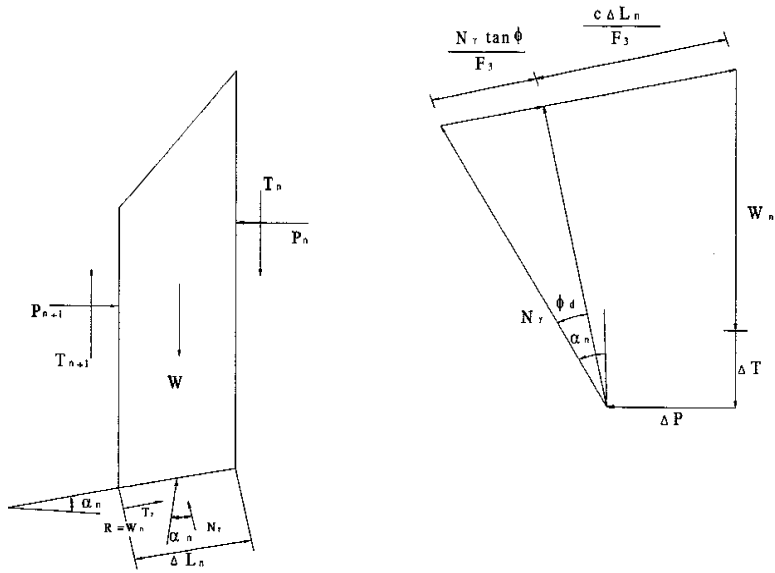


그림 2.16 Bishop의 간편법(절편 n에 작용하는 힘의 다각형)

2) 일체법

일체법은 균질한 단순사면에서 가상활동 토괴가 일체로 거동하는 것으로 생각하고 시행착오에 의한 도해적인 방법으로 사면의 안정해석을 하는 것으로 $\phi=0$ 해석법과 $\phi>0$ 해석법이 있다. $\phi=0$ 해석법은 원호활동면에 대한 안정해석법 중에서 가장 간단한 방법으로서 사면은 균질한 흙으로 구성되어 있고 흙의 비배수 전단강도 c_u 는 깊이에 따라 일정하며 파괴조건으로 $\tau_f=c_u$ 라고 가정한 것이다.

반경 r인 원호 \widehat{AED} 를 가상활동면으로 정하면 이 원호의 중심은 O점이며 사면 단면에 직각인 단위두께를 고려하면 가상활동 토괴의 무게는 $W = W_1 + W_2$ 가 된다. 가상 활동토괴 AEDCB가 평형상태에 있다면 O점에 대한 회전모멘트 M_D 와 저항모멘트 M_R 은 서로 같으며, 식(2.24)와 같이 표현된다.

$$M = W_1 l_1 - W_2 l_2 \quad (2.24a)$$

$$M = C_d \times \widehat{AED} \times \gamma = c_d \gamma^2 \theta \quad (2.24b)$$

여기서, C_d 는 가상활동면을 따라 동원되는 점착력이며, $M_D = M_R$ 로부터 C_d 는 식(2.25)과 같이 된다.

$$C_d = \frac{W_{1l_1} - W_{2l_2}}{\gamma^2 \theta} \quad (2.25)$$

따라서, 활동에 대한 안전율 F는 식(2.26)으로 구할 수 있다.

$$F = \frac{\tau_f}{C_d} = \frac{C_u}{C_d} \quad (2.26)$$

위 계산과정에서 가상활동면 \widehat{AED} 는 임의로 설정한 것이므로 최소안전율을 가지는 임계활동면을 구하기 위해서는 다른 가상 활동면에 대하여 위의 계산 절차를 반복 실행해야 하는데, 이와 같은 시행착오에 의한 도해적인 방법은 임계활동면과 안전율의 비율로써 결정된다.

$\phi > 0$ 해석법은 $\phi > 0$ 인 균질한 흙으로 구성된 단순사면에서 흙의 파괴 조건을 $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$ 로 가정하고 안정해석을 수행하는 방법이다. $\phi > 0$ 해석법의 가상활동면에서 중심이 O인 호 \widehat{AC} 를 가정하는 경우 가상 활동토괴에 작용하는 힘들은 활동을 일으키려는 힘과 저항하려는 힘으로 나타낼 수 있다. 이때 활동을 일으키려는 힘은 가상 활동무게(W)이고, 저항하려는 힘은 활동면을 따라 동원되는 점착력(C_d) 및 활동면에서의 수직력과 마찰력의 합력(F) 등으로 이루어진다.

평형상태에서 힘의 성분들을 힘의 다각형으로 도시하는 경우 폐합하게 되며, 합력 F의 작용선은 원호의 법선과 각도 ϕ 을 이루게 된다. 즉 이것은 중심이 O이고 반경이 $\gamma \cdot \sin \phi$ 인 원에 접하게 되는데, 정의하면 여러 가지 가상활동면 중에서 임계활동면에서 발생하는 최소안전율(F)은 식(2.27)과 식(2.28)에 의해 구할 수 있다.

$$F_c = \frac{c}{C_d}, \quad F_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \quad (2.27)$$

$$F_c = F_d = F \quad (2.28)$$

3) 켜기활동과괴

켜기과괴는 두 개의 절리면의 교선 벡터가 평면과괴 영역에 포함된 경우 발생한다. 단, 여기서 사면의 경사는 교선의 직각방향에서 본 일종의 위경사가 되어야 한다. 교선의 경사방향과 사면의 경사방향이 일치할 경우는 이 위경사는 진경사와 일치한다. 즉, 교선의 경사를 ψ_p , 교선의 직각 방향에서 본 사면의 위경사를 ψ_{fp} , 과괴면의 마찰각을 ϕ 라고 하면 아래와 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$\psi_{fi} > \psi_i > \phi \quad (2.29)$$

그림 2.17은 켜기과괴의 기하형상을 나타내고, 그림 2.18은 켜기과괴 형상의 평사투영도이다. 켜기과괴의 해석은 평면과괴 해석과 그 원리가 동일하다. 그러나 두 절리면과 사면의 기하학적 관계는 2차원으로 고려하기 어려운 3차원적 문제이기 때문에 실제의 계산 과정은 평면과괴에 비하여 훨씬 더 복잡하다. 점착력과 수압등을 고려하지 않은 가장 간단한 형태로 켜기과괴 해석의 원리는 다음과 같다.

그림 2.17과 그림 2.18에서 켜기의 안전율에 대한 정의를 내릴 수 있는데, 미끄러짐이 단지 마찰에 의해서만 저항을 받고 두 면의 마찰각이 같다고 가정하면 안전율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{(R_A + R_B) \tan \phi}{W \sin \psi_i} \quad (2.30)$$

여기서, R_A , R_B 는 그림 2.17에 나타난 A, B면상의 수직반력이고, R_A , R_B 를 구하기 위해 교선에 대한 수평 및 수직방향의 성분으로 나누어 표시하면 다음과 같다.

$$R_A \sin \left(\beta - \frac{1}{2} \xi \right) = R_B \sin \left(\beta + \frac{1}{2} \xi \right) \quad (2.31)$$

$$R_A \cos \left(\beta - \frac{1}{2} \xi \right) - R_B \cos \left(\beta + \frac{1}{2} \xi \right) = W \cos \psi_i \quad (2.32)$$

여기서, ξ 는 켜기의 사이각, β 는 켜기의 경사각이다.

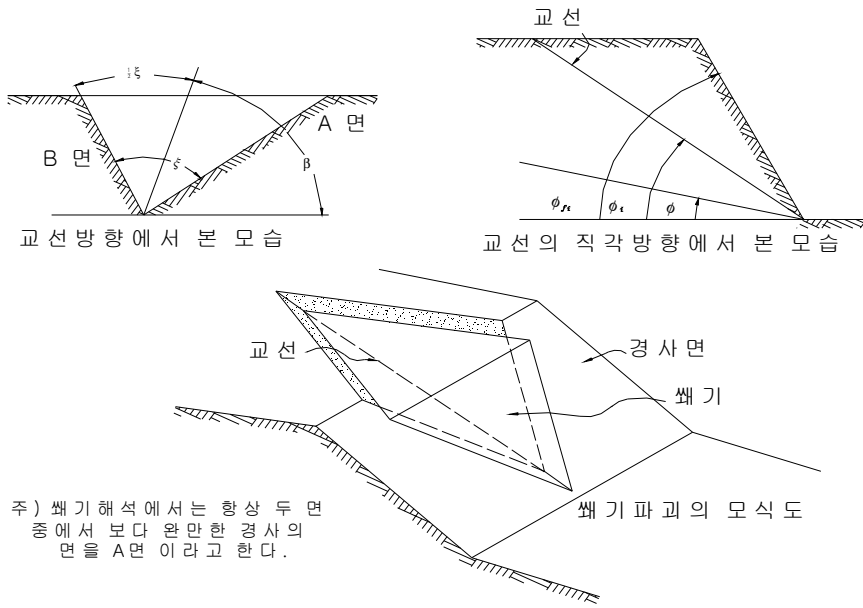


그림 2.17 썰기파괴의 기하현상

R_A, R_B 를 구해서 더하면,

$$R_A + R_B = \frac{W \cos \psi_i \sin \beta}{\sin \frac{1}{2} \xi} \quad (2.33)$$

이 식을 식(2.30)에 대입하면 다음과 같다.

$$F = \frac{\sin \beta}{\sin \frac{1}{2} \xi} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \psi_i} \quad (2.34)$$

평면파괴에서와 마찬가지로 썰기파괴에서도 안전율은 점착력을 고려하지 않는다면 사면의 기하학적 형상에만 관계하지만 규모에는 관계하지 않는다는 것을 알 수 있다. 한편, 식(2.34)은 다음과 같이 나타낼 수도 있다.

$$F_w = KF_p \quad (2.35)$$

여기서, F_w : 마찰력에 의해서만 지지되는 썰기의 안전율, F_p : 사면의 경사가 ψ_{fi} 이고 파괴면의 경사가 ψ_i 일 때의 평면파괴에 대한 안전율, K : 썰기계수이다.

K 는 썰기의 사이각과 경사각에 좌우되며 이는 그림 2.19와 같다.

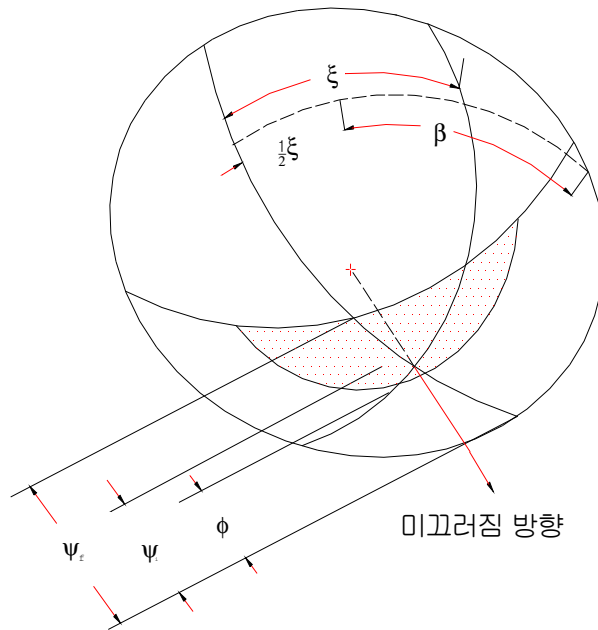


그림 2.18 썰기파괴 형상의 평사투영도

β 와 ξ 는 그림 2.18의 평사투영도에 나타난 대원으로부터 구할 수 있는데, 이때 대원의 극점은 두 평면의 교선을 나타내는 점이다. 사면과 썰기의 기하학적 형상을 규정하는 평사투영도로부터 안전율을 결정하는데 필요한 모든 정보를 얻을 수 있다. 그리고 현장에서 직접 측정할 수 없는 β 와 ξ 를 사용하여 해석하는 것보다 직접 측정할 수 있는 경사 및 경사방향을 사용함으로써 보다 완전한 해석을 할 수 있다.

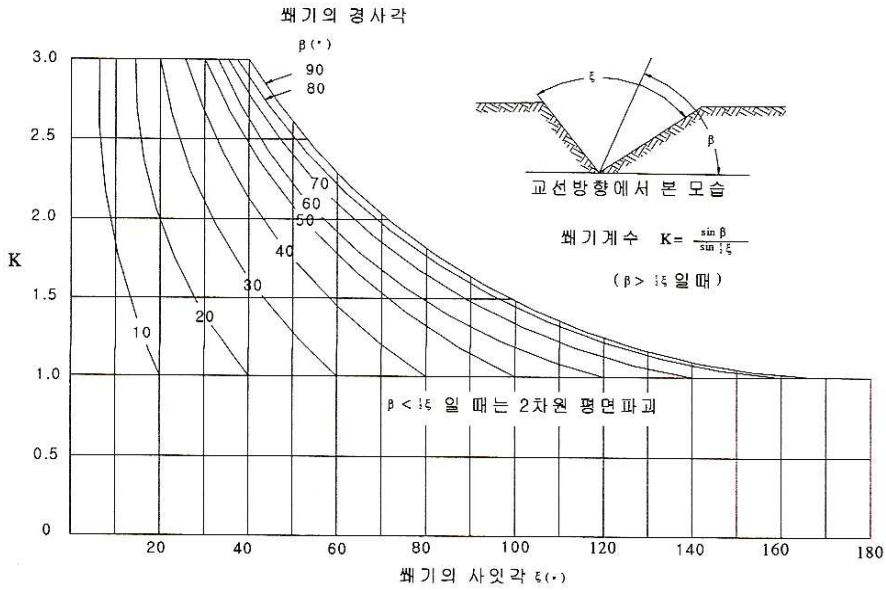


그림 2.19 썰기형상의 함수로서 나타낸 썰기계수 K

4) 전도파괴

앞에서 논의되었던 파괴형태들은 모두 암반이나 토체가 기존 파괴면이나 새롭게 발생된 파괴면을 따라 미끄러지는 것과 연관되어 있다. 이와 다른 파괴형태인 전도파괴는 암주나 암석 블록들이 고정된 어떤 기준점에 대해 회전하는 것을 수반하고 있다.

전도파괴의 각종 형태를 보면 굴곡 전도파괴, 블록 전도파괴, 복합 전도파괴가 있으며, 굴곡 전도파괴는 잘 발달된 급경사의 불연속면으로 분리되어 있는 연속적인 암주들이 전방으로 구부러짐에 따라 굴곡 되어 붕괴되는 것이다.

사면하단의 미끄러짐, 침식 또는 채굴 등으로 인하여 전도파괴가 시작되며 이는 암반 내에 깊고 넓은 인장균열을 형성하면서 후방의 암반내부로 전파된다. 사면의 하부는 방향성과 규칙성이 없는 암괴들로 덮이게 되며, 때때로 사면의 바닥면에서는 전도파괴의 형태를 식별하기가 매우 곤란할 때가 있다. 블록 전도파괴는 경암의 각 암주들이 간격이 넓은 직교 절리들에 의해 블록형태로 분리되었을 때 발생한다. 사면하단을 형성하는 짧은 암주들은 배후에 있는 긴 암주들이 전복하면서 생기는 하중에 의해 앞으로 밀리게 되는데, 사면하단의 이러한 미끄러짐은 더 많은 전도파

괴가 사면 상부로 전과되게 한다. 파괴의 저면은 굴곡 전도파괴의 경우보다 더 명확하며, 일반적으로 하나의 교차하는 절리에서 다음 교차절리까지 솟아오른 형태의 계단상으로 나타난다.

복합 전도파괴는 수많은 교차절리에 의해 분리된 긴 암주들을 따라서 일어나는 반연속적인 굴곡으로 이루어지는 것이 특징이다. 연속적인 암주들의 굴곡파괴로 굴곡 전도파괴가 발생하는 반면, 복합 전도파괴는 암주의 교차절리에 축척되는 변위에 기인한다. 이러한 형태의 전도파괴에는 작은 이동들이 수없이 많이 발생하기 때문에 굴곡 전도파괴보다는 인장균열이 적게 존재하며, 블록 전도파괴보다는 가장 자리와 면의 접촉 및 공극이 적다.

3. 개별요소해석법

(1) 개별요소법의 개요

개별요소법은 암반의 절리나 단층 등으로 나누어진 블록들의 집합체라고 보고 블록들의 접촉면에서 발생하는 힘과 변위와의 관계를 운동방정식에 의거 해석함으로써 블록들의 거동을 예측하는 수치해석적 기법이다. 여기서 블록들은 다시 변형을 하지 않는 강성블럭과 변형이 가능한 블록으로 구별되는데 변형 가능블럭의 내부는 유한차분법을 이용하여 연속체 요소로 분할되어 응력 및 변형량이 계산된다.

개별요소법에 의한 수치해석법 중 본 연구에 사용된 program UDEC은 Cundall(1971)이 개발한 Explicit Formula로서 블록의 이동에 의해 경계면에 발생하는 접촉력 및 변위를 계산한다. 블록의 이동은 블록 시스템을 가로질러 경계면에 전달되는데 이는 동적으로 블록 시스템의 물리학적 특성으로 속도가 전과됨을 의미한다. 수치해석적인 관점에서 이러한 동적인 거동은 시간이라는 매개변수를 도입하여 표시한다.

이때 시간의 크기는 매 계산단계에서 각 블록의 이웃 블록들에 대한 침투가 즉각 전달되지 않을 정도로 충분히 작아야 한다. 이러한 과정은 연속체에서 유한차분법의 Explicit법에서 사용하는 방법과 유사하다. 이 개별요소법에 의한 블록 시스템의 변위 계산은 동적인 계산식에 기초를 두고 있기 때문에 정적인 문제에 이 방법의 적용은 시스템이 안정된 상태로 수렴하게 하기 위하여 Damping상수를 도입하여 동적이완을 시킨다. 이 방법에 사용되는 알고리즘은 강성 블록사이의 상호작용을 나타내는 힘-변위 관계식과 각 블록에 작용하는 힘과 모멘트에 의한 운동방정식에 기초를 두고 있다.

(2) 블록사이의 상호작용

암반블록 사이의 변형과 마찰력의 모델링은 힘-변위 관계식을 갖는 spring-slider 시스템에 의해 해석하는데 이는 블록들 사이의 수직응력과 접선응력을 표현할 수 있게 해준다. 그림 2.20은 블록의 정점과 면의 접촉 시 메커니즘을 나타내고 있다.

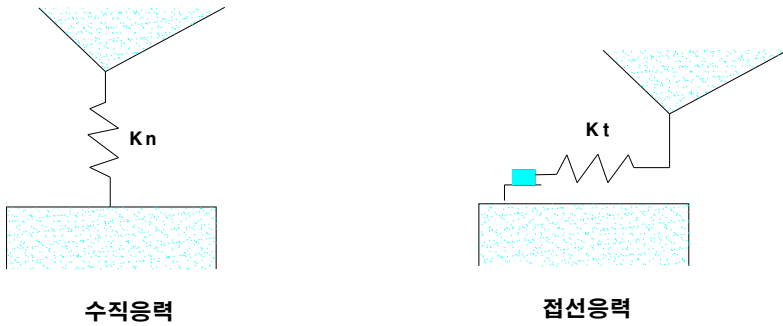


그림 2.20 개별요소간의 경계에 대한 역학적 표현

(3) 수직변형

블록사이의 접촉에 의한 활동력을 결정하기 위하여 블록의 경계면에 발생하는 가상의 침입이나 중첩현상을 가정한다. 이웃한 두 블록사이의 이러한 가상의 침입이나 중첩량은 블록의 기하학적인 모양과 블록의 중심의 전이와 회전으로 직접 정의할 수 있다. 처음에 블록들은 자신들의 중력의 영향만을 받으나 두 블록사이에 점-면접촉이 발생하면 블록의 정점에 접촉력이 작용하며 절리면을 따라 면-면접촉이 일어나면 이 절리면에 응력이 작용한다

두 블록사이에 점-면접촉시에 수직력 F_n 과 수직변위 U_n 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\Delta F_n = K_n \cdot \Delta U_n \quad (2.36)$$

여기서, ΔF_n : 수직력의 증분, K_n : 접촉 수직강성율, ΔU_n : 수직변위의 상대 증분이다.

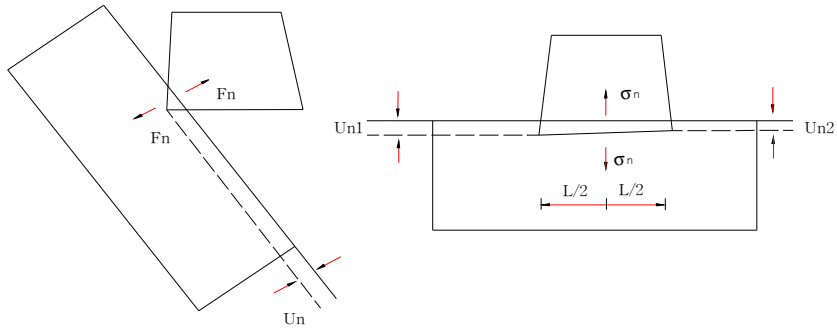


그림 2.21 블록간의 접촉에 의한 수직방향 상호작용

면-면접촉은 물리학적으로 상당히 중요한데 이는 불연속면들이 그들의 전체 길이를 따라 닫히는 경우에 해당하기 때문이다. 불연속면들이 거의 평행인 경우에 이들은 두 점의 접촉으로 표시할 수 있는데, 두 점 사이의 거리를 L 로 나타내면 절리면 사이에 작용하는 응력은 다음 식(2.37)과 같다.

$$\Delta\sigma_n = K_n \cdot \Delta U_n \quad (2.37)$$

여기서, $\Delta\sigma_n$: 수직응력의 증분, K_n : 절리면의 수직 강성을, ΔU_n : 수직변위의 상대 증분이다.

이 때 접촉면의 중간에서 응력은 일정하다고 가정하기 때문에 접촉점에 작용하는 힘의 증분은 접촉면의 중간 길이($L/2$)에 수직응력을 곱하여 얻을 수 있다.

(4) 전단변형

이웃한 두 블록사이의 전단변형은 그림 2.22와 같이 표시할 수 있다. 두 블록 사이의 수직력은 공간상에서 블록의 위치에만 관계되지만 전단력은 블록이 움직인 궤적의 함수로 나타내야 한다. 따라서 전단력 F_t 와 전단변위 U_t 와의 관계는 다음과 같이 증분의 형태로 표시한다.

$$\Delta F_t = K_t \cdot \Delta U_t \quad (2.38)$$

여기서, ΔF_t : 전단력의 증분, K_t : 접촉 전단 강성을, ΔU_t : 전단변위의 상대 증분이다.

여기서 계산된 힘의 증분을 두 블록 사이에 이미 존재하는 전단력에 더함으로써 총 전단력을 구하게 된다. 계산에 이용되는 기타 파괴법칙은 다음과 같다.

첫 번째는 인장파괴에 의하여 두 블록이 더 이상 접촉을 하지 않을 경우에는 블록 사이에 작용하는 수직응력 및 전단응력을 0으로 취한다. 두 번째로 전단파괴는 Mohr-Coulomb의 파괴식에 의해 모델링을 하는데 매 계산 단계마다 각 접촉점에서 전단력의 절대치가 $C + F_n \cdot \tan\phi$ 을 초과하는지를 테스트하여 만약 전단력이 이 임계치를 초과하면 전단력의 크기는 $C + F_n \cdot \tan\phi$ 를 취하고 부호는 계산단계의 부호를 그대로 취한다.

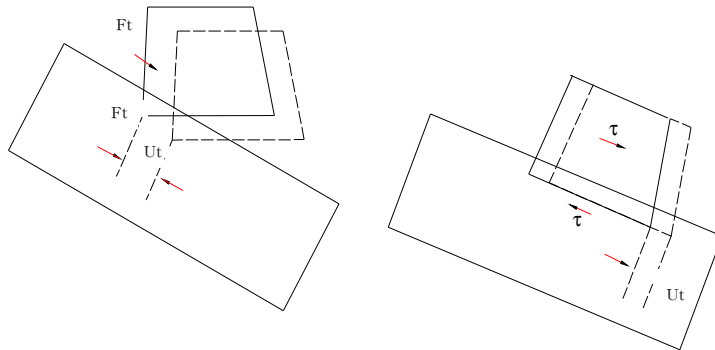


그림 2.22 블록간의 접촉에 의한 전단방향 상호작용

(5) 운동방정식

각 블록에 대하여 상기한 힘들은 블록의 중심에 작용하는 힘과 주어진 방향으로 작용하는 모멘트로 변환할 수 있다. 운동법칙에 의해 한 블록은 이 힘과 모멘트의 영향에 의해 새로운 위치로 이동하게 된다.

운동방정식은 Newton의 제2법칙에 의해 주어진다. 질량 m 인 블록에 작용하는 힘과 모멘트의 성분을 F_x, F_y, M 이라고 하면 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U'_i}{\partial t} = \frac{F_i}{m} + g_i \quad (2.39a)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{M}{I} \quad (2.39b)$$

여기서, U'_i : 방향 i 에서의 블록의 이동속도, θ : 블록의 중심에 대한 각속도, g_i : 중력가속도, I : 블록의 관성모멘트(i 는 1, 2로서 2차원에서 x, y 방향을 나타냄)이다.

속도와 모멘트를 시간 Δt 에 대하여 표현하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial U'_i}{\partial t} \right)^{(t)} = \frac{U'_i{}^{(t+\Delta t/2)} - U'_i{}^{(t-\Delta t/2)}}{\Delta t} \quad (2.40a)$$

$$\left(\frac{\partial \theta'}{\partial t} \right)^{(t)} = \frac{\theta'^{(t+\Delta t/2)} - \theta'^{(t-\Delta t/2)}}{\Delta t} \quad (2.40b)$$

또한, 변위는 전 단계에서 계산한 변위함수로 표현할 수 있다.

$$\partial U'_i{}^{(t+\Delta t)} = U'_i{}^{(t)} + U'_i{}^{(t+\Delta t/2)} \cdot \Delta t \quad (2.41)$$

블록에 중력가속도 이외에 여러 종류의 힘이 작용한다면 속도식은 다음과 같이 표현된다.

$$\partial U'_i{}^{(t+\Delta t/2)} = U'_i{}^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{\sum F_i^{(t)}}{m} + g_i \right) \cdot \Delta t \quad (2.42a)$$

$$\partial \theta'^{(t+\Delta t/2)} = \theta'^{(t-\Delta t/2)} + \frac{\sum M^{(t)}}{m} \cdot \Delta t \quad (2.42b)$$

상기 식으로 결정되는 속도는 블록 중심의 새로운 위치 및 블록중심에 대한 회전각을 결정하는데 사용된다.

$$X_i^{(t+\Delta t/2)} = X_i^{(t)} + U_i'^{(t+\Delta t/2)} \cdot \Delta t \quad (2.43a)$$

$$\theta^{(t+\Delta t/2)} = \theta^{(t)} + \theta_i'^{(t+\Delta t/2)} \cdot \Delta t \quad (2.43b)$$

여기서, X_i : 블록 중심의 x, y 좌표, θ : 블록 중심의 대한 회전각이다.

따라서, 각 블록의 정점들의 새로운 위치를 구할 수 있다. 결과적으로 각 계산단계에서 블록들의 새로운 위치를 구할 수 있으며 이는 접촉변위 및 새로운 접촉력을 구할 수 있게 한다.

계산된 힘과 모멘트는 각 블록의 선가속도 및 각가속도를 구하는데 사용되며 블록의 속도와 변위는 속도증분에 대한 적분으로 결정된다. 이러한 과정이 시스템이 평형을 이루거나 파괴가 일어날 때까지 반복된다.

(6) 수치해석의 안정성

이 알고리즘에서 시간증분 Δt 가 임계치보다 작을 때에만 수치해석상 안정하다. 시간증분의 임계값은 가장 작은 블록의 질량 M_{\min} , 수직 또는 접선 접촉강성을 중 최대치 K_{\max} 로서 구하는데 다음과 같다.

$$\Delta t = F_c \cdot 2 \left[\frac{M_{\min}}{2K_{\max}} \right]^{1/2} \quad (2.44)$$

여기서, F_c 는 한 블록이 여러 블록과 접촉하는 것을 고려하여 사용자가 정의하는 상수로 보통 0.1이면 수치해석상 안정하다. 준정적인 문제에서는 관성력은 시스템내의 다른 힘들에 비해 작기 때문에 수치해석의 해에 영향을 미치지 못한다. 다시 말해 관성력이 약하면 시스템내의 전체 작용에 별 의미가 없다는 것이다. 결과적으로 여러 경우에 모든 블럭에 대하여 동일한 질량(평균 질량)을 주는 것이 좋은

수치해석 결과를 얻을 수 있다는 것이다.

(7) 계산 싸이클

개별요소법에서 사용하는 계산은 블록의 운동방정식과 접촉에 대한 힘-변위 관계식을 이용하는데 각 Timestep에서 이 두 법칙이 적용된다. 전자는 블록에 작용하는 힘과 블록 자신에 작용하는 회전 모멘트의 결과로 발생하는 블록의 운동을 알 수 있게 하는데 이의 적분은 블록의 새로운 위치를 알려주어 접촉변위의 증분을 알 수 있게 한다. 후자는 다음 단계의 Timestep에서 블록에 작용하여야 하는 새로운 접촉력을 구하는데 쓰인다. 접촉력은 다음과 같이 계산된다.

$$F_n := F_n + K_n \cdot \Delta U_n \quad (2.45a)$$

$$F_t := F_t + K_t \cdot \Delta U_t \quad (2.45b)$$

$$|F_t| > C + \mu \cdot F_n \text{ 이면}$$

$$F_t := F_t \cdot \frac{(C + \mu \cdot F_n)}{|F_t|} \quad (2.45c)$$

2.3.2 정성적 해석방법

암반사면의 안정성해석법으로 주로 이용되고 있는 방법으로는 암반분류법이나 사면평점법 등의 경험적 방법이 있다. 이 방법은 암반의 역학적성상에 관한 항목이나 사면의 안정성에 관한 모든 요인(지형과 식생 및 지하수 등)에 대해 관찰을 하고 경험적·통계적 견지에서 종합적으로 구분하여 분류 혹은 평점 함으로서 사면의 안정성을 평가하는 것이다.

1. RMR분류법

암반사면 안정해석법은 국내외에서 많이 이용되고 있는 방법은 1976년 Bieniawski에 의하여 제안되어 1989년에 일부 수정·보완된 RMR분류법, Barton 등에 의하여 1974년에 제시된 Q-분류법, Romana(1985, 1993)에 의하여 제안된 SMR법 등이 있으며

표 2.15 RMR 지반분류법(Bieniawski, 1989)

분류기준			특성치 구분 및 평점							
R1	시료강도 (MPa)	점하중강도	> 10	4~10	2~4	1~2	일축압축강도 이용			
		일축압축강도	> 250	100~250	50~100	25~50	5~25	1~5	< 1	
	평 점		15	12	7	4	2	1	0	
R2	암질표시율(RQD)%		90~100	75~90	50~75	25~50	< 25			
	평 점		20	17	13	8	3			
R3	절리면 간격(Js)m		> 2m	0.6~2m	0.2~0.6	0.06~0.2	< 0.06			
	평 점		20	15	10	8	5			
R4	절리면 상태 (Jc)	연장길이(m)	< 1	1~3	3~10	10~20	> 20			
			6	4	2	1	0			
		틈새(mm)	0	< 0.1	0.1~1.0	1~5	> 5			
			6	5	4	1	0			
		거칠기	매우거침	거침	약간거침	매끄러움	아주 매끄러움			
			6	5	3	1	0			
		충진물두께(mm)	견고한 충진물			연약한 충진물				
			0	< 5	> 5	< 5	> 5			
		풍화정도	신선함	약간풍화	중간풍화	심한풍화	완전풍화			
			6	5	3	1	0			
R5	지하수 상태	유입량(1/분)	0	< 10	10~25	25~125	> 125			
		수압/주응력비	0	< 0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	> 0.5			
		건습상태	완전건조	습윤	젖음	소유출	지하수가 흐름			
	평 점		15	10	7	4	0			
R6	상대적인 절리방위 (터널용)	터널굴진방위 절리면경사각	경사방향		경사반대		주향방향		주향과 무관 < 20°	
			20~45° (매우유리)	45~90° (유 리)	20~45° (양 호)	45~90° (불 리)	20~45° 양호	45~90° 불량		
	평 점		-2	0	-10	-5	-5	-12	-10	

이러한 방법은 암반의 역학적 성상에 관한 항목이나 기타 사면의 안정성에 영향을 주는 모든 요소들에 관하여 분석하고 경험적·통계적으로 구분하여 평점을 주어 사면의 안정성을 평가하는 방법이다. RMR분류법은 표 2.15에 제시한 바와 같이 암석의 강도(R1), 암질표시율(R2), 절리면 간격(R3), 절리면 상태(R4), 지하수 조건(R5) 등 5개 인자에 의하여 지반의 공학적 특성이 지배되며, 구조물의 특성에 따라 절리의 방위각(R6) 또한 영향을 미치는데, 터널에 있어서의 평점은 표 2.15의 R6에 제시한 바와 같다. 표 2.15에서 암석시료의 강도는 전체 평점의 15%, 절리와 관계된 인자들은 70%, 지하수 영향에 나머지 15%의 평점을 주어서 지반의 전체적인 특성이 주로 절리 등 불연속면의 특성과 밀접한 관계가 있다.

RMR 평점은 터널의 절리의 방위에 따라 R1~R5까지의 평점의 합에서 최대 12점을 감한 R6 값으로부터 최종적인 RMR값을 결정한다. 최종 결정된 RMR값에 대한 터널 굴진시의 유효 굴착규모에 대한 지반의 자립시간과 점착력 및 내부마찰각 등의 지반강도 특성은 표 2.16과 같으며 Bieniawski는 RMR값이 50이상인 지반의 변형계수를 식(2.46)으로 산출할 수 있다고 제안하였고, Serafim and Pereira(1983)은 RMR 50이하인 지반의 변형계수 결정을 위하여 식(2.47)을 제안하였다.

$$D_m = 20,000(RMR - 50) \quad (2.46)$$

$$D_m = 10^{(k+4)} \quad (2.47)$$

여기서, 변형계수의 단위는 MPa이고, $k=(RMR-10)/40$ 이다.

표 2.16. RMR 등급별 지반특성

암반등급	I	II	III	IV	V
RMR 평점	81~100	61~80	41~60	21~40	21 미만
암반상태	매우우수	우수	양호	불량	매우불량
자립시간	20년/15m	1년/10m	1주일/5m	10시간/12.5m	30분/1m
점착력(MPa)	> 4.0	3.0~4.0	2.0~3.0	1.0~2.0	< 1.0
마찰각	> 45°	40~45°	35~40°	30~35°	< 30°

2. SMR분류법

SMR(Slops Mass Rating)법에 의한 암반사면의 분류법은 1차적으로 안정성을 평가하는 방법으로 일반적인 암반평가법인 RMR법을 근거하여 사면에 대한 요소들을 보정하는 방법이다. RMR법에 의한 암반분류가 사면에 적용하기가 곤란하며 주로 터널에서 지보의 적합성을 평가하는 반면, SMR법은 사면에 적용하는 암반분류법으로 RMR법을 기본으로 하고 사면에 대한 보정요소를 고려한 방법이다.

SMR의 값은 RMR에서 고려하는 암석의 강도(15점), RQD(15점), 불연속면의 간격(20점), 불연속면의 상태(30점), 지하수의 상태(15점)의 5가지 요소의 평가 값과 $F_1 \sim F_4$ 의 보정요소 값으로 구해진다. F_1 은 암반사면의 경사방향과 불연속면 경사방향과의 차이 각의 절대값으로 구하며, 이 값은 0.15~1.00 사이의 값을 가지며 경험적으로 식(2.48)로 표현되기도 한다. 반면에 차이 각이 30°보다 더 클 때에는 붕괴 가능성이 거의 없는 것으로 본다.

$$F_1 = (1 - \sin A)^2 \quad (2.48)$$

여기서, A : 불연속면과 사면과의 차이각

F_2 는 평면파괴 형태에서의 불연속면의 경사각과 관련된 요소로 불연속면의 전단 거동 가능성의 척도를 나타내며 이 값은 1.00(경사각이 45°보다 큰 경우)에서 0.15(경사각이 20°보다 작은 경우)사이의 값을 가진다. 이를 경험식으로 표현하면 식(2.49)와 같이 표현될 수 있으며, 전도파괴에서 F_2 의 값은 1.00의 값을 갖는다.

$$F_2 = \tan^2 \beta_i \quad (2.49)$$

여기서, β_i : 불연속면의 경사각

F_3 은 사면과 불연속면의 경사각의 차이 값으로 나타낸다. 평면파괴에서 사면과 불연속면이 평행할 때에는 양호한 상태이며, 사면의 경사각이 불연속면의 경사각보다 10이상 클 때는 불안정한 상태가 된다. 전도파괴의 경우 전도의 성격상 불안정하거나 매우 불안정한 상태는 일어날 수 없으며, 또한 갑작스런 전도파괴도 극히

드물고 전도된 사면도 그대로 유지되는 경우가 많다.

F_4 는 사면의 굴착방법에 따라 변하는 보정요소로 경험적으로 그 값은 다음과 같이 자연사면의 경우는 15점, Pre-Splitting은 10점, Smoth Blasting은 8점, 일반 발파나 기계적인 리핑의 경우는 0점, 그리고 잘못된 발파의 경우는 -8점의 값으로 고정된다. 결과적으로 이러한 보정계수를 고려한 SMR의 값은 식(2.50)으로 구할 수 있고, 이 값에 따른 등급은 표 2.17과 같다.

$$SMR = RMR_{slope} = RMR_{basic} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (2.50)$$

표 2.17. SMR에 의한 암반분류 등급표

등 급	I	II	III	IV	V
S M R	81~100	61~80	41~60	21~40	0~20
판 정	아주좋은	중 음	양 호	불 량	매우불량
안 정 성	아주안정	안 정	부분적 안정	불안정	매우불안
예 상 파괴	-	블록파괴	일부 불연속면 많은 썩기파괴	평면파괴 큰 썩기파괴	대규모 평면파괴 토사형 파괴
보강·보수	불필요	필요시 보강	규칙적 보강	본격적 보강	재 굴착

3. 사면평점법

암반분류법이 주로 암반의 성상에만 착안하여 평가하는 반면, 사면평점법은 사면의 안정에 관여되는 것으로 생각되는 암반 이외의 모든 요인(지형, 식생, 지하수 등) 까지도 고려하여 사면의 안정성을 점수로 평가하는 방법으로 사면평점법 중 평가항목에는 암반분류를 포함한 것도 있으나, 절취구배의 결정 등에는 별로 쓰이지 않으며 자연사면 등에서 사면의 안정성을 판정하기 위해 이용하는 것이 일반적이다.

사면평점법으로는 Duncan(1969)이 사면의 시공 장소 우선순위를 설정하기 위한 목적으로 고안한 SSR의 사면안정도 평점시스템이 이용되고 있고, 이 방법은 사면의 높이, 길이, 노건폭 및 교통량 등의 10가지 평가항목에 대한 종합평점으로 부터 암반사면의 낙석 또는 파괴가능성을 평가하는 방법이며, 이밖에도 많은 방법이 고안되고 있다.

제3장 신뢰성이론에 의한 사면의 안정성 평가방법

3.1 신뢰성해석과 설계방법

3.1.1 신뢰성해석 이론

구조물의 신뢰성이란 내용기간 동안 설계 목적상의 기능 및 안전도를 확보할 수 있는 능력으로 내용기간 동안 발생 가능한 모든 재하환경으로 인한 악조건으로부터 파괴되지 않고 안정성을 확보할 수 있는 확률로서 정의할 수 있다. 이는 공학적 문제에서 필연적으로 발생할 수밖에 없는 불확실성을 정량적으로 고려하며, 파손 가능성 즉, 한계상태의 파괴확률을 정량적으로 제시하고 있다.

신뢰성 해석방법은 크게 4가지의 방법으로 구분되어 있으며, 이중 Level I, II, III 방법은 가정된 구조단면에 대하여 신뢰성 해석 및 설계가 가능한 반면, Level IV 방법은 안정성의 검토와 비용의 효율적인 설계가 가능하고, 경제성이 주요한 이론적 척도가 되는 경제성이 고려된 신뢰성 설계에 적합한 방법이다.

신뢰성 해석 및 설계수준을 정리하면 표 3.1과 같이 된다. 표 3.1에서 보는 바와 같이 Level I의 신뢰성 설계법은 현재 사용되고 있는 하중-저항계수설계법 및 한계상태설계법 등과 같은 준확률적 시방서를 일컫는다. 외부하중의 값은 부분안전계수를 곱하여 증가시키고, 구조물의 저항강도는 부분안전계수로 나누어서 감소시킨다. 하중과 저항강도에 대한 부분안전계수들은 하중과 저항의 확률적 거동을 고려하여 모두 1.0 이상의 값을 부여한다.

Level I 신뢰성 설계법을 성공적으로 적용하기 위해서는 적절한 부분안전계수들을 산정하는 것이 매우 중요하다. 일단 부분안전계수들이 결정되고 나면 그 이후의 설계계산은 확정론적 방법과 동일하게 수행된다. 따라서 기존의 확정론적 설계에 통계적 기법과 구조신뢰성 방법에 의하여 확률적으로 유도된 부분안전계수들을 부분적으로 사용한다는 점이 Level I 신뢰성 설계법의 특징이라 할 수 있다. 이러한 Level I 시방서들은 통상적으로 보다 높은 수준의 신뢰성 설계와 근사적인 의미에서 등가적인 설계가 되도록 상위 Level 신뢰성 설계와의 차이를 최소화 하는 최적화기법에 의해 보정할 수 있다.

다음으로 Level II 신뢰성 설계법은 Level I의 방법을 현실적으로 개선한 방법

표 3.1 구조물의 신뢰성 해석 및 설계방법

구 분	해석 및 설계
<p>Level I (하중-저항 계수법)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 구조물이 한계상태를 넘는 확률이 허용치 이하가 되도록 각 변수의 변동계수를 고려한 특성치와 안전율에 따라 안정성을 검토함. - 치명적인 위험성을 가진 구조물을 설계할 위험을 감소시키는 것이 가능한 설계방법으로 이미 각종 설계 Code로써 도입되어 있는 방법임. - 국제표준화기구(ISO)에 제정된 구조물의 설계법의 기본으로서 Level I의 설계법이 확립되어 있음.
<p>Level II (2차모멘트법)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 구조물의 확률분포를 데이터 통계분석에 기초하여 적절한 분포로 가정한 후, 저항 및 하중의 평균치와 표준편차로부터 구해지는 안정성 지표인 신뢰성지수를 산정 및 검토함.
<p>Level III (전확률분포법)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 구조물의 파손에 관계된 모든 확률변수들의 평균과 분산 및 결합 확률밀도함수를 이용하여 파괴확률을 정확하게 산정하는 방법. - 일반적으로 파괴확률을 구하기 위해서는 파괴영역에 대한 결합 확률밀도함수의 적분이 필요하나 이는 수치적으로 산정하기가 매우 어려움으로 시뮬레이션 기법이 많이 사용됨.
<p>Level IV (총 기대비용 최소화법)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Level I~III 방법에 의한 구조물의 파괴확률과 구조물의 파괴시 발생하는 비용을 고려하여 구조물의 중요도에 따른 성능기준 설계가 가능함. - 일반적으로 Level IV 방법은 파괴확률을 일반 설계조건 이외에 추가적인 제약조건으로 고려하고, 공사비용을 최소화하는 설계를 유도하는 방법으로 알려져 있음. - 최근에는 공용 중 성능저하 및 하중의 발생확률을 고려한 파괴확률을 구하고, 파괴 발생시에 소요되는 기대비용에 따른 총 생애주기비용을 최소화하는 최적설계가 이루어지고 있음.

이라 할 수 있다. Level I의 고전적 신뢰성이론은 확률변수의 확률분포를 구하여 수치적으로 구조물의 파괴확률을 산정하는 방법이다. 이러한 파괴확률의 계산은 너무 복잡하고 실제 구조물의 설계에서는 변수의 확률분포의 파라미터들을 알 수 없는 경우가 대부분이라 적용이 불가능하기 때문에 엄격한 확률이론을 개선하여 발전된 것이 Level II의 신뢰성 설계이론이다.

Level II의 신뢰성 설계법은 확률변수의 통계량 중 분포형태인 평균(1차모멘트)과 분산(2차모멘트)을 사용하여 파괴확률의 간접지표인 신뢰도지수를 근사적으로 산정하는 방법으로서 일명 2차모멘트법이라고도 하며, 변수들의 확률밀도함수를 직접적으로 사용하지 않고도 각 변수들의 불확실성을 고려할 수 있는 방법으로 Level II의 신뢰성 설계법은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데 첫째는 신뢰성함수를 전개할 때 확률변수의 평균치를 고려하는 MFOSM(Mean First Order Second Moment)방법과 둘째는 파괴면상의 설계점을 고려하는 AFOSM(Advanced First Order Second Moment)방법이 있다.

Level III의 신뢰성 설계법은 결합밀도함수를 모사하여 파괴확률을 추정한다. 모든 하중과 저항인자들이 각각의 서로 다른 밀도함수를 갖는다고 가정하며 파괴확률의 계산에 정규분포의 가정이 들어가지 않는다. 따라서 무작위로 변동하는 하중과 저항인들의 불확실성을 모사하기 위하여 일반적으로 MCS(Monte Carlo Simulation)방법을 사용한다. 확률적 개념에 의한 구조안전성의 척도인 구조물의 신뢰성(P_f)은 파괴확률(P_f)과 보유확률($1 - P_f$)의 관계에 있으며, Level III의 신뢰성 설계법에서는 구조물의 파괴확률(P_f)을 난수발생절차를 이용한 MCS에 의한 신뢰성해석으로 구할 수 있다.

그러나 MCS의 단점은 분포에서 자료를 추출하여 표본 집단을 만들 때, 임의 추출이기 때문에 자료수가 적으면 한쪽으로 치우칠 우려가 있을 뿐 아니라 분포에서 고르게 자료를 추출하려면 추출 개수가 상당히 많으므로 계산량이 많아진다. 이와 같이 MCS에 의한 신뢰성해석에 있어서의 계산시간이 많이 소요되는 단점을 보완하기 위한 방법으로서 도함수의 미분 없이 계산시간도 단축하면서 정도를 높일 수 있는 근사적 통계수법인 점추정법의 신뢰성이론이 Rosenblueth(1975)에 의해 제안되었다.

Level IV방법은 총기대비용 최소화방법으로 불확실한 상황에서의 시공과 파괴시의 복구와 유지관리 등의 기대비용 및 이익에 관한 경제성 분석 또는 사회·경제성 원리를 이용한 최적화 기법이다. 이 방법에서 기대 생애주기비용을 최소화하기 위한 비용함수는 안전에 가장 지배적인 구조성능에 대한 파괴기대비용과 초기비용

에 국한하여 목적함수로 정식화하여 사용할 수 있다. 구조물의 비용·효율적인 최적 설계란 안전성을 만족하면서 구조 수명 간 최소비용을 도모해야 한다.

따라서, 구조물의 최적신뢰성 해석 및 성능개선을 위해서는 안전성과 경제성이 균형화된 실용적이고 합리적인 접근방법이 필요하다. 이는 구조물의 여러 가지 손상과 붕괴에 따른 직·간접 손상비용의 정량화를 통한 총기대비용 최소화 개념에 의해서 가능하다. 총기대비용 최소화 원칙에 의한 방법이 다른 신뢰성이론과의 가장 차별되는 점은 해석방법에 있어 파괴비용의 고려 여부이다. 이러한 파괴비용이 고려되는 경우는 대표적으로 Frangopol(1997)의 연구결과에서 찾아 볼 수 있으며, 이외에도 Ang(1998) 및 임종권(1999)의 연구에서도 찾아 볼 수 있다. 또한 총기대비용 최소화 원칙에 의한 방법은 최적설계 및 성능개선을 위한 보수·보강 수준결정의 최적 성능설계 및 성능개선에 대한 의사결정방법을 제시할 수 있다.

3.1.2 하중-저항계수 설계법

현재 미국에서 사용되고 있는 새로운 설계방법인 하중-저항계수설계법(LRFD)은 지난 1986년에 미국의 AISC에서 채택한 새로운 설계법으로 지난 1980년대 초 이후로 유럽이나 캐나다 등에서 발전된 한계상태 설계법(LSD)과 유사하며 구조신뢰성방법에 기초한 일종의 확률론적 한계상태설계법이다.

LRFD나 LSD 모두 종래의 허용응력 중심의 허용응력설계법과는 달리 구조부재나 상세요소의 극한내력강도 또는 한계내력에 기초를 두고 극한 또는 한계하중에 의한 부재력이 부재의 극한 또는 한계내력을 초과하지 않도록 하는 설계법이다. 따라서 하중-저항계수설계법은 RC구조물의 강도설계법이나 종래의 소성설계법과 설계기준의 형식면에서는 유사하다. 그러나 하중-저항계수설계법은 이들과는 달리 하중 및 저항관련 안전모수 즉, 계수안전율의 결정을 종래의 설계법과 같이 저항관련 모든 불확실성을 확률·통계적으로 처리하는 구조신뢰성이론에 기초하여 보정함으로써 구조물의 일관성 있는 적정수준의 안전율 즉, 신뢰도를 갖도록 하는 보다 합리적인 설계법이다.

설계시방서의 형식을 크게 구분하면 단일안전율형과 다중안전율형으로 대별할 수 있는데 이때, 단일안전율형이란 종래의 허용응력설계에서와 같이 파괴모드별로 하나의 허용응력 또는 종전의 AISC의 소성설계에서와 같이 총 초과하중계수를 사

용하는 형식을 말하며 반면, 다중안전율형은 일명 부분안전율형이라고도 하여 현행 강도설계법이나 하중-저항계수설계법의 형식이 모두 여기에 속한다. 최근 대다수의 나라에서 확률이론에 기초한 부분안전율 한계상태 시방서를 채택하는 이유는 단일 안전율로는 적용대상 구조물의 수없이 많고 복잡한 구조형식 및 형상, 시공재료 등을 수반하는 설계상황이나 다양한 하중의 종류 및 조건을 모두 고려하면서 동시에 일정한 수준의 안전율을 도저히 확보할 수 없기 때문이다.

거동중심의 한계상태과피 모드별로 하중 및 저항에 대하여 부분안전율을 사용하는 한계상태설계시방서는 미국의 AISC시방서와 같이 전체 저항에 대하여 하나의 안전계수를 사용하는 소위, LRFD형 시방서와 유럽각국에서 보편적으로 채택하고 있는 형식인 여러 개의 부분저항계수를 사용하는 한계상태 설계형 시방서로 크게 대별할 수 있다. 이와 같은 LRFD나 LSD형 시방서에서 여러 가지 다양한 저항 및 하중계수를 사용하는 이유는 실제 부재강도 및 단면성질의 설계치와 차이, 제작 및 시공과정에서 일어나는 오차나 각종 불확실량 그리고 구조 수명간 실제 작용하는 초과 또는 극치하중들의 설계하중과의 차이, 구조해석상의 부정확성과 불확실성 등을 합리적으로 고려하고 일관성이 있는 안전수준을 제공하기 위한 것이다.

따라서 현대적인 설계시방서인 LRFD나 LSD형 시방서의 부분안전계수인 저항 및 하중계수는 그 시방서를 적용하여 설계되는 대상구조물들의 강도 및 하중관련 모든 통계적인 자료의 데이터베이스에 기초를 둔 통계적 해석과 실용적인 2차모멘트 구조신뢰성이론에 바탕을 둔 보정기법에 의하여 선정된다.

하중-저항계수설계법의 일반적인 설계형식은 $\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i$ 로 표현할 수 있으며, 여기서 Q_i 는 사하중 및 각종 활하중, γ_i 는 하중계수, R_n 는 공칭저항, ϕ 는 저항계수를 나타낸다. 설계형식의 우측 항은 가정된 하중조합의 작용 하에 구조해석에 의해 계산된 하중계수를 곱한 설계하중의 작용력을 나타내고, 좌측 항은 선정된 부재가 제공하는 한계구조내력을 나타낸다. 하중-저항계수설계법에 의해 구조물을 설계하는 설계자는 구조물의 거동에 따라 고려해야 하는 모든 한계상태에 대해 기본식이 만족하가를 검사해야 한다.

즉, 모든 가능한 설계하중의 조합작용으로 인한 극한 또는 하중계수를 곱한 작용외력보다 구조부재의 실제 설계강도 즉, 구조저항이 최소한 같거나 커야 한다는 것이다.

이때 저항계수 ϕ 와 하중계수 γ_i 는 실강도, 저항과 작용력의 불확실성, 부정확성

을 반영하는 부분안전계수임을 알 수 있다. 공칭저항 R_n 은 AISC 시방서에 주어진 공식에 의해 계산되므로 실저항은 공칭저항보다 항상 적을 가능성이 있기 때문에 저항계수 ϕ 는 1보다 작기 마련이다.

또한, 시방서에 규정된 공칭하중이 구조수명간의 실효대작용외력에 벗어날 가능성이 크기 때문에 하중계수 γ_i 도, 이를 반영하는 계수이다. 하중계수는 하중조합에서 주하중의 하중계수에 대해서는 과하중계수로 1보다 큰 값이 되지만 주하중과 함께 작용 가능한 부하중인 상시순간하중인 경우에는 1보다 작은 값을 갖는다.

3.1.3 2차모멘트법

1. MFOSM 방법

확률적인 개념에 의한 구조안전성의 척도인 구조물의 신뢰성(P_f)은 파괴확률(P_f)과 보유확률의 관계($P_f = 1 - P_f$)를 갖는다. 구조물에 대한 작용외력(S)과 저항(R)이 Random변수인 경우, 구조안전성 역시 Random변수인 안전여유 $Z = R - S$ 로 표현되며, $Z \leq 0$ 일 때 안전성을 상실한 파손 또는 파괴상태가 된다. 즉, 구조부재는 저항(R)이 작용외력(S)보다 작을 때 파괴된다고 할 수 있다.

따라서, 구조부재의 파괴확률(P_f)은 다음 식(3.1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_f = P[Z = g(R, S) \leq 0] = P(R \leq S) = P(R - S \leq 0) \tag{3.1}$$

여기서, $g(\cdot)$ 을 한계상태함수라고 하며, 파괴확률은 한계상태의 초과확률과 동일하기 때문에 파괴확률 P_f 를 일명 한계상태확률이라고도 일컫는다.

식(3.1)에서 파괴확률은 개념적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = P(R - S \leq 0) = \int \int_D f_{RS}(r, s) dr ds \tag{3.2}$$

여기서, $f_{RS}(r, s)$ 는 R, S 의 결합밀도함수, D 는 파괴영역을 나타낸다.

R 과 S 가 독립일 때, 즉 $f_{RS}(r, s) = f_R(r)f_S(s)$ 일 때 식(3.2)은 다음과 같이 되며, 파괴확률을 도해적으로 표현하면 그림 3.1과 같다.

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(x)f_S(x)dx \tag{3.3}$$

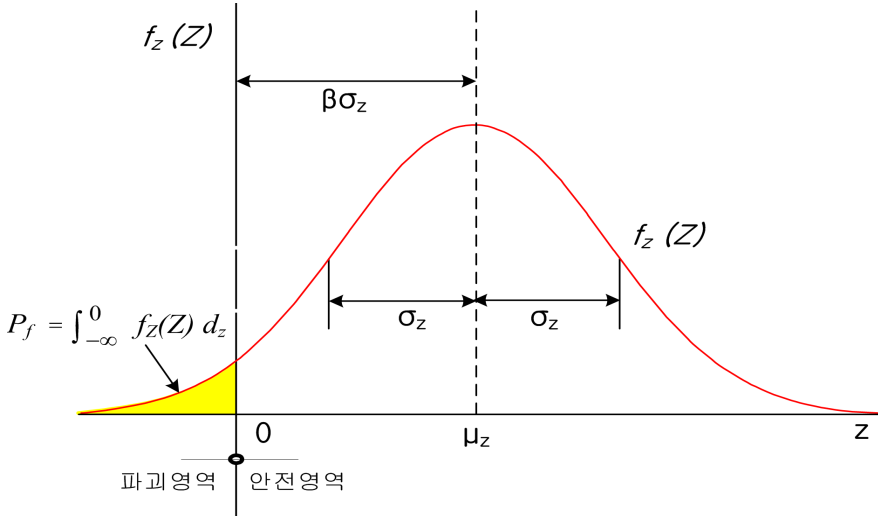


그림 3.1 파괴확률 p_f 의 분포

저항 R 과 작용외력 S 가 기본확률변수 X_1, X_2, \dots, X_n 의 비선형함수이면 한계상태함수 $g(R, S)$ 가 비선형으로 되어 이론적으로는 식 3.2에 의해 P_f 를 구할 수 있지만 실제의 해석을 수행하는 데는 많은 어려움이 따르게 되며, 한계상태함수가 선형으로 표현되면 한계상태함수의 통계적 1, 2차 모멘트인 평균과 분산을 이용하여 다음과 같이 파괴확률 P_f 를 실용적으로 구할 수 있다. 이 방법은 한계상태함수의 평균점에서 전개한 Taylor급수의 1차 항을 이용한다고 해서 MFOSM방법이라고 한다.

R 과 S 가 각각 평균 μ_R 과 μ_S 분산 σ_R^2 과 σ_S^2 을 갖는 Gaussian Random 변수라고 하면, 안전여유 $Z = R - S$ 는 다음과 같이 평균과 분산을 갖는다.

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \tag{3.4a}$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \quad (3.4b)$$

따라서, 식(3.1)은 다음과 같이 된다.

$$P_f = P(R - S \leq 0) = P(Z \leq 0) = \phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (3.5)$$

여기서 $\phi(\cdot)$ 는 표준정규분포함수(평균=0, 분산=1)를 나타낸다.

식(3.4)을 식(3.5)에 대입하면 파괴확률은 다음과 같이 된다.

$$P_f = \frac{-(\mu_R - \mu_S)}{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}} = \phi(-\beta) \quad (3.6)$$

여기서 β 는 다음과 같이 정의되며 신뢰성지수라고 일컫는다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3.7)$$

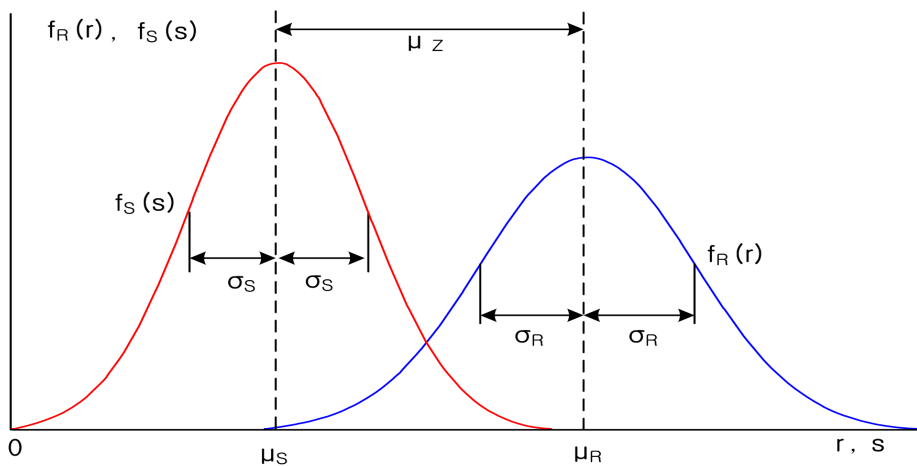


그림 3.2 S와 R의 분포

신뢰성지수(β)는 확률적 안전성을 표현하는데 있어서 전술한 파괴확률을 대신하여 보편적으로 사용되고 있는 개념이다. 그림 3.2는 이와 같은 신뢰성지수(β)의 개념을 도해적으로 나타냈다.

2. AFOSM 방법

기본변수 X_i 가 비정규분포인 경우에는 결합밀도함수를 구하기가 어렵게 되고, X_i 의 엄밀한 확률분포도 알 수 없는 경우가 많다. 또한 X_i 의 확률분포를 안다고 하더라도 통계적 자료가 부족하여 모수의 결정이 어려운 경우도 많다. 그러므로 기본변수 X_i 의 확률분포 대신에 1, 2차 모멘트인 평균과 분산을 알면, 기본변수를 Gaussian 분포로 가정하여 파괴확률과 등가의 개념을 가진 신뢰성지수($\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$)를 사용하여 상대적인 구조신뢰성을 구하는 방법을 2차모멘트법이라고 한다.

AFOSM방법에서는 한계상태함수의 선형전개가 평균점에서 이루어지는 것이 아니라 파괴면 즉, $g(\cdot)=0$ 인 면상의 최확파괴면에서 이루어지게 된다. 따라서 실제 비선형 한계상태면에 보다 근접한 파괴확률을 구할 수 있을 뿐 아니라 한계상태함수의 표현방정식에 따라 해가 달라지는 MFOSM의 문제점을 극복할 수 있게 된다.

AFOSM방법은 Hasofer-Lind가 이와 같은 MFOSM방법의 문제점을 극복하고, Rackwitz-Fiessler가 등가정규분포 변환기법을 도입함으로써 비정규분포를 갖는 기본변수들의 비선형함수로 된 일반적인 한계상태함수까지도 정확하고 일관성 있는 해를 구할 수 있는 실용적인 신뢰성 해석방법으로 발전하게 되었다.

(1) Hasofer-Lind방법

Hasofer-Lind(1974)가 제안한 소위 AFOSM방법의 기본개념은 기본변수 $X=(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ 의 비선형함수인 한계상태함수의 파괴면 $g(X)=0$ 을 무상관정규화 표준변수 $U=(U_1, U_2, U_3, \dots, U_n)^T$ 공간으로 변환시킨 후, 표준변수의 함수로 표현된 $g(U)=0$ 인 한계상태표면까지의 원점으로부터의 최소거리를 신뢰성지수(β)로 정의한 것이다.

그림 3.3에서는 두 개의 변수에 대한 신뢰성지수(β)를 도해적으로 보여 주고 있다.

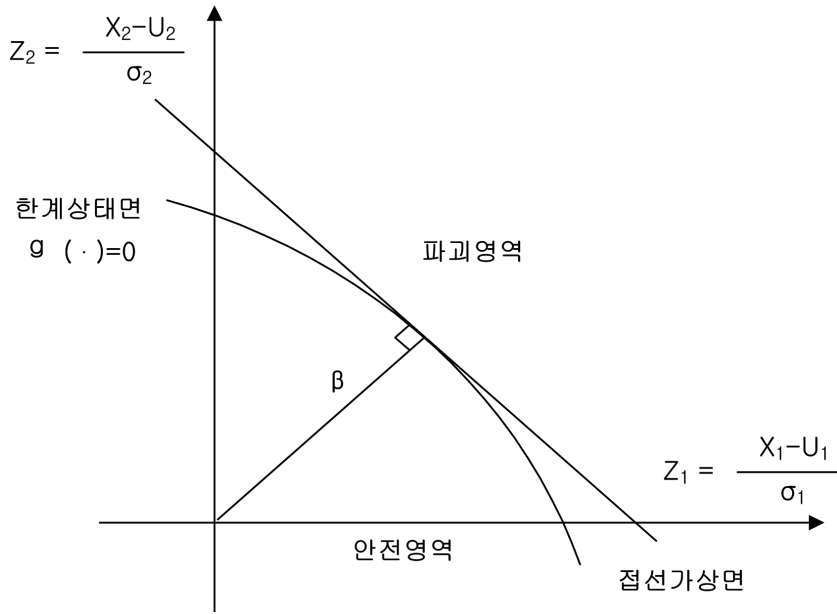


그림 3.3 표준화된 공간에서의 신뢰성지수 β

이때, U 공간으로의 변환을 표시하면 다음과 같다.

$$U = T\{X - E(X)\} \quad (3.8)$$

$$E(U) = 0 \quad (3.9)$$

$$C_U = TC_X T^T = I \quad (3.10)$$

여기서, $E(X)$ 는 X 의 기대치, $E(U)$ 는 무상관 표준화변수의 기대치, T 는 변환 매트릭스, C_U 는 U 의 공분산 매트릭스, C_X 는 X 의 공분산 매트릭스 그리고 I 는 단위 매트릭스를 나타낸다.

우선, 기본변수 X_i 사이에 상관계수가 없을 경우, 표준화변량 U_i 는 단순히 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (3.11)$$

여기서, U_i 의 평균(μ_{ui})은 0, 표준편차(σ_{ui})는 1을 나타낸다.

Hasofer-Lind의 신뢰성지수 β , 즉, 표준화공간 안에서 한계상태함수 $g(U)=0$ 인 파괴면까지 최소거리는 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\beta = \min(U^T U)^{1/2} \quad (3.12)$$

또는 등가적으로 기본변수 공간에서 다음 식(3.13)과 같이 표현된다.

$$\beta = [(x - E(X))^T C_X^{-1} (x - E(X))]^{1/2} \quad (3.13)$$

Shinozuka는 AFOSM 신뢰성해석에 의한 신뢰성지수 β 의 식(3.12)는 근본적으로 최적화 문제에 해당되며, Lagrange 승계수법에 의해 등가적으로 유도할 수 있고, β 에 해당하는 설계점은 기본변수들을 정규변량으로 가정하였을 경우 최확파괴점의 위치가 됨을 보여주었다.

따라서, 최확파괴점에서 한계상태방정식의 단위경사는 (-)방향이므로 각 좌표축에 대한 방향여현은 다음과 같다.

$$\alpha_i = - \frac{\partial g / \partial U_i}{[\sum (\partial g / \partial U_i)^2]^{(1/2)}} \quad (3.14)$$

$$U_i^* = -\alpha_i \beta \quad (3.15)$$

$$g(U_1^*, U_2^*, U_3^*, \dots, U_n^*)=0 \quad (3.16)$$

대개의 경우 실용적인 계산을 위해서는 U공간 대신에 X공간에서 반복하여 시행하면 다음과 같이 된다.

$$X_i^* = \mu x_i + U_i^* \sigma x_i = \mu x_i + \alpha_i \beta \sigma x_i \quad (3.17)$$

$$\alpha_i = - \frac{(\partial g / \partial X_i) a x_i}{[\sum (\partial g / \partial X_i)^2 a^2 x_i]^{(1/2)}} \quad (3.18)$$

$$g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*)=0 \quad (3.19)$$

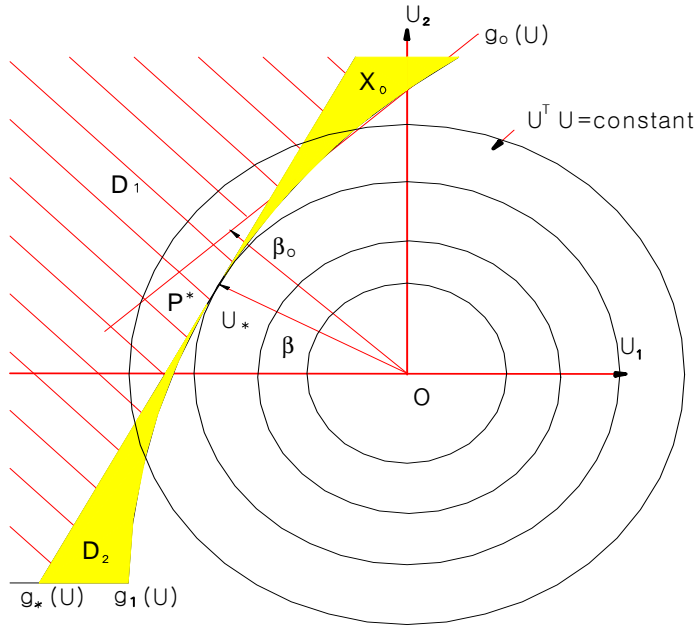


그림 3.4 U의 성분들이 무상관일 때의 설계점 결정

(2) Rackwitz-Fiessler 방법

Hasofer-Lind의 AFOSM 방법은 변수 X_i 가 정규변량이고 함수 $g(\cdot)$ 가 선형인 경우에는 정확한 해를 구할 수 있지만, X_i 가 비정규변량이거나 $g(\cdot)$ 의 비선형이 심한 경우에는 근사해 조차도 구할 수 없는 경우가 있을 수 있다.

Rackwitz-Fiessler 방법은 분포를 알고 있거나 근사적으로 가정할 수 있는 경우에 비정규분포 X_i 를 등가의 정규분포로 변환시켜 Hasofer-Lind의 AFOSM 방법을 사용할 수 있도록 하는 등가정규분포변환법을 발표하였다.

Rackwitz-Fiessler의 등가정규분포변환법은 식(3.20)에서 식(3.21)을 사용하기 이전에 최확과괴점 X_i 에서의 비정규분포 $F_{xi}(X_i^*)$ 값과 확률밀도함수 $f_{xi}(X_i^*)$ 값이 표준정규확률밀도함수 $\phi(U_i^*)$ 값과 같게 되도록 비정규변수를 등가의 정규분포로 변환하여 평균(μ_{xi}^N)과 표준편차(σ_{xi}^N)를 구하도록 하는데 기초개념을 두고 있다. 즉, 한계상태함수가 비정규함수인 경우 평균과 표준편차는 다음 식으로 나타나게 된다.

$$\mu_{\xi}^N = X_i^* - \phi^{-1}[F_{\xi}(X_i^*)]\sigma_{\xi}^N \quad (3.20)$$

$$\sigma_{\xi}^N = \frac{\phi[\phi^{-1}[F_{\xi}(X_i^*)]]}{f_{\xi}(X_i^*)} \quad (3.21)$$

(3) AFOSM 반복시행 알고리즘

전술한 방법을 이용한 신뢰성 해석방법을 요약하면 다음과 같다.

- [1단계] 고려하고자 하는 한계상태함수를 정한다.
- [2단계] 신뢰성지수 β 를 가정한다.
- [3단계] 모든 i 에 대한 초기검사치 $X_i^* = X_i$ 를 설정한다.
- [4단계] 위의 식 3.20과 식 3.21에 따라 비정규변수들에 대하여 등가의 정규분포 평균(μ_{xi}^N)과 표준편차(σ_{xi}^N)를 계산한다.
- [5단계] 추정점 X_i^* 에서 편미분 $\partial g / \partial X_i$ 를 계산한다.
- [6단계] 단위구배벡터 α_i 를 계산한다.

$$\alpha_i = \frac{(\partial g / \partial X_i) \sigma_{xi}^N}{[\sum (\partial g / \partial X_i) \sigma_{xi}^N]^2}^{(1/2)}$$

- [7단계] X_i^* 의 새로운 값을 계산한다.

$$X_i^* = \mu_{\xi}^N - \alpha_i \beta \sigma_{\xi}^N$$

그리고 α_i 가 수렴할 때 까지 단계 4~7을 반복하여 시행한다.

- [8단계] 고려하는 $g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*)=0$ 에 대하여 β 를 계산한다.

그리고 연속적인 반복시행에 의해 β 의 차이가 허용한계 내에 들 때까지 단계 4~8을 반복 시행한다.

확률적 최적화 규준의 안전모수 ϕ , γ_i 를 보정하는데 사용되는 AFOSM 설계의 알고리즘은 해석시와는 반대로 한다.

- [1단계] 고려하고자 하는 한계상태를 정한다.
- [2단계] 목표신뢰성지수 β_0 를 가정한다.
- [3단계] 모든 i 에 대해 초기검사치 X_i^* 를 결정한다.
- [4단계] 위의 식(3.20)과 식(3.21)에 따라 비정규변수들에 대하여 등가의 정규분포 평균(μ_{xi}^N)과 표준편차(σ_{xi}^N)를 계산한다.

[5단계] 추정점 X_i^* 에서 편미분 $\partial g / \partial X_i$ 를 계산한다.

[6단계] 단위구배벡터 a_i 를 계산한다.

$$a_i = \frac{(\partial g / \partial X_i) \sigma_{x_i}^N}{[\sum (\partial g / \partial X_j) \sigma_{x_j}^N]^2}^{(1/2)}$$

[7단계] X_i^* 의 새로운 값을 계산한다.

$$X_i^* = \mu_\xi^N - a_i \beta \sigma_\xi^N$$

그리고 a_i 가 수렴할 때 까지 단계 4~7을 반복하여 시행한다.

[8단계] 고려하는 $g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*)=0$ 에 대하여 $\gamma_i = X_i^* / X_i$ 로부터 ϕ 및 γ_i 를 계산 한다.

3.1.4 전 확률분포법(점추정법)

2차모멘트법에 의한 Level II 신뢰성 해석방법은 도함수의 미분계산이 필요하다는 단점이 있으며, MCS에 의한 Level III 신뢰성 해석방법도 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 이러한 도함수 미분계산 없이 시간도 단축하면서 결과의 정도를 높일 수 있는 근사적 통계수법인 점추정법의 신뢰성이론이 Rosenblueth (1975)에 의해 제안된 Level III 방법이다.

U공간내의 기본확률변수 X 의 확률밀도함수를 $f_X(x)$ 로 하고, $f_X(x)$ 와 3차모멘트까지 같다고 가정하면, 점추정법의 집중분포확률밀도함수 $P_X(x)$ 는 식(3.22)와 같고, 확률밀도함수 $f_X(x)$ 에 대한 모멘트 즉, 평균과 분산은 식(3.23)과 같다.

$$P_X(x) = P_+ \delta(x - x_+) + P_- \delta(x - x_-) \quad (3.22)$$

여기서, P_+ , P_- 는 정수, x_+ , x_- 는 X 축 상의 어느 특정의 2점, δ 는 Dirac의 델타이다.

$$P_+ P_- = 1 \quad (3.23a)$$

$$P_+ x_+ + P_- x_- = \mu \quad (3.23b)$$

$$P_+ (x_+ - \mu)^2 + P_- (x_- - \mu)^2 = \sigma^2 \quad (3.23c)$$

$$P_+(x_+ - \mu)^3 + P_-(x_- - \mu)^3 = \nu\sigma^3 \quad (3.23d)$$

식(3.23d)의 $\nu\sigma^3$ 는 x 의 3차모멘트이고, ν 는 2차모멘트 σ^2 을 사용하여 표현할 때 사용하는 외곡도계수라 부른다.

그리고 그림 3.5와 같이 정규확률분포가 좌·우 대칭이 되지 않은 경우는 $\nu=0$ 이 되는데, 식(3.23)을 P_+ , P_- , x_+ , x_- 에 관한 연립방정식으로 하여 실수해를 구하면 다음과 같다.

$$P_+ = \frac{1}{2} \left[1 \mp \sqrt{1 - \frac{1}{1 + (1/2)^2}} \right] \quad (3.24a)$$

$$P_- = 1 - P_+ \quad (3.24b)$$

$$x_{\pm} = \mu \pm \sigma \sqrt{P_{\mp} / P_{\pm}} \quad (3.24c)$$

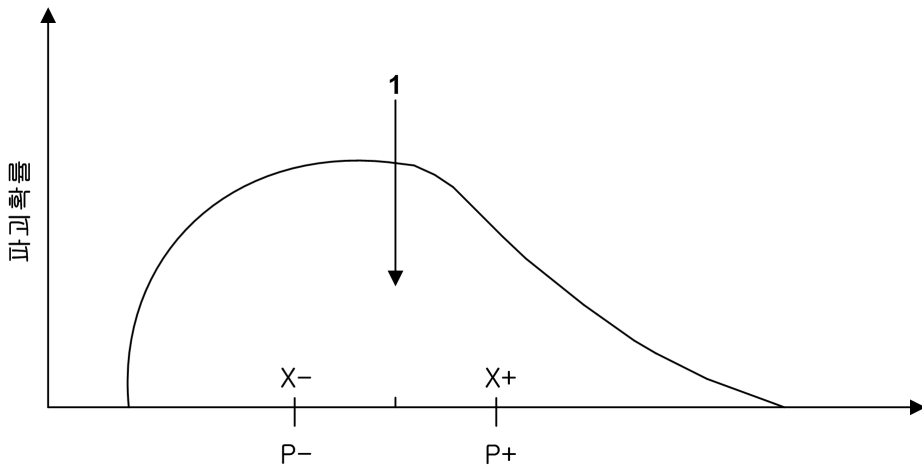


그림 3.5 두 개의 발생확률로 일반화

식(3.24a)의 근호 앞의 \mp 는 $\nu > 0$ 일 때 (-), $\nu < 0$ 일 때는 (+)가 된다. 이와 같은 확률밀도함수 $f_X(x)$ 와 집중분포확률밀도함수 $P_X(x)$ 를 사용하면 Rackwitz-Fieessler가 제안한 2차모멘트법에서와 같이 평균과 표준편차를 구할 수 있으며, 점추정법에 의한 평균과 분산은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\text{평균 : } E[u] = \int_{\Omega} u(x)f_X(x)dx \quad (3.25a)$$

$$\simeq P_+u_+ + P_-u_-$$

$$\text{분산 : } V[u] = E[\{u - E(u)\}^2] \quad (3.25b)$$

$$\simeq E[u^2] - E[u]^2$$

여기서, $u_+ = u(x_+)$, $u_- = u(x_-)$ 이다.

따라서, 식 3.25의 평균과 분산은 2차모멘트법의 $u(x)$ 에 대한 도함수의 계산이 필요하지 않다는 것을 알 수 있다. 그림 3.6과 같이 기본확률변수 X 가 두 변수 즉, $u = u(X_1, X_2)$ 인 경우, X_1, X_2 의 결합확률밀도함수 $f_{X_1, X_2}(x_1, x_2)$ 와 집중분포형 밀도함수를 $P_{X_1, X_2}(x_1, x_2)$ 로 하면, 기본확률변수 X_1, X_2 는 다음과 같다.

$$X_1 = \mu_1 \pm \sigma_1 \quad (3.26a)$$

$$X_2 = \mu_2 \pm \sigma_2 \quad (3.26b)$$

위 식(3.26)의 $\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2$ 는 기본확률변수 X_1 과 X_2 의 평균과 표준편차이다. 따라서 두 변수 $u = u(X_1, X_2)$ 의 평균은 다음과 같이 근사적으로 구해진다.

$$E[u] \simeq P_{++}u_{++} + P_{\pm}u_{\pm} + P_{\mp}u_{\mp} + P_{--}u_{--} \quad (3.27)$$

$$\text{여기서, } P_{++} = \frac{1}{4}(1 + \rho) = P_{--},$$

$$P_{\pm} = \frac{1}{4}(1 + \rho) = P_{\mp}$$

식(3.27)의 ρ 는 X_1 과 X_2 의 상관계수이고, 두 변수에 대한 분산은 식 3.25b로 구해진다. 또 세 변수의 경우, 즉 $u = u(X_1, X_2, X_3)$ 에 대한 점추정법의 평균은 다음과 같이 된다.

$$E[u] \simeq P_{+++}u_{+++} + P_{+\pm}u_{+\pm} + P_{-\mp}u_{-\mp} + P_{---}u_{---} \quad (3.28)$$

$$\text{여기서, } P_{+\pm} = P_{-\mp} = \frac{1}{2^3}(1 + \rho_{12} - \rho_{23} - \rho_{31})$$

$$P_{+++} = P_{---} = \frac{1}{2^3}(1 + \rho_{12} + \rho_{23} + \rho_{31})$$

$$P_{\pm+} = P_{\mp-} = \frac{1}{2^3}(1 - \rho_{12} - \rho_{23} + \rho_{31})$$

$$P_{\pm-} = P_{\mp+} = \frac{1}{2^3}(1 - \rho_{12} + \rho_{23} - \rho_{31})$$

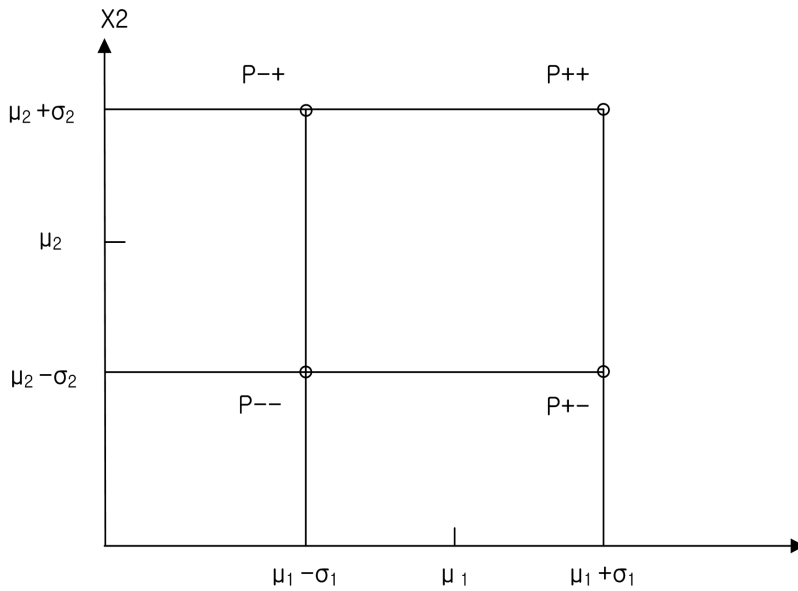


그림 3.6 두 변수의 점추정법

식(3.28)의 ρ_{ij} 는 랜덤변수 x_i 와 x_j 의 상관계수이다. ρ_{ij} 의 부호는 i 와 j 를 곱해서 얻을 수 있다. 예를 들면 만약 i 가 (-)이고, j 가 (+)이면 i 와 j 를 곱하면 음(-)의 부호를 가진다. n 개의 변수를 가진 문제에서 2^n 의 가지수와 $n(n-1)/2$ 개의 상관계수를 가진다.

따라서 결합확률밀도 함수는 여러 개의 기본확률밀도함수의 결합으로, 기본확률밀도함수의 수를 확장하면 사건이 발생할 경우의 수는 2^n 개가 되며 결합밀도함수에서 하나의 사건이 발생할 확률은 다음과 같이 된다.

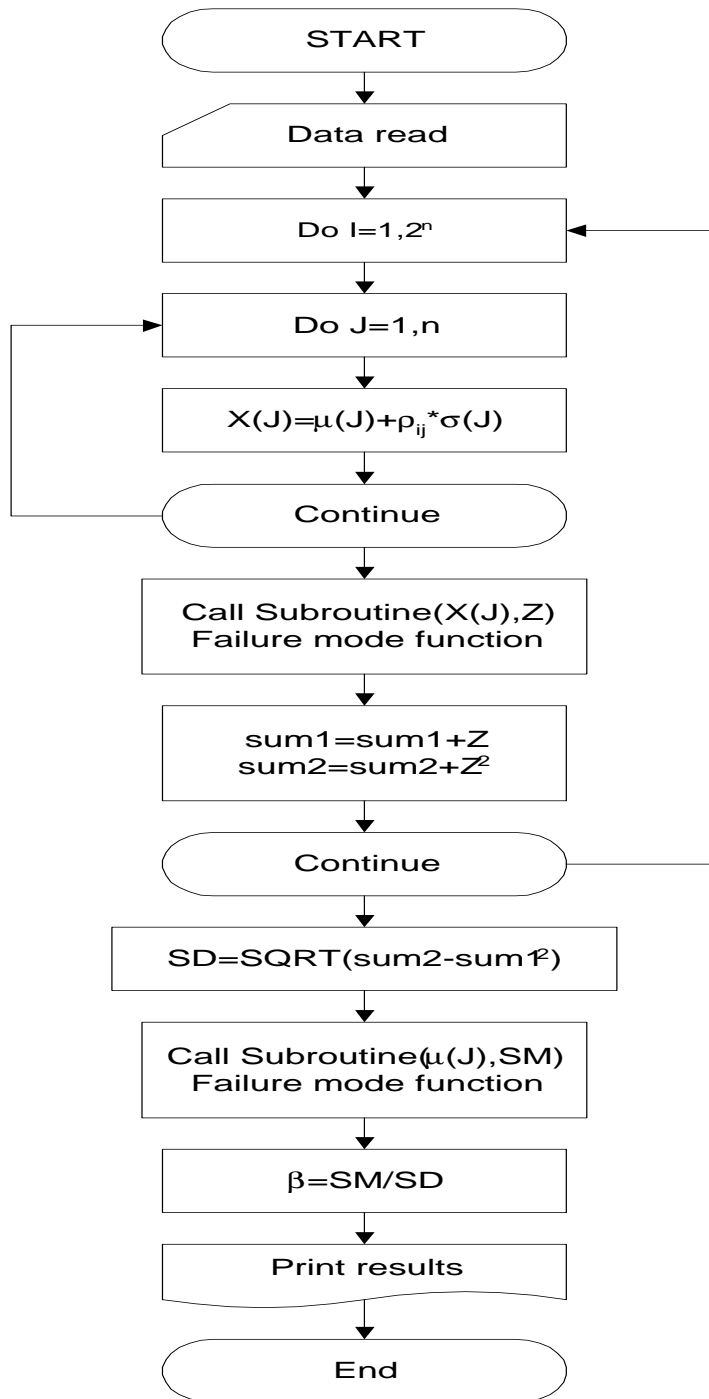


그림 3.7 점추정법에 의한 신뢰성 해석 흐름도

$$P = \frac{1}{2^n} (X_1 + X_2 + \dots + X_n) \quad (3.29)$$

여기서, $X_i = \mu_i \pm \sigma_i$ 이다.

따라서, 점추정법을 이용한 신뢰성 문제를 공식화 하면 식(3.30)으로 나타낼 수 있다.

$$Z = M_R - M_L \quad (3.30)$$

여기서, M_R 는 사면에 대한 저항요인, M_L 는 사면에 대한 하중요인이다.

위 식의 안전여유 ($Z = R - S$)의 평균과 분산은 식(3.31)과 식(3.32)에 의해 구할 수 있으며, 점추정법에 의한 신뢰성 해석 흐름도를 그림 3.7에 나타내었다.

$$\text{평균: } \mu_z = E(z) \quad (3.31)$$

$$\text{분산: } \sigma_z^2 = E(z^2) - \mu_z^2 \quad (3.32)$$

3.1.5 총기대비용 최소화법

1. 총기대비용 최소화의 원칙

신뢰성 해석방법 중 Level IV의 방법은 총기대비용 최소화의 원칙에 따라 불확실한 상황에서의 시공과 파괴시의 복구와 유지관리 등의 기대비용 및 이익에 관한 경제성 분석 또는 사회·경제성 원리를 이용한 최적화 기법이다. 이 방법에서 기대생애주기비용을 최소화하기 위한 비용함수는 안전에 가장 지배적인 구조성능에 대한 파괴기대비용과 초기비용에 국한하여 목적함수로 정식화하여 사용할 수 있으며, 총기대비용 최소화에 의한 최적신뢰성 설계모델은 다음의 식(3.33)과 같이 된다.

$$C_T = C_I + P_f C_F \Rightarrow \text{Min} \quad (3.33)$$

여기서, C_T 는 총기대비용, C_I 는 초기비용, C_F 는 파괴비용, P_f 는 구조성능의 파

과 확률이다.

구조물의 비용-효율적인 최적설계란 안전성을 만족하면서 구조수명간 최소비용을 도모해야 한다. 따라서 구조물의 최적신뢰성해석 및 성능개선을 위해서는 안전성과 경제성이 균형화된 실용적이고 합리적인 접근방법이 필요하다. 이는 구조물의 여러 가지 손상과 붕괴에 따른 직·간접 손상비용의 정량화를 통한 총기대비용 최소화 개념에 의해서 가능하다.

구조물의 신뢰성이론은 주로 저항강도와 작용하중의 불확정요인에 관한 실험 및 관측데이터에 기초한 확률모델을 채용하여 구조물의 안전성을 평가하고 있다. 그러나 안전성은 이러한 통계적으로 취급되는 불확실량으로만 결정될 수 없으며, 다른 여러 가지 불확실요인으로 구조물의 예상치 못한 거동과 설계과실 및 구조물의 파괴로 인한 사고 등 미지적 요인이 존재하게 된다.

총기대비용 최소화 원칙에 의한 신뢰성 해석에는 이러한 미지적요인을 고려한 신뢰성 모델이 적용되어야 하며, 이에 대한 신뢰성이론은 다음과 같이 된다. 구조물이 본래 소유하고 있는 저항강도를 R 로 할 때, 미지적 요인 U 로 인하여 실제강도가 R_U 로 되면 R_U 는 다음과 같이 된다.

$$R_U = R \times U \quad (3.34)$$

여기서, U 은 확률량이다.

이 때, R_U 의 확률밀도함수 $f_U(x)$ 는 다음과 같이 된다.

$$f_U(x) = p\delta(x - \psi) + (1 - p)\delta(x - 1) \quad (3.35)$$

여기서, $\delta(\cdot)$ 는 Dirac의 delta함수이다.

식(3.34)와 식(3.35)에서 규정한 확률모델은 미지적요인 U 로 인한 확률 p 가 발생하고, 이때의 강도 R 은 $(1 - \psi)R$ 만큼 저하하게 된다. 따라서 식(3.34)와 식(3.35)에 의해 실제 저항강도 R_U 의 확률밀도함수는 다음 식(3.36)과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{R_U}(x) = p \frac{1}{\psi} f_R\left(\frac{x}{\psi}\right) + (1-p)f_R(x) \quad (3.36)$$

여기서, $f_R(x)$ 는 R 의 확률밀도함수, ψ 는 강도저하율이다.

저항 R 과 하중 S 를 대수정규분포함수로 하면, 미지적 요인을 고려한 파괴확률 P_F^* 는 다음 식(3.37)과 같이 된다.

$$P_F^* = \text{prob}(R_U < S) = pP_{FU} + (1-p)P_{Fn} \quad (3.37)$$

$$\text{여기서, } P_{FU} = \Phi\left(-\beta_n - \frac{\ln\psi}{\sqrt{\ln\left((1+\Omega_R^2)(1+\Omega_S^2)\right)}}\right) \quad (3.38)$$

$$P_{Fn} = \Phi(-\beta_n) \quad (3.39)$$

P_{FU} 는 미지적 요인이 발생할 때의 파괴확률이며, P_{Fn} 은 계산상의 파괴확률, 즉 일반적인 신뢰성이론으로 계산되는 파괴확률이다.

2. 최적신뢰성 이론 및 설계기준

(1) 최적신뢰성 이론

불확실량을 확률 및 통계적으로 취급하는 설계법 중에서 총기대비용 최소화의 원칙을 이용한 최적신뢰성 이론은 구조물의 역학적 안정성과 사회적 경제성을 동시에 고려한 통계적 의사결정이론에 기초한 방법으로서, 가장 간단한 신뢰성 최적화 이론은 다음과 같이 된다.

$$C_T = C_I + P_f C_F = C_I + \Phi(-\beta) C_F \quad (3.40)$$

여기서, C_T 는 구조물의 건설비용, C_I 는 구조물의 초기 건설비용, C_F 는 구조물 파괴시의 손실비용, P_f 는 구조물의 파괴확률이다.

식(3.40)의 초기 건설비용 C_I 를 신뢰성지수 β 의 n 차 함수를 사용하면 다음과 같이 된다.

$$C_T = C_{IO} + (1 + k\beta^n)\{1 + \Phi(-\beta)\tau\} = Min \quad (3.41)$$

여기서, C_{IO} 는 $\beta=0$ 일때의 비용, k 는 $(\nu-1)/\beta^n$ (정규화비용증가비), τ 는 $C_F/C_I = C_F/C_{IO}(1+q(n'-1))$, ν 는 $C_B/C_o = \lambda(\beta_o) = 1+q(n_o-1)$, q 는 $1/[1+\alpha n_s\{(1/b)-1\}]$, P_f 는 $\Phi(-\beta)$, α 는 $n_o/n' = \text{중양안전율/공칭안전율}$, n_s 는 현행설계의 안전율이다.

이때, 식(3.41)의 ν 는 MFOSM방법 및 AFOSM방법의 중양안전율 n_o 의 함수이며 저항 및 하중효과의 평균-공칭비를 이용하면 n' 와 n_o 는 다음 식(3.42)와 식(3.43)과 같이 구해진다.

$$n_o = \frac{\bar{R}}{\bar{S}} = \frac{1 + \beta \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_s^2 + \beta^2 \Omega_R^2 \Omega_s^2}}{1 - \beta^2 \Omega_R^2} \quad (3.42)$$

$$n_o = \frac{\bar{R}}{\bar{S}} = \frac{\eta_R R'}{\eta_S S'} = \frac{\eta_R}{\eta_S} n' \quad (3.43)$$

여기서, $\eta_R = \frac{R}{R'}$ 이고, $\eta_S = \frac{S}{S'}$ 이다.

MFOSM방법과 AFOSM방법을 이용하여 정규표준화 변환과 대수 정규표준화 변환방법으로 근사법에 의해 구한 최적신뢰성 해석은 다음과 같다.

정규표준화 변환

$$\beta_{opt} = \sqrt{2 \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \frac{\tau}{k\alpha_s \Omega_s}} \quad (3.44)$$

대수 정규표준화 변환

$$\beta_{opt} = \sqrt{(\alpha_s \Omega_s)^2 + (2 \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \frac{\tau}{k\alpha_s \Omega_s})} - \alpha_s \Omega_s \quad (3.45)$$

여기서, α_s 는 $\Omega_S / \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_s^2}$, Ω_S 는 $\sqrt{\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2} / (1+\rho)$, ρ 는 L/D 이다.

(2) 최적신뢰성 설계기준

신뢰성 설계기준으로서의 저항계수(ϕ) 및 하중계수(γ_i) 결정은 신뢰성 해석에서 β 를 구하는 해석이론을 그대로 사용하는 것이지만, 해석의 경우와는 달리 신뢰성지수(β)를 목표 신뢰성지수(β_{opt})로 설정한 다음, 이에 대응하는 저항계수(ϕ) 및 하중계수(γ_i)를 결정하는 문제가 된다.

이와 같이 신뢰성 설계기준은 기초구조물의 안전성을 확보하기 위해 적절한 목표 신뢰성지수(β)를 결정하고 이로부터 저항계수(γ_i)를 산정하는 것이다. 즉 하중계수를 설계하중에 곱하고 저항계수를 기초구조물의 저항에 곱함으로써 기초구조물의 안전성을 확보하는 것이다.

따라서 최적신뢰성 설계기준은 AFOSM방법의 반복시행 해석의 부분 대수표준화 변환 반복법 및 부분 대수표준화 변환 근사법을 사용하여 설계기준에 관련된 ϕ 와 γ_i 를 산정함으로, AFOSM방법을 이용한 최적신뢰성 설계기준은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_i = 1 + \frac{\Omega_s^2 \beta_{opt}}{\sqrt{\gamma_i^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (3.46)$$

식(3.46)과 같이 전체 하중계수(γ_i)를 가정하여 반복시킴으로써 중앙 안전율(n_o) 및 저항계수(ϕ)에 관계없이 γ_i 를 구할 수 있고, γ_i 의 값이 결정되면 최적신뢰성 설계기준 γ_i 및 ϕ 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\phi = \exp \left(- \frac{\gamma_i^2 \Omega_R^2 \beta_{opt}}{\sqrt{\gamma_i^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \right) \quad (3.47a)$$

$$\gamma_D = 1 + \left(\frac{\Omega_{SD}^2 \beta_{opt}}{(1 + \rho) \sqrt{\gamma_i^2 \Omega_R^2 + \Omega_s^2}} \right) \quad (3.47b)$$

$$\gamma_L = 1 + \left(\frac{\Omega_{SL}^2 \beta_{opt}}{(1 + \rho) \sqrt{\gamma_i^2 \Omega_R^2 + \Omega_s^2}} \right) \quad (3.47c)$$

여기서, ϕ 는 저항계수, γ_D 는 성토하중계수, γ_L 는 상재하중계수이다.

그러나 부분 대수표준화 변환에서 γ_i 는 n_o 를 알 수 없으므로 식(3.47)을 다음과 같이 변형하여 근사적으로 γ_i 를 얻을 수 있다.

$$\gamma_i = 1 + \frac{\Omega_s^2 \beta_{opt}}{\sqrt{\lambda_i^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (3.48)$$

여기서, $\lambda = \frac{1 - \alpha_s^2}{\alpha_s^2} \frac{\Omega_s^2}{\Omega_R^2}$ 이다.

식(3.48)로부터 γ_i 를 구하여 식(3.46)에 대입하면 근사적으로 ϕ 와 γ_i 를 구할 수 있다.

3. 최적신뢰성 해석방법

(1) Fujino의 방법

구조물의 안전성을 좌우하는 저항 R 과 작용하중 S 에 각종 불확실성이 포함되어 있다. 신뢰성 이론에서는 이 불확실성들을 모두 확률변량으로 생각하고 R 과 S 를 확률변수로 다룬다. 이 때, R 및 S 의 평균을 \bar{R} 및 \bar{S} 변동계수를 Ω_R 과 Ω_S 라고 하면, 파괴확률 P_F 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_F = \Phi(-\beta) \quad (3.49)$$

$$\text{여기서, 표준정규분포함수 : } \Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp(-x^2/2) dx \quad (3.50)$$

$$\text{신뢰성지수 : } \beta = \frac{\ln(n_o \sqrt{1 + \Omega_S^2} / \sqrt{1 + \Omega_R^2})}{\sqrt{\ln((1 + \Omega_R^2) \sqrt{1 + \Omega_S^2})}} \quad (3.51)$$

$$\text{중앙안전율 : } n_o = R/S \quad (3.52)$$

일반적으로 초기건설비용 C_I 는 안전율 n 이 높으면 증가하게 된다. 여기서, 기준

안전율 $n' = 1.7$ 이고 가정한 안전율을 n 으로 할 때, 총중량 W 을 안전율로 나타낸 중량비는 다음과 같이 된다.

$$\frac{W(n)}{W(n')} = 1 + b\left(\frac{n}{n'} - 1\right) \quad (3.53)$$

식(3.53)의 b 값은 중량비계수값으로 $b=0.4 \sim 0.6$ 을 사용하고 있다. 초기건설비용 C_I 가 중량 W 에 선형비례 한다면 초기건설비용의 비는 다음과 같이 된다.

$$\frac{C_I(n)}{C_I(n')} = 1 + b\left(\frac{n}{n'} - 1\right) \quad (3.54)$$

따라서 설계저항 R^* 와 설계하중 S^* 는 확률적 특성치를 채용하면, 설계저항 및 설계하중은 다음과 같이 된다.

$$R^* = R \exp\left(-k_R \sqrt{\ln(1 + \Omega_R^2)}\right) / \sqrt{1 + \Omega_R^2} \quad (3.55)$$

$$S^* = S \exp\left(k_S \sqrt{\ln(1 + \Omega_S^2)}\right) / \sqrt{1 + \Omega_S^2} \quad (3.56)$$

안전율 n 은 식(3.52)와 저항의 확률적 특성치 k_R 및 하중의 확률적 특성치 k_S 로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$n = n_o \exp\left(-k_R \sqrt{\ln(1 + \Omega_R^2)} - k_S \sqrt{\ln(1 + \Omega_S^2)}\right) \sqrt{1 + \Omega_S^2} / \sqrt{1 + \Omega_R^2} \quad (3.57)$$

따라서 식(3.54)을 중앙안전율 n_o 로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{C_I(n)}{C_I(n_o)} = 1 + b\left(\frac{n_o}{n} - 1\right) \quad (3.58)$$

식(3.58)에서 n_o 와 n_o' 는 안전율 n 와 n' 의 중앙안전율이다, 설계치 R^* 와 S^* 의 수준을 나타내는 k_R 과 k_S 는 본 연구에서는 $k_R = k_S = 1.28$ 로 하였다. 즉, 설계치 R^* 및 S^* 는 각각 안전측의 90% 확률값이다. 식(3.58)을 식(3.40)에 대입하면 총기대비용 C_T 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} C_T &= C_I(n') \left(1 + b \left(\frac{n_o}{n_o'} - 1 \right) \right) + P_F C_F \\ &= C_I(n') \left(1 + b \left(\frac{n_o}{n_o'} - 1 \right) + P_F C_F^* \right) \end{aligned} \quad (3.59)$$

여기서, $C_F^* = C_F / C_I(n')$ 는 파괴손실비용의 크기를 나타내는 무차원량이다.

C_F 는 구조물의 파괴에 따른 직접손실과 경제적 및 사회적 영향에 의한 간접손실의 크기에 의해 결정되는 양이지만, 이에 대한 평가는 매우 곤란하기 때문에 무차원화한 손실비용 $C_F^* = 1 \sim 100$ 정도의 값을 사용한다.

식(3.59)에 식(3.49)~식(3.52)을 대입하고, $\partial C_T / \partial \beta = 0$ 의 조건을 사용하여 최적신뢰성수준 β_{opt} 을 해석하면 식(3.60)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \beta_{opt} &= - \sqrt{\ln((1 + \Omega_R^2)(1 + \Omega_S^2))} \\ &+ \sqrt{\ln((1 + \Omega_R^2)(1 + \Omega_S^2)) - 2 \ln \left(\frac{b \sqrt{2\pi(1 + \Omega_R^2)\ln((1 + \Omega_R^2)(1 + \Omega_S^2))} / (1 + \Omega_S^2)}{n_o' \cdot C_F^*} \right)} \end{aligned} \quad (3.60)$$

또한, 최적신뢰성지수 β_{opt} 일 때의 최적안전율은 식(3.51)과 식(3.52)에 의해 다음과 같이 된다.

$$n_{opt} = \exp \left(\beta_{opt} \sqrt{\ln((1 + \Omega_R^2)(1 + \Omega_S^2))} - k_R \sqrt{\ln(1 + \Omega_R^2)} - k_S \sqrt{\ln(1 + \Omega_S^2)} \right) \quad (3.61)$$

(2) Chou의 방법

파괴손실비용의 정도(τ)와 안전도 증가에 따른 초기비용의 증가율(ν) 및 증가곡

선형(n)의 3가지 함수로 식(3.59)의 C_T 을 무차원화하면 Chou의 신뢰성 해석을 다음과 같이 유도할 수 있다. 먼저 식(3.62)의 초기비용 C_I 를 신뢰성지수(β)의 n 차 함수를 사용하면 다음과 같이 된다.

$$C_I = C_{IO}(1 + k\beta^n) \quad (3.62)$$

식(3.62)에서 C_{IO} 는 $\beta=0$ 일 때의 비용, 즉 안전여유가 없을 때의 비용이고, 상수 k 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = (\nu - 1) / \beta^n \quad (3.63)$$

$$\nu = 1 + q(n_0 - 1) \quad (3.63a)$$

$$q = 1 / [1 + \alpha n_s \{ (1/b) - 1 \}] \quad (3.63b)$$

여기서, n_s 는 현행설계의 안전율, b 는 상수(0.4~0.6), α 는 $n_0/n' = \text{중앙안전율/공칭안전율}$ 이다.

파괴손실비용 C_F 는 초기비용 C_I 의 τ 배로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$C_F = \tau C_I = \tau C_{IO}(1 + k\beta^n) \quad (3.64)$$

따라서, 파괴확률과 신뢰성지수와의 관계식, 즉 $P_f = \Phi(-\beta)$ 를 사용하여 식(3.62)에 대입하면 총기대비용 최소화에 의한 최적 설계시스템 모델은 다음과 같이 된다.

$$C_T(\beta) = C_{IO}(1 + k\beta^n)\{1 + \Phi(-\beta)\tau\} \Rightarrow \text{Min} \quad (3.65)$$

식(3.65)는 강도항과 하중항에 특정한 확률분포를 가정할 필요가 없이 소수의 매개변수만으로 최적신뢰성 해석을 수행할 수 있다.

총기대비용 최소화에 의한 최적설계모델 식(3.65)을 파괴손실비용의 정도(τ)와 안전도 증가에 따른 초기비용의 증가율(ν) 및 증가곡선형(n)의 3가지 함수로 나타내

면 무차원화 시킨 총기대비용은 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\eta = C_T(\beta)/C_{IO} = (1+k\beta^n)\{1+\Phi(-\beta)\tau\} \Rightarrow \text{Min} \quad (3.66)$$

총기대비용의 최소화를 도입한 최적신뢰성 해석은 식(3.66)을 반복시행에 의해 최적화함으로서 최적신뢰성지수 β_{opt} 를 구할 수 있다. 따라서 최적신뢰성지수 β_{opt} 로 그림 3.8과 같이 무차원화의 초기비용(λ)와 무차원화의 파괴기대비용(μ) 및 무차원화의 총기대비용(η)을 다음과 같이 정식화하였다.

$$\lambda = C_I/C_{IO} = 1+k\beta_{opt}^n \quad (3.67a)$$

$$\mu = \Phi(-\beta)C_F/C_{IO} = \Phi(-\beta_{opt})(1+k\beta_{opt}^n)\tau \quad (3.67b)$$

$$\eta = \lambda + \mu$$

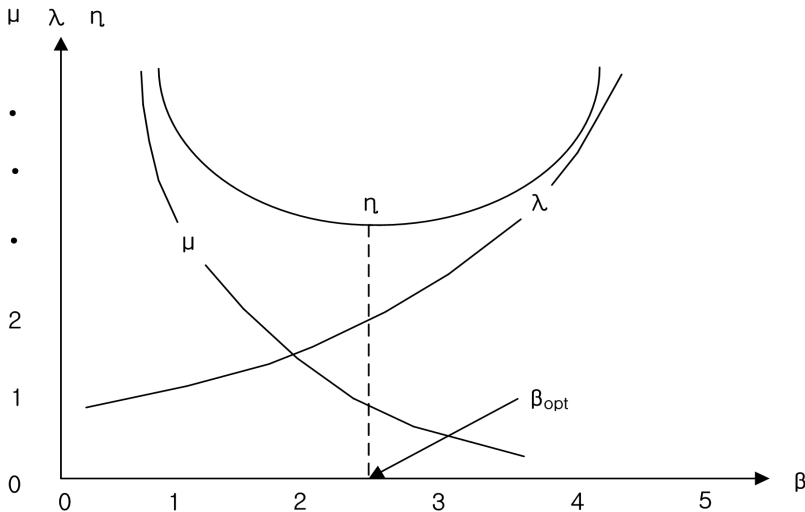


그림 3.8 무차원화의 비용에 대한 개념도

(3) Kanda의 방법

Kanda는 MFOSM의 근사적 해석으로 대수정규표준화 변환시켜 최적 신뢰성 해석을 유도하였다. 대수정규표준화 변환에서 r^* 와 s^* 는 파괴면상에서 원점까지의 최소거리의 좌표점으로서 설계점이라 부르며, $r^*=R^*$ 및 $s^*=S^*$ 로 놓고 대수정규표준

화 변환시키면 공칭저항 R^* 및 공칭하중 S^* 는 다음과 같이 된다.

$$R^* = R \exp(-\alpha_R \beta \Omega_R) \quad (3.68a)$$

$$S^* = S \exp(\alpha_S \beta \Omega_S) \quad (3.68b)$$

여기서,
$$\alpha_R = \frac{\Omega_R}{\sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (3.69a)$$

$$\alpha_S = \frac{\Omega_S}{\sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (3.69b)$$

그리고 식(3.40)의 초기비용 C_I 를 정규화된 비용증가의 비와 중앙안전율을 사용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$C_I = C_{IO} [1 + k(n_o - 1)] \quad (3.70)$$

여기서, C_{IO} 는 본래의 초기비용, k 는 정규화된 비용증가의 비, $n_o = R/S$ 중앙안전율이다.

다음으로 파괴손실비용 C_F 는 초기비용 C_{IO} 의 τ 배로 나타내면, 다음과 같이 표현된다.

$$C_F = \tau C_{IO} \quad (3.71)$$

따라서 총기대비용은 식(3.70)과 식(3.71)을 사용하여 표현하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_T = C_{IO}(1 + k(n_o - 1) + P_f \tau) \quad (3.72)$$

한편, Lind-Hasofer가 제안한 AFOSM방법 중에서 하중계수에 기초한 최적신뢰성 해석을 이용하면, 대수정규화 변환에 의한 하중효과는 다음과 같이 표현된다.

$$S = \frac{1}{\sqrt{(1 + \Omega_S^2)}} \exp(-\alpha_S \beta \Omega_S) \mu_S \quad (3.73)$$

여기서, α_S 는 하중효과의 선형화계수(separation factor)로서 다음과 같이 된다.

$$\alpha_S = \frac{\Omega_S}{\sqrt{(\Omega_R^2 + \Omega_S^2)}} \quad (3.74)$$

따라서 단일 한계상태에 대한 최적신뢰성지수 β_{opt} 는 식(3.40)에 식(3.70)~식(3.74)을 대입하여 하중효과 S를 $\partial C_T / \partial S = 0$ 로 하면 공칭하중 γ_{opt} 는 다음과 같이 된다.

$$\gamma_{opt} = S \exp\left(\alpha_S(-\alpha_S \Omega_S + \sqrt{(\alpha_S \Omega_S)^2 + 2 \ln \frac{\tau \sqrt{(1 + \Omega_S^2)}}{\sqrt{(2\pi)} k \alpha_S \Omega_S}})\right) \Omega_S \quad (3.75)$$

그러므로 식(3.68b)와 식(3.69b)를 비교하면 Kanda의 최적신뢰성지수 β_{opt} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta_{opt} = -\alpha_S \Omega_S + \sqrt{(\alpha_S \Omega_S)^2 + 2 \ln \left(\frac{\tau \sqrt{(1 + \Omega_S^2)}}{\sqrt{(2\pi)} k \alpha_S \Omega_S} \right)} \quad (3.76)$$

여기서, Ω_S 는 하중효과의 변동계수이다.

(4) Frangopol의 방법

연약지반에 시공된 지반구조물은 시공 및 공용기간 동안 하중을 지지하는 저항은 재하단계 및 시공단계에 따라 감소하는 특성이 있기 때문에, 시간이력에 따른 감소효과를 신뢰성해석에 반영되어야 한다. 이러한 효과를 반영하기 위해 주로 선형이나 지수적인 회귀분석 방법을 이용하여 다양한 모델들이 개발되었다. 한편, Frangopol 등이 개발한 구조물에 대한 시간이력의 신뢰성 해석모델을 이용하면, 보

유성능에 의한 신뢰성지수의 감소는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\beta = \frac{1}{\sqrt{(\sigma_{\ln S})^2 + (\sigma_{\ln R})^2}} \ln \frac{R_0}{R(t)} \quad (3.77)$$

여기서, $\Delta\beta$ 는 신뢰성지수의 감소, $\sigma_{\ln S}$ 는 하중효과에 대한 표준편차, $\sigma_{\ln R}$ 는 저항에 대한 표준편차, R_0 는 원래의 저항강도, $R(t)$ 는 시간에 따른 저항강도이다.

그리고 신뢰성지수의 감소를 계산하는데 필요한 식(3.77)의 $R(t)$ 는 신뢰성이론을 이용한 시간이력에 따른 평가모델의 결과를 사용한다. 따라서 Kanda의 최적신뢰성지수를 산정하는 식(3.76)과 신뢰성감소의 식(3.77)을 사용하면 구조물에 대한 점검시점의 시간이력 신뢰성지수는 다음과 같이 된다.

$$\beta(t_0) = \beta_{opt} - \Delta\beta \quad (3.78)$$

여기서, $\beta(t_0)$ 는 시간이력 신뢰성지수, β_{opt} 는 최적신뢰성지수, $\Delta\beta$ 는 신뢰성지수의 감소이다.

시공 전 원래의 보유신뢰성함수 β_{fcr} 는 시공단계의 손상신뢰성지수의 식(3.78)과 최적신뢰성지수 β_{opt} 를 사용하면 다음과 같이 된다.

$$\beta_{fcr} = \beta(t_0) / \beta_{opt} \quad (3.79)$$

따라서 시간이력 신뢰성지수는 보유신뢰성함수를 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta(t) = \beta_{opt} (1 - (1 - \beta_{fcr}) / t_0^p) t^p = \beta_{opt} (1 - k_{fcr} t^p) \quad (3.80)$$

$$k_{fcr} = (1 - \beta_{fcr}) / t_0^p \quad (3.81)$$

여기서, k_{fcr} 는 신뢰성 감소지수, t_0 는 시공단계시점, p 는 방정식 차수이다.

3.2 퍼지이론에 의한 평가방법

3.2.1 베이스이론

베이스이론은 18세기 영국의 수학자인 R.T Bayes에 의해 소개되었으며 위험상황에서의 각 상황이 발생할 확률을 기초로 하여 조사, 실험 및 추가정보 등에 의해 미래에 발생할 상황 또는 이에 대한 발생확률을 수정해 나감으로써 더 좋은 의사결정을 하기 위한 기법이다. 이와 같은 경우에 수정 이전의 확률을 사전확률(Prior probability)이라 하고, 추가정보에 의해 수정된 확률을 사후확률(Posterior probability)이라 한다. 베이스이론은 이러한 사전확률을 수정하는 과정에서 사용되는 통계학적 기법을 의미하며 이 수정과정을 도표화 하면 그림 3.9와 같이 된다.

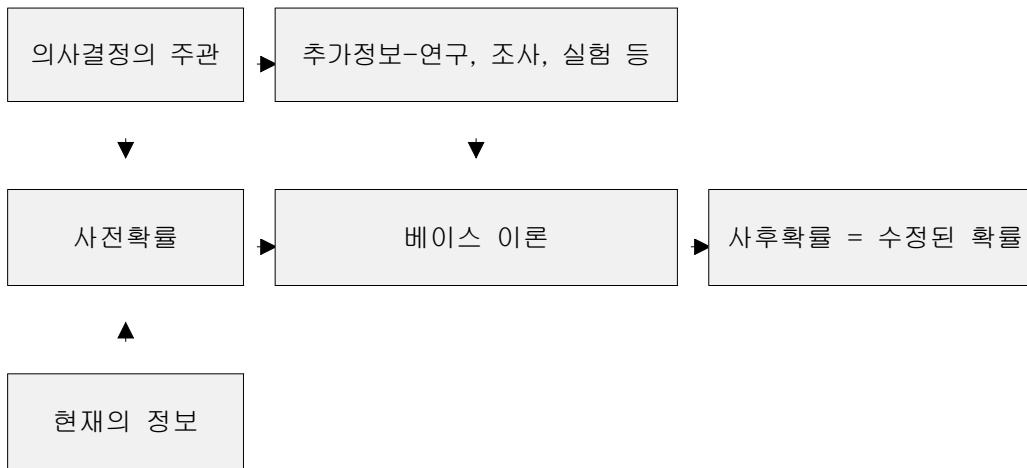


그림 3.9 사전확률의 수정과정

따라서, 사건 B_j 가 발생할 때 사건 A가 발생할 확률, 즉 조건부확률 $P(A/B_j)$ 와 사전확률 $P(B_j)$ 로 베이스이론에 의해 사후확률 $P(B_j/A)$ 을 나타내면 다음과 같이 된다.

$$P(B_j/A) = \frac{P(A/B_j)P(B_j)}{P(A)} \quad (3.82a)$$

$$P(A) = \sum_{i=0}^m P(A/B_j)P(B_j) \quad (3.82b)$$

여기서, P(A)=여백확률(Marginal probability)이다.

이때, 식(3.82b)을 수정확률 또는 베이지언확률(Bayesian Probability)이라고 부른다. 퍼지-베이스이론은 객관적 정보와 주관적 정보를 동시에 고려해야 하는데, 주관적 정보는 퍼지 집합이론을 이용하여 해석할 수 있고, 객관적 정보는 베르누이모델로 해석할 수 있다. 이 퍼지-베이스 이론은 주관적 정보, 즉 주관적 매개변수를 포함한 베이스 이론에 의한 사후확률을 계산하는 과정이다. 식(3.82b)의 퍼지사상 A의 확률 P(A)를 객관적 매개변수로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$P(A) = \delta(X)P(X=0) + \delta(X-1)P(x=0) \quad (3.83)$$

여기서, $\delta(X)$: Dirac Delta함수, X:사건 A가 발생할 때의 Bernoulli 확률변수이다.

그러나, 주관적 매개변수에 대한 확률 P(A)는 사상 A의 발생확률을 베르누이모델로 나타낼 수 없기 때문에 식(3.83)의 Dirac Delta함수를 멤버쉽함수(Membership function)로 대신하고, 퍼지사상 A에 대한 확률변수 X가 연속형일 경우 식(3.83)은 다음과 같이 된다.

$$P(A) = \int_{x \in A} \mu_A(x) f_x(x) dx \quad (3.84a)$$

그리고, 확률변수 X가 이산형이면 식(3.84a)는 다음과 같이 된다.

$$P(A) = \sum_{x \in A} \mu_A(x) P(X=x) \quad (3.84b)$$

여기서, $\mu_A(x)$ = 사상 A의 지점 x일 때 멤버쉽 값, $f_x(x)$ = 지점 x일 때의 확률밀도함수이다.

식(3.82)에 필요한 연속형과 이산형의 조건부확률은 각각 다음과 같이 된다.

$$\text{연속형: } P(A/B_j) = \int_{x \in A} \mu_A(x) f_{x/B_j}(x) dx \quad (3.85a)$$

$$\text{이산형: } P(A/B_j) = \sum_{x \in A} \mu_A(x) p_{x/B_j}(x) \quad (3.85b)$$

여기서, $f_{x/B_j}(x)$ = 조건부 확률 밀도함수, $p_{x/B_j}(x)$ = 조건부 확률 누가함수이다.

따라서 식(3.82)에 식(3.85)을 대입하면 사상 B_j 가 발생할 때 사상 A의 사후확률은 다음과 같이 된다. 이 때 사상 A는 주관적 확률매개변수이다.

$$\text{연속형: } P(B_j/A) = \frac{[\int_{x \in A} \mu_A(x) f_{x/B_j}(x) dx] P(B_j)}{\sum_{k=1}^m [\int_{x \in A} \mu_A(x) f_{x/B_k}(x) dx] P(B_k)} \quad (3.86a)$$

$$\text{이산형: } P(B_j/A) = \frac{[\sum_{x \in A} \mu_A(x) P_{x/B_j}(x)] P(B_j)}{\sum_{k=1}^m [\sum_{x \in A} \mu_A(x) P_{x/B_k}(x)] P(B_k)} \quad (3.86b)$$

여기서, m = 샘플공간에 있어서 상호확률사상의 전체수이다.

식(3.86)에서 사상 A가 객관적 확률매개변수라면 $\mu_A(x)=1$ 이고, x 가 사상 A에 속하지 않는다면 $\mu_A(x)=0$ 이다. 이것은 식(3.82b)와 같이 된다.

지금까지는 사상 A가 1개의 매개변수를 갖는 경우이며, 사상 A가 확률적으로 서로 독립이고 n개의 매개변수 $P(B_i | A_1 \cdot \cdot \cdot \cdot A_n)$ 로 주어진 경우에 식(3.82)를 멤버쉽함수와 조건부 확률밀도함수로 나타내면 다음과 같이 확장할 수 있다.

$$P(B_j/A_1, \dots, A_n) = \frac{[\prod_{i=1}^n P(A_i/B_j)]P(B_j)}{\sum_{k=1}^2 [\prod_{i=1}^n P(A_i/B_k)]P(B_k)} \quad (3.87)$$

따라서, i번째의 사상 A에 대한 사상 B_j 의 사후확률 $P(B_j^i)$ 은 다음과 같이 된다.

$$P(B_j^i) = \frac{P(A_i/B_j)P(B_j^{i-1})}{\sum_{k=1}^2 [P(A_i/B_k)P(B_k^{i-1})]} \quad (3.88)$$

식(3.88)은 $i=n$ 일 때의 식(3.87)과 같고, 퍼지-베이스이론에 의한 사후확률이라 한다. 여기서 퍼지-베이스 신뢰성해석 및 설계는 전절 3.1.5의 Kanda방법 및 Frangopol방법을 이용하면 된다(박용훈, 2004)

3.2.2 퍼지이론에 의한 사면 파괴 요인의 판정구분 설정

사면에 대한 퍼지이론에 의한 안정성 평가는 손상 및 파괴요인을 경험적 방법에 따른 외적요인과 사면의 지반정수 값에 의한 내적요인으로 구분하고, 이러한 요인에 대한 전문기술자의 주관적 판단을 퍼지언어 변수로 표현하는 퍼지근사추론법을 이용하여 사면의 안정성 평가를 수행하게 된다. 또 암반사면의 경우는 암반사면의 변상 및 파괴요인을 지형 및 지질의 내적요인과 토공 및 시공의 외적요인으로 구분하고 이러한 요인에 의한 파괴형태를 평면활동파괴의 성능함수로 가정한 후에, 각 암반사면의 변상 및 파괴요인에 대해 퍼지근사추론법을 이용하여 암반사면의 안전성 평가를 수행하게 된다.

이와 같은 퍼지이론에 의한 안정성 평가는 그림 3.10과 같은 소속도함수를 이용하여 사면의 변상 및 파괴요인을 지형 및 지질 등은 내적요인으로, 토공 및 시공 등은 외적요인으로 구분하여 사면의 내적·외적요인의 변상평가 기준을 토대로 하여 사면의 안전성 평가를 수행하게 된다.

퍼지이론에 의한 토사사면에 대한 파괴요인의 내적요인은 지반조사 및 토질시험 결과를 사용하였고, 암반사면의 경우 SMR을 적용하여 이에 따른 7가지 분류요인을 사용하였다.

또 외적요인은 토사사면의 경우 경험적 방법의 10가지 분류요인을 사용하였으며, 암반사면의 경우 SSR을 사용하여 파괴요인의 판정구분을 설정하게 된다. 따라서 퍼지이론에 의한 토사사면 파괴에 대한 내적 및 외적요인의 판정구분은 표 3.2 및 표 3.3과 같이 되며 암반사면의 경우 표 3.4 및 표3.5와 같다.

퍼지이론에서 필요한 각 요인의 멤버쉽함수는 토질 전문가의 경험이나 지식에 기초하여 주관적으로 정해지므로 내적 및 외적 요인별 판정구분의 소속도함수의 설정에 있어 A, B, C, D, E의 5단계 언어변수로 표현하면 퍼지집합의 소속도함수 A, B, C, D, E는 각각 다음의 식(3.89)과 같이 된다.

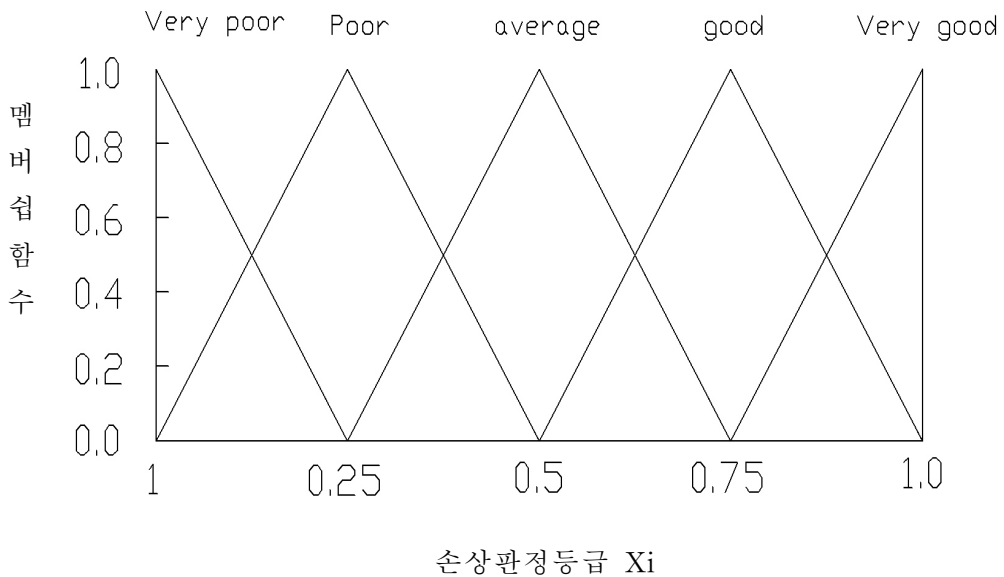


그림 3.10 변상판정등급의 소속도함수

표 3.2 토사사면에 대한 내적요인의 판정구분

분류	판정구분					
	요 인	A	B	C	D	E
X1	내부마찰각	40 이상	30~39	20~29	10~19	10 미만
X2	점착력(MPa)	5 이상	3~4.9	1.5~2.9	1~1.4	1 미만
X3	표준관입시험	50 이상	30~49	10~29	4~9	4 미만
X4	토층 심도율	2m이하	2~5m	6~10m	11~15m	15m이상
X5	토 질 분 류	자갈	자갈섞인 모래	모래	사질토	점성토
X6	지하수 상태	건조	습윤	젖음	소량유출	대량유출
X7	지반변형 상태	없음	극히 부분적	국부적 변형	다수 변형	심각한 변형

표 3.3 토사사면에 대한 외적요인의 판정구분

분류	판정구분					
	요 인	A	B	C	D	E
Y1	사면의 높이	< 5m	5~15m	16~25m	26~35m	> 36m
Y2	사면의 경사각	1:1.5 이상	1:1.3이상 1:1.5미만	1:1.2이상 1:1.3미만	1:1.1이상 1:1.2미만	1:1.1미만
Y3	토질상태	매우 조밀	조밀	보통	느슨	매우 느슨
Y4	상부 물고임 상태	없음	거의 없음	약간 발생	다수 발생	전반적 물고임
Y5	식생상태	매우 양호	양호	보통	불량	매우 불량
Y6	배수상태	매우 양호	양호	보통	불량	매우 불량
Y7	사면의 균열상태	없음	극히 부분적 균열	부분적 균열	다수 균열	매우 불량
Y8	과거 활동이력	없음	부분 유실 흔적 있음	국부 파괴 흔적 있음	전반 파괴 흔적 있음	-
Y9	지지구조물의 변형상태	없음	극히 부분적 변형	부분적 변형	다소 심각한 변형	심각한 변형
Y10	사면 표층부 상태	매우 조밀	조밀	보통	느슨	매우 느슨

표 3.4 암반사면에 대한 내적요인의 판정구분

분류	판정구분					
	요 인	A	B	C	D	E
X1	시료의 일축압축 강도(MPa)	매우 큼 (> 250)	큼 (100~250)	중간 정도 (50~100)	적음 (25~50)	매우 적음 (25~0)
X2	암질표시율 (RQD) (%)	매우 양호 (90~100)	양호 (75~90)	보통 (50~75)	불량 (25~50)	매우 불량 (25 >)
X3	절리면 간격(cm)	매우 넓음 (> 200)	넓음 (60~200)	중간 정도 (20~60)	협소함 (6~20)	매우협소함 (25 >)
X4	절리면 상태	매우 양호	양호	보통	불량	매우 불량
X5	지하수 상태	건조	습윤	젖음	소량 유출	대량 유출
X6	절리면의 경사에 따른 조정	매우 유리	유리	양호	불리	매우 불리
X7	굴착방법에 의한 조정	자연사면	pre-splitting	smoth blasting	통상의 발 파	불량한 발 파

표 3.5 암반사면에 대한 외적요인의 판정구분

분류	판정구분					
	요 인	A	B	C	D	E
Y1	사면의 높이	< 5m	5~8m	8~11m	11~14m	> 14m
Y2	사면의 길이	< 15m	15~30m	30~45m	45~60m	> 60m
Y3	노 건 폭	매우 양호 노건 충분	양호 노건 넓다	중간 정도 노건 넓음	좁다 노건은 넓다	대단히 좁다 노건 없음
Y4	교 통 량	대단히 적음	적음	중간 정도	많음	대단히 많음
Y5	낙석 방지구의 규모	Ritchie기준에 합치	폭 충분하나 깊이 불충분	중간 정도의 규모	한정된 규모	없음
Y6	지 질	괴상, 흐름반의 균열 없음	비연속성 균열의 랜덤한 배열	균열이 쇄기상을 형성	흐름반 방향의 비연속성 균열	흐름반 방향의 연속성 균열
Y7	블록사이즈	< 0.15m	0.15~0.3m	0.3~0.6m	0.6~1.5m	> 1.5m
Y8	바위의 마찰	매우 거칠다 불규칙	거칠다	평면상	평활(관관함)	점토, 파쇄대 단층점토
Y9	물/얼음	건조하고 온난한 지역	중간정도강우 온난한 지역	중간정도의 강우 약간 동결	중간정도 강우 한냉한지역	강우가많고 한냉한지역
Y10	낙 석	없음	가끔 소규모	가끔 낙석	수시로 낙석	큰낙석 /활동

$$\mu_{A_i}(A) = 0.5/4.5+1.0/5.0 \quad (3.89a)$$

$$\mu_{A_i}(B) = 0.5/3.5+1.0/4.0+0.5/4.5 \quad (3.89b)$$

$$\mu_{A_i}(C) = 0.5/2.5+1.0/3.0+0.5/3.5 \quad (3.89c)$$

$$\mu_{A_i}(D) = 0.5/1.5+1.0/2.0+0.5/2.5 \quad (3.89d)$$

$$\mu_{A_i}(E) = 1.0/1.0+0.5/1.5 \quad (3.89e)$$

또한 사면의 파괴 및 변상을 유발하는 내적 및 외적 요인별 소속도함수를 결정하고, 각 요인별에 대한 비율을 중요도계수로 하는 가중치 평균 개념을 이용한 종합적 판정의 근사화 과정에 있어 Kaufmann의 해밍거리의 개념을 도입하게 된다. 이때 중요도계수는 토질 전문가의 경험이나 지식과 통계적 자료에 의해 정해지는 계수로서 각 변상 요인별의 판정구분에 대한 중요도계수는 토사사면과 암반사면은 다음의 표 3.6과 같다.

표 3.6 내적 및 외적요인의 중요도계수

구 분		내적 요인							외적 요인									
토사사면	항목	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
	중요도계수	0.7	0.7	1.0	1.0	0.3	0.5	0.7	0.7	1.0	0.7	0.7	0.5	1.0	1.0	1.0	0.7	0.3
암반사면	항목	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
	중요도계수	0.5	0.7	1.0	1.0	1.0	0.5	0.3	1.0	1.0	0.7	0.4	0.5	1.0	0.7	0.3	0.7	0.7

3.2.3 퍼지근사추론법에 의한 안정성 평가 해석

기존의 사면에 대한 안정성평가와는 달리 퍼지근사추론법에 의한 방법은 변상상태로부터 기인되는 세 가지 변상인자, 즉 내적 변상요인(X), 외적 변상요인(Y) 및 활동 상태요인(Z)에 대한 표현을 하나의 특정한 인자로 변형시키는 것이 아니고 중

요도계수와 퍼지 언어변수를 이용하고 각 변상인자의 퍼지언어 변수 값은 근사추론법(Approximate Reasoning)에 의해 합성함으로써 종래의 안정성평가 분석방법보다 더욱 정밀하게 평가하게 된다.

X, Y, Z 및 S를 각각 내적요인, 외적요인, 활동 상태요인 및 안정성 판정에 대한 술어집합이라 하고, P_X, P_Y, P_Z 및 P_S 를 각각 X, Y, Z 및 S에 관한 퍼지명제라고 하면 퍼지논리에 의한 안정성분석의 퍼지 조건문 및 퍼지관계는 다음의 식(3.90)과 같이 된다.

$$IF(X = P_X) \cap (Y = P_Y) \cap (Z = P_Z) THEN S = P_S \quad (3.90a)$$

$$R = R_X \cap R_Y \cap R_Z \quad (3.90b)$$

여기서, R_X, R_Y, R_Z 및 R_S 은 각각 내적요인, 외적요인, 활동 상태요인 및 안정성판정의 퍼지관계를 나타내는 것으로 다음의 식(3.91)과 같은 조건문으로 풀이할 수 있다.

$$IF X = P_X THEN S = P_S \Rightarrow R_X = P_X \times P_S \quad (3.91)$$

$$IF Y = P_Y THEN S = P_S \Rightarrow R_Y = P_Y \times P_S$$

$$IF Z = P_Z THEN S = P_S \Rightarrow R_Z = P_Z \times P_S$$

다음으로 각 요인에 대한 조건이 변할 때 퍼지합성규칙에 의한 근사추론법을 이용하여 안정성 판정을 추론할 수 있으며, 각 요인의 조건이 $X=P_X', Y=P_Y'$ 및 $Z=P_Z'$ 로 변하였다고 가정할 때, 합성규칙에 의해 결정되는 안정성 판정은 다음의 식(3.92)와 같이 된다.

$$S(F_S) = \bigwedge_{i=X, Y, Z} [\bigvee_{f_i \in F_i} (P_i'(F_i \wedge r_i(F_i; F_S)))] \quad (3.92)$$

여기서, $\wedge = \text{Min}$, $\vee = \text{Max}$ 이다.

다음은 안정성 판정을 다시 언어표현으로 전환시키는 과정으로 Kaufuman의 해밍거리의 개념을 도입하여 근사추론에 의한 안정성판정과 퍼지 부분집합과의 해밍거리를 최소화하는 S내의 한 퍼지부분집합을 선택하게 되며, A와 B가 집합 F의 퍼지 부분집합일 때 A와 B간의 해밍거리는 다음의 식(3.93)과 같이 되고, 도출된 $d \in (1,2,3 \dots, m)$ 의 퍼지집합 $S_d^o = (S_{d1}^o, S_{d2}^o, S_{d3}^o, \dots, S_{dm}^o)$ 에 근사화 되는 S내의 한 퍼지 부분집합 S_d^* 는 다음의 식(3.94)와 같이 된다.

$$d(A,B) = \sum_{i=f_i \in F}^n | \mu_A(F_i) - \mu_B(F_i) | \quad (3.93)$$

$$S_d^* = \text{Min } d(S_d^o, S_d) = \text{Min } \sum_{i=1}^n | S_{di}^o - S_{di} | \quad (3.94)$$

따라서 퍼지 근사추론으로 해석한 토사사면의 안정성 평가기준과 기존의 안정성 평가기준을 비교하면 표 3.7과 같이 되며, 암반사면의 경우 표 3.8과 같다.

표 3.7 퍼지이론에 의한 토사사면의 안정성 평가기준

평가 등급	기존의 방법		퍼지이론에 의한 방법					
	정량적 해석	정성적 해석	내적 요인 (X)	외적 요인 (Y)	활동 상태 요인 (Z)	안정성 평가기준 및 유지관리사항		
						안정성 평가기준	파괴가능성	보수 · 보강
A	매우 안정 (>1.5)	매우 양호	매우 양호	매우 낮음	매우 안정	완전히 안정	없음	불필요
B	안정 (1.5~1.3)	양호	양호	낮음	안정	안정	약간 있음	안전율 유지법 (소극적)
C	보통 (1.3~1.2)	보통	보통	중간 정도	중간 정도	부분적 안정	있음	
D	불안정 (1.2~1.0)	불량	불량	높음	불안정	불안정	많음	안전율 증가법 (적극적)
E	매우 불안정 (<1.0)	매우 불량	매우 불량	매우 높음	위험	완전히 불안정	매우 많음	

표 3.8 퍼지이론에 의한 암반사면의 안정성 평가기준

평가 등급	기존의 방법		퍼지이론에 의한 방법					
	암반상태 (SMR)	위험도 (SSR)	내적 요인 (X)	외적 요인 (Y)	활동 상태 요인 (Z)	안정성 평가기준 및 유지관리사항		
						안정성 평가기준	파괴가능성	보수 · 보강
A	매우 양호 (81~100)	최소 (150이하)	매우 양호	매우 낮음	매우 안정	완전히 안정	없음	필요 없음
B	양호 (61~80)	매우 낮음 (150~250)	양호	낮음	안정	안정	일부 블럭	때때로 필요
C	보통 (41~60)	낮음 (250~400)	보통	중간 정도	중간 정도	부분적 안정	일부 절리 혹은 썩기파괴	체계적인 보강
D	불량 (21~40)	중간 정도 (400~500)	불량	높음	불안정	불안정	평면 또는 대규모 썩기파괴	중요한 보완
E	매우 불량 (0~20)	높음 (500이상)	매우 불량	매우 높음	위험	완전히 불안정	대규모 썩기파괴 토층과 유사한 파괴	재굴착

3.3 인공신경망이론에 의한 평가방법

3.3.1 뉴런과 신경계

인간이 가지고 있는 신체 기능의 대부분은 신경세포들의 유기적 결합체인 신경망에 의하여 통제되며, 신경망의 중추를 이루고 있는 것이 뇌이다. 인간의 뇌는 대략 150억 개의 신경세포들로 구성되며, 각 신경세포는 약 1만개 정도의 연결점을 통하여 인접한 다른 신경세포들과 신호를 서로 주고받는다. 이와 같은 복잡한 구조와 방대한 신호처리 체계는 인간 이외의 다른 생명체에서는 찾아 볼 수 없는 것이다. 물론 인간이 이루어 놓은 그 어떠한 기술문명의 산물도 이와는 견줄 수 없다(김대수, 1992).

한편, 공학자들의 궁극적인 관심은 뇌의 생리학적 구조와 기능을 밝히는데 있지 않고, 그보다는 뇌의 복잡한 구조적 특징과 이로부터 비롯되는 고도의 신호처리 체계를 연구하여 고난이도의 실제 문제에 적용할 수 있는 새로운 연산기법을 개발하는데 그 목표를 두고 있으므로 이를 위해서는 보고 듣고 깨닫는 인지능력, 연상 기억, 추론, 학습 등의 기능이 뇌에서 어떻게 구현되는가를 이해해야 한다.

또 이를 바탕으로 하여 Von Neumann방식의 컴퓨터와는 전혀 다른 새로운 개념을 갖는 신경회로 컴퓨터를 개발하고자 하는 것이다. 이는 뇌의 생물학적 구조와 기능을 닮은 시스템을 의미하는 것은 아니다. 단지, 뇌의 구조와 기능을 이해함으로써 뇌가 수행하는 연산기능의 원리로부터 새로운 개념을 추출하여 이를 구현하는 것을 의미한다. 따라서 신경회로 컴퓨터는 뇌의 시스템이라고 볼 수 있다. 이와 같은 시스템을 인공신경망이라고 한다.

인공신경망은 고도로 복잡한 인간의 두뇌를 구성하고 있는 기본단위인 뉴런의 개념을 도입하여 인식과정과 신경생태를 수학적 모형으로 일반화시키기 위해서 개발된 병렬정보처리 시스템이다. 지금까지 알려진 바로는 인간의 두뇌는 많은 수의 뉴런으로 구성되어 있으며, 그림 3.11에서와 같이 하나의 뉴런은 세포체(Cell Body)와 축색돌기 및 수상돌기 등으로 구성되어 있다. 이러한 뉴런의 구조로부터 유래된 인공신경망의 구조는 그림 3.12와 같다.

인공 신경망은 정보가 들어오는 입력층, 뉴런에 미치는 영향을 조절해주는 가중치와 이들 입력과 가중치로 들어온 정보를 결합하여 주는 결합함수, 이 결합함수로부터 나온 결과를 변환하여 출력 값을 결정하는 전이함수 등으로 구성되어 있다.

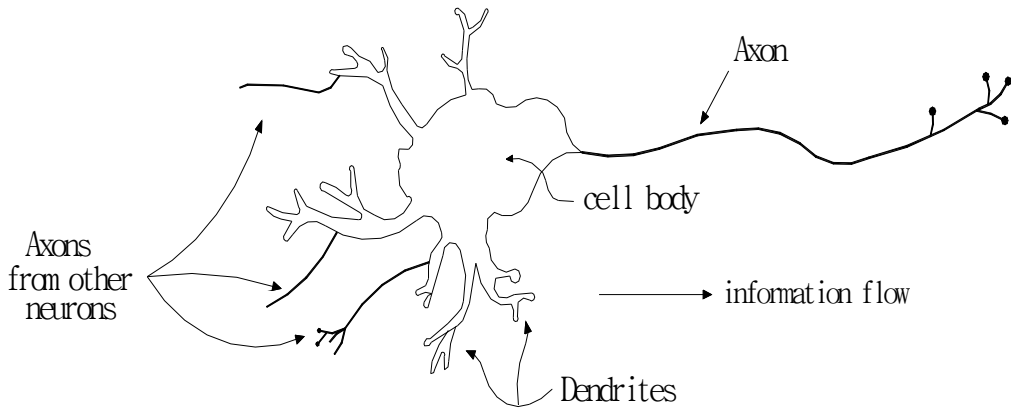


그림 3.11 뉴런의 구조(김대수, 1992)

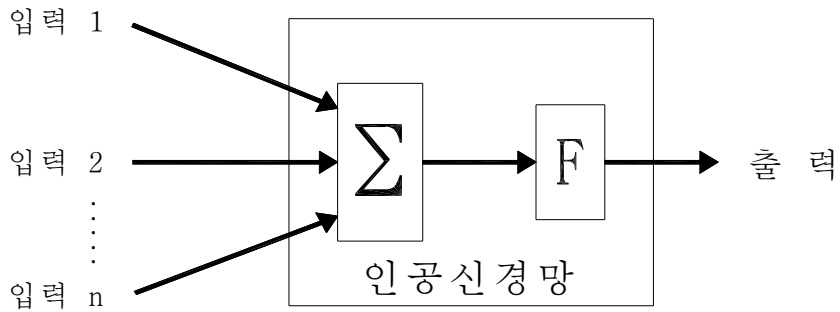


그림 3.12 인공신경망의 모델(김대수, 1992)

3.3.2 역전파 신경망 알고리즘

본 연구에서 사용한 역전파(Back Propagation) 학습 알고리즘은 델타규칙과 거의 유사하고 다수의 층으로 이루어진 다층 퍼셉트론을 학습시킬 수 있는 일반화된

델타규칙을 이용하고 있다. 일반적으로 역전파 신경망은 입력값과 목표출력으로 이루어진 학습샘플들을 사용하여 샘플입력에 대한 신경망의 출력값과 목표 출력사이의 오차가 최소로 되도록 규칙에 따라 연결강도를 조정하는 지도학습이며, 주어진 학습 샘플들을 사용하여 신경망의 성능이 원하는 수준이 될 때까지 연결강도를 조정하여 새로운 샘플이 인가되는 경우 그 연결강도를 이용하여 예측하는 Off-line 학습을 수행하게 된다.

1. 델타규칙의 역전파 과정

일반화된 델타규칙에서의 역전파 과정은 신경망이 주어진 입력패턴에 동작하여 출력을 했을 때 출력층 뉴런들의 오차가 구해진다. 출력층 뉴런들의 경우 오차를 구하는 방법은 델타규칙과 동일하다. 즉 목적패턴에서 출력 뉴런의 활성값을 빼 값이 바로 해당 출력 뉴런의 오차가 된다.

델타규칙의 경우 위에서 구한 오차를 사용하여 바로 가중치를 조절하지만 일반화된 델타규칙에서는 이 오차를 한 번 더 가공하여 각각의 출력층 뉴런에 대해 델타(δ)를 구한다. 뉴런의 오차로부터 출력층 뉴런들의 델타를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_j &= f'(\neq t_j) \cdot e_j \\ &= \frac{\sigma f(\neq t_j)}{\sigma \neq t} \cdot e_j = a_j(1 - a_j) \cdot (t_j - a_j) \end{aligned} \tag{3.95}$$

여기서, δ_j 는 출력층 뉴런 j의 델타, $f'(\neq t_j)$ 는 출력층 뉴런 j의 활성화함수의 미분값, e_j 는 출력층 뉴런 j의 에러, t_j 는 출력층 뉴런 j에 대응하는 목적패턴의 성분, 그리고 a_j 는 출력층 뉴런 j의 활성값이다.

이상과 같이 출력층 뉴런들의 델타가 구해지면 이 델타를 아래층 뉴런들로 역전파하는 과정이 진행된다. 이러한 델타의 역전파는 마치 신경망의 정상적인 동작을 완전히 바꾸어 놓은 것과 같다. 즉 위층의 뉴런에서 발생한 델타에 그것에 연결된 연결 가중치가 곱해서 아래층 뉴런으로 전달되고 그렇게 전달된 델타들은 합해진다.

그리고 그렇게 합해진 값이 바로 은닉층 해당 뉴런의 오차가 된다. 이렇게 은닉층 뉴런들의 오차가 구해지면 다음 식(3.96)을 이용하여 은닉층 뉴런의 델타를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_i &= f'(\neq t_i) \cdot e_i \\ &= \frac{\sigma f(\neq t_i)}{\sigma \neq t_i} \cdot e_i = a_i(1-a_i) \cdot e_i \end{aligned} \quad (3.96)$$

여기서, e_i 는 $w_{ij} \delta_j$ 의 합, δ_i 는 은닉층 뉴런 i의 델타, $f'(\neq t_j)$ 는 은닉층 뉴런 i의 활성화함수의 미분값, e_i 는 은닉층 뉴런 i의 오차, w_{ij} 는 뉴런 i에서 뉴런 j로의 연결 가중치, δ_j 는 출력층 뉴런 j의 델타, 그리고 a_i 는 은닉층 뉴런 i의 활성화값이다.

2. 연결가중치의 조절

뉴런들 사이의 연결 가중치의 조절은 다음 식(3.97)에 의해 이루어진다.

$$w(\neq w)_{ij} = w(old)_{ij} + \eta \delta_j a_i \quad (3.97)$$

여기서, $w(new)_{ij}$ 는 뉴런 i, j 사이의 조절된 후의 연결 가중치, $w(old)_{ij}$ 는 뉴런 i, j 사이의 조절되기 전의 연결 가중치, η 는 학습률, δ_j 는 뉴런 j의 델타, 그리고 a_i 는 뉴런 i의 활성화값이다.

식(3.97)에서 δ_j 는 연결 가중치를 수정하고자 하는 뉴런 j의 델타값이다. 그리고 a_i 는 뉴런 j에 달려있는 아래층 뉴런이다. 연결 가중치는 그것에 달려 있는 뉴런의 활성화 값에 비례해서 조절된다.

3. 활성화함수

일반적으로 신경망에서 적용하고 있는 활성화함수는 선형함수, 계단함수 및 시그모

이드 함수 등으로 정리할 수 있다. 그림 3.13은 뉴런의 3가지 비선형함수를 보여주고 있다.

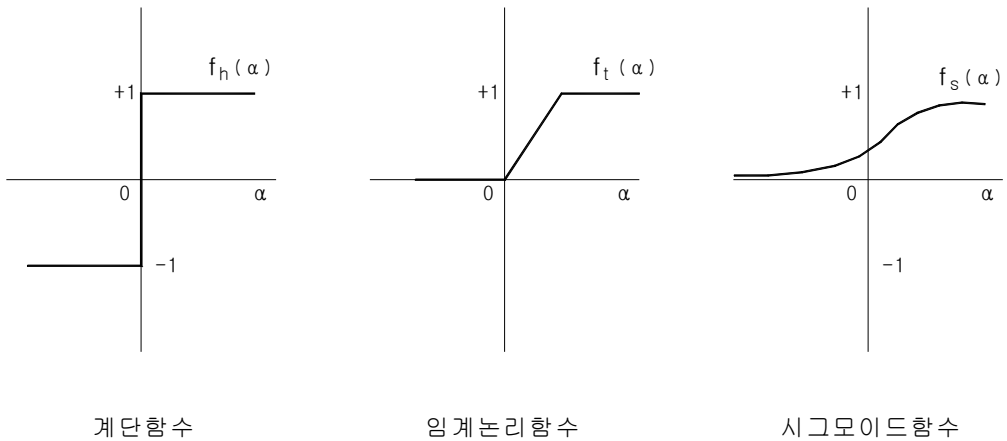


그림 3.13 뉴런의 비선형함수

본 연구에서 신경망의 활성화함수는 미분 가능하고 비선형적인 시그모이드 함수를 사용하였으며 다음과 같은 식(3.98)으로 표현된다.

$$f(x) = \frac{1}{(1 + e^{-(\alpha x - b)})} \quad (3.98)$$

여기서, b는 시그모이드 함수의 기울기를 결정하는 α 의 계수이다.

4. 모멘텀과 바이어스

모멘텀은 신경망의 연결 가중치 조절식에 관성을 줌으로서 학습 시간을 단축하고 학습 성능의 향상을 위해 고안된 것이다. 모멘텀은 현재의 연결 가중치와 그 이전 연결 가중치의 차에 의해 계산된다. 따라서 모멘텀을 구하기 위해서는 이전의 연결 가중치를 저장하고 있어야 한다. 모멘텀은 신경망의 연결 가중치 조절 과정에

추가되며, 이 모멘텀이 추가됨으로서 일반화된 델타규칙에 의한 연결가중치를 조절하는 식(3.99)는 다음 식과 같이 변하게 된다.

$$w(\neq w)_{ij} = w(old)_{ij} + \eta\delta_j a_i + \beta\Delta w_{ij}(old) \quad (3.99)$$

β 는 학습률 η 와 유사한 역할을 하는 것으로 모멘텀의 크기를 제어하기 위한 상수이다. β 는 0에서 1사이의 값이며, 일반적으로 0.7~0.9 정도의 값이 사용된다.

바이어스(Bias)는 입력층 뉴런을 제외한 모든 뉴런이 가지는 특성으로서 시그모이드 함수의 b에 해당하는 역할을 한다. 즉, 역치 함수의 역치와 유사한 기능을 수행하는 것이다. 바이어스는 마치 언제나 출력이 1인 가상적인 뉴런을 달고 있는 연결가중치처럼 취급된다. 따라서 바이어스는 뉴런의 활성화에 참여할 뿐만 아니라 다른 연결가중치들과 마찬가지로 학습에 의해 조절된다. 바이어스의 학습 역시 마치 그것이 언제나 출력이 1인 가상적인 뉴런을 달고 있는 연결가중치와 같이 이루어진다. 즉, 뉴런 j의 바이어스는 다음 식(3.100)에 의해 조절된다.

$$bias(\neq w)_j = bias(old)_j + \eta\delta_j a_i + \beta\Delta bias_j(old) \quad (3.100)$$

여기서, 우변의 마지막 항은 바이어스의 모멘텀 항이다. 바이어스도 그것에 달려 있는 가상적인 뉴런의 출력이 언제나 1이라는 점을 제외하고는 다른 연결가중치와 동일하게 취급된다.

바이어스가 일반화된 델타규칙을 사용하는 신경망의 학습에 미치는 영향은 강력하다. 특히 일반화된 델타규칙의 경우 시그모이드함수를 사용하기 때문에 이 바이어스의 역할은 매우 중요하다.

5. 시스템 오차계산

일반화된 델타규칙에서 학습 완료 정도를 나타내는 시스템 오차는 다음 식에서와 같이 출력 패턴과 목적 패턴과의 차이에 의해 계산할 수 있다.

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p (o_{p,i} - t_{p,i})^2 \quad (3.101)$$

여기서, $o_{p,i}$ 는 입력 패턴 p에 대한 출력층 i번째 뉴런의 실제 출력값, $t_{p,i}$ 는 목적 패턴 p의 i번째 성분, 그리고 E_p 는 모든 패턴에 대한 신경망의 총 오차이다.

본 연구에서의 일반화된 델타규칙을 이용한 신경망 학습은 다음과 같은 단계로 이루어지며, 그림 3.14는 오류 역전파 신경망의 흐름도를 보여 주고 있다.

[1단계] 학습 자료의 수를 결정한다. 여기에 사용되는 학습 데이터는 0.1과 0.9 사이의 정규화 된 값이다.

[2단계] 신경망의 상태를 결정하는 연결 가중치와 바이어스를 각각 -1.0~1.0 사이의 임의의 값으로 초기화한다.

[3단계] 정규화 시킨 학습패턴을 신경망에 제시한다.

[4단계] 학습 패턴의 값을 입력층 뉴런에서 제시하여 출력되는 값 o_p , 입력층과 은닉층 사이의 연결 가중치 w_{ij} 와 은닉층 뉴런 j의 바이어스 θ_j 를 이용하여 은닉층 뉴런 j의 입력 net_{pj} 를 구한다. 다음으로 net_{pj} 와 시그모이드 함수를 이용하여 은닉층 뉴런 j의 출력 o_{pj} 를 구한다.

[5단계] 은닉층 뉴런의 출력 o_{pj} , 은닉층과 출력층 사이의 연결 가중치 w_{jk} 와 출력층 뉴런 k의 바이어스 θ_k 를 이용하여 출력층 뉴런 k의 입력 net_{pk} 를 구한다. 다음 net_{pk} 와 시그모이드 함수를 이용하여 출력층 뉴런 k의 출력 o_{pk} 를 구한다.

[6단계] 학습패턴의 목표출력 t_{pk} 와 실제 출력 o_{pk} 와의 차로부터 출력층 뉴런 k에 연결된 연결 가중치와 출력층 뉴런 k의 바이어스에 대한 델타 δ_{pk} 를 구한다.

[7단계] 델타 δ_{pk} 와 은닉층과 출력층간의 연결 가중치 w_{jk} 와 은닉층의 출력 net_{pj} 로부터 은닉층 뉴런 j에 연결된 결합 가중치와 은닉층 뉴런의 바이어스에 대한 델타 δ_{pj} 를 구한다.

[8단계] 6단계에서 계산한 출력층 뉴런 k에서의 델타 δ_{pk} , 은닉층 뉴런 j의 출력 o_{pj} , 상수 a와의 곱을 더하여 은닉층 뉴런 j와 출력층 뉴런 k에 연하여 출력층 뉴런 k의 바이어스 θ_k 를 수정한다.

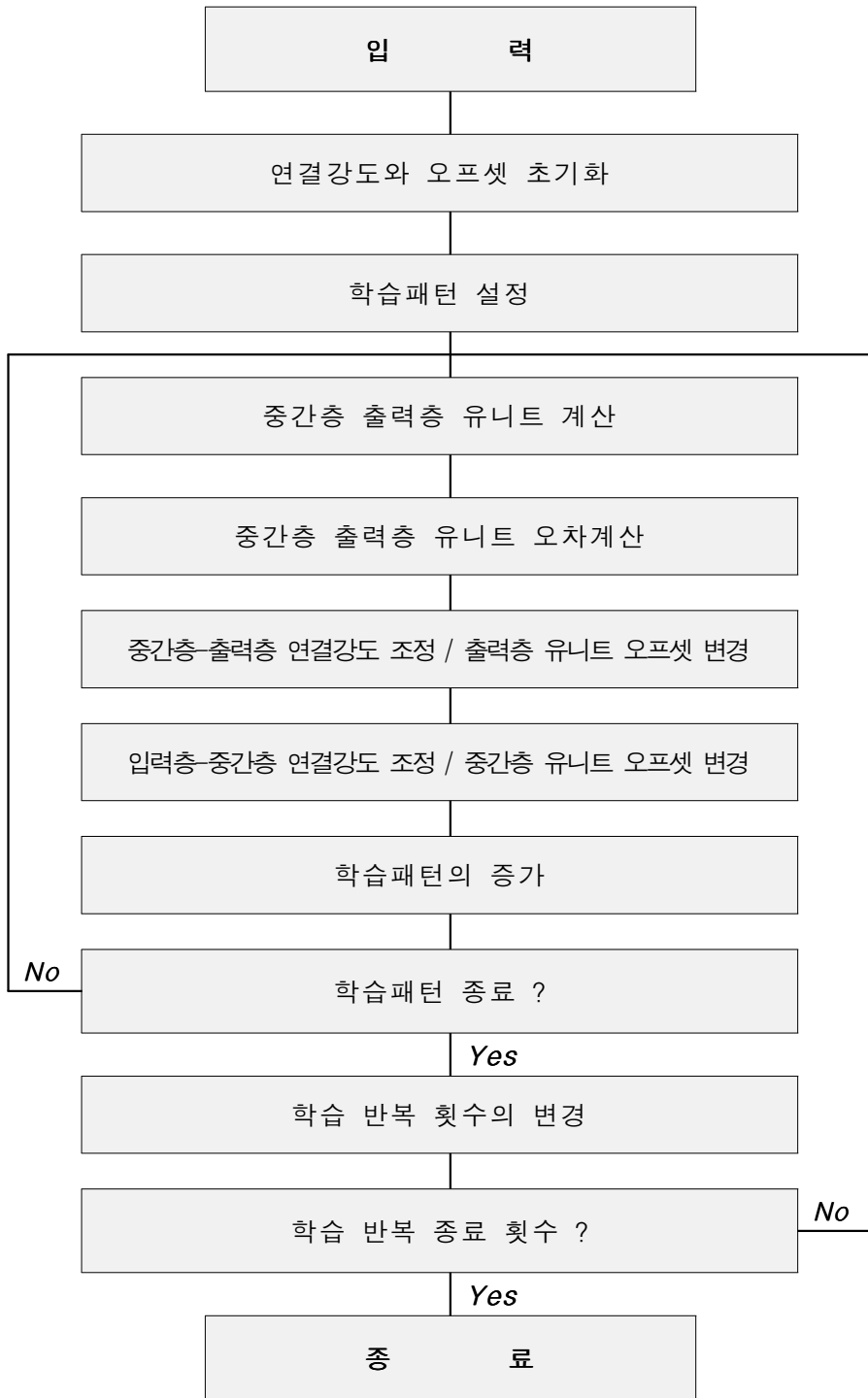


그림 3.14 오류 역전파 신경망의 흐름도(김대수, 1992)

[9단계] 은닉층 뉴런 j 의 델타 δ_{pj} , 입력층 뉴런 i 의 출력 o_{pi} , 상수 α 와의 곱을 더하여 입력층 뉴런과 은닉층 뉴런 j 에 연결된 연결 가중치 w_{ij} 를 수정한다. 또 델타 δ_{pj} 와 상수 β 와의 곱을 더하여 은닉층 뉴런 j 의 바이어스 θ_j 를 수정한다.

[10단계] 모든 학습패턴에 대하여 전부 학습할 때까지 3단계로 되돌아간다.

[11단계] 학습의 반복 횟수가 제한 횟수보다 적으면 3단계로 되돌아간다.

[12단계] 학습을 종료한다.

3.3.3 사면에 대한 안정성 평가의 신경망 모델

인공신경망이론은 인공지능의 한 분야로 추론 및 판단 측면에서 신속성 및 정확성을 지니고 있으며 최근 토목공학분야에 그 적용이 활발해지고 있다. 또한 인공신

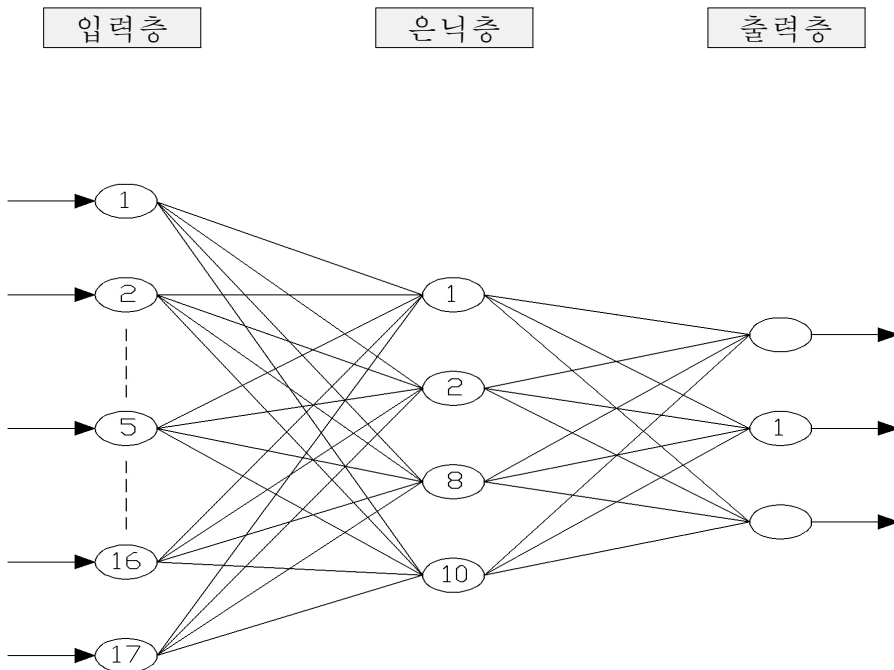


그림 3.15 사면에 대한 안정성 평가의 인공신경망 모델

경망 스스로가 계측자료의 상호 관련성을 인식, 분류함으로써 관계 규명을 명확하게 해주기 때문에 사면에 대한 손상의 상태평가 예측에 효과적인 역할을 기대할 수 있는 장점을 지니고 있다.

본 연구에서 사용한 신경망모델은 사면의 손상 및 파괴에 대한 내적요인과 외적요인을 기준으로 선별한 신뢰성 있는 현장계측 자료를 토대로 인공신경망모델의 학습검증에 사용하였으며, 학습은 최급강하법을 기초로 하는 역전과 연산방식을 이용하여 수행하였다. 사면의 안정성 평가를 위한 신경망 모델은 그림 3.15와 같이 입력층-은닉층-출력층으로 이루어진 17-10-1의 역전과 신경망을 이용하여 제안하였다.

본 연구에서 제안된 인공신경망 모델에 따른 사면의 안정성 평가항목은 퍼지이론에 의한 판정구분과 동일하여 토사사면의 경우 내적요인은 표 3.2와 같고 외적요인은 표 3.3과 같다. 또 암반사면의 경우 내적요인은 표 3.4와 같고 외적요인은 표 3.5와 같다.

표 3.9는 사면의 안정성 평가 출력 결과에 따른 판정등급 기준을 나타내고 있고, 특히 사면의 안정성 평가 등급은 A, B, C, D, E의 5단계로 구분하였다.

표 3.9 사면의 안정성 평가에 대한 판정구분 및 출력결과 값의 범위

판정등급	안전도 평가(X_0)		예측 성능지수(PI)	
	판정구분	출력 결과값의 범위	확률적 방법	퍼지적 방법
A	매우 양호	0.000 ~ 0.125	1.0 ~ 0.9	1.0 ~ 0.8
B	양호	0.126 ~ 0.375	0.9 ~ 0.8	0.8 ~ 0.7
C	보통	0.376 ~ 0.625	0.8 ~ 0.7	0.7 ~ 0.65
D	불량	0.626 ~ 0.875	0.7 ~ 0.65	0.65 ~ 0.6
E	매우 불량	0.876 ~ 1.000	0.65 ~ 0.0	0.6 ~ 0.0

3.4 퍼지-신경망에 의한 안정성 평가방법

3.4.1 퍼지가능성 이론 및 파괴가능성 분포함수

1. 퍼지가능성 이론

데이터 등으로부터 추정된 파괴확률은 기본적 또는 표준적인 것이다. 파괴확률이 최상의 조건 및 최악의 조건하에서 구해지며 이 상황의 사이에는 기본적 또는 표준적인 파괴확률이 있다는 것을 의미한다. 따라서 인간의 신뢰성을 정량적으로 해석하기 위해서는 우선, 해석의 대상인 작업을 인간이 어떠한 상황에서 행하는가를 검토하여 그 상황에 따라서 파괴확률을 수정해야 하므로 그 작업을 구성하는 일련의 작업요소의 내용을 숙지하지 않으면 안 된다.

파괴확률의 수정은 대개 각 작업을 숙지하고 있는 전문가의 협력을 얻어 그의 주관적인 판단에 기초해서 행하게 되는데, 예를 들면 「작업상황이 나쁘므로 추정되는 표준의 파괴확률을 5배로 한다.」 등의 형태로서 대상작업의 상황은 언어를 사용해서 표현된다. 이와 같은 파괴확률의 추정에서 Swain 등은 초보자 또는 숙련자에 대한 단순한 작업과 복잡한 작업의 파괴확률의 모형을 스트레스의 높고 낮음에 대

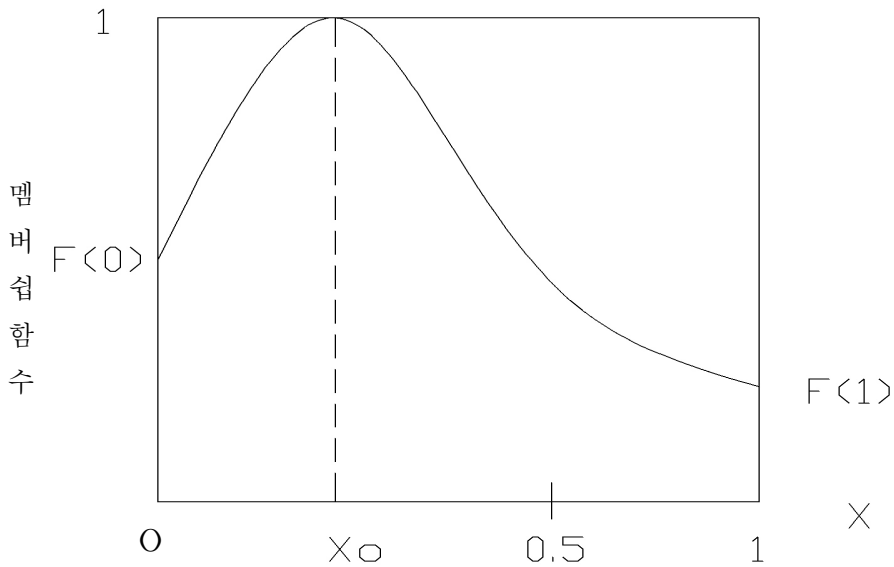


그림 3.16 퍼지 파괴가능성

해 스트레스 수준이 「매우 낮다」, 「최적하다」, 「약간 높다」, 「매우 높다」 등과 같은 어떤 수치가 부여될 수 있는 언어로 표현하거나 또는 확률의 형태로 나타나고 있으나 실제 언어의 의미를 이러한 단순한 수치로 표현함은 부적절하다. 예를 들면, 스트레스 수준간의 경계도 명확히 정의될 수 없으므로 인간이 일상 사용하는 자연언어으로써 인간의 신뢰성을 정성적으로 표현하는 방법이 오히려 적절하다 할 것이다.

여기에서 말하는 언어에 따른 표현이라 함은 예를 들어 「이 작업에서 파괴를 일으킬 가능성은 다소 적다.」 등과 같이 확률을 포함하지 않는 것이다. 신뢰성해석 및 위험해석에서도 위험발생 확률 및 사고가 일어나는 확률 등과 같은 수치로 위험의 정도를 표현하기보다는 일상의 언어로서 표현하는 편이 좋은 경우도 있다. 그러나 여기에는 애매함을 수반하는 언어의 의미를 정량적으로 표현할 것이 필요하고 여기에는 퍼지집합이 사용된다. 언어로 표현된 인간 신뢰성의 의미는 그림 3.16과 같은 鬼澤 등이 제안한 퍼지집합으로 표현하면 이 퍼지집합은 주관적 신뢰도상에서 정의된다.

여기에서 주관적 신뢰도는 인간의 신뢰도를 평가자 자신의 주관에 기초해서 평가하는 것으로 y 축은 주관적 신뢰도의 멤버쉽함수를 나타내고 x 축은 주관적 불신뢰도를 나타낸다. 그림 3.16과 같이 y 축의 $[0, 1]$ 상의 신뢰도에 대응하는 x 축의 값이 0으로 되지 않게 하는 멤버쉽함수는 파괴의 가능성을 나타내는 가능성분포함수를 선택함에 따라서 같은 작업에서 인간은 파괴를 범할 가능성도 있고 파괴를 범하지 않을 가능성도 있다고 표현할 수 있다. 즉, 파괴확률 대신에 파괴가능성을 신뢰성척도로 사용하는 것이다. 여기에는 인간의 신뢰성을 정성적으로 표현하는 언어와 그 의미를 나타내는 퍼지집합을 대응시킴에 있어서 평가자의 주관을 그대로 반영시켜 해석하고 있다.

그림 3.16에서 주관적 불신뢰도가 1이라 함은 평가자가 대상의 시스템요소가 소정의 시간 내에 파괴를 일으킨다고 평가하고 있음을 의미하고 역으로 주관적 불신뢰도가 0이라 함은 그 요소가 소정의 시간 내에 파괴를 일으키지 않는다고 평가하고 있음을 의미한다. 또한 이 값이 0.5라 함은 평가자가 갖고 있는 표준의 주관적 불신뢰도 임을 의미하고 있다. 따라서 파괴가능성은 주관적 불신뢰도상의 퍼지집합이며 불신뢰도를 나타내는 하나의 척도이다.

각 작업에 대한 인간의 신뢰성을 언어로 표현하거나 또는 그 의미를 $[0, 1]$ 상의 퍼지집합으로 표현한다는 것은 평가자가 어떤 기준(이는 평가자 자신이 가진 기준이어도 좋다.)과 비교해서 그 신뢰성을 평가한다는 것을 의미한다. 그러므로 인간의

신뢰성을 퍼지집합으로 표현함에 수반되는 주관성 및 애매함이 해석결과에도 그대로 영향을 미치게 되며 해석결과를 평가하는 경우에도 확률론적 기법에서 취급하는 것과 같이 이미 구해진 확률을 재차 평가대상으로 삼는 것은 아니고 평가자가 앞서 가지고 있는 기준에 의하여 평가하는 것으로 해석결과와 퍼지집합과 평가자가 앞서 사용한 언어에 대응시킨 퍼지집합을 비교하기 때문이다.

또 퍼지이론을 신뢰성의 문제에 도입하는 경우 객관성이 보장될 수 없다는 비판이 있을 수도 있으나 이는 어떤 확률론적 기법을 사용해서 고장 및 사고확률을 해석하여 결과를 도출 하여도 그 수치에는 주관적 평가의 영향이 혼입되게 되며 그 수치에는 주관적 평가에 수반되는 애매함이 표면화 되지 않고 수치 내에 혼입되어 최종적인 평가단계에서도 각 작업의 파괴확률을 추정하는 단계에서 보장할 수 있는 정도 이상의 주관적 평가는 바랄 수 없다. 그러나 퍼지이론을 신뢰성해석의 문제에 도입하여 어떤 기준에 따라서 각 요소의 신뢰성을 주관적으로 평가하고 그 신뢰성을 퍼지집합으로 표현하여 해석하면 최초에 혼입된 주관적 평가에 수반되는 애매함이 해석결과에도 그대로 반영된다. 또한 평가자가 달라지면 당연히 평가기준 및 해석결과도 달라지는데 이는 평가에 혼입되는 주관적인 영향을 인식하게 되면 당연한 것이다. 단, 이때 평가자가 갖고 있는 평가기준을 명확히 하고 또 평가결과가 그 평가기준을 기초로 해서 얻어진 것임을 명확하게 하지 않으면 안 된다.

2. 파괴가능성 분포함수

인간 및 지반공학의 신뢰성을 확률론적 입장에서 수치로 평가하는 것이 물리적 정의를 완벽하게 나타내는 것은 아니다. 여기서 파괴율은 조사 횟수나 지반요소에 따라서도 달라질 수 있으며 여기에는 어느 정도의 해석의 어려움이 포함되어 있다. 따라서 이러한 요인의 영향을 고려하기 위하여 신뢰성의 해석대상을 지반으로 할 경우에 그 지반요소가 어떤 목적으로 사용되고 있는가, 또 인간이 그 대상일 경우 어떠한 환경에서 작업을 하는가를 평가하여 추정된 기본 파괴확률을 수정해서 사용할 필요가 있음으로 파괴확률의 수정에도 공학적, 경험적인 판단이 이루어지지 않으면 안 된다. 그러므로 인간 및 지반공학시스템의 신뢰성을 수치로 표현할 만큼의 충분한 데이터가 없는 경우 무리하게 수치로 표현하는 대신 일상 사용하는 언어로서 표현하는 것도 하나의 수단이 될 것이다. 왜냐하면, 언어의 의미는 애매하나 그 애매함이 역으로 신뢰성평가에 관한 애매함을 잘 포함할 수 있기 때문이다.

인간을 포함하는 시스템 대상은 복잡하고 애매한 문제에 관해서는 해석대상을 개략적으로 이해하는 거시적 방식의 도입이 필요하며, 이 방식의 하나로서 정성적인 모형에 기초한 해석방법이 필요하고 여기에는 퍼지 개념의 적용이 합당한 것이다. 언어의 의미를 수치로 표현하거나 언어의 의미의 경계를 명확하게 해 둔다는 것은 평가자에게 심한 제약을 가하는 것이 된다.

파괴확률은 불확실성이 많이 포함되는 수치이므로 개략적인 수치로 파괴확률을 대표할 수도 있지만, 이 경우 정확성을 요구하는 수치 자체의 진정한 의미를 상실하게 되므로 더욱 적합한 모형을 사용해야 할 필요성에 대한 해답을 제공하는 것이 퍼지이론의 적용이라고 할 수 있다.

인간의 파괴확률을 추정함에 있어 인간의 신뢰성에 포함되는 애매함을 적극적으로 수용하는 사고방식으로 그림 3.17에 나타난 확률상의 퍼지집합 즉, 퍼지확률을 사용해서 해석하는 방법이 있다. 퍼지확률을 이용하는 경우 파괴확률을 「이 작업의 파괴확률은 대개 10^{-2} 이다」 등으로 표현할 수 있는데, 퍼지확률을 사용하는 방법에서는 파괴확률이 대개 애매하다는 인식에 입각하여 파괴확률의 개념을 정의하기 때문에 인간의 신뢰성을 개략적으로 표현할 수가 있게 된다.

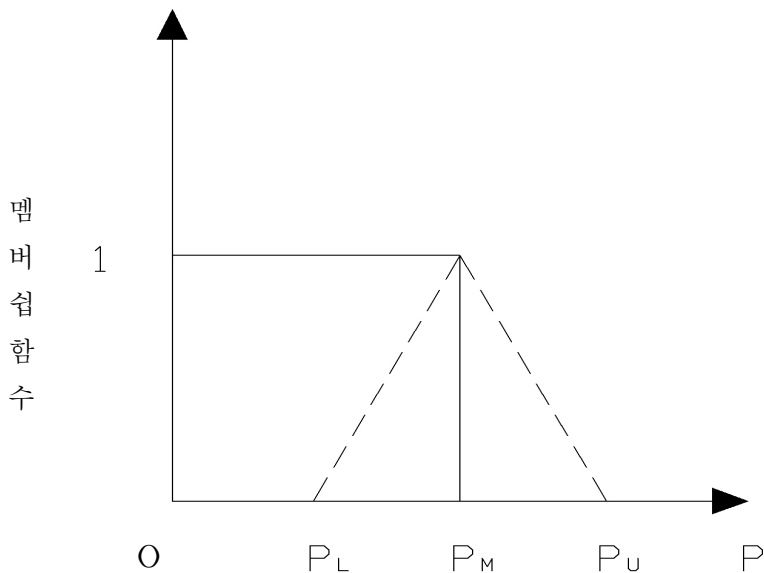


그림 3.17 퍼지 가능성확률

퍼지확률은 그림 3.17과 같은 확률 상에 정의된 퍼지집합이므로 전술한 값에 따른 표현과 의미가 다르지만, 확장원리를 사용하여 종래의 신뢰성해석에서 사용되고 있는 확률론적 기법에 따른 정량적 해석법을 그대로 사용할 수 있게 된다. 여기서 P_L 은 하위파괴확률, P_M 은 평균파괴확률 P_U 는 상위파괴확률을 나타낸다.

또한 그림 3.17과 같이 인간 및 지반공학의 신뢰도를 $[0, 1]$ 상의 퍼지집합으로 표현하여 인간의 경우 식(3.102)의 $F(x)$ 를 과오가능성, 지반의 경우 파괴가능성이라고 하고 이를 사용한 해석법을 제안하고 있다. 즉, 인간의 경우 과오가능성을 식(3.102)와 같은 멤버쉽함수를 가진 $[0, 1]$ 상의 퍼지집합으로 표현하는 것이다.

$$F(x) = \frac{1}{1 + 20 \times |x - x_0|^m} \quad (3.102)$$

여기에서, $0 \leq x, x_0 \leq 1$ 이며 파라메타 x_0 는 $F(x)$ 의 최대의 값(등급)을 부여한 것이고 파라메타 m 은 평가의 애매함에 관한 것이며 $x \leq x_0$ 일 때 $m = m_L$, $x > x_0$ 일 때 $m = m_R$ 이다. 또, 모든 $x \in [0, 1]$ 에 대해서 $F(x) > 0$ 이므로, 식(3.102)는 x_0 가 아무리 작아도 인간이 파괴를 범할 가능성이 있음을 나타내고 있다. 즉, 이러한 파괴의 가능성분포를 나타낸 그림 3.16의 x축은 주관적 평가에 따른 인간의 신뢰도를 나타내고 있으며 이 값이 1에 가까울수록 신뢰도가 낮다는 것을 의미하고 있다. 또한 횡축의 0.5는 평가자가 갖고 있는 기준의 신뢰도를 나타내고 이 값이 0에 가까울수록 높은 신뢰도를 나타낸다고 해석하고 있다. 다시 말하면, x축의 값이 1이라는 것은 절대적으로 과오를 범한다고 하는 주관적 평가이고 x축의 값이 0이라는 것은 절대적으로 과오를 범하지 않는다는 주관적 평가를 의미한다.

3.4.2 사면에 대한 활동요인의 성능평가

사면의 경우 한계평형방법의 목적은 활동면을 따라 토사사면이 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체의 안정성을 해석하는 것이다. 즉, 문제를 단순화하기 위한 가정을 설정하고 간단한 정역학이론으로 해답을 얻는 방법으로서 한계평형해석법은 절·성토 사면의 안정해석에 널리 사용되고 있다. 사면의 안전율을 구하기 위해서는 곡

면인 활동면상의 각점에서 전단응력과 전단강도를 산정하여야 한다. 사면전체로서의 안전율은 활동면 전체에 걸쳐 일어나는 전단강도와 전단응력의 비로서 파괴 토체 전체의 활동중심에 대한 저항모멘트와 활동모멘트의 비로 식(3.103)과 같이 표시할 수 있다.

$$F_s = \frac{M_r}{M_o} \quad (3.103a)$$

$$F_s = \frac{M_r}{M_o} - 1 \geq 0 \quad (3.103b)$$

여기서, F_s : 사면의 안전율, M_r : 파괴 토체의 저항 모멘트(ϕ_1 : 내적요인 상태지수 ϕ_2 : 외적요인 상태지수), M_o : 파괴 토체의 활동 모멘트이다.

위와 같은 가정 하에서 활동파괴의 성능함수는 식(3.103b)과 같이 구해진다. 지금까지 성능함수에 포함된 파라미터의 통계적 성질에 대해 많은 연구가 이루어져 왔으며, 각 항목의 분포함수에 대해서는 M_r 는 대수정규분포, M_o 는 정규분포, F_s 는 일정한 분포라는 가정을 채용함이 비교적 타당할 것으로 알려져 있다.

암반사면의 안정해석에서 사용되는 한계평형해석법은 미끄러짐을 일으키고자 하는 외력과 저항하고자 하는 전단저항력의 균형을 계산하는 극한평형이론에 의하며, 본 연구에서는 극한평형해석법에 있어 평면활동파괴만을 가정하였고, 이에 따른 평면활동파괴의 성능함수는 다음의 식(3.104)와 같이 구해진다.

$$k = \frac{\tan\phi}{\tan\theta} - 1 \geq 0 \quad (3.104)$$

여기서, ϕ : 활동면의 마찰각, θ : 활동면의 경사각, k : 균열부에 충전수가 있는 경우의 저감계수이다.

지금까지 성능함수에 포함된 파라미터의 통계적 성질에 대해 많은 연구가 이루어져 왔으며, 각 항목의 분포함수에 대해서는 ϕ 는 대수정규분포, θ 는 정규분포, K 는 일정한 분포라는 가정을 채용함이 비교적 타당한 것으로 알려져 있다.

표 3.10 토사사면에 대한 활동요인의 상태 및 성능평가 기준

평가 등급	예측상태지수 (X ₀)	상태평가기준	보 강 방 법		예측성능지수(PI)	
					확률적방법	퍼지적방법
A	0.000~0.125	파괴 가능성 없음	보강 불필요(정기 관측)		1.0~0.9	1.0~0.8
B	0.126~0.375	안정된 상태	안전율 유지법	수평 배수공 + 식생공	0.9~0.8	0.8~0.7
C	0.376~0.625	보통의 상태		콘크리트 격자 + 식생공	0.8~0.7	0.7~0.65
D	0.626~0.875	불안정 상태	안전율 증가법	소일네일링 + 숏크리트	0.7~0.65	0.65~0.6
E	0.876~1.000	극히 심각하고 불안정한 상태		절취공법 + 소일네일링	0.65~0.0	0.6~0.0

표 3.11 암반사면에 대한 활동요인의 상태 및 성능평가 기준

평가 등급	예측상태지수 (X ₀)	상태평가기준	보 강 방 법		예측성능지수(PI)	
					확률적방법	퍼지적방법
A	0.000~0.125	붕괴가능성 없음	필요 없음		1.0~0.9	1.0~0.8
B	0.126~0.375	비교적 안정된 상태	사면하단측구 및 펜스 설치 또는 구간 볼팅		0.9~0.8	0.8~0.7
C	0.376~0.625	보통상태	사면하단측구 및 펜스 설치 또는 구간 숏크리트		0.8~0.7	0.7~0.65
D	0.626~0.875	불안정 상태	전면숏크리트, 하단벽체, 재굴착 및 깊은배수		0.7~0.65	0.65~0.6
E	0.876~1.000	극히 심각하고 불안정 상태	중력식 또는 앵커를 가진 벽체, 재굴착		0.65~0.0	0.6~0.0

사면파괴의 성능함수식에서 활동면의 저항모멘트(Mr)와 활동면의 활동모멘트(Mo) 및 안전율(Fs)의 영향을 받아 사면이 파괴된다고 가정하여 사면에 대한 활동요인의 상태평가는 다음의 식(3.105)와 같은 예측파괴확률에 대응하는 예측상태지수 X_0 로부터 구해지며, 예측 파괴확률 p_f^i 는 퍼지-베이스 신뢰성해석모델로 계산되어 진다. 또한 지금까지 명확한 기준은 없으나 본 연구에서는 Meyerhof 등의 연구에 의한 목표 파괴확률로서 $p_{f_0}=1.0 \times 10^{-2}$ ($\beta_0=2.33$)에서 $p_{f_0}=1.0 \times 10^{-3}$ ($\beta_0=3.10$)의 범위를 채용하였다.

$$X_0 = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p_f^i))^3} \quad (3.105)$$

여기서, $k = 1/\log(1/p_{f_0}) =$ 기본파괴확률(기본사전확률), $p_f^i =$ 예측 파괴확률(사후파괴확률), $p_{f_0} =$ 활동의 목표 파괴확률이다.

따라서, 토사사면에 대한 활동요인의 상태 및 성능평가 기준은 다음의 표 3.10과 같으며, 암반사면의 경우 표 3.11과 같이 된다.

$$PI = \frac{k}{X_0} \quad (3.106)$$

여기서, X_0 : 예측의 파괴가능성(예측상태지수), k : 기본파괴확률(원래의 상태지수)이다.

3.4.3 결함수법에 의한 신뢰성 해석

1. 일반적 결함수의 구조

대규모시스템의 신뢰성 및 안정성을 해석하는 기법은 크게 2가지로 분류할 수 있는데 첫째는 시스템의 신뢰성그래프해석(RGA)기법으로 이는 전기, 전자 또는

기계공학분야의 신뢰성해석 기술자에 의해 추진, 발전되어 왔으며 둘째는 결합수 분석(FTA) 기법이다.

그 중, FTA는 대규모시스템의 신뢰성해석을 위한 유일한 도구로 널리 인식되어 왔다. FTA에서 시스템의 성공 또는 실패 가능성은 소위 구조함수를 사용하여 평가되며 성공의 확률은 시스템의 신뢰성의 척도로서 사용되고 있다.

시스템의 신뢰성해석을 수행하는 경우 시스템의 신뢰성에 관계되는 직접적요인의 근인요소인 2차적 요인까지 고려한 각종요인이 시스템에 미치는 영향 및 인과 관계를 검토하여 시스템의 신뢰성구조를 명확하게 하지 않으면 안 된다. 이때 고려해야 할 요인의 수가 많으면 요인간의 관계가 복잡하게 되기 때문에 보다 체계적인 해석방법을 도입할 필요가 있고, 여기에서는 시스템의 신뢰성해석에 대규모시스템의 신뢰성해석법인 FTA를 이용한다.

결합수는 정상사상과 기본사상으로 불리는 상호독립적인 사상간의 계층적 관계를 Bool 논리에 따라 도시적으로 표현한 것이다. FTA에서는 정상사상, 중간사상, 기본사상을 규정하고 이들을 AND 또는 OR의 논리 gate로 연결하여 Fault Tree를 구성한다. AND gate는 모든 입력사상이 생길 때 출력사상이 발생한다는 관계를 OR gate는 입력사상 중 한 가지 이상이 생길 때 출력사상이 발생한다는 관계를 나타내고 있다.

FTA의 이점으로서는 각종 요인간의 관련성과 이들 요인의 정상사상에 미치는 영향의 정도를 명확하게 파악할 수 있다는 것이며, 이는 정상사상에 중대한 영향을 미치는 요인의 발생과정이 명확하게 되어 사고의 발생구조를 시각적으로 용이하게 이해할 수 있다는 점 등을 들 수 있으며, 이 방법에 의해 기본사상과 정상사상 간의 관계에 대한 연역적인 해석이 가능하게 된다.

종래 FTA에서는 어떤 기본사상의 발생이 정상사상에 어떠한 영향을 미치는가를 알기 위해서 Fault Tree로 표현된 기본사상과 정상사상과의 구조적관계를 수학적으로 표현하는 구조함수 ϕ 를 정의한다. 이때, 기본사상 i 의 상태를 x_i 로 표시하면 x_i 는 다음과 같은 2치논리에 의한 특성함수로서 정의된다. 즉 특성함수는 식(3.107)

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{기본사상 } i \text{ 가 생김} \\ 0 & \text{기본사상 } i \text{ 가 생기지 않음} \end{cases} \quad (3.107)$$

으로 정의되며, 또한 정상사상의 상태 Φ 는 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 의 함수로서 식(3.108)

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{정상사상이 발생한다} \\ 0 & \text{정상사상이 발생하지 않는다} \end{cases} \quad (3.108)$$

로서 표현되는 이치(Binary)를 취하는 변수 Φ 로서 정의한다.

Fault Tree에서는 정상사상으로서 시스템 전체의 고장 또는 사고와 같은 시스템에 따라서 바람직하지 않은 사상이 발생하고 이에 대응하여 기본사상으로서 요소의 고장, 인간의 과오 등 파괴 또는 사고의 기본원인이 발생한다.

만약, 정상사상의 상태 Φ 가 기본사상의 상태 $x_i (i = 1, \dots, m)$ 에 따라서 완전히 결정된다고 하면 Φ 는 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 의 함수로서 식(3.109)로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \Phi(x) \quad (3.109)$$

단, 여기에서 \doteq 는 정의식을 의미하며 이 0-1변수의 0-1함수 $\Phi(x)$ 를 Fault Tree의 구조함수라 한다.

그림 3.18에서 나타낸 Fault Tree상의 AND gate에 대한 구조함수는 식(3.110)으로 나타낸다. 또한, OR gate에 대한 구조함수는 식(3.111)로 나타내며 단, 여기에서 기호 \prod 는 식(3.110)을 의미한다.

$$\Phi_{AND}(x) = \prod_{i=1}^m x_i = \min(x_1, \dots, x_m) \quad (3.110)$$

$$\Phi_{OR}(x) = \prod_{i=1}^m x_i = \max(x_1, \dots, x_m) \quad (3.111)$$

$$\prod_{i_1}^m x_i \doteq 1 - \prod_{i=1}^m (1 - x_i) \quad (3.112)$$

일반적인 Fault Tree에서는 AND gate와 OR gate가 조합되어 정상사상의 구조함수로 구성되므로 직접 $\Phi(x)$ 를 계산해서 정상사상의 상태를 추정할 때 기본사상의 수 및 gate의 수가 많으면 논리연산이 복잡하게 되므로 그 추정이 용이하지 않다. 더욱이 구조함수가 2치논리로서 정의되기 때문에 기본사상의 발생유무가 명확하지 않은 경우에는 Fault Tree를 사용할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 AND gate와 OR gate에 대한 구조함수를 대수합, 대수곱의 사고방식을 직접 사용해서 식(3.107), 식(3.108)의 정의를 다음의 식(3.113), 식(3.114)와 같이 치환한다.

$$\Phi_{AND}(x) = \bigwedge_{i=1}^m \doteq \min x_i \tag{3.113}$$

$$\Phi_{OR}(x) = \bigvee_{i=1}^m \doteq \max x_i \tag{3.114}$$

식(3.113), 식(3.114)는 퍼지이론의 대수연산이 min-max연산만으로서 실행되고 있음을 설명하고 있다. 이들은 식(3.110), 식(3.111)에 비해서 간단한 형태를 취하며 정상사상에 대한 구조함수 Φ 의 값을 직접 계산할 수 있어 계산의 간략화를 도모할 수 있으며, 기본사상 i 의 상태 x_i 를 반드시 0과 1의 2치논리로서 취급할 필요가 없이 {0, 1}에서부터 [0 1]로 확장 할 수 있다.

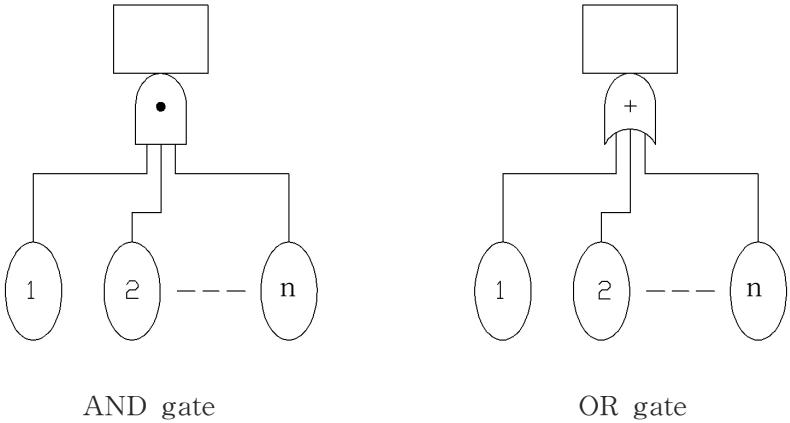


그림 3.18 Fault Tree

인간의 신뢰성해석에서 기본사상에 포함되는 주관적 불확정성의 영향을 단정적인 형태로 평가하는 것은 곤란하기 때문에 여기에는 Blockley에 의해 제안된 언어변수를 사용하는 방법을 이용한다. 지금 기본사상을 F_i 로 표시하면 이의 평가는 언어변수를 사용해서 행하게 되는데. 기본사상에 F_i 에 대한 인간의 신뢰도를 E_i 로 하고 이를 퍼지집합으로 나타낸다. 또한 F_i 의 시스템에 관한 영향 및 다른 요인과의 관련성에 수반되는 영향을 고려하기 위해서, 기본사상의 중요도를 w_i 를 고려하여 양자를 조합하는 형태로서 F_i 의 영향을 정의한다. 여기에서 사용하는 각 언어변수 $[0, 1]$ 로서 정의되는 대집합을 가진 퍼지집합으로 규정되고 그 특성을 귀속도함수로 주어진다.

이제 중요도를 고려한 기본사상 F_i 의 신뢰도를 E'_i 로 하고 기본사상의 신뢰도를 E_i , 중요도를 w_i 라 하면, 이와 중요도의 max연산에 의해 E'_i 는 다음 식(3.101)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E'_i = E_i \cup w_i \quad (3.115)$$

식(3.115)의 연산에 의해서 E'_i 는 귀속도함수로 규정되므로 $[0, 1]$ 로 정의되는 대집합을 가진 퍼지집합으로 된다. 여기에서 기호 \cup 는 합집합을 나타낸다.

지금, 기본사상의 중요도를 그 합이 1이 되게 정규화하고 E'_i , E_i , w_i 의 대집합에 대한 귀속도함수를 각 $\mu'_{E'_i}(x)$, $\mu_{E_i}(x)$, μ_{w_i} 로 하면 $\mu'_{E'_i}(x)$ 는 식(3.116)으로 나타낼 수 있다.

$$\mu'_{E'_i}(x) = \mu_{E_i}(x) \vee \mu_{w_i}, \quad x \in [0, 1] \quad (3.116)$$

단. 여기에서 기호 \vee 는 max연산을 나타낸다. 따라서 정상사상에 대한 귀속도함수 $\mu'_{E'_i}(x)$ 는 식(3.117)과 같다.

$$\mu'_{E'_i}(x) = \Phi(\mu'_{E'_i}) \quad (3.117)$$

여기서 μ'_{E_T} 는 귀속도함수 μ'_{E_i} 를 성분으로 하는 벡터이다.

2. 결합수분석 기법

FTA는 신뢰도와 안전 분석을 위해 행하는 기법으로 사면의 유지관리 전략에 적용될 수 있는데, 사면의 유지관리의 전략 목표 중 하나는 Project 수준에서의 관리를 넘어 Network 수준에서의 관리를 포함하고 있다. 이러한 경우는 특히 관리해야 할 사면의 수가 많고 사용할 수 있는 예산은 한정되어 있는 경우 보수·보강의 우선순위를 선정해야 할 때 자주 발생한다. 따라서 사면의 구성 상태평가 보다는 사면의 전체적인 상태평가가 중요하지만, 기존의 상태등급을 사용하는 경우 사면의 구성 상태평가로부터 사면의 상태를 추정해 내기란 쉬운 일이 아니다.

이러한 이유 중 가장 큰 문제는 평가지표로 사용되는 상태등급의 산정기준이 육안점검에 의한 외관평가로서 사면의 구성상태의 성능을 나타내기 힘들 뿐 아니라 사면 전체의 성능지수로 사용되기 위한 통합과정에 있어 표준적인 변환모델을 적용할 수 없기 때문이다. 또한 단일 사면이 복수이상의 한계상태함수를 갖고 있는 경우에는 직렬시스템의 결합수분석이 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 하위시스템의 상태지수로부터 상위시스템의 상태지수를 추정하는 방법 중 수학적 근거를 가지고 접근할 수 있는 집합론에 근거한 시스템 신뢰성지수 계산법을 적용하였다. 또 하위시스템의 신뢰성지수로부터 상위시스템의 신뢰성지수를 계산하는 방법은 다음과 같다. 일반적인 결합수분석은 시스템의 구성구조와 각 구성요소의 신뢰도에 관련하여 결정된다. 시스템 구성구조 모델 중 가장 간단한 것으로는 직렬시스템(Series System)과 병렬시스템(Parallel System), 그리고 혼합시스템(Combination System)이 있다.

(1) 직렬시스템

직렬 시스템은 그림 3.19와 같이 나눌 수 있으며, 이 시스템은 어느 구성요소 하나라도 파괴되면 기능하지 않게 되므로 이 시스템이 기능하기 위해서는 모든 구성요소가 정상적으로 작동하고 있어야 한다. 따라서 이 직렬 시스템의 신뢰도를 대수합 연산(or 연산)으로 하고, 시스템의 각 구성 요소가 서로 독립적이면 파괴확률은 다음과 같이 나타내어진다.

- 대수합

$$P_f = P_{f1} + P_{f2} - P_{f1} \times P_{f2} \quad (3.118a)$$

- 신뢰성지수

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (3.118b)$$

여기서, P_f =직렬시스템의 파괴확률, P_{f1} =직렬체계1의 파괴확률, P_{f2} =직렬체계2의 파괴확률이다.

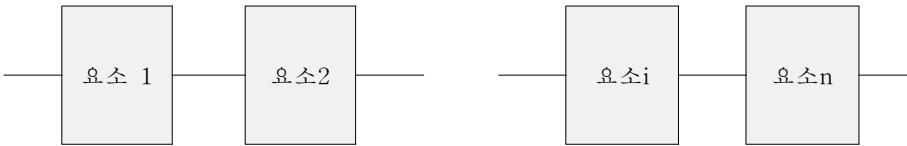


그림 3.19 직렬 시스템

(2) 병렬 시스템

병렬 시스템은 그림 3.20과 같이 대수곱연산(and 연산) 나타내어지며, 이 시스템은 어느 구성요소 하나라도 정상이면 기능하며 이 시스템이 파손되기 위해서는 모든 구성요소가 파괴되어야 한다. 따라서 이 시스템의 파괴확률은 각 구성요소가 서로 독립적이라 하면, 다음과 같이 나타내어진다.

- 대수곱

$$P_f = P_{f1} \times P_{f2} \quad (3.119a)$$

- 신뢰성지수

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (3.119b)$$

여기서, P_f =병렬시스템의 파괴확률, P_{f1} =병렬체계1의 파괴확률, P_{f2} =병렬체계2의 파괴확률이다.

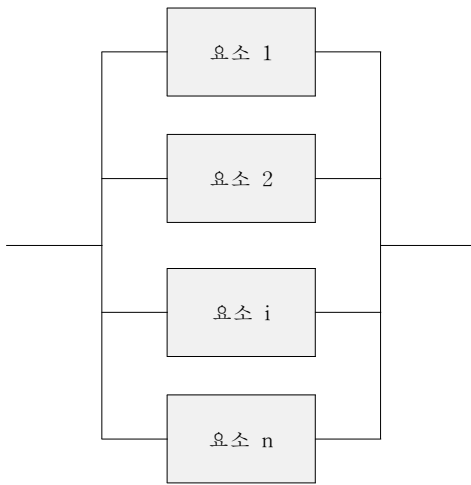


그림 3.20 병렬 시스템

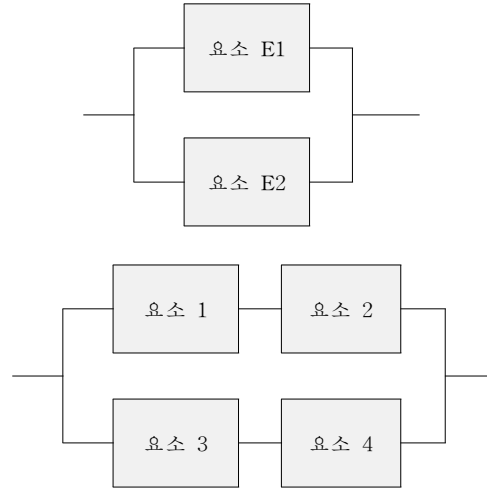


그림 3.21 혼합 시스템

(3) 혼합시스템

직렬 시스템은 신뢰도가 낮아지고, 병렬 시스템은 신뢰도가 높아진다. 시스템이 직렬 시스템이 되어 신뢰도가 낮아진 경우에 병렬시스템을 연결함으로써 전체 시스템의 신뢰도를 개선할 수가 있다. 직렬과 병렬 시스템이 혼합된 시스템의 신뢰도는 그림 3.21과 같이 적당히 등가 구성요소를 생각하고 위의 직렬 시스템과 병렬 시스템 각각에 대한 계산식을 이용하여 쉽게 구할 수가 있다. 요소 1과 2의 등가요소 E1에 대한 신뢰도는 직렬 시스템의 파괴확률로 되므로 식(3.118)로 산정하고, 마찬가지로 요소 3과 4의 등가요소 E2에 대한 파괴확률은 식(3.119)로 산정된다. 전체 시스템은 등가요소 E1과 E2의 병렬시스템이 되고 있으므로 시스템의 파괴확률은 식(3.119)를 이용하면 된다.

3. 퍼지 결합수분석 기법

사면의 상태등급의 산정기준이 육안점검 등과 같은 주관적인 자료에 대한 불확실성을 처리하고, 전문가 의견에 대한 불확실성을 처리하기 위해 퍼지이론이 이용된다. 본 연구에서는 현장에서 관측된 자료와 실험결과에서 도출된 파괴가능성에 대한 주관적 불확실성을 처리하기 위해 퍼지논리에 결합수분석 기법을 접목한 다음과 같은 퍼지 결합수분석 기법을 사용하였다.

(1) 수치정보에 의한 해석방법

수치정보에 의한 해석방법은 퍼지집합의 기본연산인 대수합과 합연산을 사용하면 직렬체계의 손상 구조부재요소에 대응하는 파괴가능성의 주관적 신뢰성감지함수 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.

- 대수합

$$X_0 = G(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p_f))^3} \quad (3.120a)$$

- 합연산

$$X_0 = G(X_{01}, X_{02}) = \frac{[(X_{01}/(1 - X_{01}))^3 + (X_{02}/(1 - X_{02}))^3]^{1/3}}{1 + [(X_{01}/(1 - X_{01}))^3 + (X_{02}/(1 - X_{02}))^3]^{1/3}} \quad (3.120b)$$

여기서, $P_f = P_{A1} + P_{A2} - P_{A1} \times P_{A2}$, P_f =논리합연산(OR연산)의 전체 사후파괴확률, X_{01} =직렬체계 1의 파괴가능성에 대한 주관적 신뢰성감지함수, X_{02} =직렬체계 2의 파괴가능성에 대한 주관적 신뢰성감지함수이다.

이 때, X_{01} , X_{02} 는 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$X_{01} = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p_{f1}))^3} \quad (3.121a)$$

$$X_{02} = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p_{f2}))^3} \quad (3.121b)$$

한편, 병렬체계의 손상 사면의 구성요소에 대응하는 정량적 정보에 의한 X_0 는 다음과 같이 정의된다.

- 대수곱

$$X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p_f))^3} \quad (3.122a)$$

- 곱연산

$$X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + [(1 - X_{01})/X_{01}]^{1/3} + [(1 - X_{02})/X_{02}]^{1/3}]^3} \quad (3.122b)$$

여기서, $P_f = P_{f1} \times P_{f2}$ 이고, P_f =대수곱연산(AND연산)의 전체 사후파괴확률, X_{01} =병렬체계 1의 파괴가능성에 대한 주관적 신뢰성감지함수, X_{02} =병렬체계 2의 파괴가능성에 대한 주관적 신뢰성감지함수이다. 이 때, 병렬체계의 X_{01} , X_{02} 는 식(3.121)을 이용하여 계산되어 진다.

(2) 언어정보에 의한 해석방법

언어정보에 의한 해석방법은 파괴가능성에 의한 퍼지 신뢰성해석을 이용한 정성적이고 주관적인 정보를 이용한 방법으로서 직렬체계의 퍼지 신뢰성해석인 경우에는 식(3.120)의 수치파라미터를 파라미터 c 로 치환하면, 퍼지집합의 연산에 대한 파괴가능성의 전체 주관적 신뢰성감지함수 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.

- 대수합

$$X_0 = G(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p_f))^c} \quad (3.123a)$$

- 합연산

$$X_0 = G(X_{01}, X_{02}) = \frac{[(X_{01}/(1 - X_{01}))^c + (X_{02}/(1 - X_{02}))^c]^{1/c}}{1 + [(X_{01}/(1 - X_{01}))^c + (X_{02}/(1 - X_{02}))^c]^{1/c}} \quad (3.123b)$$

식(3.123)의 파라미터 c 는 평가자의 주관에 따라 달라지는 데, 최미라 논문에 의하면 c 값은 $c=2.5$ (낙관적 평가), $c=1.5$ (표준적 평가), $c=0.85$ (보수적 평가)로 선택하고 있다. 한편, 병렬체계의 퍼지 신뢰성해석인 경우에는 식(3.122)의 수치파라미터를 파라미터 n 으로 치환하면, 정성적 정보에 의한 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.

- 대수곱

$$X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p_f))^n} \quad (3.124a)$$

- 곱연산

$$X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + [(1 - X_{01})/X_{01}]^{1/n} + [(1 - X_{02})/X_{02}]^{1/n}]^n} \quad (3.125b)$$

식(3.125)의 파라미터 n 는 평가자의 주관에 따라 달라지는 데, n 값은 $n=2.9$ (낙관적 평가), $n=2.05$ (표준적 평가), $n=1.0$ (보수적 평가)으로 선택하고 있다.

4. 신뢰성 해석방법

사면의 안정성을 신뢰성해석 및 확률적으로 추정하는 방법은 암묵적인 방법 (Implicit Method)과 명시적인 방법 (Explicit Method)으로 구분할 수 있는데 암묵적인 방법은 사면의 한계상태방정식을 구성하는 각 설계변수를 확률변수로 보고 각 변수의 확률밀도함수를 대입하여 이를 직접 적분하는 방법을 말한다. 이 방법은 주어진 시간에서의 파괴확률, 즉 사면의 한계상태방정식을 확률적으로 직접 나타내는 방정식 형태의 결과를 주는데 직접적으로 확률을 계산할 수 있고 확률함수의 형태를 명시적으로 파악할 수 있는 장점이 있으나, 복잡한 구성방정식 때문에 이를 푸는데 수학적 어려움이 있고, 명시적인 방법은 구조물의 한계상태방정식의 직접적인 변형이 필요치 않은데, 1계신뢰성방법, 2계신뢰성방법 등이 그 대표적인 방법이다. 이 방법은 요구조건 또는 하중과 저항능력 차이를 정의하는 한계상태함수를 사용하는 것이다.

또 하나의 명시적인 방법으로는 전통적인 MCS을 들 수 있다. MCS는 확률변수들의 결합 확률밀도 함수를 이용하여 각 확률변수의 분포 특성이 반영된 난수 (Random Number)를 추출하여 충분한 수의 확률변수 표본 집단을 생성한 다음, 생성된 각 확률변수의 값을 차례로 한계상태식에 대입하여 그 값이 0보다 큰지 작은지 즉, 구조물이 안전한지 파괴되는지를 판단하는 방법이다.

사면안전성 설계에서 외부작용응력과 내부저항응력의 관계 및 비교에서는 일반적으로 2차모멘트법등을 사용하여 신뢰성지수를 가지도록 하고 있다. 1980년대부터 도입된 구조물 설계 및 내구성 설계에서도 FOSM을 이용하고 있으나, 다양한 확률변수를 고려하지 못하였다. 이와 같이 하나의 외력과 하나의 저항내력의 비교를 통하여 안전을 유도하는 FOSM기반의 설계와는 다르게, 본 연구에서는 효과적으로 다중의 확률변수를 고려하기 위하여 MCS을 사용하도록 한다. 구조신뢰성의 설계

를 위한 MCS의 적용은 최근 많은 연구에서 확인할 수 있는데, 다양한 확률변수를 적용하여 효과적으로 파괴확률을 도출할 수 있는 장점이 있다. 기존의 설계방법인 확률론적 설계방법은 시간 의존적 함수로 구성된 환경하중과 저항성능와의 시간에 따른 성능을 비교한 것으로 식(3.126)과 같이 주어진다.

$$g(t) = R(t) - S(t) \geq 0 \quad (3.126)$$

여기서, $g(t)$ =구조물의 한계상태함수, $R(t)$ =시간에 대한 구조물의 저항성능, $S(t)$ =시간에 대한 외부환경하중이다. 본 연구에서는 전술한 방법 중 MCS를 적용하여 확률론적인 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 충분한 반복횟수를 갖는지를 각 설계변수에 대하여 검증하여야 하며, 한계상태함수를 정의하기위해 식(3.126)을 정리하여 다음과 같이 시간에 따른 한계상태함수로 표현할 수 있다.

$$P_f(t) = P(R(t) - S(t) < 0) \leq P_{fmax} \quad (3.127)$$

여기서, $P_f(t)$ =목표구조 수명 내에서의 구조적 파괴확률, P_{fmax} =특성파괴확률 최대치(구조 허용 파괴확률)이다. 한계상태함수에 대한 신뢰성기반 설계방법은 하중에 대항하는 저항성능 $R(t)$ 와 하중 $S(t)$ 값이 모두 확률변수이므로, 한계상태함수 $P_f(t)$ 에 대해 확률적으로 신뢰할 수 있는 결과 값을 제공한다. 사면에 대한 수명예측에서 신뢰할만한 특정 한계상태의 파괴확률은 일반적으로 신뢰성지수로 표현된다.

따라서 각 시뮬레이션마다 압력변수는 가정된 확률밀도함수로부터 임의로 추출되며 그 변수조합에 대하여 식(3.128)에 의해 한계상태함수의 값이 결정된다. 즉, 한계상태함수 값이 음으로 되는 경우를 사면파괴가 일어나는 경우로 하여 그 횟수를 측정한 후 이 값을 전체 시뮬레이션 횟수 N 으로 나누어 파괴확률을 결정한다. MCS에 의한 파괴확률 식(3.128)을 신뢰성지수로 환산하면 점검시점의 신뢰성지수는 식(3.129)와 같이 된다.

$$P_f(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n I[g(r_j(t), s_j(t))] \quad (3.128)$$

$$\beta(t) = -\Phi^{-1}[P_f(t)] \quad (3.129)$$

여기서 $g(r_j(t), s_j(t))$ 는 한계상태함수 $I[]$ 는 사면의 파괴가 발생한 횟수를 나타낸다. 본 연구에서는 전술한 절차에 따라 퍼지 신뢰성해석을 수행할 수 있는 프로그램을 작성하였으며 그 절차는 표 3.12와 같다.

표 3.12 불안정성을 고려한 일반적 및 퍼지적 신뢰성해석 모델 비교

해석방법	해석단계	단계별 산정식	비 고
일반적 신뢰성해석	Step 1	한계상태함수 설정 $g(\cdot) = R(t) - S(t)$	객관적 신뢰성해석
	Step 2	신뢰성지수 산정 [$\beta_o = \beta(t)$] $\beta_o = \beta(t) = -\Phi^{-1}[P_f(t)]$	
	Step 3	불안정에 의한 감소의 객관적 신뢰성지수 산정($\Delta\beta$) $\Delta\beta = \frac{1}{\sqrt{(\sigma_{\ln S})^2 + (\sigma_{\ln R})^2}} \ln \frac{R_o}{R(t)}$	
	Step 4	점검시점의 객관적 신뢰성지수 산정($\beta(t_o)$) $\beta(t_o) = \beta_o - \Delta\beta$	
퍼지적 신뢰성해석	Step 5	원래사면구성요소의 파괴가능성(파괴발생확률) 산정(X_o) $X_o = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/P_{f_i}))^c}$	주관적 신뢰성해석
	Step 6	불안정요소의 파괴가능성 산정(X_{od}) 및 파괴에 의한 보유성능(β_{fcr}) 산정 $X_{od} = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/P_{f_{id}}))^c}, \quad \beta_{fcr} = X_o / X_{od}$	
	Step 7	불안에 의한 주관적 신뢰성지수 산정($\Delta\beta_F$) $\Delta\beta_F = \frac{1}{\sqrt{(\sigma_{\ln S})^2 + (\sigma_{\ln R})^2}} \ln \left(\frac{1}{\beta_{fcr}} \right)$	
	Step 8	점검시점의 주관적 신뢰성지수 산정($\beta_F(t_o)$) $\beta_F(t_o) = \beta_o - \Delta\beta_F$	

n β_o = AFOSM, FOSM 및 Kanda 방법으로 구할 수 있음

- 각 설계 변수에 대하여 가정된 확률분포함수를 이용하여 무작위 샘플링을 수행하고 이를 각 설계변수의 입력 값으로 한다.
- 하나의 설계변수 조합에 대하여 식(3.126) 및 식(3.127)을 이용하여 한계상태함수 값을 계산한다.
- 한계상태함수 값이 음으로 나온 경우의 수를 사면의 파괴가 일어난 경우로 고려하고 이를 누적하고 계산이 끝난 후 전체 시뮬레이션 횟수로 나누어 파괴 확률을 계산한다.
- 이 과정을 반복하여 식(3.128)을 이용하여 전체 사용수명 동안 특정 시점에서의 파괴확률을 구한다.

사면에 대한 불안정요소성능평가를 위한 객관적(일반적) 및 주관적(퍼지적) 신뢰성해석방법은 표 3.11과 같다.

표 3.11에서와 같이 객관적 신뢰성해석인 경우의 보유성능은 원래부재요소의 구조성능과 손상시점의 구조성능의 비로 표현하는데 반하여 주관적 신뢰성해석인 경우는 원래부재요소의 파괴가능성과 열화손상시점의 파괴가능성의 비로 나타낸 점이 특이한 점이다 할 수 있다.

3.4.4 퍼지-신경망 사면안정 평가 시스템

본 연구에서 사면 안정성 평가에 대해 신속하고 정확한 해석 및 평가를 수행하기 위해 현장에서 관측된 자료와 실험결과에서 도출된 파괴가능성에 대한 주관적 불확실성을 처리하기 위해 전절에서 소개한 퍼지논리에 결합수분석 기법을 접목하여, 수치정보 및 언어정보에 의해 해석이 가능하도록 한 퍼지 결합수분석 기법과 추론 및 판단에 대한 신속성 및 정확성으로 안정성 평가 예측에 효과적인 역할이 가능한 인공신경망이론에 의해 사면안정 해석이 가능한 퍼지-신경망 사면 안정성 평가 시스템(일명 CITYSNF.m)을 개발하여 MATLAB(Matrix Laboratory) 프로그램에서 구현되도록 하였다.

퍼지-신경망 사면안정 평가 시스템은 한 번의 입력 값으로 인공신경망과 퍼지로지식에 의한 사면안정 평가를 동시에 할 수 있도록 프로그램한 사면안정 평가 시스템으로 인공신경망 기반 결합수기법(Artificial Neural Network-based Fault Tree Analysis:

ANN-FTA)과 퍼지로지직 기반 결합수기법(Fuzzy Logic-based Fault Tree Analysis: FLG-FTA) 그리고 인공신경망 기반 퍼지결합수기법(Artificial Neural Network-based Fuzzy Fault Tree Analysis: ANN-FFTA)과 퍼지로지직 기반 퍼지결합수기법(Fuzzy Logic-based Fuzzy Fault Tree Analysis: FLG-FFTA)을 이용하여 신뢰성 해석을 할 수 있도록 시스템화 하여 최소안전율 해석 및 평가가 가능한 방법으로 MATLAB 프로그램에 의해 수치해석 되므로 신속하고 정확한 계산이 가능하며, 애매성 및 모호성을 갖는 주관적 상태 평가를 객관화 시킬 수 있고 내적 또는 외적손상요인을 인공신경망으로 산정하므로 합리적이고 과학적인 사면안정 평가가 가능하다.

그림 3.22는 프로그램 입력창으로서 퍼지와 인공신경망의 평가항목을 그대로 사용하여 그림 3.23과 같은 결과를 얻을 수 있다. 관정구분은 토사사면의 경우 내적요인은 표 3.2와 같고 외적요인은 표 3.3과 같다. 또 암반사면의 경우 내적요인은 표 3.4와 같고 외적요인은 표 3.5와 같다. 그림 3.24는 퍼지-신경망 사면안정 평가 시스템 흐름도이고, 그림 3.25는 시스템 분석 프로그램의 주요구조를 표현한 것이다.

본 연구에서 사면에 대한 불안정요소 성능평가를 위한 객관적(일반적) 및 주관적(퍼지적) 신뢰성해석 방법으로 표 3.12를 사용하였고, 이때 사용할 주관적 성능지수는 평균적 정보에 의한 퍼지 파괴 발생확률로 산정할 수 있는데, 이는 수치적 정보, 낙관적 정보, 비관적 정보, 보수적 정보에 따라서 성능지수 값이 다르게 산정될 수 있어 인간의 신뢰성 해석에 정보를 반영한 방법으로 내적 및 외적요인과 불확실량을 주프로그램에 입력하여 안전율을 구할 수 있다. 이때 불확실량은 표 3.13을 사용하며 표 3.13은 Kanda공식 Frangopol공식에 의해 산정된 불확실량 값이다.

표 3.13 신뢰성 해석 불확실량

구 분	저항의 변동계수 (Ω_R)	하중의 변동계수 (Ω_S)	상수 (K)	상수 (Ls)	파괴계수 (τ)	안전율의 변동계수 (Ω_x)
내적요인	—	0.25	0.05	0.55	100	
외적요인	—	0.25	0.05	0.55	100	
안정성평가 (활동요인)	0.10	0.25	0.05	0.55	100	

※ 파괴계수 = 파괴비용 / 초기투자비용

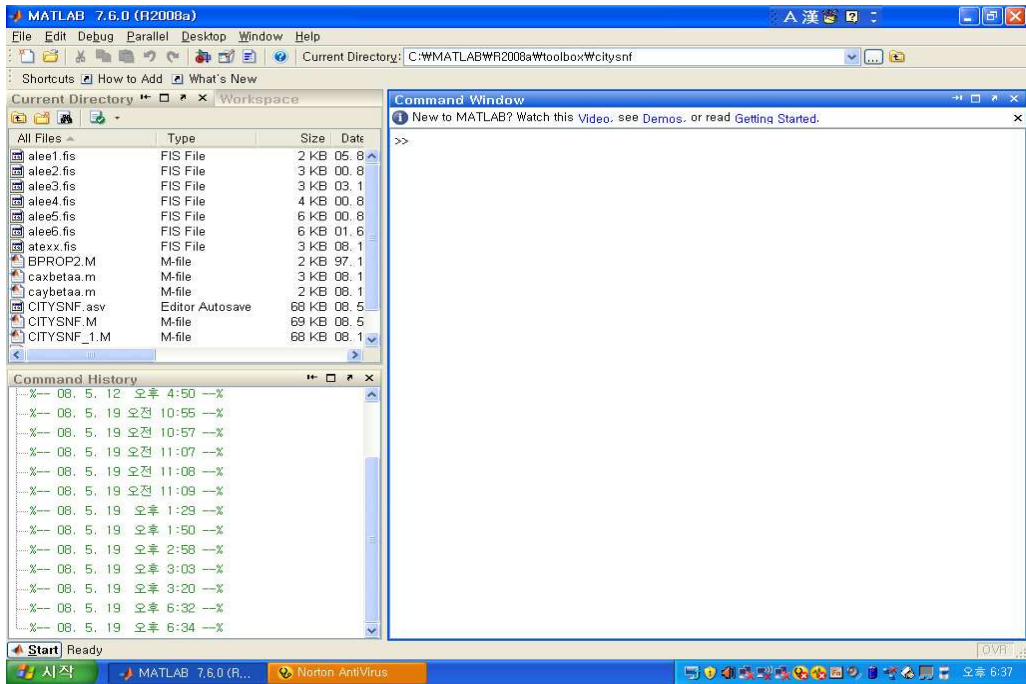


그림 3.22 퍼지-신경망 프로그램 초기화면

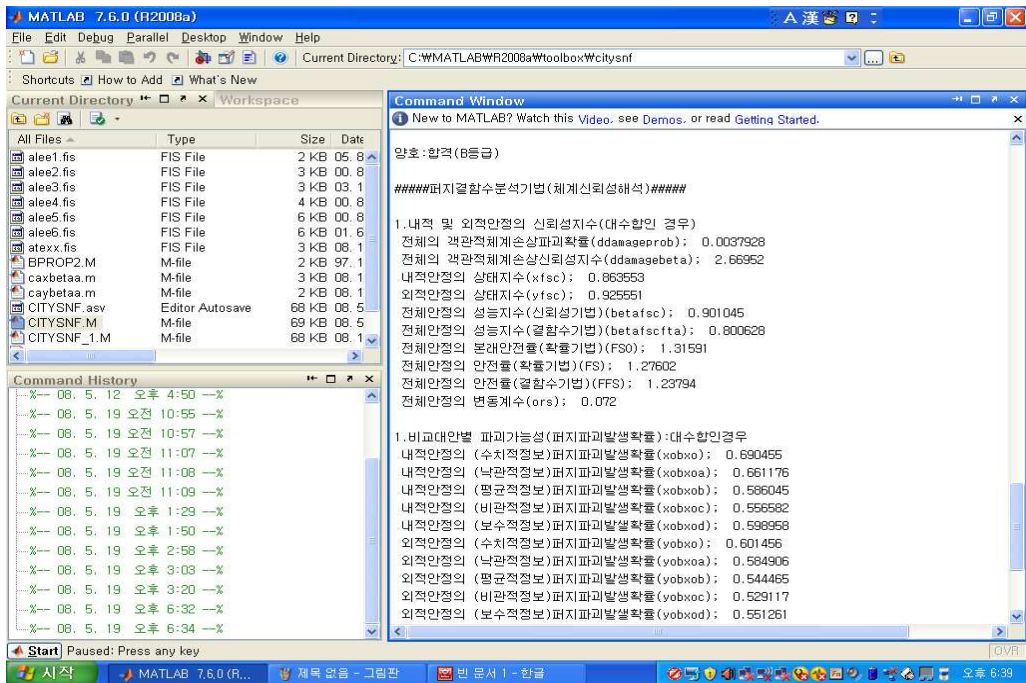


그림 3.23 퍼지-신경망 프로그램 결과창

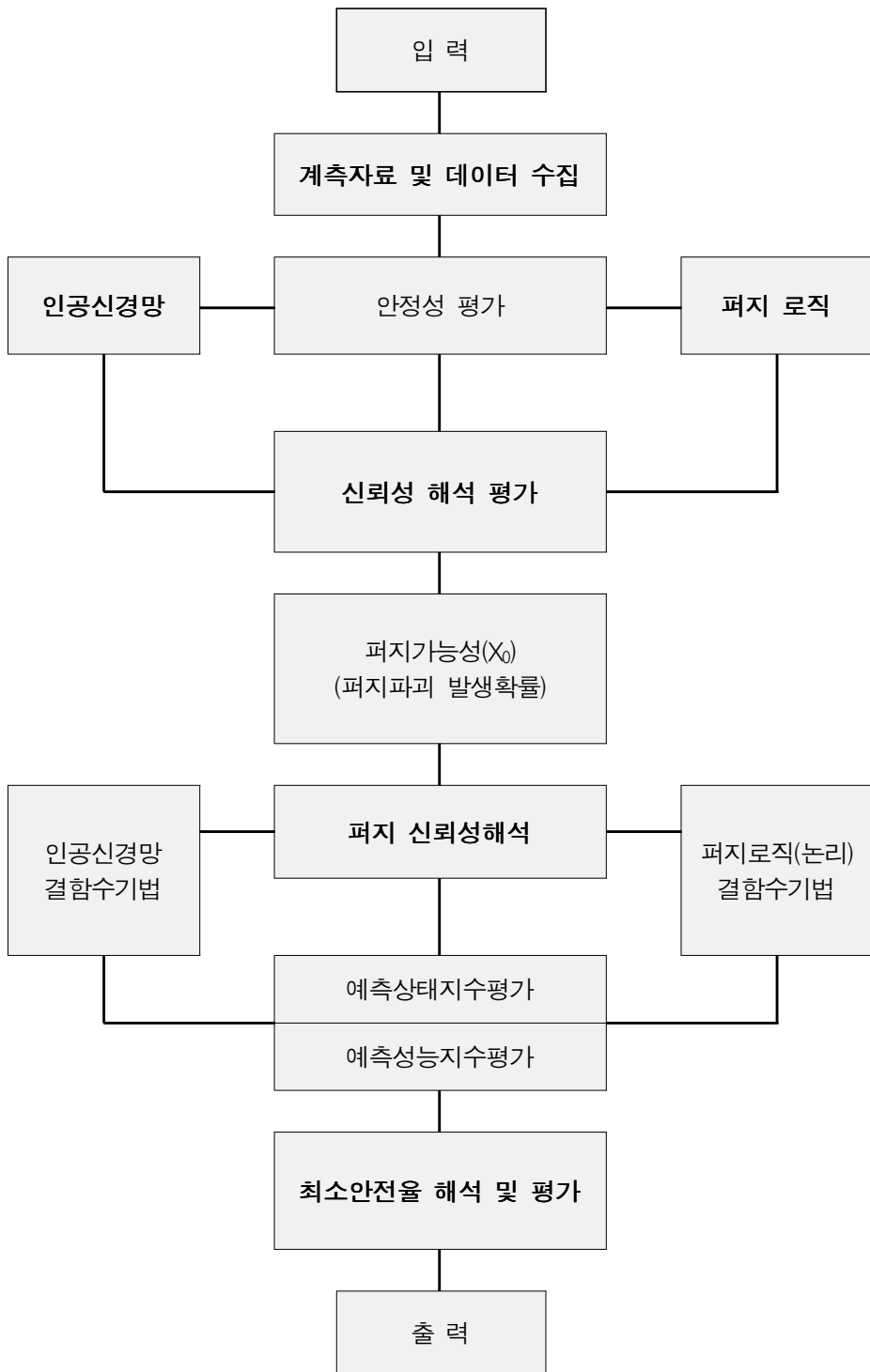


그림 3.24 퍼지-신경망 사면안정 평가 시스템 흐름도

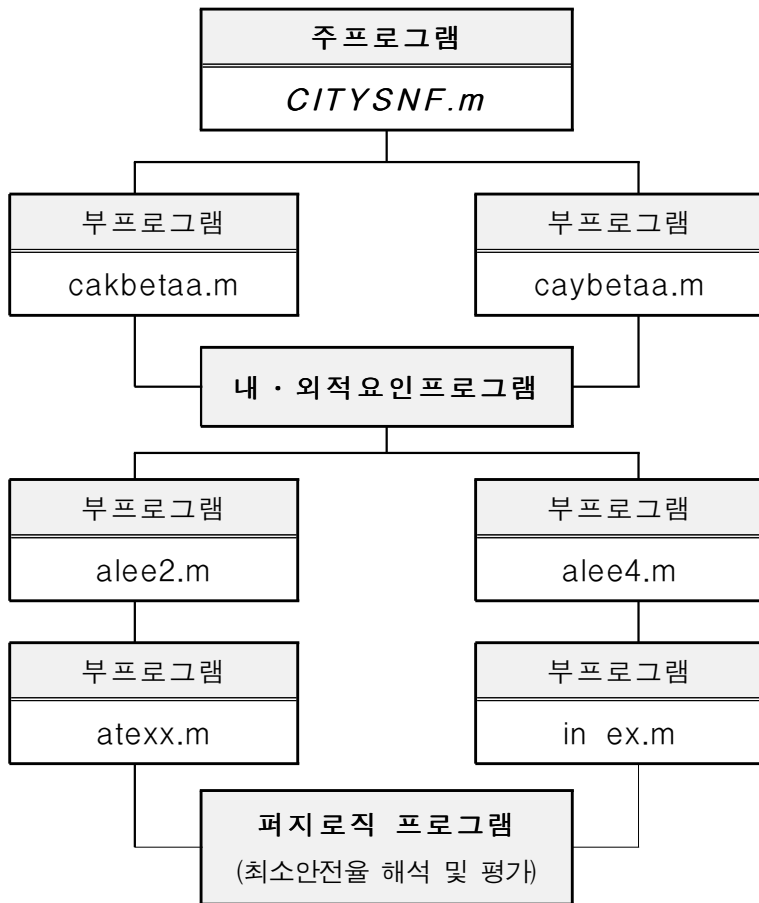


그림 3.25 시스템 분석 프로그램의 주요구조

제4장 토사사면에 대한 안정성 평가 및 분석

4.1 검토대상 및 현황

본 연구의 검토대상인 토사사면에 대하여 시추조사와 표준관입시험, 채취시료에 대한 실내시험 등을 실시하여, 현 지반의 지층구성 상태, 토질분포 및 기반암의 분포상태 등 사면안정성 평가를 위한 토질 공학적 기본 사항을 파악하였다. 본 연구를 위한 토질조사의 범위는 다음과 같다.

- 시추조사 : 2개소
- 표준관입시험 : 2개소
- 실내 토질시험 : 1식

시추 조사는 회전 수세식 시추기(CBM-500)를 사용하여 NX Casing으로 시추조사 2개소를 시행하였으며 시추 종료심도는 연암층의 1.0m 깊이까지 굴착한 후 시추를 종료하였으며 그 성과는 표 4.1과 같다.

표 4.1 시추조사 결과

HOLE NO.	시 추 조 사 (단위 : m)					표준관입 시험	비 고
	토 사	풍화토	풍화암	연 암	계		
BH-1	5.6	2.9	0.2	1.0	9.7	6회	
BH-2	2.3	-	2.7	1.0	6.0	3회	

본 연구에 적용된 지역은 전남 순천시 삼거동 일원으로서 순천시에서 서측으로 약 11km 정도 떨어진 곳에 위치하며, 이사천을 경계로 북부지역으로 산계는 옥너봉-수리봉(550m)-남산(346m)을 잇는 주능선으로서 침식윤회의 과정으로 볼 때 만장년기의 지형을 이루고 있으며 수계는 산계의 방향에 따른 소하천이 빈약하게 발달되어 있다. 본 지역의 지질은 한반도 남부의 기반암이 되는 영남육괴의 남단에 위치하는 선캠브리아기의 지층으로서 시추조사 시 채취된 코어 및 지질도(순천도폭

: 1:50000, 한국동력자원연구소, 1989) 등으로 판단할 때 반상변정 화강암, 편마암이 기반암으로 광범위하게 분포하고 있다.

시추조사 결과 수직적인 지층 구성 상태는 표토 또는 붕적층으로 구성된 토사층과 원지반인 풍화토, 풍화암, 연암층의 순으로 구성되어 있다. BH-1공 시추조사에서 표토 및 붕적층은 0~5.6m 범위의 두께로 분포하고 있고, BH-2공에서는 0~2.3m의 두께로 조사되었다. 풍화토는 BH-1공에서는 5.6~8.5m의 두께로 분포하고 있으며, BH-2공에서는 조사되지 않았다. 풍화암층은 BH-1공에서는 8.5~8.7m 사이에 아주 얇은 층으로 분포되어 있으며, BH-2 시추조사에서는 2.3~5.0m의 두께로 조사되었다. 연암층은 BH-1공에서는 8.7m심도에서 나타났으며, BH-2공에서는 5.0m심도에서 조사되어 시추공 별로 지형적 특징에 따라 층후의 변화·지층의 구성상태가 매우 다르게 조사되었다.

각 지층별 분포 특성을 시추조사 결과와 채취된 시료 및 N치 등을 토대로 분류 기술하면 다음과 같다.

표토층은 본 조사에서 최상부에 위치한 피복토층으로 BH-1공 구간은 지표면에서 3.7m의 두께로 분포하고 있으며, 지층의 구성 성분은 자갈 및 실트 섞인 세립의 모래로 구성되어 있다. 표준관입시험에 의한 N치는 3/30~4/30의 범위로 대단히 느슨한 상태의 상대밀도를 나타내고 있으며, BH-2공 구간의 표토층은 지표면에서 2.3m의 두께로 분포하고 있으며, 지층의 구성 성분은 BH-1공과 동일하다. 표준관입시험에 의한 N치는 48/30으로 조밀한 상대밀도를 나타내고 있으나 자갈 등의 영향으로 N치가 불안정하게 측정되었다.

붕적층은 유수, 중력 등에 의하여 사면을 따라 근거리에서 운반 퇴적된 지층으로서 BH-1공 구간은 매립토층 하부에 1.9m의 두께로 분포하고 있으며, 지층의 구성 성분은 실트 섞인 세립의 모래로 구성되어 있다. 표준관입시험에 의한 N치는 4/30~19/30으로 느슨 내지 보통 조밀한 상대밀도를 나타내었다. BH-2공 구간은 붕적층이 조사되지 않았다.

풍화대층은 붕적층 하부 그리고 기반암의 상부에 위치하여 모암이 완전풍화 또는 심한 풍화로 원위치에서 토사와 암상의 중간상태로 존재하며 풍화정도에 따라 풍화 잔류토와 풍화암으로 구분하여 쓰여 지고 있다.

BH-1공 구간의 풍화 잔류토층은 모암이 완전풍화 되어 모암의 조직과 구조를 상실하고 완전히 토사화 되어 상태로 붕적층 하부에 2.9m의 두께로 분포하고, 지층의 구성은 실트 섞인 세립의 모래로 구성되어 있으며, 표준관입시험에 의한 N치는

48/30으로 대단히 조밀한 상대밀도로 나타났다. 풍화암층은 완전풍화 또는 심한풍화상태로 풍화잔류토층 하부에 0.2m의 두께로 분포하고, 지층의 구성은 실트질 모래로 구성되어 있다. 표준관입시험에 의한 N치는 4/50으로 대단히 조밀한 상대밀도를 나타내었다.

BH-2공 구간은 풍화잔류토층구분은 조사되지 않았으며, 풍화암층은 기반암이 완전풍화 또는 심한풍화되어 매립층 하부에 2.7m의 두께로 분포하고 있고, 심도 3.1m 이하에서는 암편이 혼재되어 시추되었다. 표준관입시험에 의한 N치는 2/50으로 대단히 조밀한 상대밀도를 나타냈다.

본 지역에 형성하고 있는 기반암은 화강암질 편마암이 부분적인 풍화작용을 받아 형성된 지층으로 조사지역 BH-1공 구간에서는 8.7m 깊이에 분포되어 있고, BH-2공 구간에서는 5.0m 깊이에 분포되어 있다. 또한 시추작업시의 Core 회수율은 11~9% 정도로 저조한 상태이다.



그림 4.1 검토대상 토사사면 전경



그림 4.2 토사사면 시추조사 전경

4.1.1 제 1구간

제 1구간의 사면형태는 5단의 석축에 의해 지지되고 있으며, 석축 구조물 상부에는 법면의 연장이 47.9m인 절취사면이 구성되어 있고 사면의 경사각은 33°의 각을 이루고 있다. 법면의 식생상태는 비교적 양호하며, 균열이나 변형 등은 발견되지 않았다.

사면 상부의 산마루측구는 절개지 끝 부분과 너무 가깝게 시공되어 대부분의 구간이 토사나 이물질 등이 막혀 있어 제 기능을 수행치 못하여 사면 정상부의 지표수가 사면내로 직접 침투하여 사면안정에 직접적인 영향을 주는 것으로 조사되었다. 또한 각 석축 하단부에 설치된 배수로도 토사나 낙엽 등으로 막혀있어 제 기능을 수행하지 못함으로써 지표수가 사면하단으로 직접 유입되어 석축구조물에 수압 등의 수평하중을 가중시켜 사면의 안정에 영향을 주는 것으로 사료된다.

제 1구간 석축구조물의 높이는 2.0~2.6m로 측정되었고 기울기는 1:0.22~1:0.31로 2단 석축과 5단 석축은 비교적 급한 경사를 유지하고 있으며, 특히 2단과 3단, 5단의 석축은 균열과 변형이 많이 발견되었다.

4.1.2 제 2구간

제 2구간의 사면 형태는 6단의 석축에 의해 지지되고 있으며, 석축구조물 상부에는 법면의 연장이 66.2m인 절취사면이 구성되어 있고 사면의 경사각은 34°의 각을 이루고 있다. 법면의 상태는 풍화가 많이 진행되어 있으며 식생상태는 비교적 양호한 상태로 인장균열이나 사면의 변형 등은 발견되지 않았다.

절취사면 하부에 설치된 산마루측구는 절취사면 하부로부터 5m 정도의 여유가 있으나 주변 토사와 낙엽 등이 막혀 배수기능을 유지하지 못하고 있다.

사면 끝부분과 산마루 측구사이에 40~50cm의 단차 발생되어 있으며 인장균열로 보이는 균열이 연속적으로 형성되어 정상부의 지표수가 사면내로 직접 침투하여 사면안정에 직접적인 영향을 주는 것으로 조사되었다.

제 2구간 석축구조물의 높이는 2.0~3.0m로 측정되었고 석축구조물의 기울기는 1:0.23~1:0.37로 5단, 6단의 석축은 과거붕괴로 인하여 재시공한 상태이며, 3단 석축부의 상단에서는 인장균열로 보이는 균열이 발생하였다. 1단과 5단 석축은 비교적 급한 기울기를 나타내는 것으로 조사되었으며, 특히 3단~4단의 석축은 균열과 변형이 다소 많이 발견되었다.

각 석축 하단부에 설치된 배수로는 토사나 낙엽 등으로 완전히 막혀 있거나 부분적으로 막혀 있어 제 기능을 수행하지 못하여 지표수가 사면으로 직접 유입되어 사면내부에 수압 등의 수평하중을 가중시켜 사면의 안정에 영향을 주는 것으로 사료된다.

4.1.3 제 3구간

제 3구간은 사면 형태는 6단의 석축에 의해 지지되고 있으며, 최상단 묘역의 상부에는 법면의 연장이 66.1m인 절취사면이 구성되어 있고 사면의 경사각은 33°의 각을 이루고 있다. 법면의 상태는 풍화가 많이 진행되어, 3구간의 중앙에서 우측 끝부분까지 토사가 다량으로 흘러 내려 산마루 측구가 막혀 있는 상태이고 법면의 유실로 인하여 식생상태가 불량한 상태이다. 절개면 위쪽으로는 인장균열이나 사면의 변형 등은 발견되지 않았다.

절취사면 하부에 설치된 산마루측구는 절취사면과 아주 가깝게 설치되어 주변토사와 낙엽 등이 막혀 배수기능을 제대로 유지하지 못하고 있는 것으로 조사되었다.

제 3구간 석축구조물의 높이는 1.6~3.0m로 측정되었고 석축구조물의 경사는 1:0.24~1:0.33으로 조사되었으며, 3단 석축은 비교적 급한 경사를 유지하고 있는 것으로 조사되어 석축구조물의 균열이나 변형 상태는 비교적 양호한 것으로 조사되었다.

각 석축 하단부에 설치된 배수로는 토사나 낙엽 등이 부분적으로 막혀있으나 비교적 배수로 상태는 양호한 편으로 조사되었다.

4.1.4 제 4구간

제 4구간의 사면의 형태는 4단의 석축에 의해 지지되고 있으며, 법면의 연장은 28.2m로 사면상단 형태는 평평한 광장을 형성하고 있으며 사면의 경사각은 28°로 어린나무 등의 식생이 전체적으로 분포하고 있으며 인장균열이나 사면의 변형은 발생되지 않았다.

산마루측구의 상태는 토사 유출로 인하여 완전히 막혀 있는 상태로서 3구간의 지표수가 4구간 유입되어 사면내로 직접 지표수가 침투함으로써 사면안정에 직접적인 영향을 주는 것으로 조사되었다.

제 4구간 석축구조물의 높이는 0.9~2.8m로 측정되었고 석축구조물의 기울기는 1:0.27~1:0.38로 석축의 경사는 비교적 양호한 편으로 조사되었으며, 3단, 4단의 석축은 균열과 변형이 다소 발견되었다.

각 석축 하단부에 설치된 배수로는 토사나 낙엽 등에 의해 부분적으로 막혀있어 제 기능을 수행하지 못함으로써 지표수가 사면으로 직접 유입되어 사면에 수압 등

의 수평하중을 가중시켜 사면의 안정에 영향을 주는 것으로 사료된다. 표 4.2는 토사사면 각 구간별 평가항목의 개요이다.

표 4.2 평가 대상 토사사면의 구간별 개요

평가항목	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
사면의 높이	34m	47m	47m	15m
사면의 경사각	1 : 1.47	1 : 1.45	1 : 1.47	1 : 1.88
토질종류	사질토	사질토	사질토	사질토
표준관입시험	19	19	48	48
기반암의 깊이	8.7	8.7	2.3	2.3
지하수 상태	습윤	젖음	습윤	습윤
내부마찰각	25	25	30	30
점착력(MPa)	2	2	3	3

4.2 정량적 해석 평가

4.2.1 한계평형 해석에 의한 평가

한계평형 해석은 활동면의 형상에 따라 해석방법이 구분되며, 활동면이 지표면과 평행한 평면이며, 토질이 균일하고 활동면의 깊이가 비교적 작은 사면의 경우, 무한사면 해석방법이 상당히 정확하다. 활동면이 지표면으로부터 깊이가 얇고 긴 평면이며 지표면과 평행하지 않는 경우에 대해서는 Fellenius방법이 간편하고 정확하다. 또한 활동면이 2개 또는 3개의 평면으로 이루어진 경우 예비해석 단계에서는 Fellenius방법은 정확도가 낮은 결과를 얻을 수 있으므로 Janbu의 간편법을 사용하면 그 정확도를 향상시킬 수 있다. 또 임계활동면과 안전율을 보다 정확히 결정하기 위해서는 썩기 또는 활동 Block방법을 사용해야 한다.

사면활동면이 원호활동면인 경우 예비해석 단계에서는 안정도표를 이용할 수 있으며, Fellenius방법을 사용할 수도 있으나 활동면의 깊이가 깊거나 간극수압이 큰 경우 부정확한 결과가 얻어진다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 Bishop의 간편법을 사용하여야 한다. 그리고 활동면이 임의의 형상인 경우, 예비해석 단계는 Janbu의 간편법을 사용하며, Janbu의 정밀해법, Spencer의 방법, Morgenstern and Price방법, Fellenius and Krahn의 G.L.E방법 등을 사용하여 정밀해를 구한다. 사면 선단부에서 활동면의 경사가 급한 경우에는 측면력의 분포를 예민하게 고려할 수 있는 방법을 선택해야 한다.

이상과 같은 해석방법에 대한 선정 기준을 분석한 결과 본 연구에서는 모멘트 평형조건에 의한 안전율 산정 방법인 Bishop의 간편법(절편법)을 적용한 STABL (Siegel, 1975)을 확장시킨 STABL5M 프로그램을 이용하여 지하수가 지표면과 일치하는 경우, 지하수가 토층사이에 있을 경우, 지하수가 없을 경우의 안정 해석을 실시하였다.

한계평형해석방법에 의한 토사사면 각 구간별 안정해석 결과는 지하수위가 토사층 사이에 위치하는 경우(정상시에 대한 모델링)와 지하수위가 없는 경우에는 전 구간에서 최소안전율인 1.3이상으로 안정된 양상을 나타내고 있으나, 하절기 집중호우시를 모델링한 경우(지하수위가 지표면과 일치하는 경우) 제 1구간, 제 2구간, 제 3구간에서는 안전율이 1.3 미만(0.992~1.171)으로서 붕괴의 위험성이 높은 것으로

로 분석되었고, 제 4구간에서는 안전율이 1.3이상(1.428~1.527)으로 비교적 안정을 유지하고 있는 것으로 분석되었다. STABL5M 프로그램에 의한 사면안정 해석 결과는 표 4.3과 그림 4.3~그림 4.6과 같다(나머지구간 부록참조).

표 4.3 STABL5M 최소안전율에 의한 안정해석 결과

조 건	구 간	최 소 안 전 율(Fs)			
		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
지하수가 지표면과 일치할 경우		0.992~1.057	1.035~1.147	1.054~1.171	1.428~1.527
지하수가 토층 사이에 있을 경우		1.400~1.474	1.593~1.751	1.496~1.638	1.993~2.157
지하수가 없을 경우		1.602~1.686	1.745~1.946	1.785~1.955	2.178~2.328

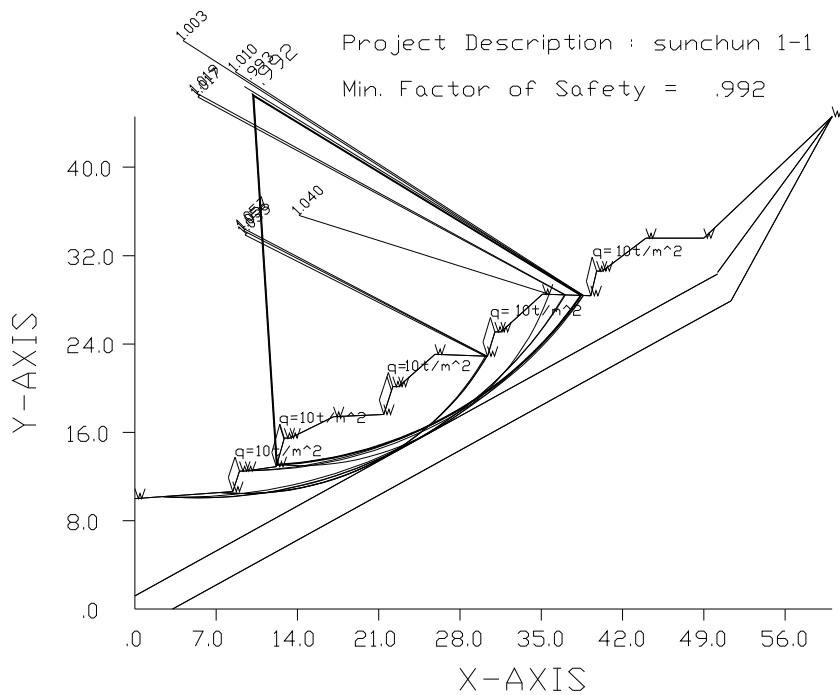


그림 4.3 제 1구간(지하수위가 지표면과 일치할 경우)

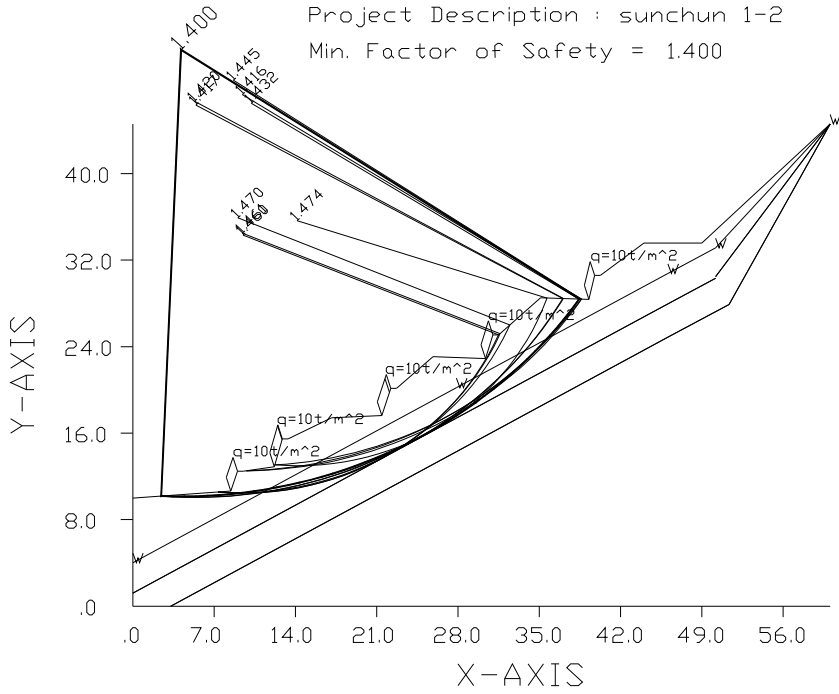


그림 4.4 제 1구간(지하수위가 토층 사이에 있는 경우)

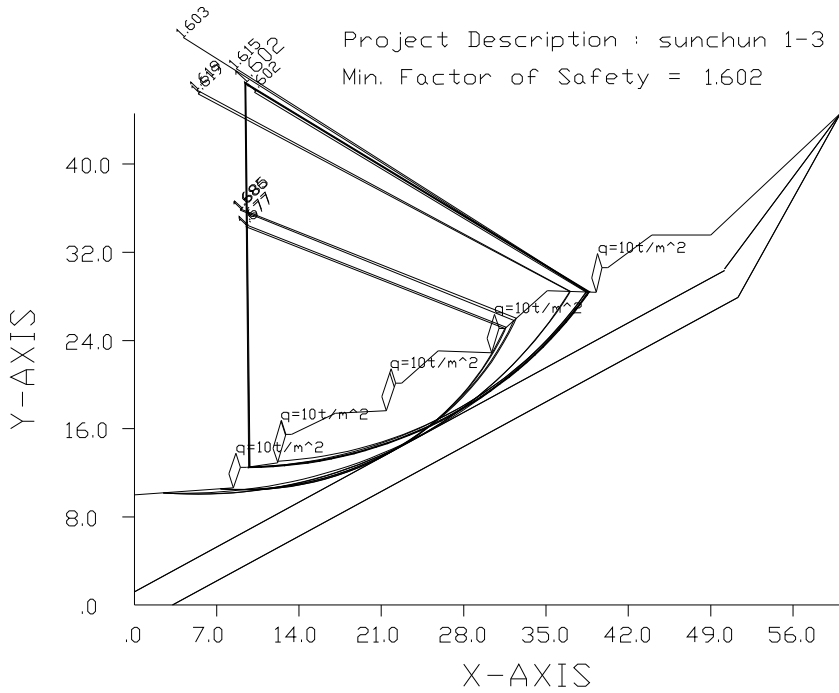


그림 4.5 제 1구간(지하수위가 없는 경우)

4.3 정성적 해석 평가

4.3.1 경험적인 방법에 의한 평가

본 연구에서 적용된 경험적 해석방법은 우리나라의 자료 및 연구가 미흡하여 제2장에서 열거한 호주의 사면 안전도 평가법, 홍콩의 사면 안전도 평가법, 일본(국철)의 절개사면 안전도 평가법 등이 공통적으로 가지고 있는 사면안정의 주요 평가기준을 적용하여 평가를 하였으며, 이를 다시 호주의 사면 안전도 평가법(2.2.2 절 참조)을 이용 평가내용을 비교·분석하여 나타내면 표 4.4와 같다.

표 4.4 경험적인 방법에 의한 토사사면 안정성 평가

평가항목	구 간 내 용			
	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
사면의 높이(m)	34	47	47	15
사면의 경사각	1 : 1.47	1 : 1.45	1 : 1.47	1 : 1.88
상부 물고임 상태	산마루측구에 토사유입으로 물고임 발생	산마루측구와 절개지사이의 단차로 사면내 지표수 유입	지표수의 흔적, 물고임 발생 없음	지표수 유입과 배수불량으로 물고임 발생
식생상태	양호	부분 유실	양호	보통
배수상태	불량	불량	보통	보통
사면균열상태	없음	부분적 발생	없음	없음
과거활동흔적	부분 유실	국부적 파괴	없음	없음
지지구조물의 변형상태	석축구조물 일부개소에서 심한 변형 발생	석축구조물의 심한 변형이 발생	석축구조물의 상태는 대체로 양호	석축구조물의 일부개소에서 변형 발생
사면표층부의 상태	매우 느슨한 상태	매우 느슨한 상태	양호	양호
종합평가 (호주안전도표 결과)	전체적인 사면의 구성 상태나 구조물의 변형상태로 보아 불안정한 상태.	사면의 지표수 유입과 구조물의 변형상태로 보아 아주 불안정한 상태를 나타냄.	지지구조물이 양호하고 지표수 등의 배수가 비교적 양호하여 부분적 안정성 확보.	사면의 형상 및 전체적인부분에서 안정성을 확보하고 있으나 지표수 처리 방안 검토.

경험적인 방법에 의한 평가는 제 1구간이 사면높이가 34m로 1:1.47의 경사로 사면 상부의 산마루측구에 토사유입으로 물고임이 발생하였고, 사면표층부의 상태가 매우 느슨하고 부분적으로 활동의 흔적으로 구조물의 변형도 일부 발생하여 불안정한 상태로 분석되었다. 또 제 2구간은 사면높이가 47m로 1:1.45의 경사로 산마루측구와 절개지 사이의 단차로 사면 내에 지표수가 유입되었고, 사면표층부의 상태가 매우 느슨하고 국부적인 파괴흔적으로 아주 불안정한 상태로 분석되었다.

그리고 제 3구간은 사면높이가 47m로 1:1.47의 경사로 지표수의 흔적과 물고임이 없고, 사면표층부 상태도 양호하여 제 1구간, 제 2구간보다 안정한 상태를 유지하고 있으나 약간의 불안한 상태로 분석되었다. 또 제 4구간은 사면의 높이가 15m로 1:1.88의 경사로 사면표층부의 상태는 양호하나 사면상부에 지표수 유입과 배수불량으로 물고임이 발생하여 사면의 형상 및 전체적인 부분에서 안정성을 확보하고 있으나 지표수처리방안 등의 문제가 있어 약간의 불안한 상태로 분석되었다.

이와 같이 토사사면에 대한 경험적인 방법에 의한 평가는 전절에서 평가한 한계 평형해석법과 같이 지반의 간극수압의 영향에 따라 사면의 안정성 평가에 대해 크게 영향을 주었고, 사면의 경사와 사면표층부의 식생상태에 따라서도 평가에 대한 적용이 달라질 수 있음을 확인할 수 있었다.

4.4 신뢰성이론에 의한 평가

4.4.1 점추정법에 의한 평가

1. 신뢰성 해석을 위한 한계상태 해석모델

현행 사면의 안정해석은 확정론적 수치해석 및 경험에 의한 해석 방법으로 사면의 기하학적 요소와 함께 물리적 강도정수의 대표치를 구하여 사용하고 있으나, 일반적으로 사면은 지반물성치, 지층조건, 조사방법 등의 오차로 인해 많은 불확실량을 내포하고 있다. 이에 토사사면의 안정해석에 안전율을 대치할 수 있는 합리적인 평가를 위해 확률론적 접근방법의 도입이 필요하게 된다. 이에 본 연구는 점추정법에 의한 신뢰성 해석에 의한 안정성 평가를 수행하고자 한다.

점추정법(PEM)에 의한 신뢰성 해석은 토사사면의 안정성에 영향을 주는 몇 가지 인자들에 대한 평균값과 표준편차를 구하고 이를 이용하여 사면의 신뢰성을 계산할 수 있으며, 점추정법에 의한 파괴확률 값은 기존의 신뢰성 기법에 비하여 복잡한 미분방정식의 계산이 필요치 않고 확정론적 방법에서 제안된 식을 한계상태 함수식으로 유도하여 산정할 수 있으며, 신속한 신뢰성 계산을 위해서는 컴퓨터 프로그램으로 수행되어진다.

토사사면의 안정성 평가를 위한 점추정법에 의한 신뢰성 해석은 기존의 확정론적 방법인 원호활동파괴식으로부터 한계상태함수식을 유도해야 한다. 토사사면의 원호활동에 대한 안정계산은 한계평형원리에 입각한 Fellenius방법이나 Bishop방법 등의 사면안정 해석법을 적용하여 해석한다. 원호활동파괴에 대한 안전율은 다음의 식(4.1)과 같이 나타낼 수 있으며, 활동토괴가 미끄러져 내려가려는 힘 F_d 혹은 M_d 와 이에 저항하려는 힘 F_r , 혹은 모멘트 M_r 의 비로 안정성을 검토할 수 있다. 여기서 저항력 F_r , 혹은 모멘트 M_r 은 토괴가 활동 시 발생하는 마찰력 및 점착력에 의한 전단저항력 F_{rs} , 혹은 저항모멘트 M_{rs} 와 말뚝에 의한 저항력 F_{rp} , 혹은 모멘트 M_{rp} 으로 활동모멘트 M_d 로 나누면 다음 식(4.1)과 같다.

$$F_s = \frac{M_r}{M_d} = \frac{M_{rs} + M_{rp}}{M_d} = \frac{\sum (W \cos \alpha - ul) \tan \phi + \sum cd}{\sum W \sin \alpha} \quad (4.1)$$

여기서, M_r 는 저항모멘트($M_{rs} + M_{rp}$), M_d 는 활동모멘트, W 는 토괴의 중량, u 는 간극수압, c 는 점착력, l 는 사면길이, $\tan\phi$ 는 내부마찰각, α 는 사면경사각이다.

원호활동 안정계산에 의한 판정방법의 한계상태 해석모델은 전술한 식(4.1)에서 저항의 불확실량(Ω_R)은 c , $\tan\phi$ 를 확률변수로 취하면, 저항에 대한 변동계수는 식(4.2a)와 같이 되고, 하중의 불확실량(Ω_S)은 W , u , l , α 를 확률변수로 취하면, 하중에 대한 변동계수는 식(4.2b)와 같이 된다.

$$\Omega_R = \sqrt{\Omega_c^2 + \Omega_{\tan\phi}^2} \quad (4.2a)$$

$$\Omega_S = \sqrt{\Omega_W^2 + \Omega_u^2 + \Omega_l^2 + \Omega_\alpha^2} \quad (4.2b)$$

2. 점추정법에 따른 사면안정 판정방법의 확률변수

전술한 Level III의 신뢰성 설계법은 결합밀도함수를 모사하여 파괴확률을 추정하는 방법으로서 모든 하중과 저항인자들이 각각의 서로 다른 밀도함수를 갖는다고 가정하며 파괴확률의 계산에 정규분포의 가정이 들어가지 않는다. 따라서 무작위로 변동하는 하중과 저항인자들의 불확실성을 모사하기 위하여 일반적으로 MCS(Monte Carlo Simulation)방법을 사용한다. 하지만, MCS의 단점은 분포에서 자료를 추

표 4.5 토사사면 안정계산의 하중 및 저항 확률변수

하중 확률변수		저항 확률변수	
Z_1	W	Z_5	c
Z_2	u	Z_6	$\tan\phi$
Z_3	l		
Z_4	α		

출하여 표본 집단을 만들 때, 임의 추출이기 때문에 자료수가 적으면 한쪽으로 치우칠 우려가 있을 뿐 아니라 분포에서 고르게 자료를 추출하려면 추출 개수가 상당히 많으므로 계산량이 많아진다. 이와 같이 MCS에 의한 신뢰성해석의 계산시간이 많이 소요되는 단점을 보완하기 위한 방법으로 도함수의 미분 계산 없이 시간도 단축하면서 정도를 높일 수 있는 근사적 통계수법인 점추정법에 의한 신뢰성 해석을 실시하며 이를 위해 확정론적 사면안정 평가방법을 성능함수로 가정한 후 하중과 저항에 대한 확률변수를 유도하였다. 이에 따른 원호활동 안정계산의 하중 및 저항의 확률변수는 표 4.5와 같다.

3. 점추정법에 의한 토사사면의 신뢰성 해석

본 연구는 전술한 바와 같이 확률이론에 기초를 둔 점추정법에 의해 토사사면의 안정해석에 대한 한계상태방정식을 유도하고, 평가 대상 토사사면에 대한 안정해석을 수행하였다. 다음의 표 4.6은 토사사면 각 구간의 제원 및 확률변수의 값이며, 표 4.7은 점추정법에 따른 원호활동 안정계산의 불확실량 즉, 하중과 저항의 확률변수에 대한 각각의 평균과 표준편차를 산정하여 나타내었다.

표 4.6 토사사면 안정계산에 대한 제원 및 확률변수 값

구 분	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
	W	u	l	α	c	$\tan\phi$
제 1구간	340.5	1.5	47.9	33	2	0.466
제 2구간	471.0	2.5	66.2	34	2	0.466
제 3구간	476.3	2.5	66.1	33	3	0.577
제 4구간	280.3	1.5	28.2	28	3	0.577

표 4.7 토사사면 안정계산에 대한 평균과 표준편차 산정결과

구 분	안정계산의 제원 및 확률변수					
	W	u	l	α	c	$\tan\phi$
평 균	392.0	2.0	52.1	32	2.5	0.522
표준편차	19.4	1.0	2.9	2.7	1.071	0.21

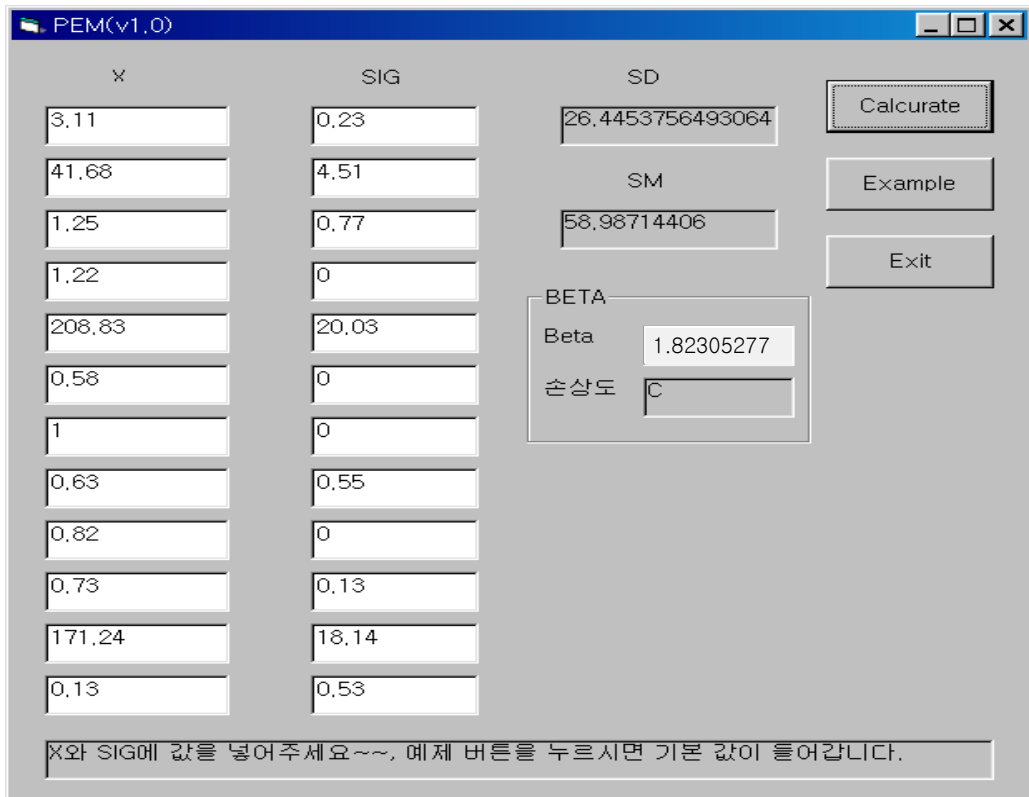


그림 4.6 점추정법 신뢰성해석을 이용한 입력 및 결과의 창(토사사면)

점추정법에 의한 신뢰성해석의 안전율은 FAURE(1994)에 의해 제안된 식(4.3)을 이용하여 구할 수 있으며, 이때 평균은 각 물성치를 산술평균하여 구하고, 변동계수는 표준편차와 평균의 비로 구할 수 있으나, 본 연구에서 사용되는 변동계수는 허용안전율을 1.3으로 보고 Meyerhof 등의 파괴확률 연구범위 계산 시 사용한 신뢰성지수 2.33~3.10을 역산하여 나온 값을 사용하였다(주승완, 2001).

$$F.S = \frac{1}{1 - (\beta)(\Omega_x)} \quad (4.3)$$

여기서, Ω_x : 변동계수 β : 신뢰성지수이다.

표 4.8 토사사면 안정계산의 신뢰성 해석결과

구 간 조 건	최 소 안 전 율(Fs)			
	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
신뢰성지수(β)	1.82			
안 전 율($F.S$)	1.15			

표 4.8은 그림 4.6과 같이 점추정법 프로그램에 의해 신뢰성해석을 실시하여 신뢰성지수(β)를 구하여 변동계수값 0.072를 식(4.3)에 대입하여 계산한 결과 안전율($F.S$)은 1.15로 나타났으며 이와 같은 점추정법에 의한 신뢰성해석은 토사사면 구간 전체의 신뢰성지수와 안전율을 도출할 수 있어, 이는 종래의 확정론적 방법에서 임의의 한 구간에 대해서만 안전율을 산출하여 안정해석을 하는 방법과 크게 대조를 이루고 있다.

4.4.2 퍼지근사추론법에 의한 평가

토사사면은 지반정수 값과 지층특성 및 지하수의 상태 등에 따라 그 거동이 다

르기 때문에 토질역학과 암반공학 등의 모든 이론에 의거하여 그 상태를 정량적 지표로 정확히 평가할 수 없는 경우가 많다. 이 때문에 토사사면의 안정성평가에 있어 퍼지이론의 응용은 토목구조물로서의 사면의 특수성을 고려하는 동시에 전문 기술자의 경험적 주관이나 평가과정을 정량적이고 객관적으로 받아들일 수 있다는 점에서 사면의 안정성 평가를 합리적으로 해결하는 방법으로 유효하다고 사료된다.

본 연구에서는 토사사면의 파괴요인에 대한 전문기술자의 주관적 판단을 퍼지언어변수로 표현하고 퍼지집합론에 근거한 퍼지근사추론법을 이용한 사면안정 평가 분석 방법을 적용하였다. 또 토사사면의 안정성 평가 구성요인들 중 각각의 내·외적 요인들에 대해서 전문가의 주관적 판단을 기초로 하여 언어학적 판단을 정량적으로 평가할 수 있는 퍼지집합의 개념을 응용하여 다음과 같은 수행절차를 거쳐 평가하였다.

[단계 1] : 퍼지 가중평균과 해밍거리의 개념을 도입하여 토사사면 각각의 내·외적 요인에 대한 변상인자의 종합적 추정치를 산정한다.

[단계 2] : 퍼지-베이스 신뢰성 해석모델로 예측파괴 확률을 산정하고 파괴가능성에 의한 퍼지 신뢰성해석모델을 사용하여 예측 파괴확률에 대응하는 예측성능지수와 성능평가 분석을 추정한다.

[단계 3] : [단계 1]과 [단계 2]의 각 요인의 추정치를 사용하여 토사사면의 퍼지근사추론법에 의한 안정성 평가의 결과를 분석한다.

위의 3가지 단계를 거쳐 입력한 내적 및 외적 요인별 데이터는 내적요인(X)의 경우 표 4.9를 이용하였고, 외적요인(Y)의 경우 표 4.10을 이용하였다.

전술한 바와 같이 토사사면에 대한 파괴요인의 내적요인은 지반조사 및 토질시험 결과를 사용하였고, 또한 외적요인은 경험적 방법의 10가지 분류요인을 사용하였다.

또한 퍼지이론에서 필요한 각 요인의 멤버쉽함수는 토질 전문가의 경험이나 지식에 기초하여 주관적으로 정해지므로 내적 및 외적 요인별 판정분의 소속도함수의 설정에 있어 A, B, C, D, E의 5단계 언어변수로 표현하여 사면의 파괴 및 변상을 유발하는 내적 및 외적 요인별 소속도함수를 결정하였고, 각 요인별에 대한 비율을 중요도계수로 하는 가중치 평균 개념을 이용한 종합적 판정의 근사화 과정에 있어

표 4.9 토사사면에 대한 내적요인 조사결과

분류	판정구분		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
	요 인					
X1	내부 마찰각		25	25	30	30
X2	점착력(MPa)		2	2	3	3
X3	표준관입시험		19	19	48	48
X4	기반암 깊이		8.7	8.7	2.3	2.3
X5	토질 분류		사질토	사질토	사질토	사질토
X6	지하수 상태		습윤	젖음	습윤	습윤
X7	지반변형 상태		극히 부분적	국부적변형	없음	없음

표 4.10 토사사면에 대한 외적요인 조사결과

분류	판정구분		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
	요 인					
Y1	사면의 높이(m)		34	47	47	15
Y2	사면의 경사각		1 : 1.47	1 : 1.45	1 : 1.47	1 : 1.88
Y3	토질상태		느슨	느슨	조밀	조밀
Y4	상부 물고임 상태		약간 발생	다수 발생	거의 없음	약간 발생
Y5	식생상태		양호	보통	양호	보통
Y6	배수 상태		불량	불량	보통	불량
Y7	사면의 균열상태		없음	부분적 균열	없음	없음
Y8	과거 활동이력		없음	국부적 파괴	없음	없음
Y9	지지구조물의 변형상태		심각한 변형	심각한 변형	극히 부분적 변형	극히 부분적 변형
Y10	사면표층부 상태		매우 느슨	매우 느슨	보통	보통

Kaufmann의 해밍거리의 개념을 도입하여 계산하였다. 이 때 중요도계수는 토질 전문가의 경험이나 지식과 통계적 자료에 의해 정해지는 계수로서 각 변상 요인별의 판정구분에 대한 중요도계수는 제3장에서 전술한 바와 같이 적용하였다.

토사사면의 퍼지 근사추론에 의한 각 구간별 입력데이터는 전설의 분석절차를 통해 얻어 표 4.11과 같으며, 그림 4.7 ~그림 4.9와 같은 퍼지근사추론법의 구조화를 이용하여 안정성 평가를 시행하여 결과는 표 4.12와 같다.

표 4.11 토사사면의 각 구간별 내·외적요인 입력데이터

구 분	내적요인							외적요인									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
제 1구간	C	C	C	C	D	B	B	D	B	D	C	B	D	A	A	E	E
제 2구간	C	C	C	C	D	C	C	E	B	D	D	C	D	C	C	E	E
제 3구간	B	B	B	B	D	B	A	E	B	B	B	B	C	A	A	B	C
제 4구간	B	B	B	B	D	B	A	B	A	B	C	C	D	A	A	B	C

표 4.12 퍼지이론에 의한 토사사면의 안정성 평가 결과

구 분	구간별 안정성 검토			
	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내적요인(X)	C	C	B	B
외적요인(Y)	E	E	B	A
활동상태요인(Z)	E	D	D	B
안정성 평가	E	D	D	B

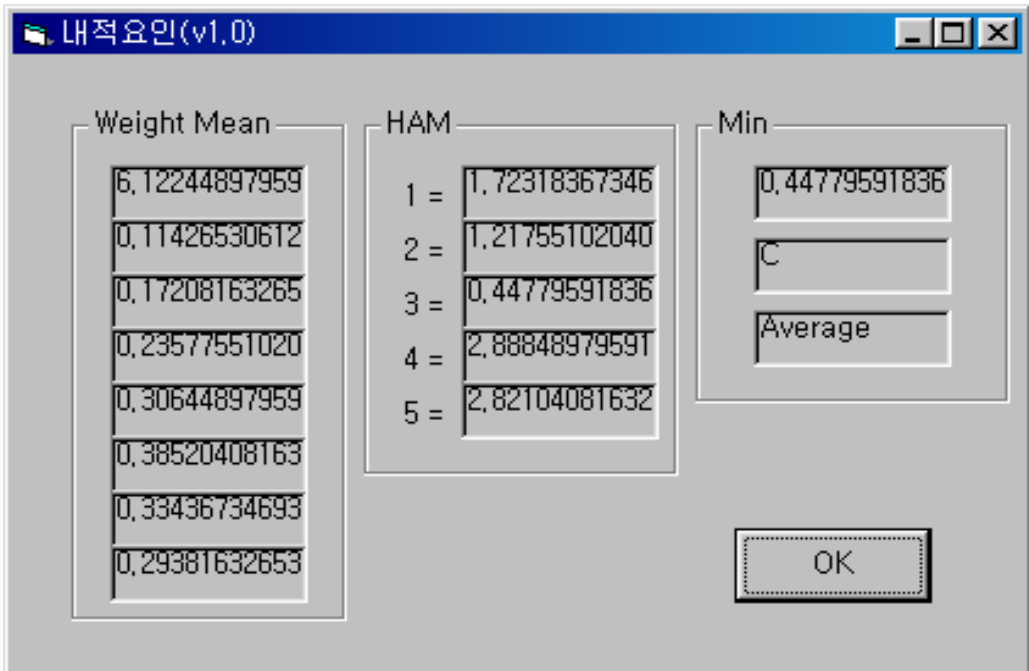
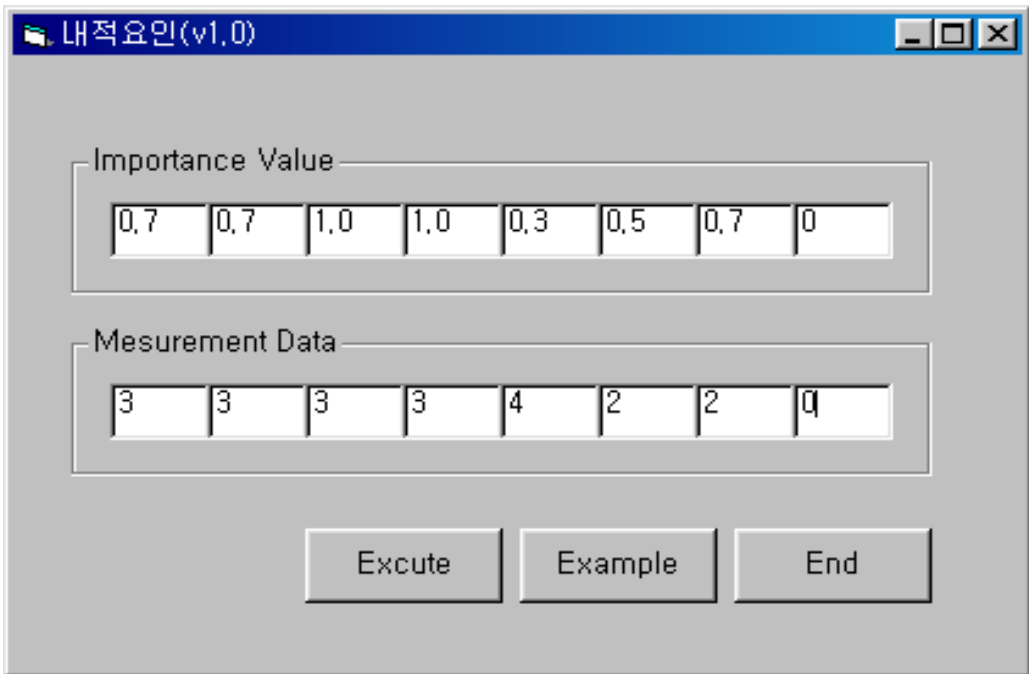


그림 4.7 퍼지 내적안정에 대한 입력 및 결과 창

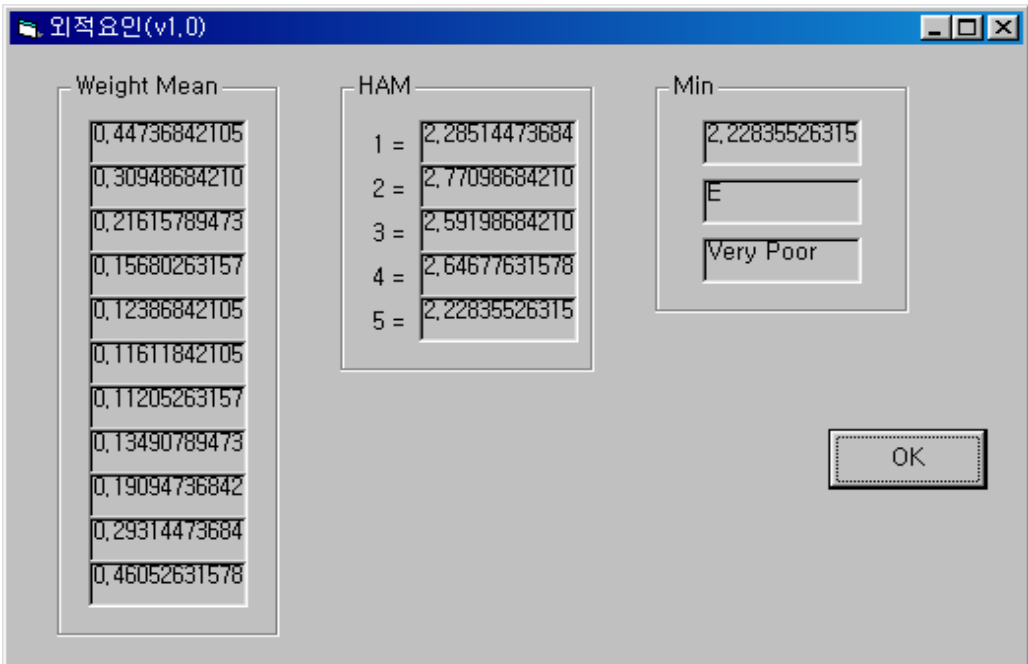
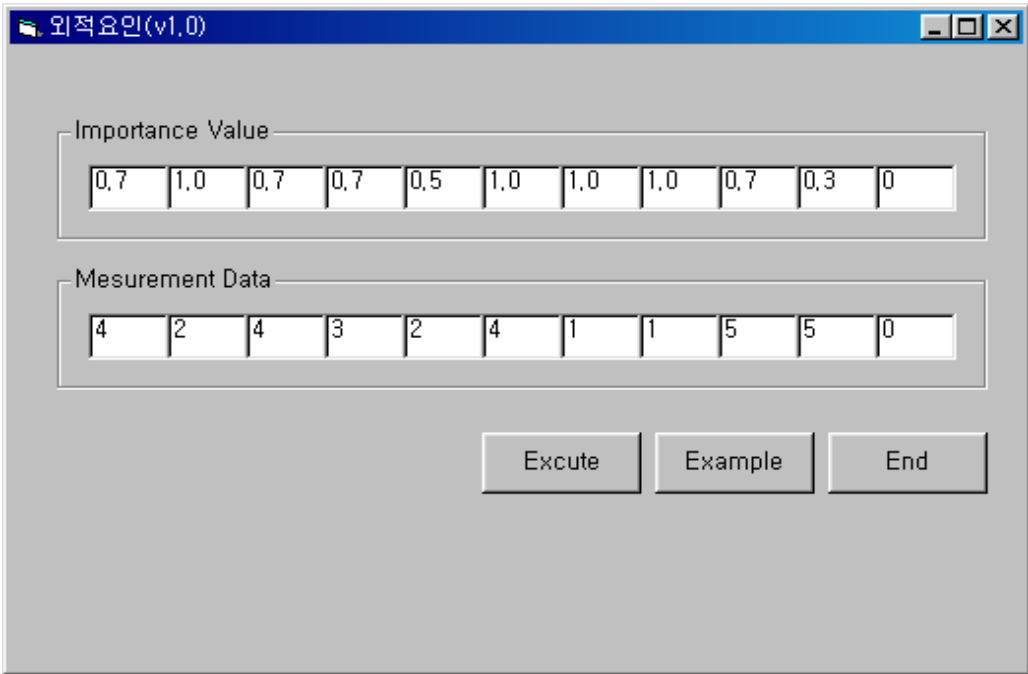


그림 4.8 퍼지 외적안정에 대한 입력 및 결과 창

퍼지 안정성 평가(v1.0)

1. NUMBER OF FUZZY SUBSETS

X

Y

Z

2. NAME OF FUZZY SUBSETS

3. CHANGED FUZZY SUBSET OF RISK FACTOR

4. Name of Risk Subsets

Excute Example End

퍼지 안정성 평가(v1.0)

Hamming Distance

<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="3,52"/>
<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="4,24"/>
<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="4,12"/>
<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="3,44"/>
<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="0"/>

Result

Risk Score

Linguistic Value

Result

OK

그림 4.9 퍼지 안정성 평가 입력 및 결과 창

4.4.3 인공신경망 이론에 의한 평가

인공신경망 이론에 의한 토사사면의 안정성 평가는 인공신경망 시스템의 활용성을 검증하고 시스템 수행결과의 타당성을 분석하기 위해 검토대상 토사사면에 대해 적용하여 평가하였다. 본 연구에서 사용한 신경망모델은 사면의 손상 및 파괴에 대한 내적요인과 외적요인을 기준으로 선별한 신뢰성 있는 현장계측 자료를 토대로 인공신경망모델의 학습검증에 사용하였으며, 학습은 최급강하법을 기초로 하는 역전파 알고리즘을 이용하여 수행하였다. 사면의 안정성 평가를 위한 신경망 모델은 입력층-은닉층-출력층으로 이루어진 17-10-1의 역전파 신경망을 이용하였으며, 토사사면의 안정성 평가를 위해 표 4.13과 같이 토사사면의 안정성 평가에 대한

표 4.13 토사사면의 안정성 평가에 대한 입력변수 및 입력값의 범위

구 분	평가 항목		A	B	C	D	E
내적요인	X1	내부 마찰각	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X2	점착력(MPa)	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X3	표준관입시험	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X4	기반암 깊이(m)	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X5	토질 분류	0	0.14	0.43	0.71	1.0
	X6	지하수 상태	0	0.2	0.5	0.7	1.0
	X7	지반변형 상태	0	0.25	0.5	0.75	1.0
외적요인	X8	사면의 높이(m)	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X9	사면의 경사각	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X10	토질상태	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X11	상부 물고임 상태	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X12	식생상태	0	0.2	0.5	0.7	1.0
	X13	배수 상태	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X14	사면의 균열상태	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X15	과거 활동이력	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X16	지지구조물의변형상태	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X17	사면 표층부 상태	0	0.14	0.43	0.71	1.0

입력변수 및 입력 값의 범위를 정하였다. 본 연구에서 구축한 역전과 학습 알고리즘을 이용한 인공신경망 학습과정에서는 다양한 사면해석 사례를 바탕으로 출력층의 노드가 1개인 신경망 모델로 사면의 안정성 평가를 학습시켰다. 입력변수들은 총 17개의 항목을 입력하였으며 은닉층의 수는 10개로 고정하였다. 학습반복횟수는 5000번으로 신경망을 학습시켰고, 입력변수는 17개의 노드로 구성되며 0~1사이의 값을 갖도록 변화시켰다. 이때 학습률(lr)은 0.1, 오차제곱평균(RMS)의 오차허용한계는 0.05로 은닉층과 출력층이 모두 로지스틱(Logistic) 전달함수를 갖는 2개 층의 신경망과 역전과 알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서 적용한 토사사면의 안정성 평가 입력 데이터를 표 4.14에 정리하였고 출력된 평가 결과를 표 4.15에 정리하였다.

표 4.14 토사사면의 안정성 평가의 입력 데이터

구 분		입력 데이터									
제 1구간	내적 요인	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7			
		0.5	0.5	0.6	0.6	0.71	0.2	0.25			
	외적 요인	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
		0.75	0.4	0.75	0.5	0.2	0.8	0	0	1.0	1.0
제 2구간	내적 요인	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7			
		0.5	0.5	0.6	0.6	0.71	0.5	0.5			
	외적 요인	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
		1.0	0.4	0.75	0.75	0.5	0.8	0.6	0.6	1.0	1.0
제 3구간	내적 요인	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7			
		0.25	0.25	0.4	0.4	0.71	0.2	0			
	외적 요인	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
		1.0	0.4	0.25	0.25	0.2	0.6	0	0	0.25	0.43
제 4구간	내적 요인	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7			
		0.25	0.25	0.4	0.4	0.71	0.2	0			
	외적 요인	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
		0.25	0	0.25	0.5	0.5	0.8	0	0	0.25	0.43

표 4.15 인공신경망 이론에 의한 토사사면의 안정성 평가결과

구 분	구간별 안정성 검토 결과			
	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
출력 결과치	0.6671	0.6331	0.7301	0.7375
평 가 등 급	D	D	D	D
판 정 결 과	불량	불량	불량	불량

4.4.4 퍼지-신경망 이론에 의한 평가

본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 시스템에 의한 토사사면 안정성 평가는 인공신경망 이론에 의한 방법의 표 4.14의 입력 데이터를 이용하여 인공신경망과 퍼지 로직에 의한 안정해석을 실시하여 아래와 같은 결과를 얻었다. 그림 4.10, 그림 4.11은 시스템에 의한 파괴가능성 분포도이다.

1. 인공신경망에 의한 안정성 평가

인공신경망에 의한 방법은 토사사면에 대해 신뢰성 지수를 구할 수 있으며, 안정 해석도 확률적기법과 결함수기법으로 구분하여 구할 수 있는데, 본 연구에서는 결함수기법의 결과만 나타내었다.

표 4.16 인공신경망에 의한 토사사면의 신뢰성지수

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내 적 요 인 신뢰성지수(β_x)	2.5121	2.4109	2.9046	2.9074
외 적 요 인 신뢰성지수(β_y)	2.4533	2.0012	2.9917	3.0934
전 체 신뢰성지수(β)	2.4609	2.1504	3.0223	3.0669

표 4.17 인공신경망에 의한 토사사면의 안정성 평가(결함수기법)

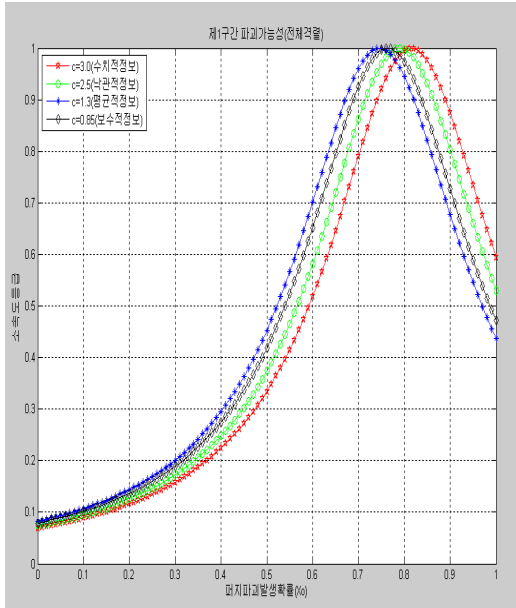
구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내 적 요 인	0.7534	0.7231	0.8711	0.8720
외 적 요 인	0.7358	0.6002	0.8973	0.9278
안정성 평가	0.6671	0.6331	0.7301	0.7375
신뢰성지수(β)	2.4609	2.1504	3.0223	3.0669
안 전 율(F_s)	1.1908	1.1560	1.2439	1.2490

2. 퍼지로직에 의한 안정성 평가

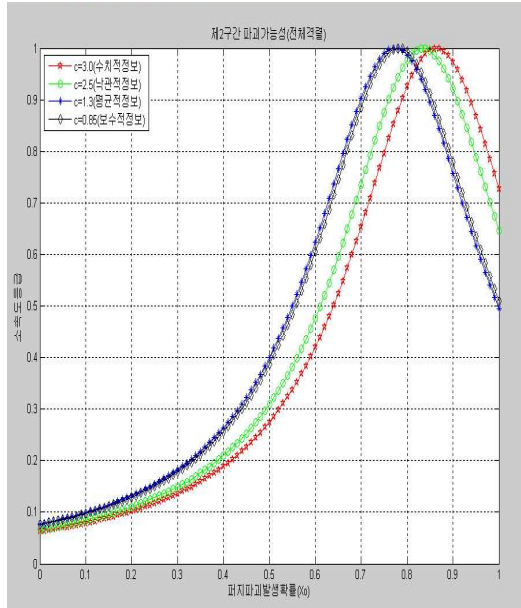
퍼지로직에 의한 방법은 토사사면에 대해 신뢰성 지수를 구할 수 있으며, 안정해석도 확률적기법과 결함수기법으로 구분하여 구할 수 있는데, 본 연구에서는 결함수기법의 결과만 나타내었다.

표 4.18 퍼지로직에 의한 토사사면의 신뢰성지수

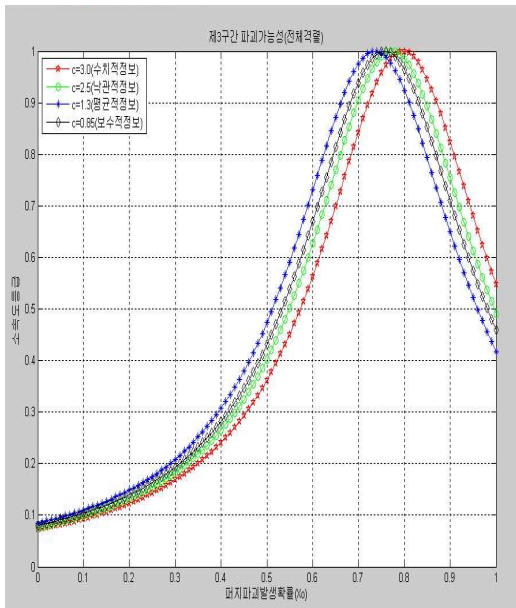
구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내 적 요 인 신뢰성지수(β_x)	2.5190	2.2695	2.5986	2.5986
외 적 요 인 신뢰성지수(β_y)	2.4994	2.3380	2.5654	2.5876
전 체 신뢰성지수(β)	2.5158	2.2899	2.6150	2.6164



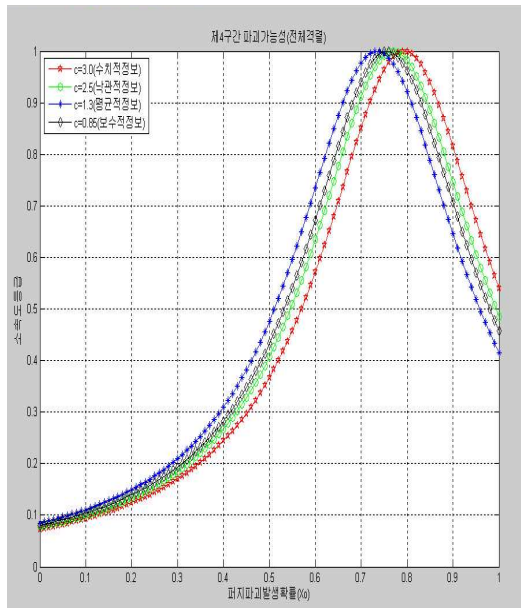
(제 1구간)



(제 2구간)

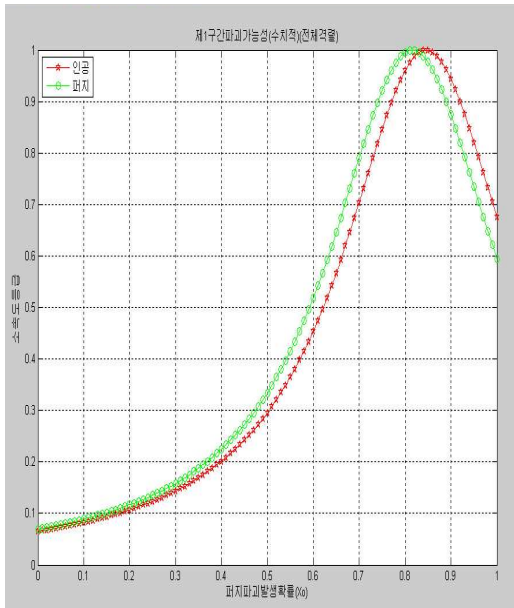


(제 3구간)

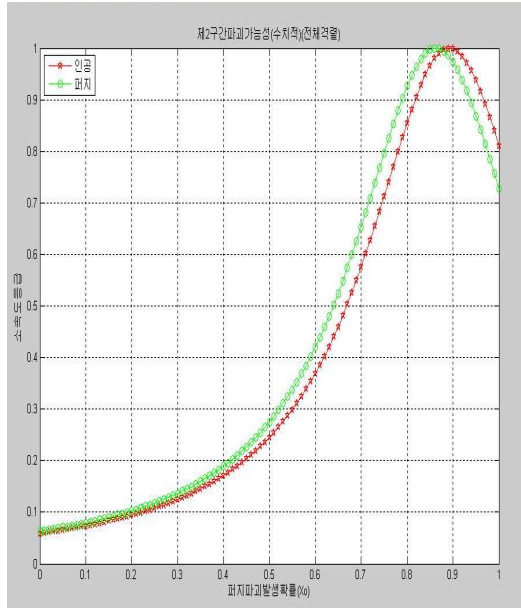


(제 4구간)

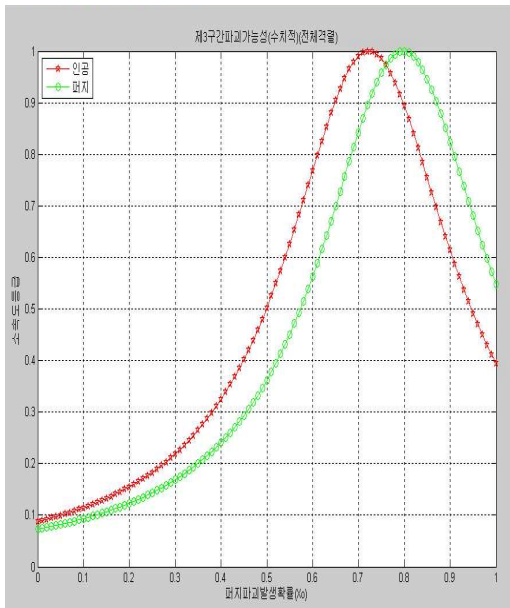
그림 4.10 토사사면 각 구간별 파괴가능성



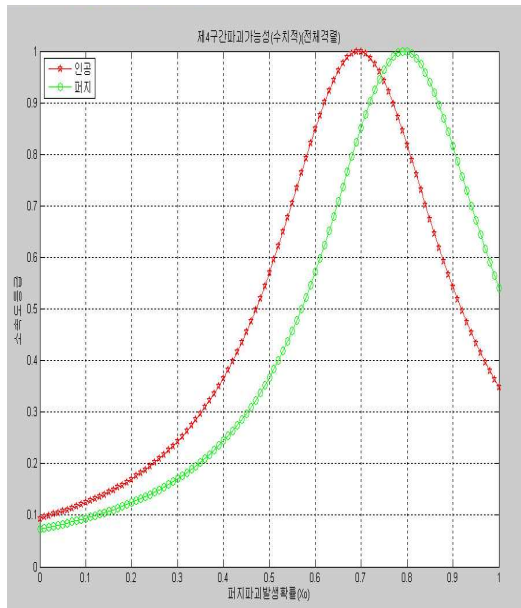
(제 1구간)



(제 2구간)



(제 3구간)



(제 4구간)

그림 4.11 토사사면 각 구간별 수치적 파괴가능성

표 4.19 퍼지로직에 의한 토사사면의 안정성 평가(결함수기법)

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내 적 요 인	0.7555	0.6807	0.7794	0.7794
외 적 요 인	0.7496	0.7012	0.7694	0.7761
안정성 평가	0.6704	0.6463	0.6795	0.6809
신뢰성지수(β)	2.5158	2.2899	2.6150	2.6164
안 전 율(F_s)	1.1938	1.1711	1.2019	1.2032

4.5 토사사면의 안정성 평가 결과 및 분석

4.5.1 정량적 해석에 의한 안정성 평가결과

토사사면에 대한 정량적 안정해석은 한계평형이론 중 Bishop의 간편법을 적용한 STABL5M 프로그램 해석방법을 사용하였고, 신뢰성이론에 의한 안정해석은 원호활동과괴식으로부터 한계상태함수식을 유도·산정하여 사용하는 점추정법에 의한 안정성 해석방법과 본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 시스템 해석 결과를 정리하였다.

1. 한계평형 해석에 의한 평가결과

한계평형해석법(STABL5)에 의한 각 토사사면의 안정성 평가 결과는 제 1구간은 건기시: 1.602~1.686으로 안정, 평상시: 1.400~1.474로 안정, 우기시: 0.992~1.057로 불안정한 것으로 분석되며, 제 2구간에 대한 결과도 건기시: 1.745~1.946으로 안정, 평상시: 1.593~1.751로 안정, 우기시: 1.035~1.147로 불안정한 것으로 분석되었고, 제 3구간은 건기시: 1.785~1.955로 안정, 평상시: 1.496~1.638로 안정, 우기시: 1.054~1.171로 불안정한 것으로 분석되었다. 그러나 제 4구간은 건기시: 2.178~2.328로 안정, 평상시: 1.993~2.157로 안정, 우기시: 1.428~1.527로 안정성을 확보하는 것으로 나타났다. 또 각 구간별 최소안전율을 값은 제 1구간은 0.992로 불안, 제 2구간은 1.035로 불안, 제 3구간은 1.054로 불안, 제 4구간은 1.428로 안정한 것으로 나타났다. 한계평형해석법에 따른 각 구간별 안정성 평가 결과는 표 4.20과 같다.

표 4.20 한계평형해석에 의한 토사사면의 안정성 평가결과

구 분	건기시 (평균)	평상시 (평균)	우기시 (평균)	최소안전율	판 정
제 1구간	1.602~1.686 (1.644)	1.400~1.474 (1.437)	0.992~1.057 (1.0245)	0.992	Fs < 1.3 NG
제 2구간	1.745~1.946 (1.8455)	1.593~1.751 (1.672)	1.035~1.147 (1.091)	1.035	Fs < 1.3 NG
제 3구간	1.785~1.955 (1.870)	1.496~1.638 (1.567)	1.054~1.171 (1.1125)	1.054	Fs < 1.3 NG
제 4구간	2.178~2.328 (2.253)	1.993~2.157 (2.075)	1.428~1.527 (1.4775)	1.428	Fs > 1.3 OK

2. 점추정법에 의한 신뢰성 평가결과

점추정법에 의한 신뢰성 해석은 토사사면 각 구간별 물성치를 산술하여 안정해석에 필요한 제원 및 확률변수 값을 구하고 이에 대한 평균과 표준편차를 구하여 그림 4.6의 점추정법 신뢰성해석 프로그램을 이용하여 신뢰성지수(β)를 구할 수 있으며, 변동계수는 표준편차와 평균의 비로 산정된다.

점추정법에 의한 신뢰성 해석은 FAURE(1994)에 의해 제안된 식에 신뢰성지수와 변동계수값 0.072를 대입하여 계산한 결과 안전율이 1.15로서 1.3미만으로 나타났으며 신뢰성지수 값은 토사사면 제 1구간에서 제 4구간까지의 1.82로 산정되어 붕괴 가능성이 있는 것으로 판정된다.

표 4.21 토사사면의 점추정법에 의한 신뢰성해석 결과

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
신뢰성지수	1.82			
안 전 율	1.15			

3. 퍼지-신경망 시스템에 의한 평가결과

퍼지-신경망 시스템을 이용하여 인공신경망에 의한 안정해석과 퍼지로지스에 의한 안정해석을 실시하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

표 4.22 퍼지-신경망 시스템에 의한 평가결과(토사사면)

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
인공신경망 안 전 율	1.19	1.16	1.24	1.25
퍼지로지 안 전 율	1.19	1.17	1.20	1.20

4.5.2 정성적 해석에 의한 안정성 평가결과

토사사면에 대한 정성적 안정해석은 경험적인 방법에 의한 사면안정성 평가와 퍼지근사추론법을 이용한 방법 그리고 인공신경망이론을 이용하여 다음과 같이 결과를 정리하였다.

1. 경험적인 사면안정 해석방법에 의한 평가결과

경험적인 사면안정 해석방법은 표 4.4와 같이 경험적인 방법에 의한 사면안정성 평가를 실시하여 표 4.23과 같이 토사사면에 대한 안정성 평가 결과를 나타냈다.

그 결과로서 제 1구간은 불안정한 상태, 제 2구간은 대단히 불안정한 상태로 분석되었고, 제 3구간과 제 4구간은 불안이 잠재되어 있는 것으로 분석되어 경험적 방법에 의한 사면안정 평가는 경험 있는 기술자의 판단 등으로 사면불안정의 원인을 빨리 들출할 수 있어 보수·보강 대책을 수립하는데 유효한 것으로 판단되나 해석방법에 대한 객관성이 미흡하고 세부적인 대책수립에 대한 객관성 또한 미흡하다고 판단된다.

표 4.23 경험적 방법에 의한 토사사면의 안정성 평가결과

구 분	평 가 결 과	호주사면 안전도표 결과
제 1구간	전체적인 사면의 구성상태나 구조물의 변형상태로 보아 아주 불안정한 상태.	불안
제 2구간	사면의 지표수 유입과 구조물의 변형상태로 보아 불안정한 상태를 나타냄.	대단히 불안
제 3구간	지지구조물이 양호하고 지표수 등의 배제가 비교적 양호하여 부분적 안정성 확보	불안 잠재
제 4구간	사면의 형상 및 전체적인 부분에서 안정성을 확보하고 있으나 지표수처리 방안 검토	불안 잠재

2. 퍼지근사추론법에 의한 평가결과

퍼지근사추론법에 의한 평가는 토사사면의 안정성분석 평가 구성요인들 중 각각의 내·외적 요인들에 대해서 퍼지근사추론법의 구조화를 이용하여 표 4.12 토사사면 각 구간별 안정성 평가 결과를 표 3.7 퍼지이론에 의한 토사사면의 안정성 평가 기준에 의해 분석하였다. 분석결과 제 1구간은 극히 심각한 불안정한 상태로 파괴 가능성이 매우 많고, 제 2구간과 제 3구간은 불안정 상태로 파괴 가능성은 많게 나타났다. 또 제 4구간은 안정된 상태로 파괴가능성이 약간 있음으로 분석된다. 표 4.12와 표 3.7을 분석하여 정리하면 표 4.24와 같다.

표 4.24 퍼지이론에 의한 안정성평가 해석결과(토사사면)

구 분		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내적요인(X)		보통	보통	양호	양호
외적요인(Y)		매우 높음	매우 높음	낮음	중간정도
활동상태요인(Z)		위험	불안정	불안정	안정
안정성 평 가	평가등급	E	D	D	B
	판정결과	완전히 불안정	불안정	불안정	안정
	파괴가능성	매우 많음	많음	많음	약간 있음
	보수·보강	안전율 증가법	안전율 증가법	안전율 증가법	안전율 유지법

3. 인공신경망 이론에 의한 평가결과

인공신경망 이론에 의한 안정성 평가는 토사사면 각 구간별 안정성 평가를 위해 입력변수 및 입력 값의 범위를 정하여 본 연구에서 구축한 역전파 학습 알고리즘을 이용하여 판정하여 표 4.15와 같이 인공신경망 이론에 의한 토사사면의 안정성 평가 결과를 도출할 수 있는데, 그 결과 제 1구간은 출력 결과치가 0.6671로 평가

등급 D에 해당하여 불량한 상태로 판정되었고, 제 2구간은 출력 결과치가 0.6331로 평가등급 D에 해당하여 불량한 상태로 판정되었다. 또 제 3구간은 출력 결과치가 0.7301로 평가등급 D에 해당하여 불량한 상태로 판정되었고, 제 4구간은 출력 결과치가 0.7375로 평가등급 D에 해당하여 불량한 상태로 평가되었다.

4.5.3 토사사면 안정성 평가 분석 및 고찰

본 연구는 토사사면의 안정성 평가 중 정량적 방법(한계평형해석방법, 점추정법에 의한 신뢰성 해석방법, 퍼지-신경망 사면안정 평가시스템에 의한 방법)과 정성적 방법(경험적인 사면 안정성 평가방법, 퍼지이론에 의한 평가방법, 인공신경망이론에 의한 평가방법)을 실제 토사사면에 적용하여 서로 비교·분석하여 각 사면에 대한 안정성 평가와 신뢰성 및 타당성 등을 검토하여 향후 사면의 설계·시공·유지관리에 대해 안전하고 경제적인 사면을 확보하기 위한 기준을 제시하고자 한다.

토사사면 안정해석은 토사사면 4개구간에 대해 시추조사, 표준관입시험, 실내시험 등의 결과를 바탕으로 정량적 방법과 정성적 방법을 이용하여 안정성 평가를 실시하여 상호 비교·분석하였다.

1. 정량적 평가 결과의 분석

토사사면에 대한 정량적 평가 분석은 한계평형해석법인 STABL5M 프로그램의 결과와 한계평형해석에 대해 저항과 하중의 확률변수를 고려한 점추정법에 의한 신뢰성 해석방법에 의한 결과, 그리고 본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 시스템 해석에 대한 결과를 정리하여 서로 비교·분석하였다.

한계평형해석법(STABL5)에 의한 각 토사사면의 안정성 평가 결과 제 1구간은 최소안전율이 0.992로 불안정, 제 2구간은 최소안전율이 1.035로 불안정, 제 3구간은 최소안전율이 1.054로 불안정, 제 4구간은 최소안전율이 1.428로 안정성을 확보하는 것으로 나타났다.

또 점추정법에 따른 안정성 평가 결과는 제 1구간에서 제 4구간까지의 토사사면 전체의 신뢰성지수(β)값은 1.82로 산정되었고, FAURE(1994)의 제안식에 변동계수 0.072를 대입하여 계산된 안전율이 1.15로서 최소허용안전율 1.3 미만으로 불안정한 것으로 판단되었다.

표 4.25 토사사면에 대한 정량적 평가 결과 비교

구 분		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
한계평형 해석방법	우기시~ 건기시	0.992~ 1.686	1.035~ 1.946	1.054~ 1.955	1.428~ 2.328
	최소안전율	0.992	1.035	1.054	1.428
점추정법	안 전 율	1.15			
퍼 지 신경망	인공신경망 결함수기법	1.19	1.16	1.24	1.25
	퍼지로직 결함수기법	1.19	1.17	1.20	1.20

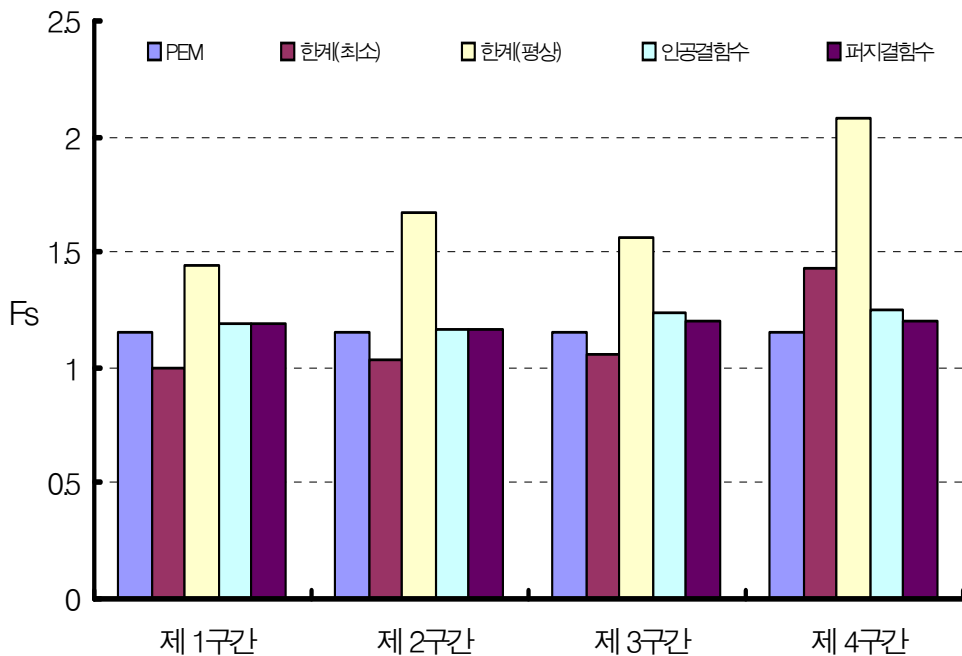


그림 4.12 정량적 해석방법 비교(토사사면)

그리고 본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 사면안정 평가시스템에 의한 토사사면 안정성 평가는 인공신경망 결합수기법의 안전율이 제 1구간에서 1.19, 제 2구간에서 1.16, 제 3구간에서 1.24, 제 4구간에서 1.25로 나타났으며 퍼지로지컬 결합수 기법의 안전율이 제 1구간에서 1.19, 제 2구간에서 1.17, 제 3구간에서 1.20, 제 4구간에서 1.20으로 나타나 다소 불안정한 값의 결과를 얻었다.

이와 같은 결과는 한계평형해석방법은 지하수위 영향에 따라 안전율에 대한 변화의 차이가 상당히 있어, 토사사면의 경우 지반 중 간극수압의 영향에 따라 사면의 안정성이 크게 달라질 수 있음을 확인할 수 있었으며, 평가된 안전율도 토사사면의 전체적인 파괴 가능성에 대한 안정성을 평가하는데 유효한 것으로 판단할 수 있으나, 이는 임의의 한 구간에 대한 안전율을 나타낸 값이므로 전체사면의 안정성을 판정 및 보수·보강공법을 결정하기에 다소 불안정한 부분이 있는 것으로 판단된다.

반면 점추정법에 의한 신뢰성해석과 본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 사면안정 평가 시스템은 토사사면 구간 전체의 신뢰성지수와 안전율을 도출할 수 있으며, 이는 종래의 확정론적(한계평형해석)방법에서 임의의 한 구간에 대해서만 안전율을 산출하여 안정해석을 하는 방법과 달리 여러 개의 확률변수의 평균과 표준편차 값으로 신뢰성 해석을 할 수 있다. 그림 4.12와 같이 점추정법의 안전율과 퍼지-신경망의 안전율 그리고 한계평형해석 최소안전율을 그래프로 비교해 보면, 안전율 값은 거의 유사하게 판정되어 점추정법은 확률변수가 15개 이하인 경우에는 손쉽게 계산할 수 있어 유리하게 이용될 수 있으나, 그 이상인 경우에는 컴퓨터 프로그램에 의한 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 반면, 본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 시스템은 점추정법과 같은 안전율을 값을 나타냈으며 확률변수가 많아도 계산이 손쉽게 할 수 있어 아주 유리한 방법으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있다. 표 4.25와 그림 4.12는 토사사면에 대한 정량적 평가 결과를 비교하였다.

2. 정성적 평가 결과의 분석

토사사면에 대한 정성적 평가 분석은 경험적인 사면 안정성 평가 방법에 의한 결과와 퍼지이론에 의한 평가방법 및 인공신경망 이론에 의한 평가방법 등의 결과를 서로 비교·분석하였다.

경험적인 사면 안정성 평가 결과는 제 1구간은 불안정, 제 2구간은 대단히 불안정, 제 3구간과 제 4구간은 불안잠재 상태로 경험 있는 기술자의 판단 등으로 사면

불안정의 원인을 빨리 돌출할 수 있어 보수·보강 대책을 수립하는데 유효한 것으로 생각할 수 있으나 해석방법에 대한 객관성이 미흡하고 세부적인 대책수립에 대한 객관성 또한 미흡하여 확실한 안정성을 확보하는데 다소의 어려움이 있을 것으로 판단된다.

또 퍼지근사추론법에 의한 평가결과는 제 1구간이 완전 불안정, 제 2구간과 제 3구간이 불안정, 제 4구간이 안정한 상태로 경험적 방법에 의한 평가결과와 유사성을 보이고 판정에 대한 객관성을 확보할 수 있어 세부적인 대책수립에도 유리한 것

표 4.26 토사사면의 정성적 평가 결과 비교

구 분		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
경험적 방법		전체 사면의 구성상태나 구조물의 변형상태로 보아 아주 불안정한 상태 (불안정)	사면의지표수 유입과 구조의 변형상태로 보아 불안정한 상태 (대단히불안정)	지지구조물이 양호하고 지표수 배제가 비교적 양호하여 부분적 안정성 (불안 잠재)	사면형상 및 전체적인부분의 안정성을 확보하나 지표수처리방안 검토 (불안 잠재)
퍼지이론에 의한 방법	평가등급	E	D	D	B
	판정결과	완전 불안정	불안정	불안정	안정
	파괴가능성	매우 많음	많음	많음	약간 있음
	보수·보강	안전율 증가법	안전율 증가법	안전율 증가법	안전율 유지법
인공신경망 이론에 의한 방법	출력결과치	0.6671	0.6331	0.7301	0.7375
	평가등급	D	D	D	D
	판정결과	불량	불량	불량	불량
보수·보강대책		절취공법+ 소일네일링	소일네일링+ 솟크리트	소일네일링+ 솟크리트	수평배수공+ 식생공

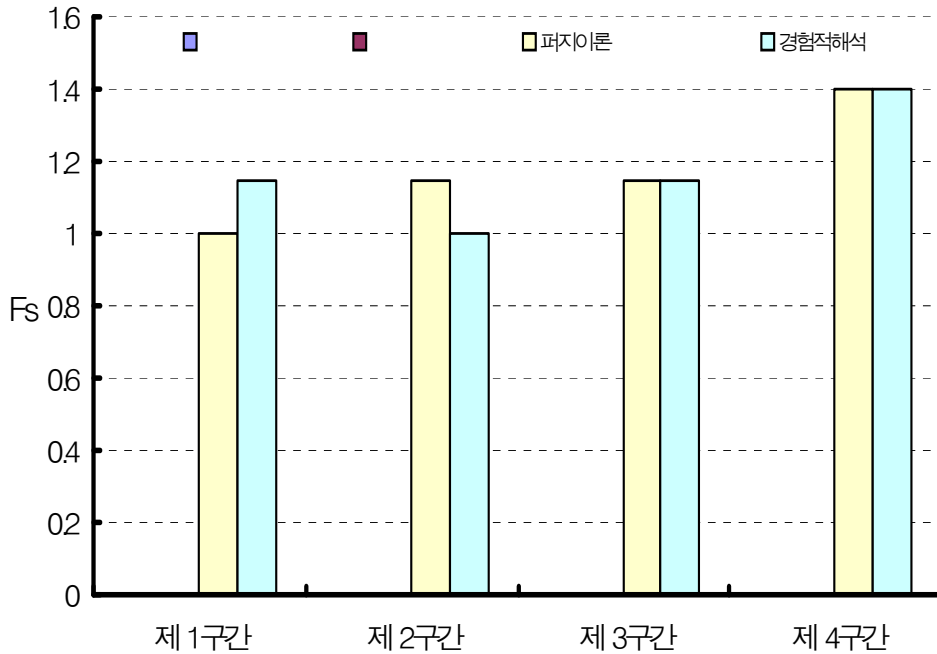


그림 4.13 정성적 해석방법 비교(토사사면)

으로 판단된다. 또한 퍼지근사추론 구조화에 의한 토사사면의 안정성 평가는 사면에 내재되어 있는 다양한 내적·외적요인을 정량적으로 평가할 수 있으므로 기존의 토사사면 안정해석과 퍼지근사추론법에 의한 안정성평가를 병행하면 정성적인 측면과 정량적인 측면에서의 사면안정해석을 보다 체계적이고 종합적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 인공지능망이론에 의한 평가결과는 제 1구간·제 2구간·제 3구간·제 4구간이 모두 불량한 상태로 분석되어 인공지능망이론에 의한 평가 결과는 퍼지근사추론에 의한 방법 및 경험적 방법에 따른 결과와 비교할 때 제 4구간을 제외한 나머지 구간에서 유사한 결과를 나타내고 있으므로, 인공지능망이론에 의한 해석은 인공지능의 한 분야로서 추론 및 판단 측면에서 신속성 및 정확성을 지니고 스스로가 조사된 자료의 상호 관련성을 인식, 분류함으로써 관계 규명을 명확하게 해주기 때문에 사면지반에 대한 안정성 평가 예측에 효과적인 역할을 기대할 수 있는

장점이 있는 것으로 사료된다.

3. 토사사면의 종합분석 및 고찰

토사사면 각 구간별 안정성에 대해 종합적으로 평가하면 제 1구간·제 2구간·제 3구간은 불안정한 상태, 제 4구간은 불안잠재 상태로 분석되어 한계평형해석은 지반 중 간극수압의 영향과 흙의 성질에 따라 사면의 안정성이 크게 달라질 수 있으므로 우기시를 고려한 안정성 분석을 하여야 하며, 활동형상에 따라 해석방법을 달리 적용해야 하는 불편함이 있다. 반면, 점추정법에 의한 신뢰성해석은 토사사면 구간 전체의 신뢰성지수와 안전율을 도출할 수 있으며, 평균과 표준편차만으로 신뢰성해석을 할 수 있고 토사사면 전체에 대한 평가도 확률변수가 15개 이하인 경우에는 아주 유리한 방법으로 사용될 수 있고, 한계평형해석방법 안전율과 비교하면 더 안전한 것으로 평가되어 안정성을 결정에 신중을 기할 수 있음으로 판단된다.

표 4.27 토사사면에 대한 안정성 종합평가 결과 비교

구 분		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
정 량 적 해석방법	한계평형 해석법	0.992 (NG)	1.035 (NG)	1.054 (NG)	1.428 (OK)
	점추정법	신뢰성지수 - 1.82 안 전 율 - 1.15 (불안정)			
	퍼지-신경망	1.19 (NG)	1.165 (NG)	1.22 (NG)	1.23 (NG)
정 성 적 해석방법	경험적 해석법	불안정	대단히 불안정	불안정	안정
	퍼지이론 해석법	완전 불안정	불안정	불안정	안정
	인공신경망 해석법	불량	불량	불량	불량
총 합 분 석		불안정한 상태	불안정한 상태	불안정한 상태	불안잠재 상태

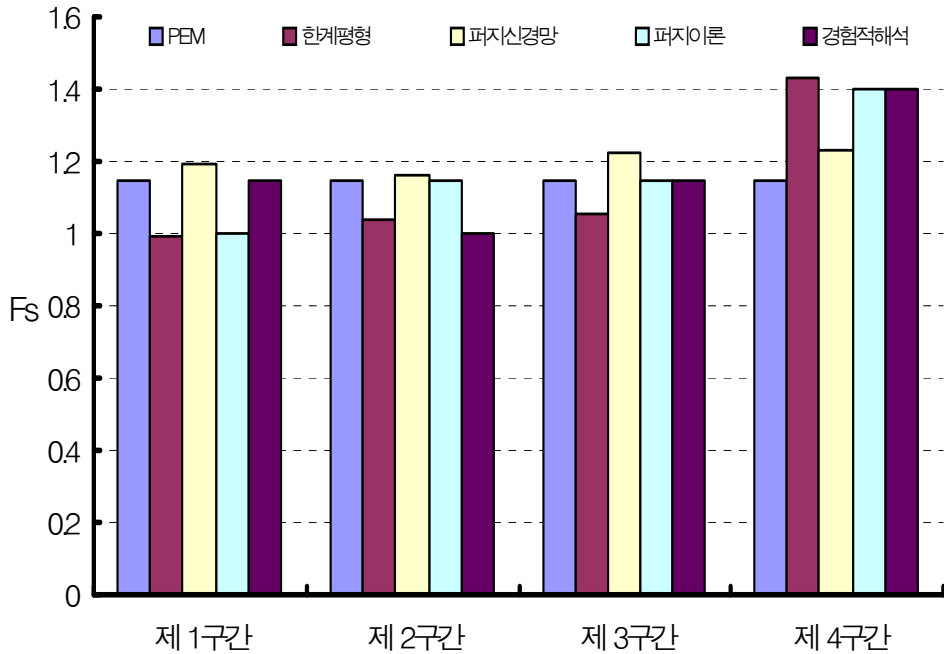


그림 4.14 토사사면에 대한 안정성 종합 비교

또 퍼지-신경망 시스템에 의한 방법은 전체구간의 안전율이 한계평형해석법에 의한 최소안전율 값의 범위에 있고, 점추정법에 의한 안전율과 거의 유사한 결과를 얻어 합리적인 평가방법임을 확인할 수 있었다. 또한, 한 번의 입력 값으로 인공신경망과 퍼지로직에 의한 사면안정 평가를 동시에 할 수 있으며 결함수기법과 확률론적기법을 이용하여 MATLAB 프로그램에 의해 수치해석 되므로 빠르고 정확한 계산이 가능하고, 사면에 대한 불안정요소 성능평가를 위한 객관적(일반적) 및 주관적(퍼지적) 신뢰성해석에 인간의 신뢰성 해석에 정보를 반영한 방법으로 내적 및 외적요인과 불확실량만으로 안전율을 구할 수 있어 합리적인 평가방법임을 확인할 수 있었다.

또한 경험적 방법에 의한 토사사면 안정성 평가는 사면의 불안정의 원인을 빨리 도출할 수 있어 보수·보강 대책을 수립하는데 유효한 것으로 판단되나 판단의 객관성과 세부적인 안정성 및 보수·보강대책을 수립하는데 다소 어려움이 있고, 퍼

지근사추론 구조화에 의한 토사사면의 안정성 평가는 사면에 내재되어 있는 다양한 외적 및 내적요인을 정량적으로 평가할 수 있는 것으로 판단되므로 기존의 경험적 방법에 의한 토사사면의 안정해석과 병행하면 사면안정해석을 보다 체계적이고 종합적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 인공신경망이론은 인공지능의 한 분야로서 추론 및 판단 측면에서 신속성 및 정확성을 지니고 있으며 스스로가 조사된 자료의 상호 관련성을 인식, 분류함으로써 관계 규명을 명확하게 해주기 때문에 사면지반에 대한 안정성 평가 예측에 효과적인 역할을 기대할 수 있는 장점을 지니고 있으므로 보다 합리적인 사면안정 평가법의 개발에 대한 가능성이 있음을 확인할 수 있다.

위와 같은 내용을 종합해보면 기존의 토사사면 안정해석 시 사용되는 경험적 방법에 의한 평가방법, 한계평형해석법에 의한 안정해석을 수행하는데 본 연구에서 제안한 퍼지-신경망 시스템에 의한 평가방법을 사용함으로써 점추정법에 의한 평가방법, 퍼지근사추론법에 의한 안정해석, 인공신경망에 의한 안정성 예측방법을 동시에 고려하여 실시할 수 있으므로 사면안정 평가 시 기존의 방법과 병행하여 사용하여 보다 체계적이고 종합적인 사면안정 해석이 가능하리라 사료된다.

제5장 암반사면에 대한 안정성 평가 및 분석

5.1 검토대상 및 현황

암반사면의 안정성 평가를 위한 검토대상 지역은 차령산맥과 노령산맥 사이에 위치하는 지역으로 지역지세로 본다면 비교적 저평한 지역이다. 금강 안쪽의 연미산 ~채측산 ~사미산을 잇는 능선 및 한산 ~백운산을 잇는 능선의 방향은 N40 ~50E로 이는 이 지대에 발달한 퇴적암류 및 단층선의 주향과 평행한 발달을 보인다.

본 연구지역에 분포하는 암석은 고생대의 선캠브리아기에 속하는 변성암류와 시대미상의 편마상 화강암류, 중생대의 화강암류, 염기성암맥, 산성암맥, 안산암질암 및 경상계 퇴적암류로 되어 있다. 암반사면의 안정해석의 대상구간은 제 1구간, 제 2구간, 제 3구간 및 제 4구간의 총 4구간으로서 각 구간의 지질 및 암반을 분석한 결과는 다음과 같다.

제 1구간은 중생대 경상계 퇴적암류인 세일질 역암류로 지층구조는 풍화토 1.8m, 연암 10.2m, 경암 13.0m로 구분되고, 노출된 암반은 암녹색과 암갈색으로 중간 정도의 풍화상태이며, 노두의 관찰은 양호한 편이다. 절리의 간격은 약 1 ~2m 정도이고, 절리 틈은 소량의 충전물로 채워져 있으며, 절리의 연장성은 2 ~3m 정도로 약한 상태이다. 본 지역의 사면에서는 대규모 단층이나 파쇄대 등은 관찰되지 않고, 불연속면의 방향성은 70 ~90°의 경사각을 지닌 NE ~EW 방향의 절리가 우세하게 나타난다. 표 5.1은 제 1구간의 대표적인 불연속면의 분포상태를 나타낸 것이다.

제 2구간은 시대미상의 편마상 화강암이 기반암으로 암녹색 ~녹회색을 띠고 있고, 중립 및 조립질로서 석영과 장석 및 운모류를 주요 구성광물로 이루고 있다. 일부의 절리면은 풍화가 진행되어 암 내부까지 변질된 상태이고, 산화철이 피복되어 적갈색을 띤다. 국부적으로 편마구조가 잘 관찰되어 있으며, 절리간격은 5 ~50cm로 빈도가 높고 연장성이 미약한 미세절리가 발달되어 있다. 본 구간의 사면에서는 대규모 단층이나 파쇄 등은 관찰되지 않고 불연속면의 방향성은 뚜렷한 방향성을 가지지 않은 산란된 형태를 띠고 있다. 다음의 표 5.2는 제 2구간의 대표적인 불연속면의 분포상태를 나타낸 것이다.

표 5.1 제 1구간의 불연속면의 분포상태

측점번호	주향 / 경사	Dip / Direction
1	N10W / 75SW	10 / 30
2	N20W / 80SW	76 / 240
3	N15W / 80SW	80 / 262
4	N60W / 66SW	65 / 210
5	N5E / 82NW	82 / 275
6	EW / 20S	20 / 180
7	EW / 70N	70 / 0
8	N10W / 90SW	90 / 80
9	N20W / 86SW	86 / 250
10	N28W / 78SW	78 / 242
11	N75W / 85NE	85 / 15
12	N55E / 70NW	70 / 325

표 5.2 제 2구간의 불연속면의 분포상태

측점번호	주향 / 경사	Dip / Direction
1	N62W / 67SW	60 / 210
2	N75W / 55SW	55 / 180
3	N52E / 80NW	80 / 310
4	N60W / 42SW	42 / 210
5	EW / 78N	78 / 0
6	N30E / 86NW	86 / 300
7	N20W / 13NE	13 / 70
8	N46E / 52SE	52 / 136
9	N42W / 83NE	83 / 48
10	N4E / 55SE	55 / 94
11	N60E / 78NW	78 / 330
12	N43W / 78SW	78 / 227

제 3구간의 기반암은 담회색과 녹회색을 띠는 조립질의 편마상 화강암이다. 노두는 세립질의 판상맥암이 높은 풍화대를 이루고 있고, 전반적으로 관찰된 절리의 간격은 0.3 ~ 0.5m로서 촘촘한 편이며, 연장성은 1m 이내로 측정되었다. 절리틈은 밀착 내지 0.1mm정도이고, 노출면은 거친 거칠기를 가지고 있다. 본 구간의 사면에 서는 대규모 단층이나 파쇄대 등은 관찰되지 않고, 불연속면의 방향성은 50 ~ 80의 경사각을 지닌 NE방향의 절리가 우세한 것으로 관찰되었다. 표 5.3은 제 3구간의 대표적인 불연속면의 분포상태를 나타낸 것이다.

제 4구간은 담회색의 중립 및 조립질의 화강암을 기반암으로 하고 있으나 노두의 관찰은 불량하며, 관찰된 노두는 중간 풍화의 정도를 나타내고 있다. 또한 장석과 석영 및 흑운모가 주요 구성광물이고 노두에서 관찰된 절리들은 0.2m 정도의 절리간격과 1m 이내의 연장성을 보인다. 지층의 구조는 풍화암 4.5m, 연암 5m, 경암이 23m로 분포한다. 본 구간의 사면에서는 대규모 단층이나 파쇄대 등은 관찰되지 않고, 불연속면의 방향성은 70~80°의 경사각을 지닌 NE방향의 절리가 우세한 것으로 관찰되었다. 표 5.4는 제 4구간의 대표적인 불연속면의 분포상태를 나타낸 것이다.

표 5.3 제 3구간의 불연속면의 분포상태

측점번호	주향 / 경사	Dip / Direction
1	N35W / 75NE	60 / 40
2	N40W / 66NE	66 / 45
3	N60E / 60NW	65 / 340
4	N20W / 72NE	72 / 65
5	N45W / 85NE	85 / 45
6	N36W / 70NE	70 / 54
7	N45W / 80SE	80 / 135
8	N80E / 45SE	45 / 170
9	N30W / 30SW	30 / 240
10	N15W / 60NE	60 / 75
11	N30W / 65NE	65 / 60
12	N5W / 55SW	55 / 265

표 5.4 제 4구간의 불연속면의 분포상태

측점번호	주향 / 경사	Dip / Direction
1	N30W / 82SW	70 / 220
2	N40W / 80SW	85 / 250
3	NS / 70E	60 / 90
4	N26W / 84SW	82 / 155
5	N52W / 80SW	80 / 220
6	N40W / 68NE	68 / 50
7	N6W / 90SW	90 / 84
8	N50E / 80NE	80 / 40
9	N30E / 80NW	80 / 300
10	N40E / 78SE	78 / 130
11	N35W / 70SE	70 / 125
12	N80W / 25SW	25 / 190

표 5.5 암반사면의 구간별 현황

평가항목	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
사면높이(m)	42.2	63.8	37.5	23.3
사면연장(m)	28.3	29.5	26.4	28.1
노 건 폭(m)	3	3	3	3
교통량(대/일)	55,834	55,834	50,748	55,834
낙 석 방 지	Ritchie기준	Ritchie기준	Ritchie기준	Ritchie기준
지 질	비연속성 균열의 랜덤한 배열	비연속성 균열의 랜덤한 배열	비연속성 균열의 랜덤한 배열	비연속성 균열의 랜덤한 배열
Block size	0.5	0.2	0.3	0.2

5.2 정량적 해석 평가

5.2.1 평사투영 해석에 의한 평가

해석 대상구간에 대해 지표지질조사, 시추조사, 현장시험에 의한 암반의 특성을 분석하여 얻어진 자료들을 이용하여 암반사면 각 구간별 평사투영해석을 실시하여 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

제 1구간의 평사투영 해석결과 관찰된 노두에 발달되어 있는 불연속면이 설계사면과 유사한 주향을 가진 절리들이 우세하게 발달하고 있으며, 사면의 경사보다 15°이상 큰 절리경사를 지니므로 절리에 의한 평면과괴 가능성이 약간 있는 것으로 평가되었고, 불연속면이 사면의 주향과 유사하며 경사방향이 반대의 경사로 발달되어 있는 절리들에 의한 전도과괴 및 낙석의 가능성이 다소 있는 것으로 평가되었다.

제 2구간의 노두 관찰로부터 획득한 불연속면에 대하여 평사투영한 결과 절리의 분포형태는 전반적으로 뚜렷한 주절리를 갖지 않는 분산된 양상을 보인다. 또한 소

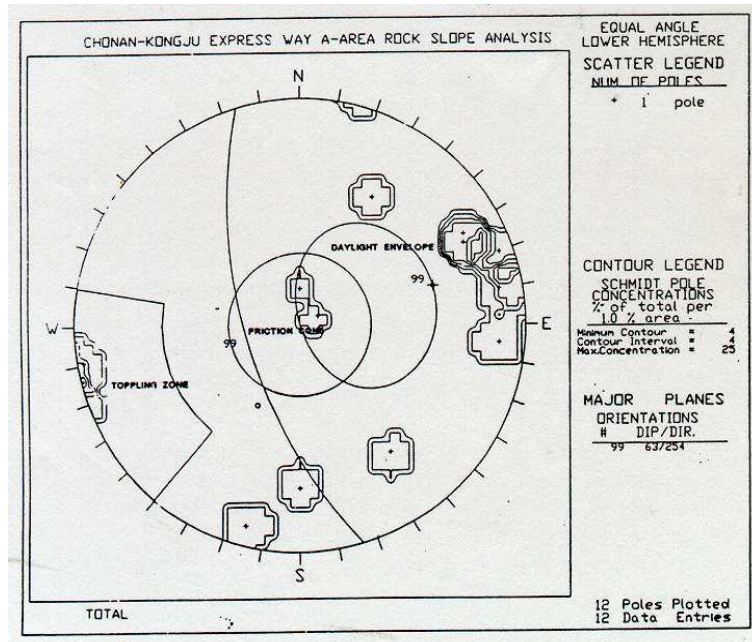


그림 5.1 제 1구간의 평사투영해석

수의 절리가 평면활동파괴 및 전도파괴의 영역에 분포하는 것으로 나타날 뿐 절리들은 사면의 안정에 유리하게 발달되어 있는 것을 나타나 소수의 절리에 의한 평면활동 및 전도파괴의 우려만이 있는 것으로 평가되었다.

제 3구간의 노두로부터 조사된 불연속면에 대하여 평사투영한 결과 N5W~N45W의 주향을 가지며 경사 60~80°NE인 주절리군에 의한 전도파괴 및 낙석의 우려가 예상되며 일부 부절리군에 의한 평면파괴의 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

제 4구간의 지표지질조사로부터 획득한 불연속면에 대한 자료를 평사투영한 결과 대규모의 단층이나 파쇄대 등은 관찰되지 않았으며 대부분 70~80°이상의 경사를 가진 NE방향의 절리들이 우세하게 분포하며 그 중 일부가 전도파괴 및 낙석의 우려가 예상되는 것으로 나타났으며, 다른 형태의 파괴 가능성은 적은 것으로 평가되었다. 그림 5.1~그림 5.4는 암반사면 각 구간별 평사투영해석 결과이다.

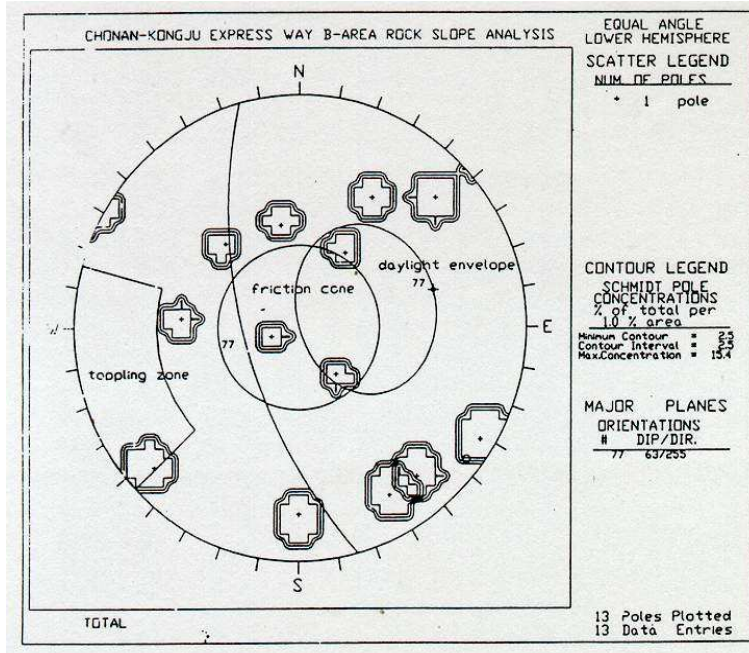


그림 5.2 제 2구간의 평사투영해석

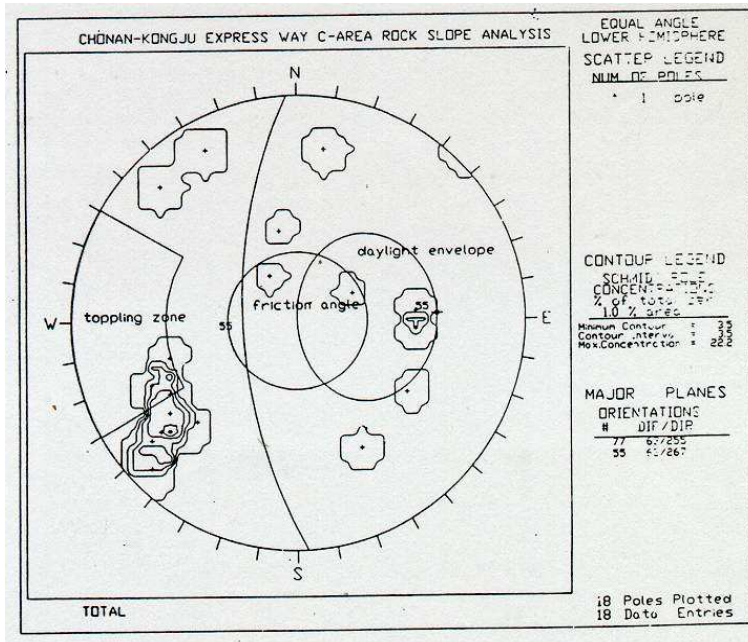


그림 5.3 제 3구간의 평사투영해석

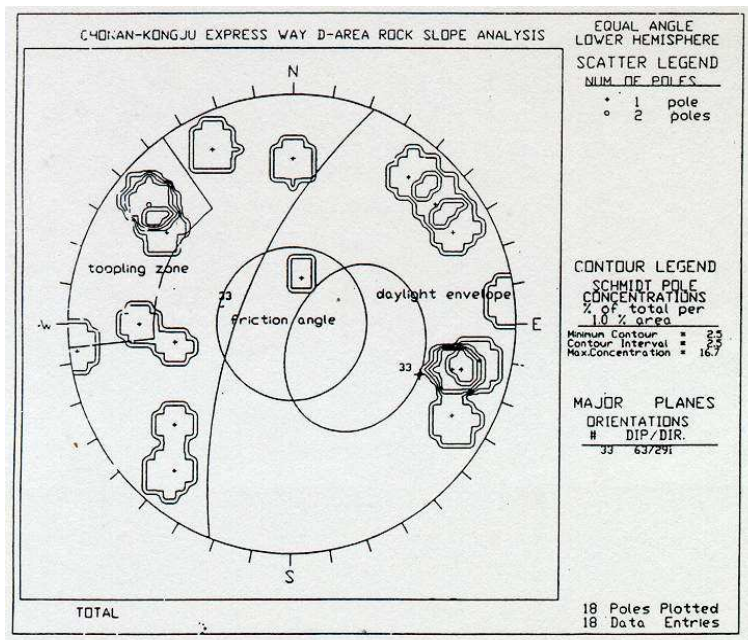


그림 5.4 제 4구간의 평사투영해석

5.2.2 한계평형 해석에 의한 평가

현장의 노출암에 대한 지표지질조사, 지질도폭 및 시추조사 결과의 암반 불연속면을 고려하여 1차적으로 평사투영법에 의한 개략적인 안정성을 평가한 후 1차 해석 결과에 따라 파괴발생 내지 잠재적 파괴 가능성을 가진 사면에 대해 한계평형식(2.14)에 의한 사면안정해석을 수행하는데, 이때 한계평형해석에서 고려되는 사면의 일반적인 기하학적조건은 사면 상부면에 인장균열을 가진 사면과 경사면내에 인장균열을 가진 사면으로 사면의 안정성은 인장균열의 존재여부에 따라 구분하여 고려되어야 한다.

본 연구에서는 암반사면 안정성 평가에 있어 위의 사항을 고려하여 평사투영해석결과 대부분 구간에서 평면파괴 발생위험이 있으므로 평면파괴를 가정한 한계평형해석을 수행하였다. 한계평형해석을 위한 입력 데이터는 표 5.6과 같고, 보다 쉽고 빠른 계산을 위해 아래의 평면파괴에 대한 안전율 식을 Excel 프로그램에 의해 구축하여 계산하였다. 계산 결과는 표 5.7과 같이 제 1구간에서는 1.48로 안정, 제 2구간은 1.24로 불안정, 제 3구간은 1.46으로 안정, 제 4구간은 2.13으로 안정한 것으로 나타나 암반사면에서의 한계평형해석은 기하학적인 형상과 인장균열 안에서의 물의 깊이를 알면 안전율의 계산은 아주 간단하므로 암반 사면의 기하학적 형상, 물의 깊이, 서로 다른 전단강도의 영향 등을 비교할 필요가 있다.

표 5.6 암반사면의 한계평형해석을 위한 입력데이터

구 분	c	H	Z	cosec θ	W	cos θ	γ_w	Z _w	sin θ	tan ϕ	$\frac{W}{\sin\theta}$	$\frac{V}{\cos\theta}$
제 1구간	3.0	42.2	2.0	1.2	182.5	0.6	1.0	1.0	0.8	0.7	149.6	0.3
제 2구간	3.4	63.8	1.0	1.2	446.3	0.6	1.0	0.5	0.8	0.8	366.0	0.1
제 3구간	2.9	37.5	1.0	1.2	150.5	0.6	1.0	0.5	0.8	0.7	123.4	0.1
제 4구간	3.2	23.3	1.0	1.2	56.1	0.6	1.0	0.5	0.8	0.8	46.0	0.1

표 5.7 암반사면의 한계평형해석 평가결과

구 분	최 소 안 전 율(Fs)			
	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
한계평형해석	1.48	1.24	1.46	2.13

5.3 정성적 해석 평가

5.3.1 암반분류법에 의한 평가

암반사면에 대한 정성적 해석은 안정해석 대상구간에 대하여 RMR값을 산출하기 위해 현장시추조사 및 실내시험을 실시하여 그에 따른 암석의 풍화정도, 경도, 암석역학적 특징, 절리 등의 불연속 특성과 절리간격, 코어회수율 및 암질표시율 등을 기록하여 분석하였다. 또한 암석의 시험결과를 1989년 Bieniawski의 RMR분류에 적용하여 점착력과 내부마찰각을 산출하여 작성하였다. 표 5.8은 안정해석 대상구간의 RMR분류 결과를 나타낸 것이다.

표 5.8 RMR분류 결과

구 분	압축강도 (MPa)	RQD (%)	절리간격 (cm)	절리상태	지하수	절리 방향성	점착력 (MPa)	내 부 마찰각(°)	평점 합계	등급	분류
제 1구간	84	49	0.45	다소거침 틈새<1mm 모암연약	없음	유리	2.95	34.5	59	4	불량
평 점	8	10	11	20	15	-5					
제 2구간	162	85	0.20	다소거침 틈새<1mm 모암연약	없음	유리	3.40	39	68	3	양호
평 점	13	17	8	20	15	-5					
제 3구간	93	50	0.30	다소거침 틈새<1mm 모암연약	없음	유리	2.90	34	58	4	불량
평 점	9	10	9	20	15	-5					
제 4구간	125	78	0.20	다소거침 틈새<1mm 모암연약	없음	유리	3.20	37	64	3	양호
평 점	11	15	8	20	15	-5					

5.4 신뢰성이론에 의한 평가

5.4.1 점추정법에 의한 평가

암반사면에 대한 신뢰성 해석은 토사사면에서 전술한 바와 같이 확률이론에 기초를 둔 점추정법에 의한 신뢰성 안정해석을 실시하였다. 표 5.9와 같이 하중의 불확실량(Ω_S)은 $c, H, Z, \text{cosec}\theta, W, \cos\theta, \gamma_w, Z_w, \sin\theta, \tan\theta$ 를 확률변수로 취하면 하중의 대한 변동계수는 식(5.1a)와 같이 되고, 저항의 불확실량(Ω_R)은 $W\sin\theta, V\cos\theta$ 를 확률변수로 취하면 저항에 대한 변동계수는 식(5.1b)와 같이 된다.

$$\Omega_S = \sqrt{\Omega_c^2 + \Omega_H^2 + \Omega_Z^2 + \Omega_{\text{cosec}\theta}^2 + \Omega_W^2 + \Omega_{\cos\theta}^2 + \Omega_{\gamma_w}^2 + \Omega_{Z_w}^2 + \Omega_{\sin\theta}^2 + \Omega_{\tan\theta}^2} \quad (5.1a)$$

$$\Omega_R = \sqrt{\Omega_{W\sin\theta}^2 + \Omega_{V\cos\theta}^2} \quad (5.1b)$$

표 5.9 암반사면 안정계산의 하중 및 저항의 확률변수

하중의 확률변수		저항의 확률변수	
Z ₁	c	Z ₁₂	Wsinθ
Z ₂	H	Z ₁₃	Vcosθ
Z ₃	Z	-	-
Z ₄	cosecθ	-	-
Z ₅	W	-	-
Z ₆	cosθ	-	-
Z ₇	γ _w	-	-
Z ₈	Z _w	-	-
Z ₉	sinθ	-	-
Z ₁₀	tanθ	-	-

표 5.10 암반사면의 안정계산에 대한 평균과 표준편차 산정결과

구 분	안정계산의 제원 및 확률변수											
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12
	c	H	Z	$\operatorname{cosec} \theta$	W	$\cos \theta$	γ_w	Zw	$\sin \theta$	$\tan \theta$	$\frac{W}{\sin \theta}$	$\frac{V}{\cos \theta}$
평 균	3.1	41.7	1.3	1.2	208.8	0.6	1.0	0.6	0.8	0.7	171.2	0.1
표 준 편 차	0.2	4.5	0.8	-	20.0	-	-	0.6	-	0.1	18.1	0.5

한계평형해석 시 사용한 표 5.6의 데이터 값이 점추정법에 의한 암반사면의 안정정 평가에 대한 제원 및 확률변수의 값과 동일하게 사용하였고, 표5.10은 점추정법에 따른 암반사면 안정계산의 불확실량 즉, 하중과 저항의 확률변수에 대한 각각의 평균과 표준편차를 산정하여 나타내었다.

이때 점추정법의 신뢰성해석에 의한 안전율은 토사사면과 같이 FAURE(1994)의 제안 식(4.3)을 이용하면 구할 수 있으며, 표 5.11은 그림 5.5와 같이 점추정법에 의한 신뢰성 해석을 실시하여 나타난 결과로서 제안된 식(4.3)에 신뢰성지수와 변동계수값 0.072를 대입하여 계산한 결과이다. 이때 변동계수값은 토사사면의 방법과 같이 허용안전율을 1.3으로 보고 Meyerhof 등의 파괴확률 연구범위 계산 시 사용한 신뢰성지수 2.33~3.10을 역산하여 나온 값을 사용하였다.

표 5.11 암반사면 안정계산의 신뢰성 해석결과

조 건 \ 구 간	최 소 안 전 율(Fs)			
	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
신뢰성지수(β)	2.23			
안 전 율(F.S)	1.19			



그림 5.5 점추정법 신뢰성해석을 이용한 입력 및 결과의 창(암반사면)

5.4.2 퍼지근사추론법에 의한 평가

암반사면의 안정성평가에 있어 모형개발의 기초단계인 본 연구는 퍼지-베이스 및 퍼지근사추론법에 의한 평가분석기법이 실제 암반사면의 안정성평가에 어떻게 적용될 수 있는지에 대한 체계적인 방법을 제시하고자 암반사면의 안정성평가를 구성하고 있는 각각의 내적 및 외적 요인들에 대해서 전문가의 주관적 판단을 기초로 하여 언어학적 판단을 정량적으로 평가할 수 있는 퍼지집합의 개념을 응용하여 다음과 같은 단계를 거쳐 수행하였다.

첫 번째는 퍼지가중평균과 해밍거리의 개념을 도입하여 암반사면 각각의 내·외적 요인에 대한 변상인자의 종합적 추정치를 산정한다.

두 번째는 퍼지-베이스 신뢰성해석모델로 예측파괴확률을 산정하고 파괴가능성에 의한 퍼지신뢰성 해석모델을 사용하여 예측파괴확률에 대응하는 예측거동지수

와 거동 평가분석을 추정한다.

세 번째는 첫 번째 단계와 두 번째 단계의 각 요인의 추정치를 사용하여 암반사면의 퍼지근사추론법에 의한 안정성평가의 결과를 분석한다. 위의 3개의 단계를 거쳐서 대상지역에 대한 지질 및 암반현황을 통해 조사된 자료를 이용하여 입력데이터로 분류할 수 있으며 내적 및 외적요인으로 구분한다.

내적요인은 표 5.12에 나타난 것과 같이 RMR분류기준에 의하여 등급을 표시하였으며 외적요인에 대해서는 대상지역의 조사 자료를 토대로 등급을 표시하였으며 그 기준은 표 5.13과 같다.

암반사면의 퍼지근사추론법에 의한 각 구간별 입력데이터 판정은 다음의 표 5.14와 같으며, 그림 5.6 ~ 그림 5.8의 퍼지근사추론법의 구조화를 이용하여 전절의 분석절차를 통해 얻은 안정성 평가의 결과는 표 5.15와 같다.

표 5.12 암반사면에 대한 내적요인 조사결과(RMR)

평가항목	판정구분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
X1	일축압축강도(MPa)	84	162	93	125
X2	RQD(%)	49	85	50	78
X3	절리면 간격(Cm)	중간정도	협소함	중간정도	협소함
X4	절리면 상태	보통	보통	보통	보통
X5	지하수 상태	건조	건조	건조	건조
X6	절리면 경사 조정	유리	유리	유리	유리
X7	굴착방법	통상의 발파	통상의 발파	통상의 발파	통상의 발파

표 5.13 암반사면에 대한 외적요인 조사결과(SSR)

평가 항목	판정구분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
Y1	사면의 높이(m)	42.2	63.8	37.5	23.3
Y2	사면의 길이(m)	28.3	29.5	26.4	28.1
Y3	노 건 폭(m)	3	3	3	3
Y4	교통량(대/일)	55,834	55,834	50,748	55,834
Y5	낙 석 방 지	Ritchie기준	Ritchie기준	Ritchie기준	Ritchie기준
Y6	지 질	비연속성 균열의 랜덤한 배열	비연속성 균열의 랜덤한 배열	비연속성 균열의 랜덤한 배열	비연속성 균열의 랜덤한 배열
Y7	Block size	0.5	0.2	0.3	0.2
Y8	암반의 마찰각	34.5	39	34	37
Y9	물	없음	없음	없음	없음
Y10	낙 석	일부낙석	낙석위험	낙석위험	낙석위험

표 5.14 암반사면 각 구간별 내·외적요인 입력데이터

구 분	내적요인							외적요인									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
제 1구간	C	D	C	C	A	B	D	E	B	C	C	A	B	E	B	B	B
제 2구간	B	B	D	C	A	B	D	E	B	C	C	A	B	E	B	C	C
제 3구간	C	C	C	C	A	B	D	E	B	C	D	A	B	E	C	C	C
제 4구간	B	B	D	C	A	B	D	E	B	C	C	A	B	E	C	B	B

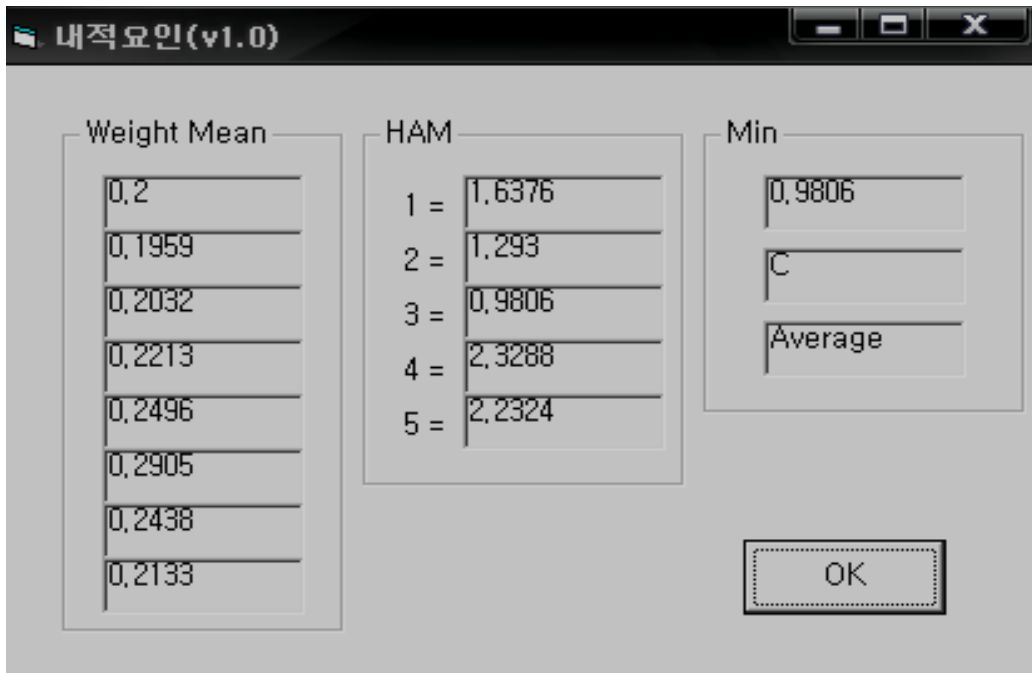
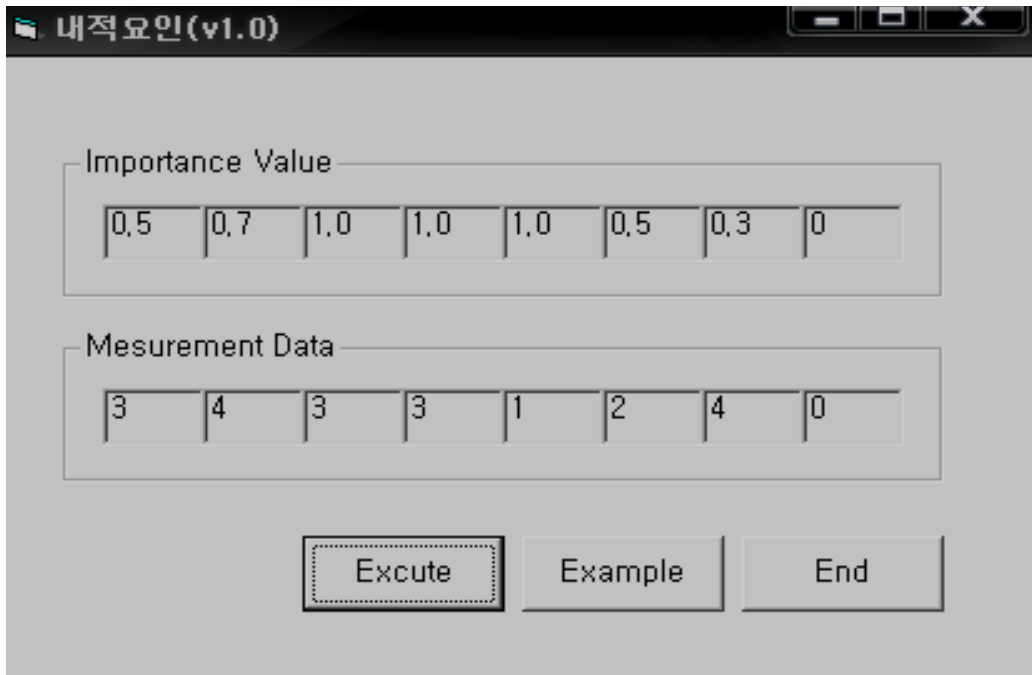


그림 5.6 퍼지 내적안정에 대한 입력 및 결과 창

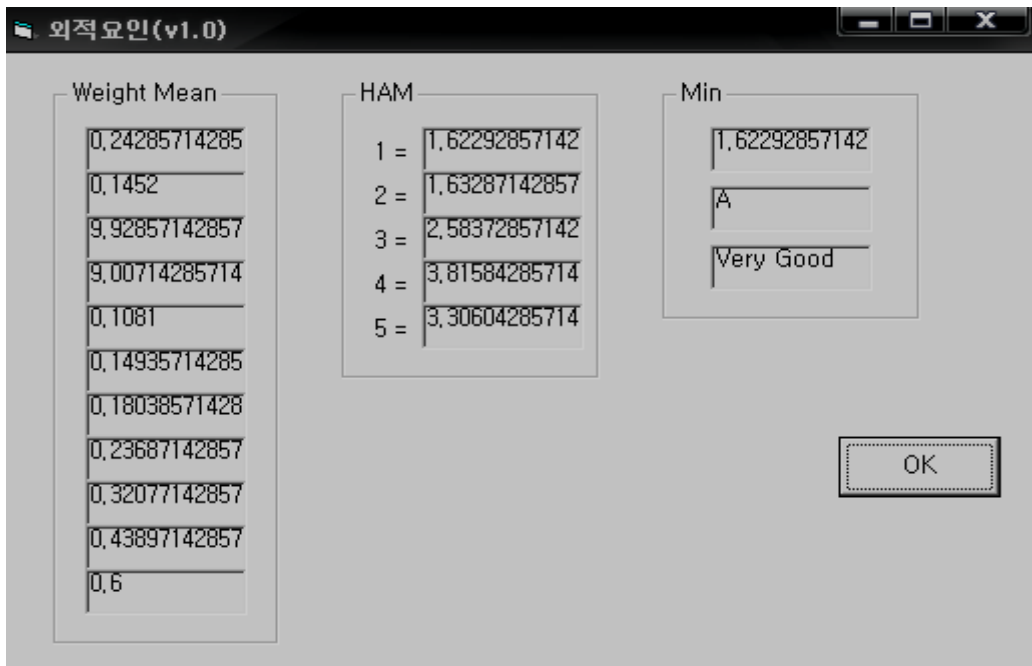
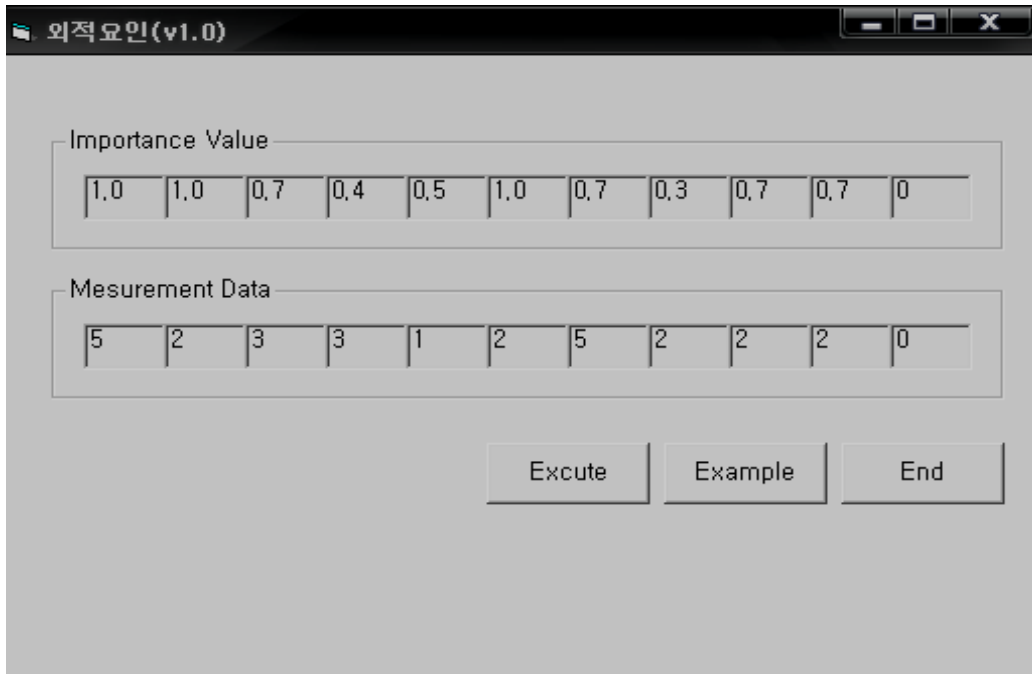


그림 5.7 퍼지 외적안정에 대한 입력 및 결과 창

퍼지 안정성 평가(v1.0)

1. NUMBER OF FUZZY SUBSETS

X	5
Y	5
Z	5

2. NAME OF FUZZY SUBSETS

	3
	2
	2

3. CHANGED FUZZY SUBSET OF RISK FACTOR

	3
	2
	2

4. Name of Risk Subsets

	3
--	---

Excute Example End

퍼지 안정성 평가(v1.0)

Hamming Distance

1	4.18
2	4.1
3	0.1
4	2.74
5	4.02

Result

Risk Score	C
Linguistic Value	Average
Result	0.1

OK

그림 5.8 퍼지 안정성 평가 입력 및 결과 창

표 5.15 퍼지이론에 의한 암반사면의 안정성 평가 결과

구 분	구간별 안정성 검토 결과			
	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내적요인(X)	C	B	C	B
외적요인(Y)	B	C	C	B
활동상태요인(Z)	B	B	B	B
안정성평가	C	C	C	B

5.4.3 인공신경망 이론에 의한 평가

인공신경망 이론에 의한 암반사면의 안정성 평가는 인공신경망 시스템의 활용성을 검증하고 시스템 수행결과의 타당성을 분석하기 위해 검토대상 암반사면에 대해 적용하여 평가하였다.

본 연구에서는 암반사면의 안정성 평가를 위한 인공신경망 시스템의 적용은 암반사면의 손상 및 파괴에 대한 내적요인과 외적요인을 기준으로 선별한 신뢰성 있는 현장계측 자료를 토대로 인공신경망모델의 학습검증에 사용하였으며, 학습은 최급강화법을 기초로 하는 역전파 알고리즘을 이용하여 수행하였다. 사면의 안정성 평가를 위한 신경망 모델은 입력층-은닉층-출력층으로 이루어진 17-10-1의 역전파 신경망을 이용하였다. 또 암반사면의 안정성 평가를 위해 표 5.16과 같이 암반사면의 안정성 평가에 대한 입력변수 및 입력 값의 범위를 정하였다.

본 연구에서 구축한 역전파 학습 알고리즘을 이용한 인공신경망 학습과정에서는 다양한 사면해석 사례를 바탕으로 출력층의 노드가 1개인 신경망 모델로 사면의 안정성 평가를 학습시켰다. 입력변수들은 총 17개의 항목을 입력하였으며, 은닉층의 수는 10개로 고정하였다. 학습반복횟수는 5000번으로 신경망을 학습시켰고, 입력변수는 17개의 노드로 구성되며 0~1사이의 값을 갖도록 변화시켰다. 본 연구에서 적용한 암반사면의 안정성 평가 입력 데이터를 표 5.17과 같고 출력된 평가 결과는 표 5.18에 정리하였다.

표 5.16 암반사면의 안정성 평가에 대한 입력변수 및 입력값의 범위

구 분	평가 항목		A	B	C	D	E
내적요인 (RMR)	X1	시료의 일축압축 강도(MPa)	0	0.2	0.5	0.7	1.0
	X2	암질표시율 (RQD) (%)	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X3	절리면 간격(cm)	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X4	절리면 상태	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X5	지하수 상태	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X6	절리면의 경사에 따른 조정	0	0.2	0.5	0.7	1.0
	X7	굴착방법에 의한 조정	0	0.14	0.43	0.71	1.0
외적요인 (SSR)	X8	사면의 높이	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X9	사면의 길이	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X10	간파/노견폭	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X11	교통량	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X12	낙석방지구의 규모	0	0.2	0.5	0.7	1.0
	X13	지질	0	0.4	0.6	0.8	1.0
	X14	블록사이즈	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X15	바위의 마찰	0	0.14	0.43	0.71	1.0
	X16	물/얼음	0	0.25	0.5	0.75	1.0
	X17	낙 석	0	0.25	0.5	0.75	1.0

표 5.17 암반사면의 안정성 평가의 입력데이터

구 분		입력 데이터									
제 1구간	내적 요인	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7			
		0.5	0.75	0.6	0.6	0	0.2	0.71			
	외적 요인	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
		1.0	0.4	0.5	0.5	0	0.4	1.0	0.14	0.25	0.25
제 2구간	내적 요인	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7			
		0.2	0.25	0.8	0.6	0	0.2	0.71			
	외적 요인	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
		1.0	0.4	0.5	0.5	0	0.4	1.0	0.14	0.5	0.5
제 3구간	내적 요인	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7			
		0.5	0.5	0.6	0.6	0	0.2	0.71			
	외적 요인	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
		1.0	0.4	0.5	0.75	0	0.4	1.0	0.43	0.5	0.5
제 4구간	내적 요인	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7			
		0.2	0.25	0.8	0.6	0	0.2	0.71			
	외적 요인	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
		1.0	0.4	0.5	0.5	0	0.4	1.0	0.43	0.25	0.25

표 5.18 인공신경망 이론에 의한 암반사면의 안정성 평가결과

구 분	구간별 안정성 검토 결과			
	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
출력 결과치	0.6891	0.7278	0.6875	0.6971
평가 등급	D	D	D	D
판정 결과	불량	불량	불량	불량

5.4.4 퍼지-신경망 이론에 의한 평가

본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 시스템에 의한 암반사면 안정성 평가는 인공신경망 이론에 의한 방법, 표 5.17의 입력 데이터를 이용하여 인공신경망과 퍼지로직에 의한 안정성 평가를 실시하여 아래와 같은 결과를 얻었다. 그림 5.9, 그림 5.10은 시스템에 의한 파괴가능성 분포도이다.

1. 인공신경망에 의한 평가

표 5.19 인공신경망에 의한 암반사면의 신뢰성지수

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내 적 요 인 신뢰성지수(β_x)	2.6167	2.8820	2.6793	2.8722
외 적 요 인 신뢰성지수(β_y)	2.6981	2.9846	2.6096	2.5828
전 체 신뢰성지수(β)	2.7238	3.0006	2.6916	2.8007

표 5.20 인공신경망에 의한 암반사면의 안정성 평가(결함수기법)

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내 적 요 인	0.7848	0.8644	0.8036	0.8614
외 적 요 인	0.8092	0.8951	0.7827	0.7746
안정성 평가	0.6891	0.7278	0.6875	0.6971
신뢰성지수(β)	2.7238	3.0006	2.6916	2.8007
안 전 율(F_s)	1.2102	1.2421	1.2088	1.2153

인공신경망에 의한 평가는 암반사면에 대해 신뢰성 지수를 구할 수 있으며, 안정 해석도 확률적기법과 결함수기법으로 구분하여 구할 수 있는데, 본 연구에서는 결함수기법의 결과만 나타내었다.

2. 퍼지로직에 의한 평가

퍼지로직에 의한 평가는 암반사면에 대해 신뢰성 지수를 구할 수 있으며, 안정 해석도 확률적기법과 결함수기법으로 구분하여 구할 수 있는데, 본 연구에서는 결함

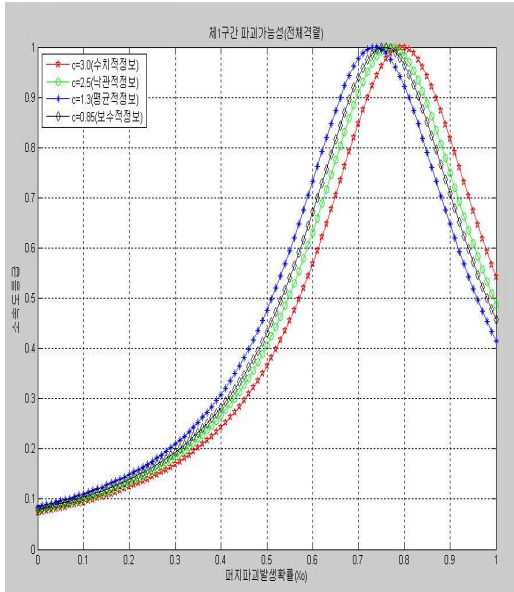
표 5.21 퍼지로직에 의한 암반사면의 신뢰성지수

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내 적 요 인 신뢰성지수(β_x)	2.5828	2.5986	2.5878	2.5986
외 적 요 인 신뢰성지수(β_y)	2.5959	2.5658	2.4465	2.5959
전 체 신뢰성지수(β)	2.6134	2.6151	2.5311	2.6171

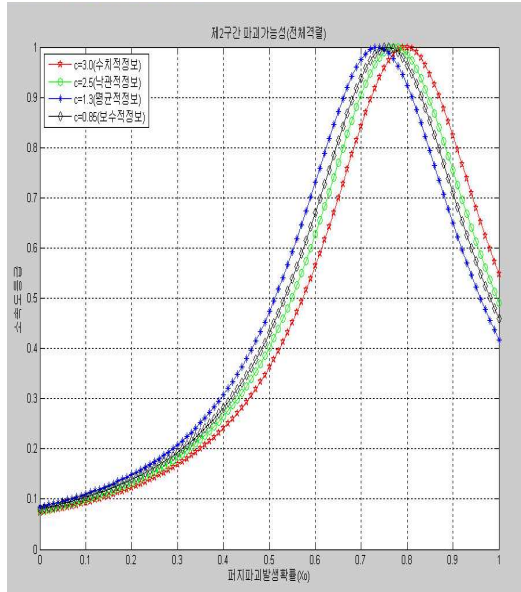
표 5.22 퍼지로직에 의한 암반사면의 안정성 평가(결함수기법)

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내 적 요 인	0.7746	0.7794	0.7761	0.7794
외 적 요 인	0.7786	0.7695	0.7337	0.7786
안정성 평가	0.6804	0.6795	0.6710	0.6815
신뢰성지수(β)	2.6134	2.6151	2.5311	2.6171
안 전 율(F_s)	1.2028	1.2019	1.194	1.2037

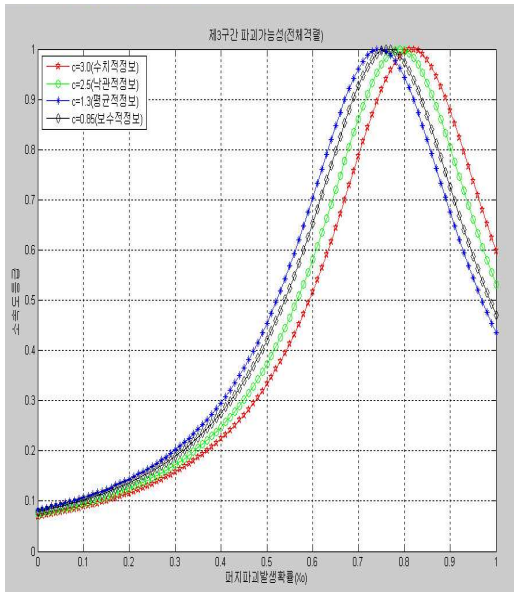
수기법의 결과만 나타내었다.



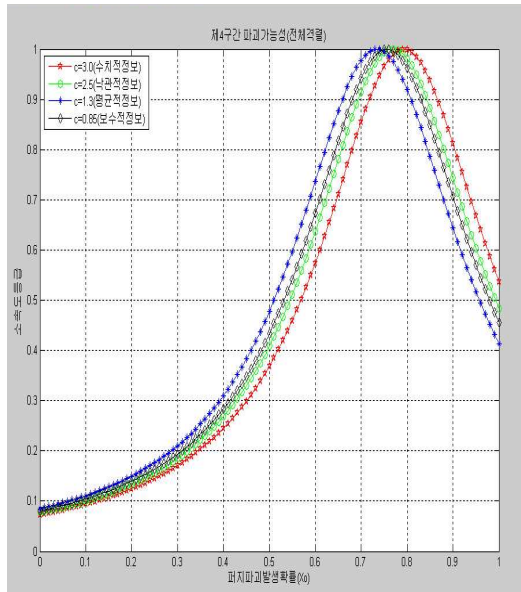
(제 1구간)



(제 2구간)

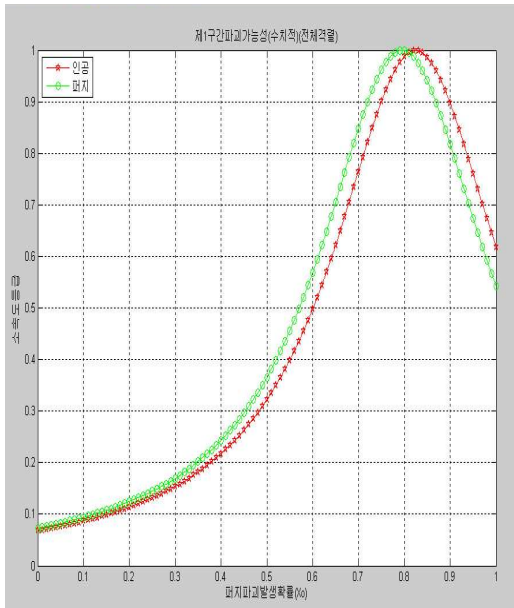


(제 3구간)

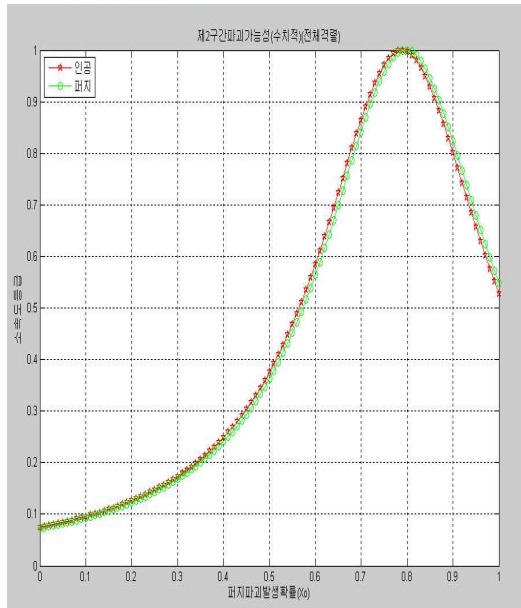


(제 4구간)

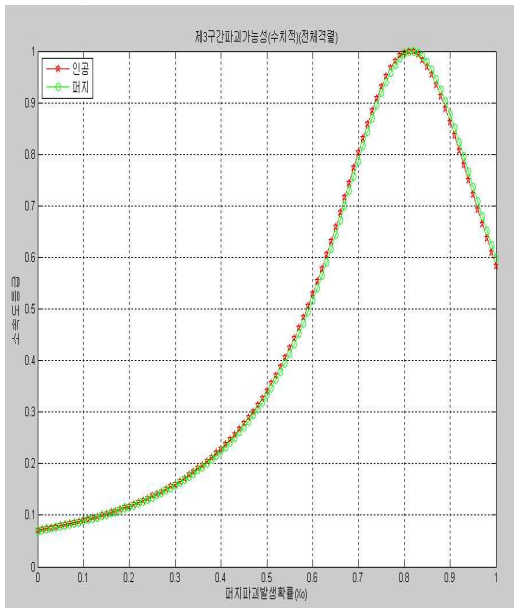
그림 5.9 암반사면 각 구간별 파괴가능성



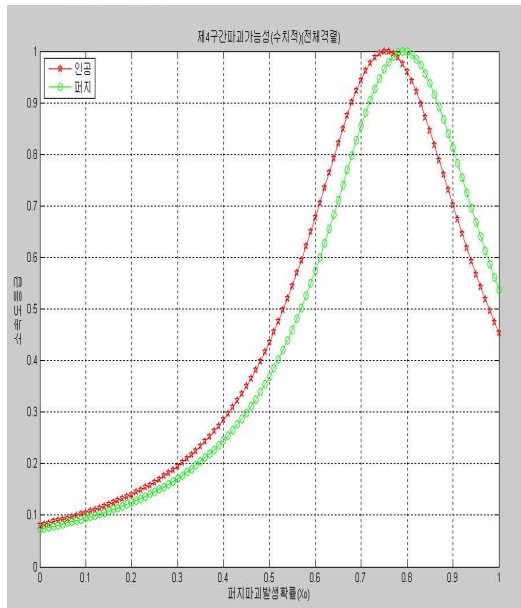
(제 1구간)



(제 2구간)



(제 3구간)



(제 4구간)

그림 5.10 암반사면 각 구간별 수치적 파괴가능성

5.5 암반사면의 안정성 평가 결과 및 분석

5.5.1 정량적 해석에 의한 안정성 평가결과

암반사면에 대한 정량적 안정해석은 평사투영해석과 한계평형해석방법을 사용하였고, 신뢰성이론에 의한 안정해석은 토사사면과 같이 점추정법에 의한 안정성 해석 방법과 퍼지-신경망 시스템 해석 결과를 정리하였다.

1. 평사투영 해석에 의한 평가결과

암반사면의 불연속면에 대한 평사투영해석 결과로 제 1구간은 설계사면과 유사한 주향을 가진 절리가 우세하게 발달하였고, 경사방향과도 반대로 발달되어 전도파괴와 낙석의 위험이 있는 것으로 나타났고, 제 2구간은 절리의 분포형태가 분산되어 소수의 절리에 의해 평면활동파괴 및 전도파괴의 우려가 있는 것으로 나타났다. 또 제 3구간은 주절리군에 의한 전도파괴 및 낙석의 우려가 예상되며 일부 부절리군에 의한 평면파괴 가능성도 약간 있는 것으로 나타났으며, 제 4구간은 단층이나 파쇄대는 관찰되지 않았으나 그 중 일부가 전도파괴 및 낙석의 우려가 있는 것으로 나타났다.

표 5.23 평사투영해석에 의한 안정해석 결과

구 분	평면파괴	썩기파괴	전도파괴	낙석 위험성
제 1구간	있음	-	있음	있음
제 2구간	있음	-	있음	-
제 3구간	있음	-	있음	있음
제 4구간	-	-	있음	있음

2. 한계평형 해석에 의한 평가결과

한계평형해석법에 의한 각 암반사면의 안정성 평가는 평면파괴를 가정하여 암반사

면의 기하학적 형상, 인장균열, 물의 깊이 등을 고려하여 안전율을 계산한 결과 제 1구간의 안전율은 1.48로 안정, 제 2구간의 안전율은 1.24로 불안정, 제 3구간의 안전율은 1.46로 안정, 제 4구간의 안전율은 2.13으로 안정으로 제 2구간만 안전율 1.3미만이고 나머지는 모두 1.3이상으로 나타났다.

표 5.24 한계평형해석에 의한 암반사면의 안정성 평가결과

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
한계평형해석	1.48	1.24	1.46	2.13

3. 점추정법에 의한 신뢰성 평가결과

점추정법에 의한 신뢰성 해석은 그림 5.5와 같이 점추정법에 의한 신뢰성해석 프로그램을 이용하여 신뢰성지수(β)를 구하여, FAURE(1994)에 의해 제안된 식에 신뢰성지수와 변동계수값 0.072를 대입하여 계산한 결과, 안전율이 1.19로서 1.3 미만으로 나타났다. 또 암반사면 신뢰성지수 값은 제 1구간에서 제 4구간까지 1.19로 산정되어 위험성을 내포하고 있는 것으로 분석되었다.

표 5.25 암반사면의 점추정법에 의한 신뢰성해석 결과

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
신뢰성지수	2.23			
안 전 율	1.19			

4. 퍼지-신경망 시스템에 의한 평가결과

퍼지-신경망 시스템을 이용하여 인공신경망에 의한 안정해석과 퍼지로직에 의한

안정해석을 실시하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

표 5.26 퍼지-신경망 시스템에 의한 평가결과(암반사면)

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
인공신경망 안 전 율	1.21	1.24	1.21	1.22
퍼지로직 안 전 율	1.20	1.2019	1.19	1.20

5.5.2 정성적 해석에 의한 안정성 평가결과

암반사면에 대한 정성적 안정해석은 암반분류법에 의한 사면안정성 평가와 토사사면에서 사용된 퍼지근사추론 구조화와 인공신경망 이론을 이용하여 다음과 같이 결과를 정리하였다.

1. 암반분류에 의한 평가결과

RMR에 의한 암반사면 안정해석은 현장시추조사 및 실내시험을 실시하여 암석의 풍화정도, 암석 역학적 특징, 절리 등의 불연속 특성, 절리간격, 코어회수율, 암질표시율을 분석하여 표 2.16 RMR 등급별 지반특성으로 안정성을 평가하였다. 그 결과

표 5.27 암반사면의 RMR분류 결과

구 분	제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
평점합계	59	68	58	64
평가등급	4	3	4	3
판정결과	불량	양호	불량	양호

제 1구간은 등급 4로 불량, 제 2구간은 등급 3으로 양호, 제 3구간은 등급 4로 불량 제 4구간은 등급 3으로 양호 한 것으로 나타났다. 암반사면의 RMR분류 결과는 표 5.28과 같다.

2. 퍼지근사추론법에 의한 평가결과

퍼지근사추론법에 의한 평가는 암반사면의 안정성분석 평가 구성요인들 중 각각의 내·외적 요인들에 대해서 토사사면과 같이 퍼지 근사추론법의 구조화를 이용하여 표 5.15 암반사면 각 구간별 안정성 평가 결과를 표 3.8 퍼지이론에 의한 암반사면의안정성 평가기준에 의해 분석하였다. 분석결과 제 1구간·제 2구간·제 3구간·제 4구간 모두 부분적 안정으로 분석되었으나 일부 절리 및 썩기파괴의 가능성이 있으므로 판단된다. 표 5.15와 표 3.8을 분석하여 정리하면 아래의 표 5.29와 같다.

표 5.28 퍼지이론에 의한 안정성 평가해석 결과(암반사면)

구 분		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
내적요인(X)		보통	양호	보통	양호
외적요인(Y)		낮음	중간정도	중간정도	낮음
활동상태요인(Z)		안정	안정	안정	안정
안정성 평 가	평가등급	C	C	C	B
	판정결과	부분적 안정	부분적 안정	부분적 안정	부분적 안정
	파괴가능성	일부절리 혹은 썩기파괴	일부절리 혹은 썩기파괴	일부절리 혹은 썩기파괴	일부절리 혹은 썩기파괴
	보수·보강	체계적인 보강	체계적인 보강	체계적인 보강	체계적인 보강

3. 인공신경망 이론에 의한 평가결과

인공신경망 이론에 의한 안정성 평가는 토사사면과 같이 암반사면 각 구간별 안정성 평가를 위해 입력변수 및 입력 값의 범위를 정하여 본 연구에서 구축한 역전파 학습 알고리즘을 이용하여 표 5.18과 같이 인공신경망 이론에 의한 암반사면의 안정성 평가 결과를 도출하였다. 그 결과 제 1구간은 출력 결과치가 0.6891, 제 2구간은 출력 결과치가 0.7278, 제 3구간은 출력 결과치가 0.6875, 제 4구간은 출력 결과치가 0.6971로 모든 구간이 평가등급 D에 해당하여 불량한 상태로 각각 평가되었다.

5.5.3 암반사면 안정성 평가 분석 및 고찰

암반사면의 안정성 평가 중 정량적 방법(평사투영해석법, 한계평형해석법, 점추정법에 의한 신뢰성 해석방법, 퍼지-신경망 사면안정 평가시스템에 의한 방법)과 정성적 방법(암반분류법, 퍼지이론에 의한 평가방법, 인공신경망 이론에 의한 평가방법)을 실제 암반사면에 적용하여 서로 비교·분석하여 각 사면에 대한 안정성평가와 신뢰성 및 타당성 등을 검토하여 향후 사면의 설계·시공·유지관리에 대해 안전하고 경제적인 사면을 확보하기 위한 기준을 제시하고자 한다.

암반사면 안정해석은 암반사면 4개 구간에 대해 RMR 및 SMR과 SSR 등의 결과를 바탕으로 정량적 방법과 정성적 방법의 결과를 이용하여 안정성 평가를 실시하여 상호 비교·분석하였다.

1. 정량적 평가 결과의 분석

암반사면에 대한 정량적 평가 분석은 평사투영법에 의한 방법과 한계평형해석법 및 점추정법에 의한 신뢰성 해석방법에 의한 결과와 본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 시스템 해석에 대한 결과를 정리하여 서로 비교·분석하였다.

평사투영법에 의한 안정해석 결과는 제 1구간·제 2구간·제 3구간에서 평면과피 및 전도과피, 낙석의 우려가 있는 것으로 나타났으며, 제 4구간은 전도과피 및 낙석의 우려가 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 평사투영법에 의한 안정해석은 과피유형의 분석이 가능하기 때문에 암반사면 불안정의 원인을 도출할 수 있어 보수·보강

대책을 수립하는데 유효한 것으로 판단된다.

또 암반사면의 한계평형해석법은 1차적으로 평사투영법에 의한 개략적인 안정성을 평가한 후, 1차 해석 결과에 따라 한계평형해석을 실시한다. 이때 암반사면의 안정해석 방법은 평면파괴를 가정하여 실시하였으며 그 결과 제 1구간의 안전율은 1.48로 안정, 제 2구간의 안전율은 1.24로 불안정, 제 3구간의 안전율은 1.46으로 안정, 제 4구간의 안전율은 2.13으로 안정한 것으로 분석되었다.

반면, 점추정법에 의한 안정성 평가 결과는 제 1구간에서 제 4구간까지의 암반사면 전체의 신뢰성지수(β)값은 2.23으로 산정되었고, FAURE(1994)의 제안식에 변동계수 0.072를 대입하여 계산된 안전율은 1.19로서 최소허용안전율 1.3미만으로 불안정한 것으로 분석되었다.

그리고 본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 사면안정 평가 시스템에 의한 암반사면 안정성 평가는 인공신경망 이론에 의한 방법에서 사용된 암반사면의 안정성 평가의 내적 및 외적요인의 입력 데이터를 이용하여 결과를 도출하였으며, 도출된 결과로는 인공신경망 결합수기법의 안전율이 제 1구간에서 1.21, 제 2구간에서 1.24, 제 3구간에서 1.21, 제 4구간에서 1.22로 나타났으며 퍼지로직 결합수기법의 안전율이 제 1구간에서 1.20, 제 2구간에서 1.20, 제 3구간에서 1.19, 제 4구간에서 1.20으로 나타나 다소 불안정한 결과의 값을 얻었다.

표 5.29 암반사면에 대한 정량적 평가 결과 비교

구 분		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
평사투영해석		평면파괴 전도파괴 낙석우려	평면파괴 전도파괴	평면파괴 전도파괴 낙석우려	전도파괴 낙석우려
한계평형해석		1.48	1.24	1.46	2.13
점추정법	안 전 율	1.19			
퍼 지 신경망	인공신경망 결합수기법	1.21	1.24	1.21	1.22
	퍼지로직 결합수기법	1.20	1.20	1.19	1.20

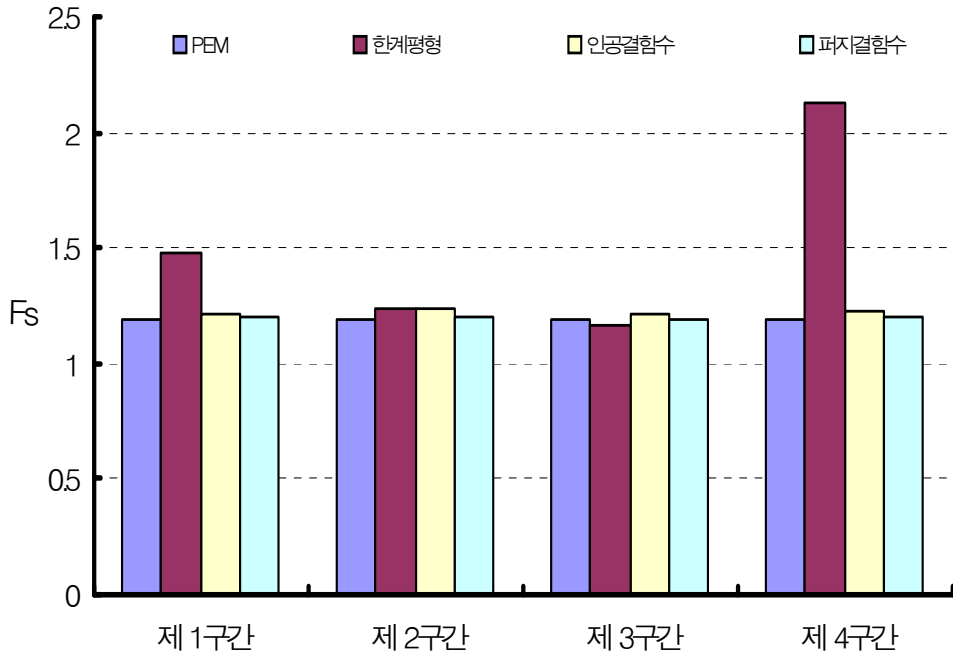


그림 5.11 정량적 해석방법 비교(암반사면)

이와 같이 정량적 평가의 안전율은 각 인자의 확률변수에 대한 평균과 표준편차를 통해 신뢰성해석에 기초를 둔 점추정법과 본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 사면안정 평가 시스템의 안전율이 한계평형해석 안전율 보다 안전한 값을 나타내고 있어, 종래의 확정론적방법(한계평형해석)과 같이 임의의 한 구간에 대해서만 안전율을 산출하여 대표치로 취하는 방식과 크게 대조를 이루고 있음을 알 수 있었다.

그림 5.11은 점추정법의 안전율과 퍼지-신경망의 안전율 그리고 한계평형해석 최소안전율을 비교한 그래프로 점추정법에 의한 안전율 값과 퍼지-신경망 시스템의 안전율은 거의 유사하게 판정되었으며, 한계평형해석에 의한 안전율은 각 구간별로 차이가 있어 암반사면 전체의 안전율을 도출하는데 무리가 있고 보수·보강공법 선정 시에도 다소 문제점이 있는 것으로 사료된다.

반면 점추정법은 확률변수가 15개 이하인 경우에는 토사사면과 같이 손쉽게 계산할 수 있어 유리하게 이용될 수 있으나, 확률변수가 15개 이상인 경우에는 토사사면

과 같이 컴퓨터 프로그램에 의한 계산시간 오래 걸리는 단점이 있지만, 본 연구에서 구축한 퍼지-신경망 시스템은 점추정법과 같은 안전율을 나타냈으며 확률변수가 많아도 계산이 손쉽게 할 수 있어, 아주 유리한 방법으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있다. 표 5.29와 그림 5.11은 암반사면에 대한 정량적 평가 결과를 비교하였다.

2. 정성적 평가 결과의 분석

암반사면에 대한 정성적 평가 결과 분석은 암반분류법에 의한 평가 결과와 퍼지이론에 의한 평가방법 및 인공지능망 이론에 의한 평가방법 등의 결과를 서로 비교·분석하였다.

표 5.30 암반사면의 정성적 평가 결과 비교

구 분		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
RMR 분류법	평가등급	4	3	4	3
	판정결과	불량	양호	불량	양호
퍼지이론에 의한 방법	평가등급	C	C	C	B
	판정결과	부분적 안정	부분적 안정	부분적 안정	안정
	파괴가능성	일부 절리 혹은 썩기파괴	일부 절리 혹은 썩기파괴	일부 절리 혹은 썩기파괴	일부 블럭
	보수·보강	체계적 보강	체계적 보강	체계적 보강	때때로 필요
인공지능망 이론에 의한 방법	출력결과치	0.6804	0.6795	0.6710	0.6815
	평가등급	D	D	D	D
	판정결과	불량	불량	불량	불량
보수·보강대책		사면하단 측구 및 웬스/네트설치 또는 전반적 볼팅	사면하단 측구 및 웬스/네트설치 또는 전반적 볼팅	사면하단 측구 및 웬스/네트설치 또는 전반적 볼팅	사면하단 측구 및 웬스설치 또는 부분적 볼팅

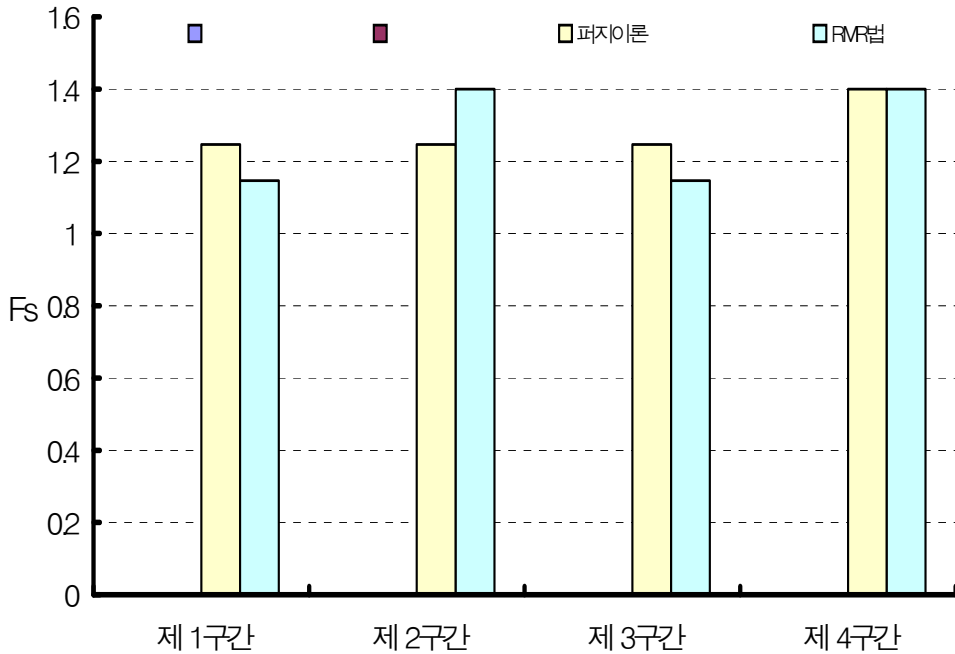


그림 5.12 정성적 해석방법 비교(암반사면)

표 5.30은 암반사면의 정성적 평가방법에 대한 종합적인 결과를 나타낸 것으로 RMR에 의한 대상지역의 안정성평가 결과는 제 1구간과 제 3구간은 평가등급이 4로서 불량한 상태로 나타났고, 제 2구간과 제 4구간은 평가등급이 3으로서 양호한 상태로 분석되어, RMR에 의한 분석은 분석과정에 영향을 미치는 인자들 중에는 암석 Core의 압축강도와 RQD값이 차지하는 비중이 큰 것을 알 수 있었다. 또 RMR에 의한 암반사면 평가는 사면의 내부적인 지질조건을 평가함으로써 암반사면의 전체적인 파괴 가능성에 대한 안정성을 평가하는데 효과적이며 보수·보강의 수준을 결정하는데 유효하게 생각할 수 있으나, 판단에 대한 객관성 결여로 합리적인 판단에는 약간 미흡한 것으로 사료된다.

또 퍼지근사추론 구조화를 이용한 암반사면의 안정성 평가결과는 제 1구간에서 제 3구간은 부분적 안정, 제 4구간은 안정으로 다른 해석구간에 비해 안정된 결과를 나타냄으로 암반분류법에 의한 결과에 비해 좀 더 안전한 방법임을 확인할 수

있다. 특히 퍼지 근사추론 구조화에 의한 안정성 평가방법은 암반사면에 내재되어 있는 다양한 해석요인을 정량적으로 평가할 수 있고, 합리성과 객관성을 확보할 수 있는 평가방법으로 사료된다. 따라서 암반분류법에 의한 암반사면의 안정해석과 본 연구에서 제안하고 있는 퍼지 근사추론법의 안정성평가를 병행하면 정량적인 측면과 정성적인 측면에서 사면안정 해석을 보다 체계적이고 종합적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

인공신경망이론에 의한 평가 결과는 전 구간이 평가 등급이 D에 해당하여 불량한 것으로 나타났고, 이는 토사사면의 평가 결과와 매우 유사한 결과를 나타내고 있다.

3. 암반사면의 종합분석 및 고찰

암반사면 각 구간별 안정성에 대해 종합적으로 평가하면 제 1구간·제 2구간·제 3구간·제 4구간 모두 부분적으로 안정한 상태로 분석되어 한계평형해석방법은 평사 투영해석에 대한 신뢰성과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었고, 지표지질조사 및 시추조사로는 안정성 평가에도 한계가 있어, 암반사면의 균열이 촘촘하고 비교적 균질한 경우를 제외하고는 적용상의 문제점이 있을 수 있다.

반면, 점추정법에 의한 평가방법은 암반사면 구간 전체의 신뢰성지수와 안전율을 도출할 수 있으며, 평균과 표준편차만으로 신뢰성해석을 할 수 있어 토사사면과 같이 확률변수가 15개 이하인 경우에는 아주 유리한 방법으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

또 퍼지-신경망 시스템에 의한 방법은 전체구간의 안전율이 한계평형해석법에 의한 제 2구간의 최소안전율과 같은 안전율을 나타냄으로 점추정법에 의한 안전율과 거의 유사한 결과를 얻어 합리적인 평가방법임을 확인할 수 있었다. 또 한 번의 입력 값으로 인공신경망과 퍼지로직에 의한 사면안정 평가를 동시에 할 수 있으며, 결합수기법과 확률론적기법을 이용하여 MATLAB 프로그램에 의해 수치해석 되므로 빠르고 정확한 계산이 가능하고, 사면에 대한 불안정요소 성능평가를 위한 객관적(일반적) 및 주관적(퍼지적) 신뢰성해석에 인간의 신뢰성 해석에 정보를 반영한 방법으로 내적 및 외적요인과 불확실량만으로 안전율을 구할 수 있다.

또한 암반분류법에 의한 평가는 사면의 불안정의 원인을 빨리 도출할 수 있고 보수·보강 대책을 세부적으로 수립하는데 유효하지만 판단에 객관성이 확보되지

표 5.31 암반사면에 대한 안정성 종합평가 결과 비교

구 분		제 1구간	제 2구간	제 3구간	제 4구간
정 량 적 해석방법	평사투영 해석법	평면파괴 전도파괴 낙석우려	평면파괴 전도파괴	평면파괴 전도파괴 낙석우려	전도파괴 낙석우려
	한계평형 해석법	1.48 (OK)	1.24 (NG)	1.46 (OK)	2.13 (OK)
	점추정법	신뢰성지수 - 2.23 안 전 율 - 1.19 (불안정)			
	퍼지 신경망	1.205	1.22	1.20	1.20
정 성 적 해석방법	RMR 분류법	불량	양호	불량	양호
	퍼지이론 해석법	부분적 안정	부분적 안정	부분적 안정	안정
	인공신경망 해석법	불량	불량	불량	불량
총 합 분 석		부분적 안정	부분적 안정	부분적 안정	부분적 안정

않고, 사면안정성 평가의 비합리성을 보완하는 작업이 필요하므로 평가 사면에 내재되어 있는 다양한 외적 및 내적요인을 정량적으로 평가할 수 있는 퍼지근사추론법의 안정해석과 병행하면 사면안정해석을 보다 체계적이고 종합적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

위와 같은 내용을 종합해보면 기존의 암반사면 안정해석 시 사용되는 암반분류법, 평사투영해석법, 한계평형해석법에 의해 안정해석을 수행하는데 본 연구에서 제안한 퍼지-신경망 시스템에 의한 방법의 사용으로 점추정법에 의한 신뢰성해석법, 퍼지근사추론법에 의한 안정해석, 인공신경망에 의한 안정성 예측방법을 동시에 고려하여 암반사면의 특수성을 체계적이고 종합적으로 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

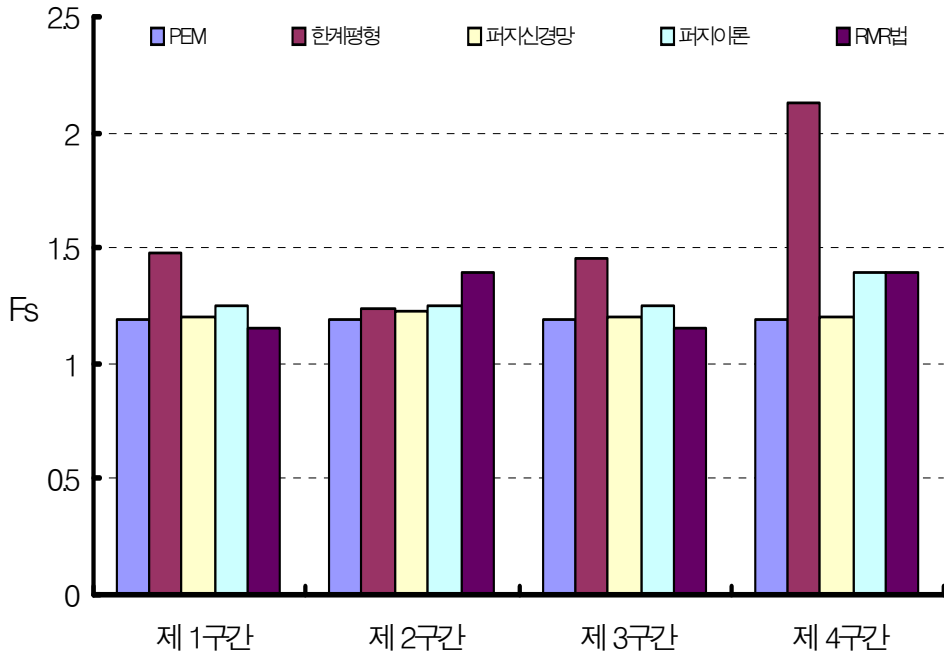


그림 5.13 암반사면에 대한 안정성 종합 비교

제6장 결 론

본 연구는 사면에 대한 안정성 평가 방법들 중 기존의 사면안정성 평가방법들과 본 연구에서 제안한 퍼지-신경망 이론 및 사면안정성 예측방법들을 정량적·정성적 방법으로 구분하여, 실제 토사 및 암반사면에 적용하여 상호 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 토사사면에 대한 한계평형해석방법은 지반 중 간극수압의 영향과 흙의 성질에 따라 사면의 안정성이 크게 달라질 수 있고, 평가된 안전율도 임의의 한 구간에 대한 안전율을 나타낸 값으로 전체사면에 대한 안정성을 평가하기에는 다소 불안정한 부분이 있다. 반면, 점추정법에 의한 신뢰성해석은 확률변수의 평균과 표준편차로 토사사면 전체의 구간에 대해 신뢰성지수와 안전율을 도출할 수 있어, 안정성 결정에 사면지반의 정수의 분산 영향을 반영할 수 있을 것으로 판단된다.
2. 토사사면에 대한 경험에 의한 평가방법은 사면의 불안정의 원인 분석 및 보수·보강 대책을 수립하는데 유효한 것으로 생각할 수 있으나, 해석방법에 대한 객관성이 미흡하여 사면안정성 평가 시 다소 어려움이 있을 것으로 판단된다. 반면, 퍼지-신경망 이론에 의한 평가는 토사사면에 내재되어 있는 다양한 내적·외적요인을 정량적으로 평가할 수 있으므로 기존의 토사사면 안정해석방법과 비교함으로써 사면안정을 보다 합리적으로 해석할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 암반사면에 대한 한계평형해석법은 평사투영해석에 대한 신뢰성 및 지표지질조사 등으로 안정성 평가에 한계가 있고, 토사사면과 같이 임의의 한 구간에 대한 안전율을 나타낸 값으로 전체사면의 안정성을 평가하기는 다소 불안정하다. 반면, 신뢰성해석에 의한 안전율은 한계평형해석방법의 안전율보다 안전한 값을 나타내고 있어 종래의 확률론적 방법의 임의의 한 구간에 대해서만 안전율을 산출하여 대표치로 취하는 방식과 크게 차이가 있음을 알 수 있었다.
4. 암반사면에 대한 암반분류법에 의한 평가는 분석과정에 영향을 미치는 인자들 중 암석의 압축강도 및 RQD값의 비중이 크기 때문에, 이를 수치로 환산하는 과정에서 오차

가 발생할 수 있어, 판단에 대한 객관성이 미흡하다. 반면, 퍼지-신경망에 의한 방법은 암반사면에 내재되어 있는 다양한 해석요인을 정량적으로 평가할 수 있으므로 사면안정 해석에 대한 합리적인 평가방법으로 사료된다.

5. 퍼지-신경망 이론에 의한 방법은 애매성과 모호성을 갖는 주관적 상태평가를 퍼지결함수 기법으로 신뢰성 해석에 대한 정보를 제대로 반영하여 객관화 시킬 수 있고, 내적 또는 외적 손상요인을 인공신경망으로 산정할 수 있는 방법으로 불확실량을 주프로그램에 입력하여 안전율을 구할 수 있다. 또 한 번의 입력 값으로 점추정법에 의한 신뢰성해석과 퍼지로직 그리고 인공신경망 해석을 동시에 할 수 있고, MATLAB 프로그램에 의해 빠르고 정확한 수치해석이 가능하므로 각 사면에 대한 안정성 평가 예측에 보다 체계적이고 종합적인 안정해석을 할 수 있을 것으로 사료된다.

이와 같이 토사 및 암반사면의 안정성 평가 시 사용되는 기존의 사면안정 해석방법과 본 연구에서 비교·분석한 점추정법에 의한 신뢰성 해석방법, 퍼지근사추론법에 의한 해석방법, 그리고 본 연구에서 구축한 인공신경망 및 퍼지-신경망 이론에 의한 사면안정성 평가방법 등을 향후 사면안정 평가에 대해 서로 병행하여 사용한다면, 보다 안전하고 경제적인 사면을 확보할 것으로 기대되며, 이를 위해 확률변수 및 불확실량 산정 등에 대한 신뢰성 있는 D/B 구축이 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- 기술경영사 편집부(1996), “암반사면의 안정해석과 계획”, pp.15~80.
- 김대수(1992), “신경망이론과 응용”, 하이테크정보, pp.13~75.
- 김영수(1988), “사면안정의 확률론적 해석”, 대한토목학회 논문집, 제 8권, 제 3호, pp.85~90.
- 김영수·김종렬·김홍택·이영휘·홍원표(2003), “토질역학”, 사이텍미디어, pp.479~534.
- 김영근(1996), “절리특성이 인공절리를 포함한 불연속암반의 변형거동에 미치는 영향에 관한 연구”, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원
- 김일구·서재우·안기문·이증빈·안종필(2008), “신뢰성이론에 의한 기초구조물의 성능 및 경제성 모델”, 한국구조물진단유지관리공학회 봄학술발표회 논문집, 제 12 권 1호, pp.347~354.
- 김일구·안기문·박주원·이증빈·안종필(2008), “점추정법에 의한 널말뚝의 신뢰성 설계기준”, 한국구조물진단유지관리공학회 봄학술발표회 논문집, 제12권 1호, pp.129~134.
- 김일현(1988), “토류구조물의 신뢰도 해석에 관한 연구”, 공학박사 학위논문, 경희대학교 대학원
- 김정만(1996), “Fuzzy Fault Tree에 의한 인간신뢰성 해석”, 공학박사 학위논문, 동아대학교 대학원
- 김창용·박치현·배규진·홍성완·오명렬(2000), “터널 시공 중 보강공법 선정용 퍼지 전문가 시스템 개발”, 한국지반공학회 논문집 16권 16호, pp.127~139.
- 김현우(1999), “인공신경망을 이용한 터널건전도 평가 시스템 개발”, 공학석사 학위논문, 서울대학교 대학원
- 류성기(2000), “인공신경망 이론에 의한 옹벽구조물의 안전도 평가 분석”, 공학석사 학위논문, 조선대학교 대학원
- 문현구(1999), “인공신경망을 이용한 터널 암반분류”, 한국암반역학회지, 통권 28호, pp.212~223.
- 박용훈(2004), “퍼지이론에 의한 사면의 안정성 평가”, 공학석사 학위논문, 조선대학교 대학원
- 박종진(2001), “퍼지 제어시스템”, 교우사, pp.218~268.
- 박현일·황대진·권기철·이승래(2005), “최적의 인공신경망 구조설계를 통한 지반

- 물성치 추정”, 한국지반공학회 논문집 21권 9호, pp.25~34.
- 안종필 · 김일구 · 김규덕 · 최진호(2008), “측방유동을 받는 교대 기초말뚝의 안정성에 관한 신뢰성 해석”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.1090~1097.
- 안종필 · 박주원 · 오수동(1998), “암반사면의 안정성평가 및 적용에 관한 연구”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, 제2권 2호, pp.177~184.
- 안종필 · 이증빈 · 박경환 · 박주원(1998), “퍼지근사추론을 이용한 암반사면의 안전성 평가모형”, 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 제2권 2호, pp.113~118.
- 안종필 · 유덕찬 · 박주원 · 김일구(2006), “퍼지-신뢰성이론에 의한 호안구조물의 VE/LCC 분석”, 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 제10권 2호, pp.281~290.
- 양우식(1992), “FOSM Method를 이용한 사면의 신뢰도 해석”, 공학박사학위논문, 경희대학교 대학원
- 유덕찬(2007), “퍼지신뢰성 이론에 의한 항만구조물의 VE/LCC분석에 관한 연구”, 공학박사 학위논문, 조선대학교 대학원
- 유동선, 이교원(1999), “기초 퍼지이론”, pp9~210.
- 이규환(2007) “지반특성의 불확실성과 신뢰성 기법을 고려한 압밀해석”, 한국구조물진단학회지, 제 11권 제 4호, pp138~146
- 이송(1986), “얕은 기초의 안정성에 관한 신뢰성 해석”, 공학박사 학위논문, 고려대학교 대학원
- 이정인(1997), “암반 불연속면의 역학적인 성질과 사면안정해석”, 한국지반공학회 사면안정 학술발표회 논문집, pp.21~47.
- 이증빈(1984), “강도로교의 신뢰성 설계기준에 관한 연구”, 공학박사 학위논문, 조선대학교 대학원
- 이증빈 · 백대우 · 박주원 · 강수경(1998), “퍼지-베이즈 이론에 의한 기존구조물의 신뢰성평가모델”, 순천공업전문대학 학술연구조성비지원 연구보고서.
- 이증빈 · 손용우 · 박철수(2002), “퍼지 의사결정기법을 이용한 RC 구조물의 건전성 평가”, 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집, 제15권 제1집, pp.274~283.
- 이인모(2005), “암반역학의 원리”, 도서출판 새론, pp.222~273.
- 전성기(2002), “실무자를 위한 사면안정화 설계실무편람”, 도서출판 과학기술, pp.1~105.
- 정형식(1997), “절토사면의 안정해석시 SMR평가법의 적용사례”, 한국지반공학회 사면안정 학술발표회 논문집, pp.51~60.

- 신종호 · 이인모(2001), “토질역학”, 도서출판 엔지니어, pp.610~644.
- 심태섭 · 주승완(2000), “점추정법에 의한 암반사면의 안정해석 모델”, 대한지질공학회지, 제10권, 제2호, pp.107~114.
- 조성은 · 변위용(2007), “인공신경망 기반의 한계상태함수를 이용한 사면의 신뢰성 해석”, 한국지반공학회 논문집 23권 18호, pp.117~127.
- 주승완 (2001), “신뢰성이론에 의한 암반사면의 안정해석”, 공학박사 학위논문, 조선대학교 대학원
- 최인걸 · 박영목(2007), “현장실무자를 위한 지반공학”, 구미서관, pp.147~176, pp.513~559.
- 한국도로공사(1996), “도로설계 실무지침”
- 한국건설기술교육원(1988), “홍콩의 산사태 현황과 대책”, 부록, 방재종합대책 중장기 계획 조사 보고서(3권), pp.3~615.
- 한국지반공학회(1997), “지반공학 시리즈5 사면안정”, 구미서관, pp.20~101.
- 황정규(1994), “지반공학의 기초이론”, 구미서관, pp.267~326.
- 홍원표(1991), “한계평형법을 이용한 여러 방법의 비교분석”, 한국지반공학회지, 8(3), pp.127~129.
- 홍원표 · 김원형 · 송영석 · 임석규(2004), “인공신경망 모델을 이용한 산사태 예측”, 한국지반공학회 논문집 20권 8호, pp.67~75.
- Anderson, M.G and Richards, K.S.,(1987), " Slope Stability Ch.2 A Comparative Review of Limit Equilibrium Methods of Stability Analysis," John Wiley and Sons.
- Ang, A. H-S., and Tang, W. H.(1984), "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", Vol. 1 and 2, John Wiley, New York.
- Asce(1982), "Application of Walls to Landslides Control Problems".
- Barton N., Bandis, S., and Bakhtar K.(1985), “Strength Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints“, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.22. No.3, pp.121~140.
- Bieniawski, Z. T.(1979), "The Geotechnics Classification in Rock Engineering Applications", Pro. 4th Int. Cong. on Rock Mech(Montreux), Isrm, Balkema, Vol.2, pp.41~48
- Bieniawski, Z. T.(1989), Engineering Rock Mass Classification, John Wiley & Sons, New York.
- Bishop, A.W.(1955), The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of slopes,

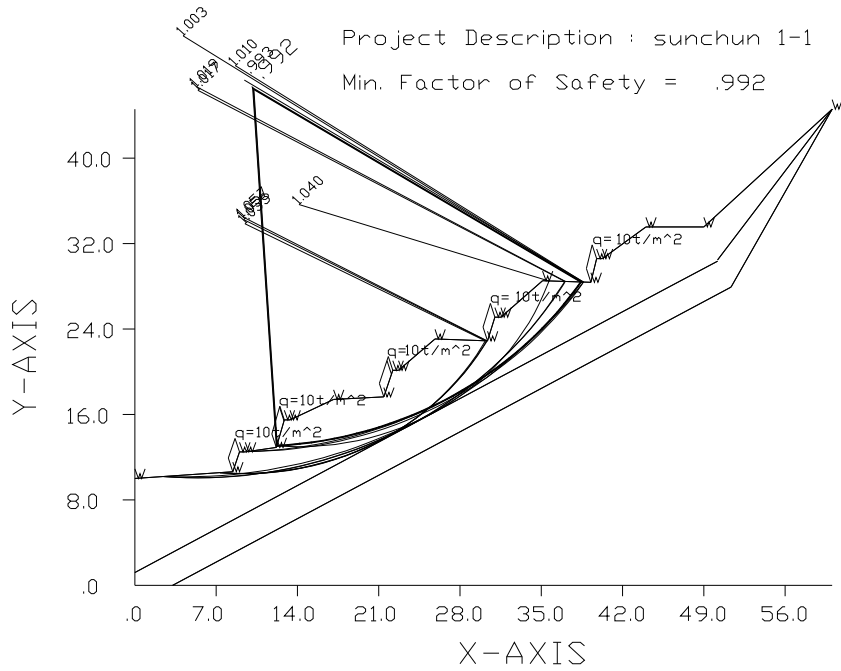
- Geotechnique, Vol.5, No.1, pp.7~17.
- Brown, C. B., & Yao, J. T. P.(1983), Fuzzy Sets & Structural Engineering.", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol.109, No.5, pp.1211~1225.
- Chou. T.(1991), "Optimum Safety Indices Based on Expected Total Cost Minimization", Journal of Structural Engineering(in Japanese), Vol 37A, pp.543~555.
- Duncan, N.(1969), "Engineering Geology and Rock Mechanics", Vol. I , Leonard Hill,
- Frangpol, D.M, and Enright, M.P(1999), "Reliability-based Condition Assessment of Deteriorating Concrete Bridges Considering Load Redistribution, Structural Safe", Elsevier, Vol 21, No2, pp.159~195.
- Frangpol, D.M, and Enright, M.P(1998), "Probability Analysis of Resistance Degradation of Reinforced Concrete Bridge Beams under Corrosion", Engineering Structures, Elsevier, Vol 20, No11, pp.960~971.
- Hengger S.R. and R.P. Martin(1984), "The Failure of a Cut Slope on the Tuen Mun Road in Hong Kong", Int. Conf. on Rolla,(ed. S. Prakash), Vol.2, pp.683~688.
- Hoek, E. & Bray. J. W.(1981), "Rock Slope Engineering, Revised Third edition", pp.150~350.
- Hsai-Yang Fang(1990), "Foundation Engineering Handbook", Van Nostra Reinhold, New York, pp.379~406.
- Kanda, J, and Adachi, T.(2001), "Influence of Probability Distrbution of Load on Optimum Reliability", Reliability Engineering and System Safety, Elsevier 73, pp.197~204.
- Kaufmann, A(1975), Introduction Theory of Fuzzy Subsets, Vol I, Academic Press, New York.
- Lee, C. B. and Park, J. W.(1997), "Reliability Analysis Based on Fuzzy-Bayesi an Approach", Proc. of Iccbe-VII, Vol.1, pp.589~593.
- Lukman P.G.(1987), "Slope Stability Assessment Under Uncertaninty: A First Order Stochastic Approach", Ph.D. Thesis, Dept of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- Markland, J.T.(1972), "A Useful Technique for Estimating the Stability of Rock Slopes When the Rigid Wedge Sliding Type of Failure is Expected", Imperial College Rock Mechanics Research Report, No.19, pp.10.

- Meyerhof, G. G.(1982), "Limit State Design in Geotechnical Engineering Structural Safety, Vol. 1.
- Nishimura, A., Fujii, M, and Miyamoto, A., and Ogasa, M.(1975), "Application of Fuzzy set theory to Serviceability Diagnosis of Structures, proc, of JSCE, No. 380, pp.365~374.
- Priest, S.D.(1985), Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics, George Allen & Unwin, London.
- Shiraishi, N., Furuta, H., and Ikejima, K.(1982), "Application of Fuzzy set theory to Reliability Analysis, proc, of JSCE, No. 325, pp.1~10.
- Tamimi, S., Amadei, Bernard and Frangpol, D. M.(1989), "Monte Carlo Simulation of Rock Slope Reliability, Computer and Structure Vol. 33, No. 6, pp.1495~1505.
- Warburton, P.M.(1981), Vector Analysis of an Arbitrary Polyhedral Rock Block with Any Number of Free Faces, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol 18, pp.415~427.
- Zadeh, L. A.(1975), "A Fuzzy Logic and Approximate Reasoning", Synthese, Vol.30, pp.407~428.
- Zadeh, L. A.(1965), "Fuzzy Sets", Information and Control, Vol.8,

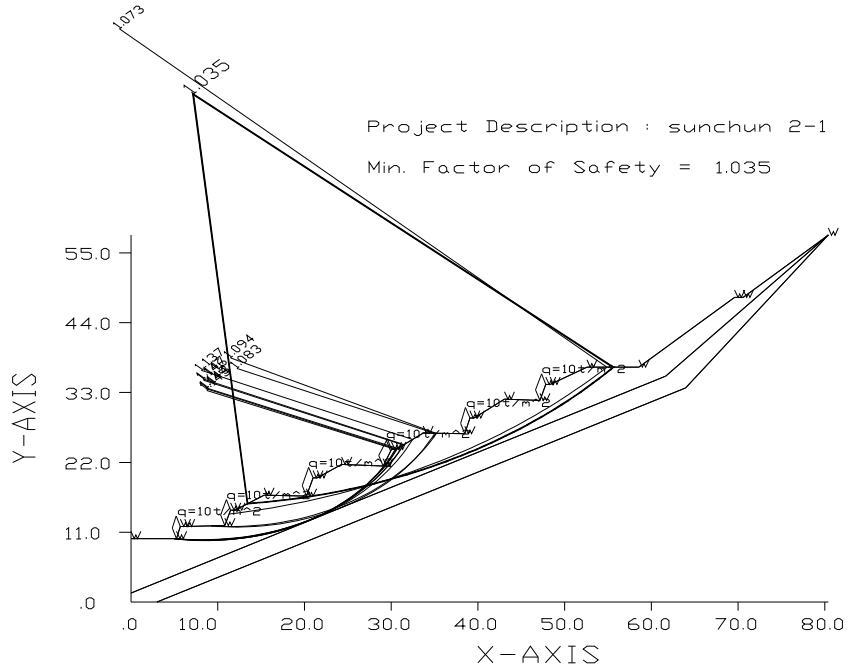
부 록

- A. STABL5M 안정해석 결과
- B. 퍼지근사추론 구조화 입력 및 결과창
- C. 퍼지-신경망 시스템 평가결과

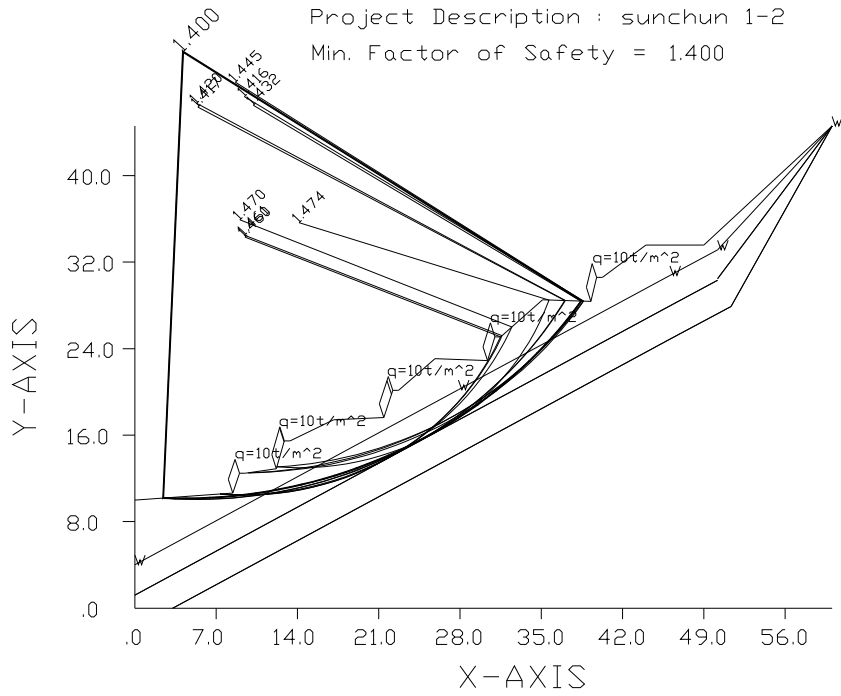
A. STABL5M 안정해석 결과



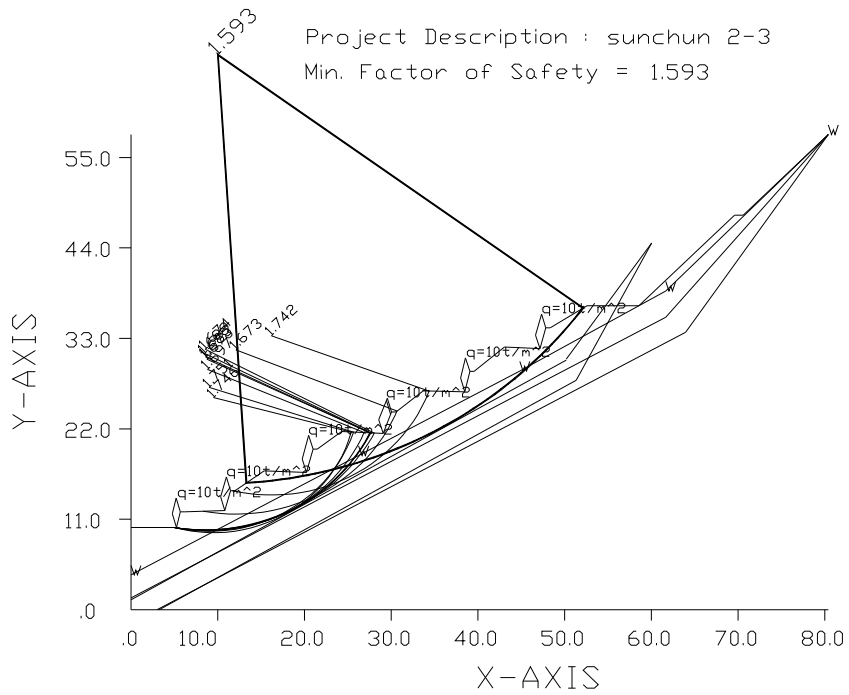
제 1구간(지하수위가 지표면과 일치할 경우)



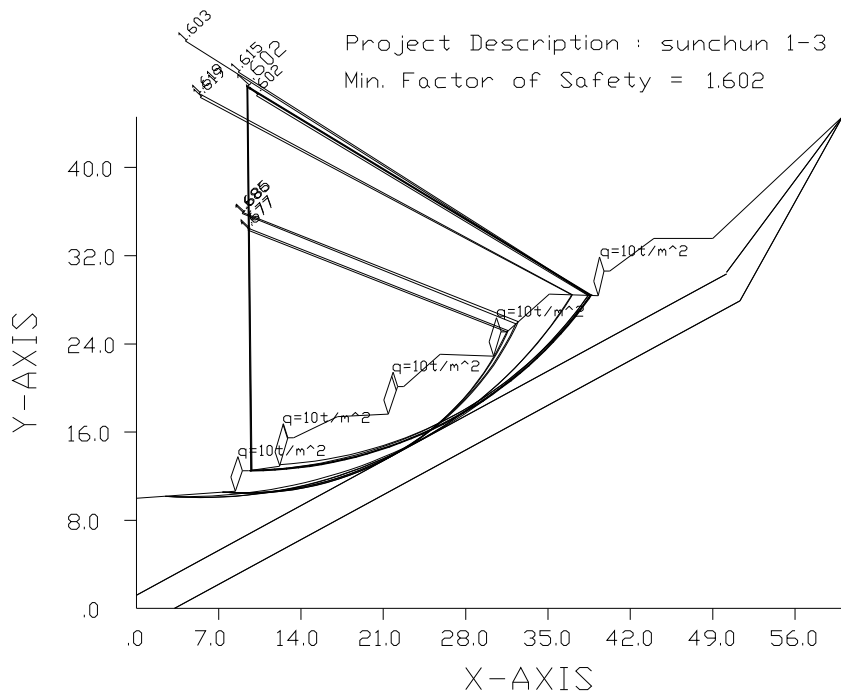
제 2구간(지하수위가 지표면과 일치할 경우)



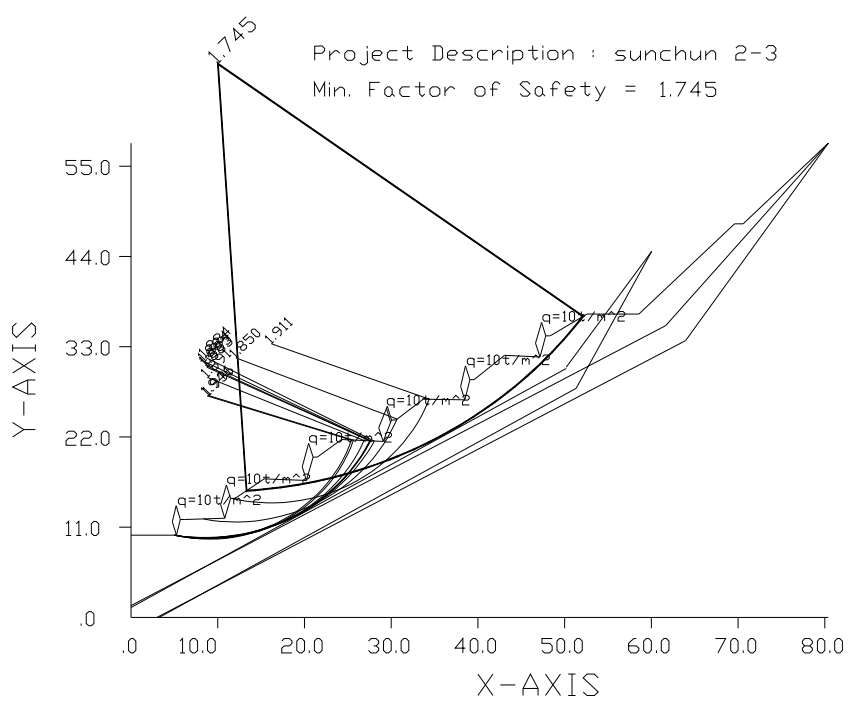
제 1구간(지하수위가 토층 사이에 있는 경우)



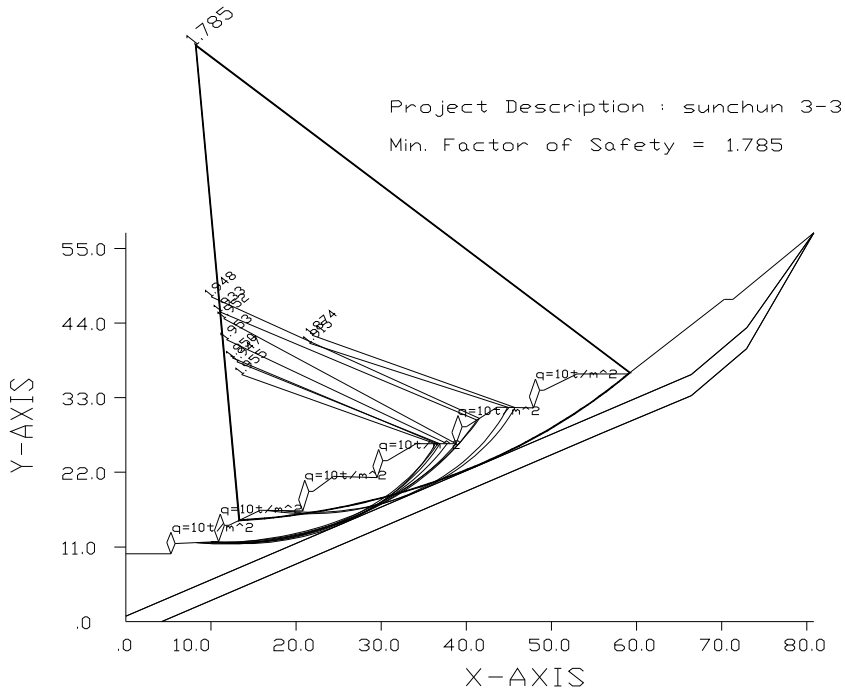
제 2구간(지하수위가 토층 사이에 있는 경우)



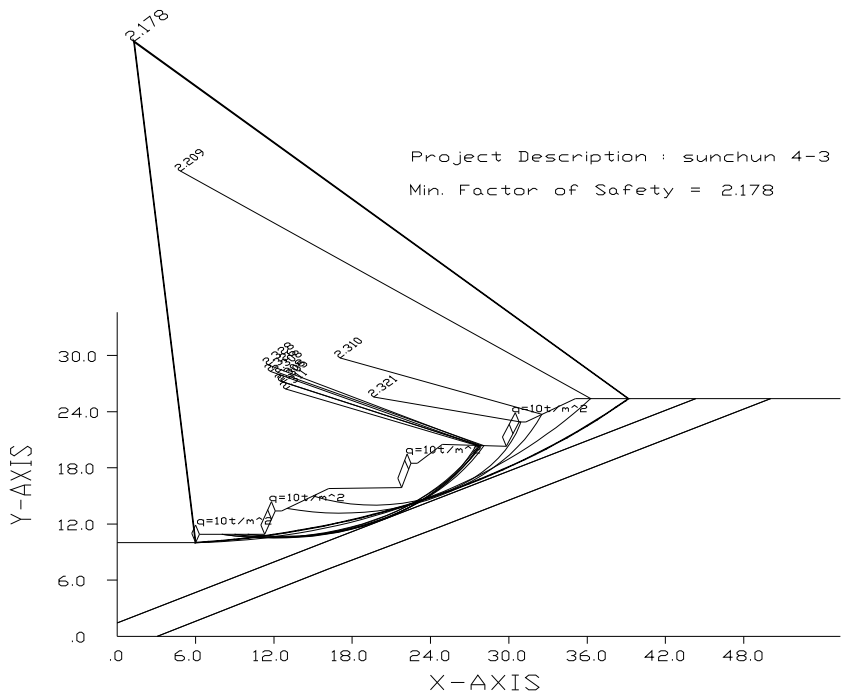
제 1구간(지하수위가 없는 경우)



제 2구간(지하수위가 없는 경우)



제 3구간(지하수위가 없는 경우)



제 4구간(지하수위가 없는 경우)

B. 퍼지근사추론 구조화 입력 및 결과창

The screenshot shows two windows of the '내적요인(v1,0)' software. The left window is the input screen, and the right window is the output screen.

Input Window (Left):

- Importance Value:** A row of 8 input boxes containing the values: 0.7, 0.7, 1.0, 1.0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.
- Measurement Data:** A row of 8 input boxes containing the values: 3, 3, 3, 3, 4, 2, 2, 0.
- Buttons:** 'Excute', 'Example', and 'End'.

Output Window (Right):

- Weight Mean:** A vertical list of 10 numerical values: 6.12244897959, 0.11426530612, 0.17208163265, 0.23577551020, 0.30644897959, 0.38520408163, 0.33436734693, 0.29381632653, 0.44779591836, 0.44779591836.
- HAM:** A vertical list of 5 values: 1 = 1.72318367346, 2 = 1.21755102040, 3 = 0.44779591836, 4 = 2.88848979591, 5 = 2.82104081632.
- Min:** A vertical list of 3 values: 0.44779591836, 'C', 'Average'.
- Button:** 'OK'.

퍼지 내적안정에 대한 입력 및 결과 창(토사사면 1구간)

The screenshot shows two windows of the '외적요인(v1,0)' software. The left window is the input screen, and the right window is the output screen.

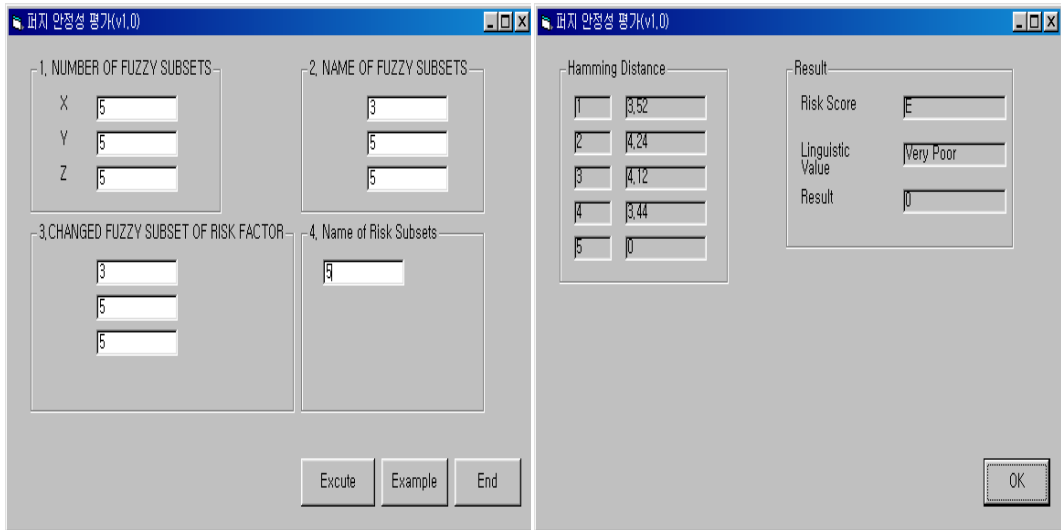
Input Window (Left):

- Importance Value:** A row of 11 input boxes containing the values: 0.7, 1.0, 0.7, 0.7, 0.5, 1.0, 1.0, 1.0, 0.7, 0.3, 0.
- Measurement Data:** A row of 11 input boxes containing the values: 4, 2, 4, 3, 2, 4, 1, 1, 5, 5, 0.
- Buttons:** 'Excute', 'Example', and 'End'.

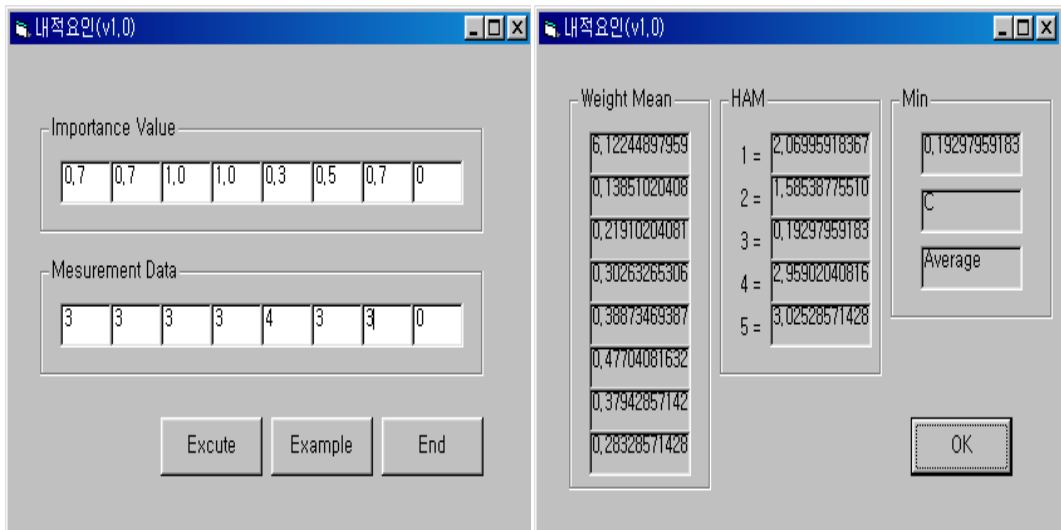
Output Window (Right):

- Weight Mean:** A vertical list of 10 numerical values: 0.44736842105, 0.30948684210, 0.21615789473, 0.15680263157, 0.12386842105, 0.11611842105, 0.11205263157, 0.13490789473, 0.19094736842, 0.29314473684, 0.46052631578.
- HAM:** A vertical list of 5 values: 1 = 2.28514473684, 2 = 2.77098684210, 3 = 2.59196684210, 4 = 2.64677631578, 5 = 2.22835526315.
- Min:** A vertical list of 3 values: 2.22835526315, 'E', 'Very Poor'.
- Button:** 'OK'.

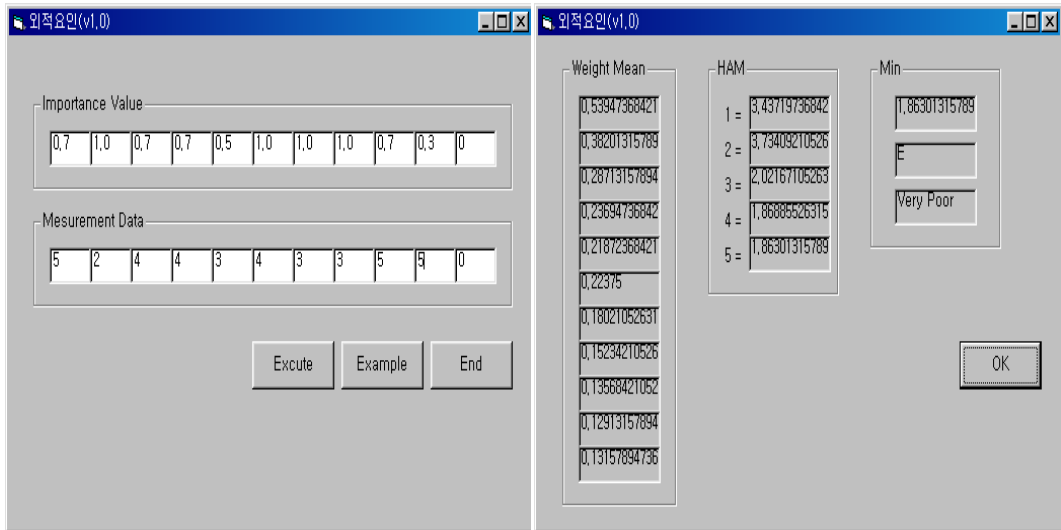
퍼지 외적안정에 대한 입력 및 결과 창(토사사면 1구간)



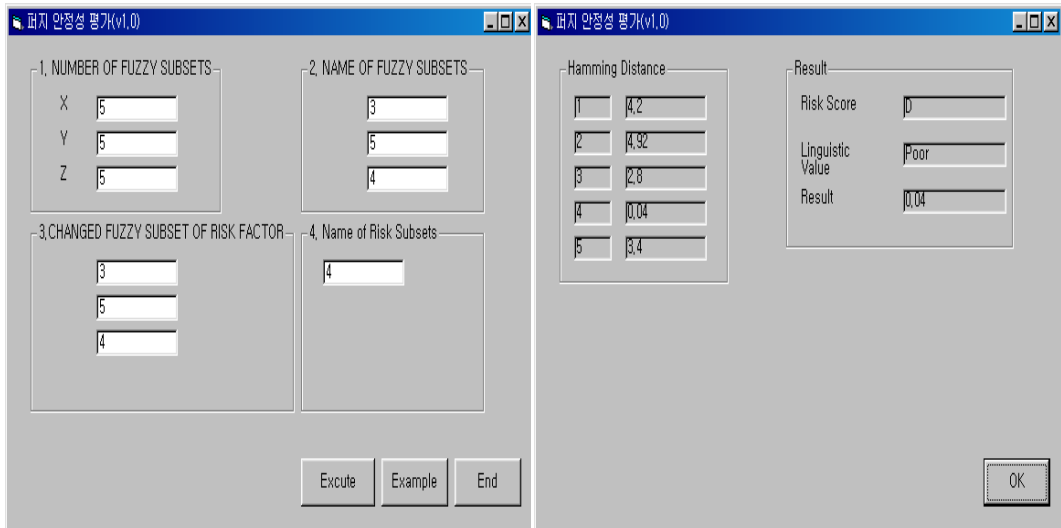
퍼지 안정성 평가 입력 및 결과 창(토사사면 1구간)



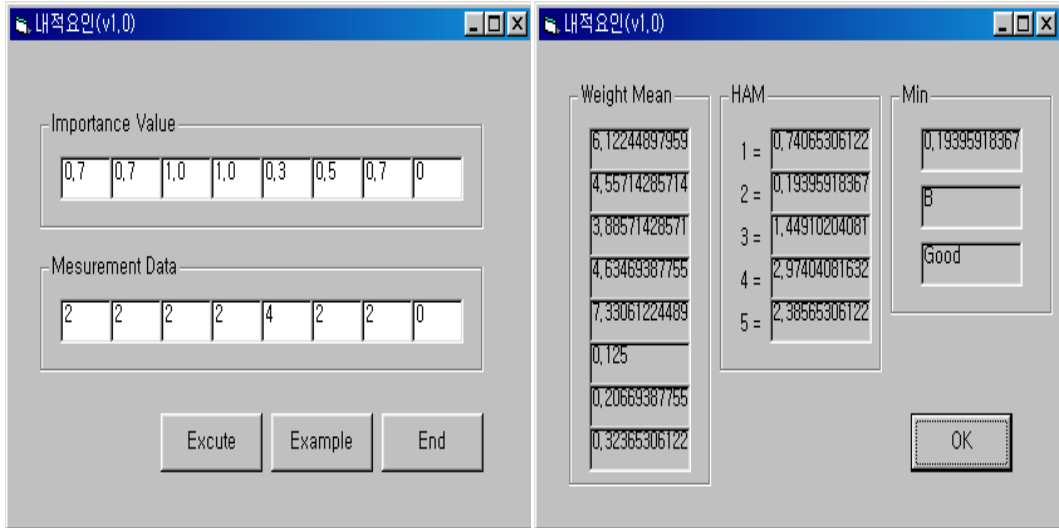
퍼지 내적안정에 대한 입력 및 결과 창(토사사면 2구간)



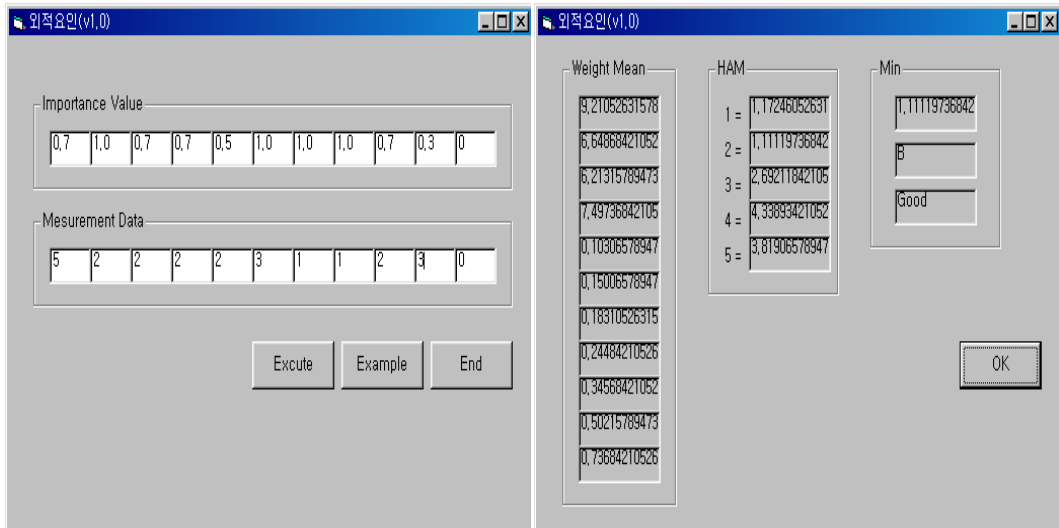
퍼지 외적안정에 대한 입력 및 결과 창(토사사면 2구간)



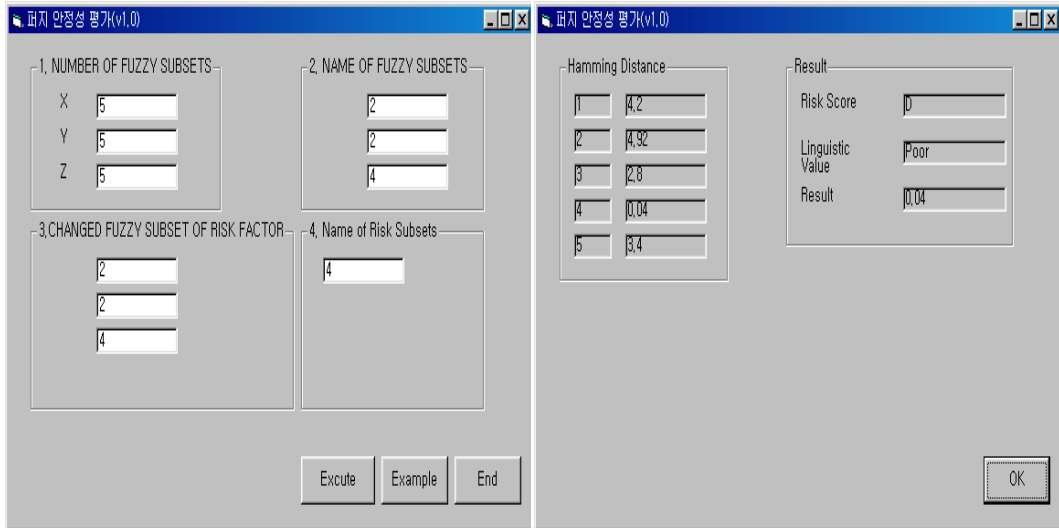
퍼지 안정성 평가 입력 및 결과 창(토사사면 2구간)



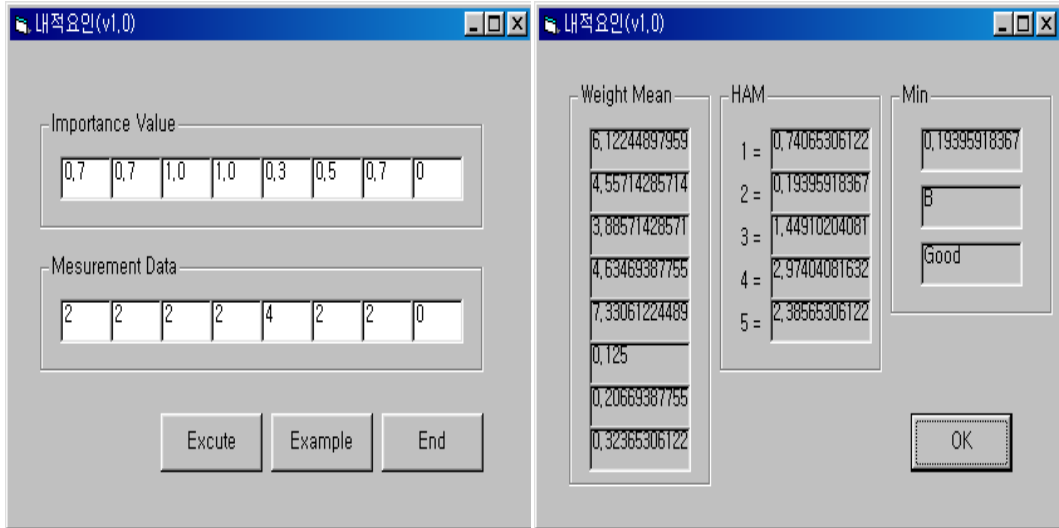
퍼지 내적안정에 대한 입력 및 결과 창(토사사면 3구간)



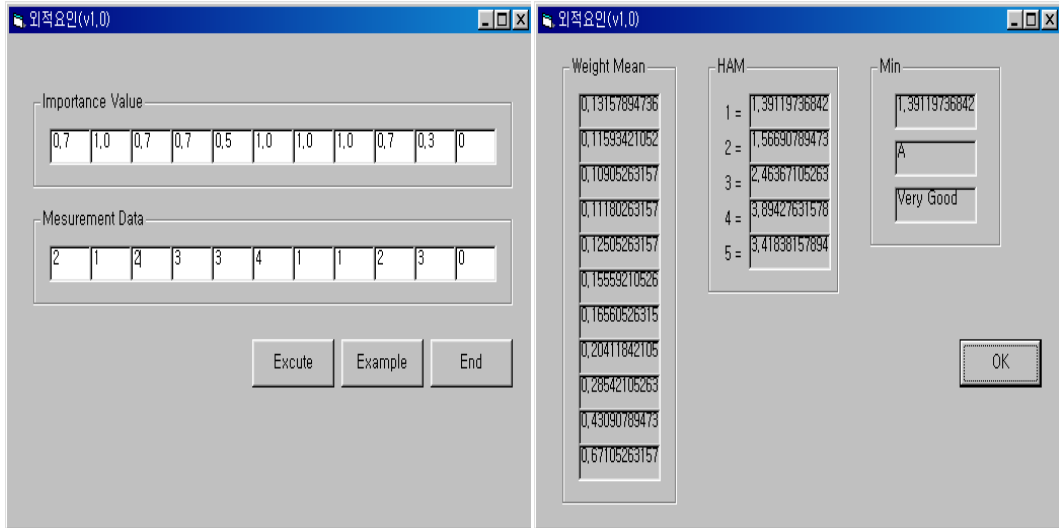
퍼지 외적안정에 대한 입력 및 결과 창(토사사면 3구간)



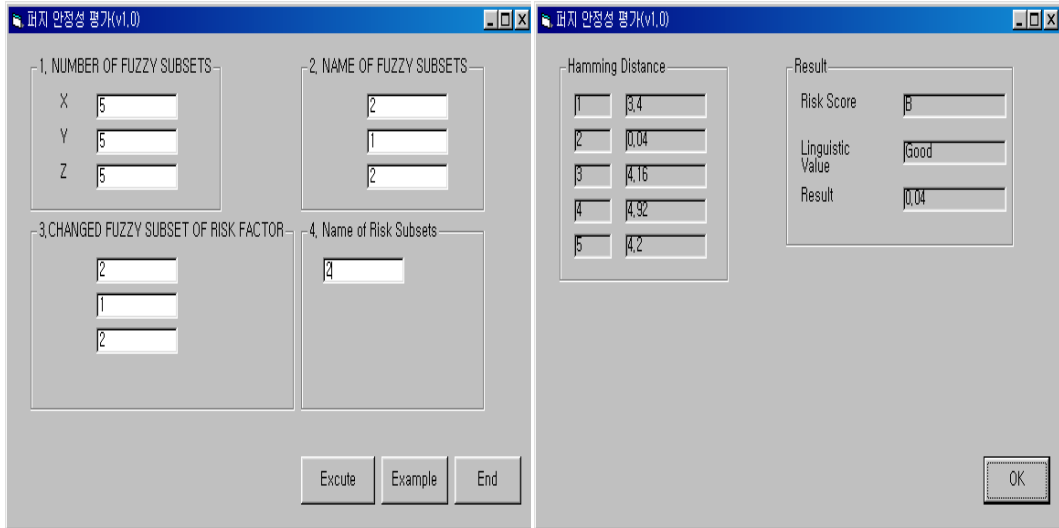
퍼지 안정성 평가 입력 및 결과 창(토사사면 3구간)



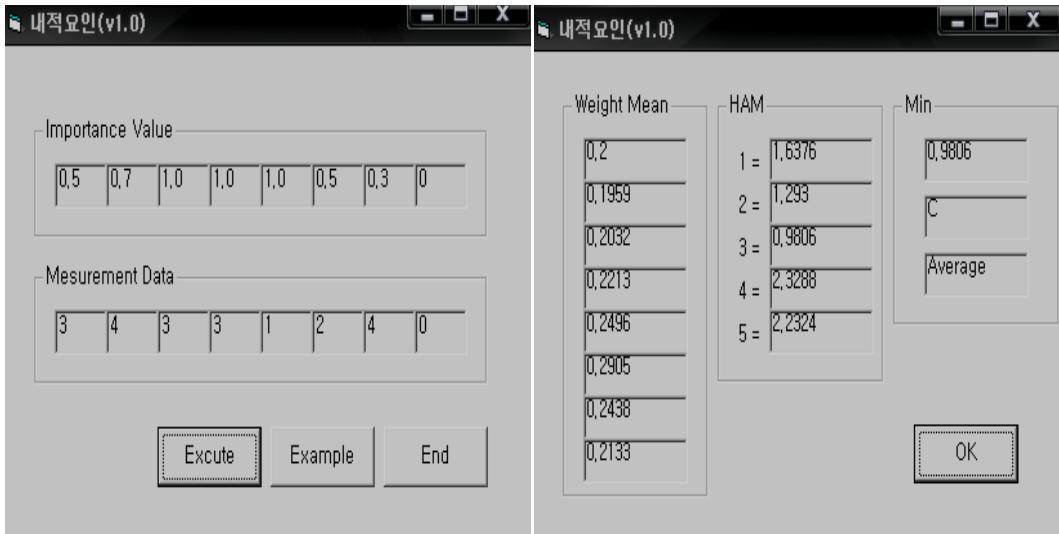
퍼지 내적안정에 대한 입력 및 결과 창(토사사면 4구간)



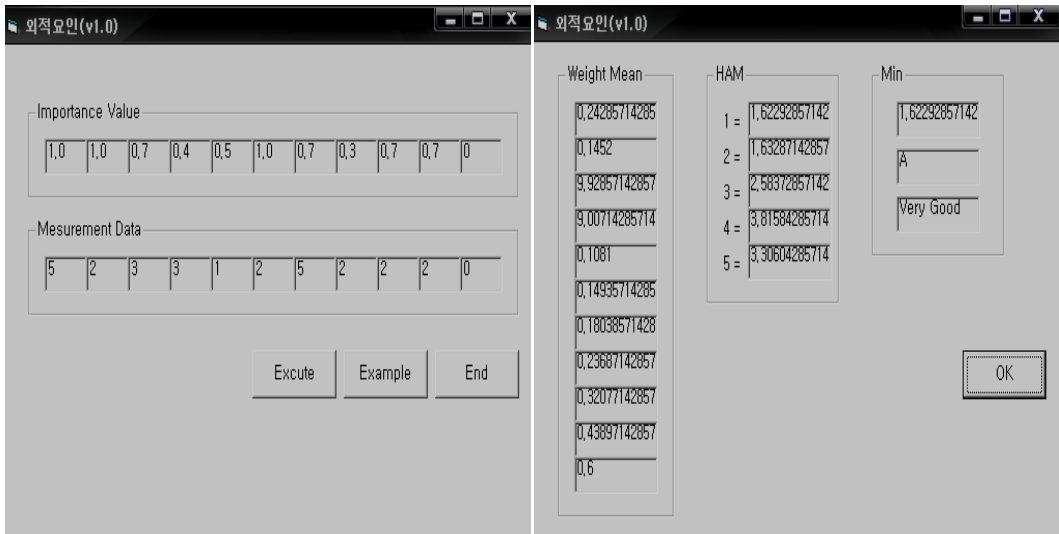
퍼지 외적안정에 대한 입력 및 결과 창(토사사면 4구간)



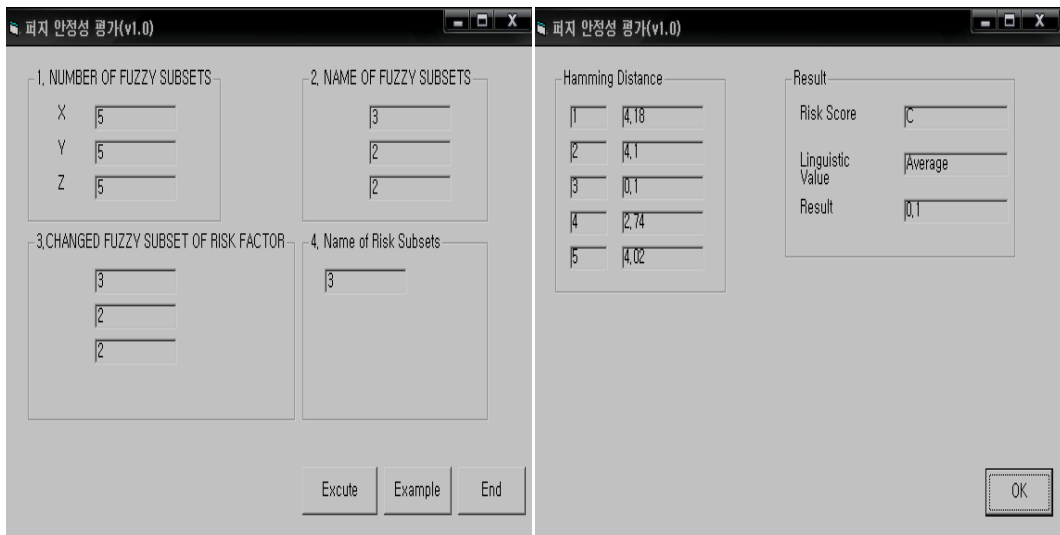
퍼지 안정성 평가 입력 및 결과 창(토사사면 4구간)



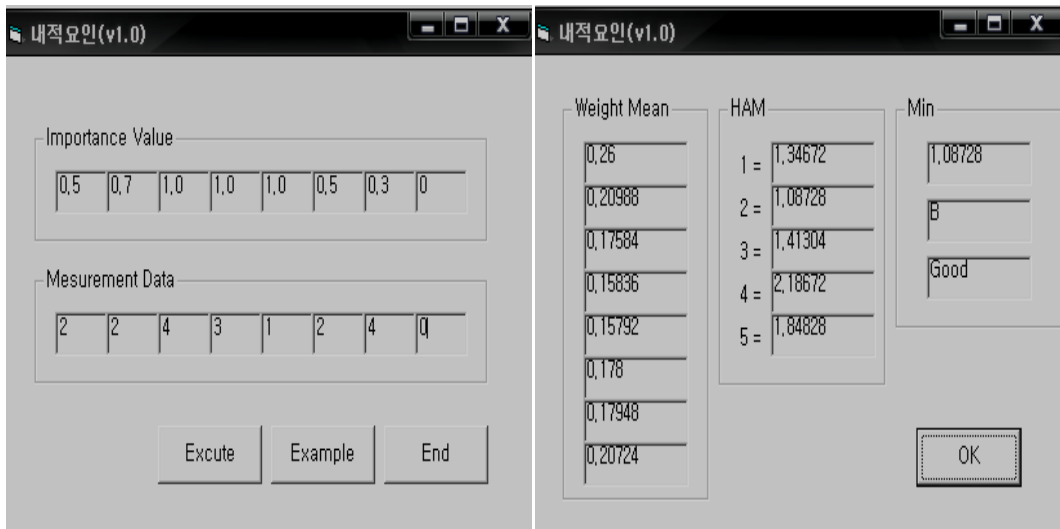
퍼지 내적안정에 대한 입력 및 결과 창(암반사면 1구간)



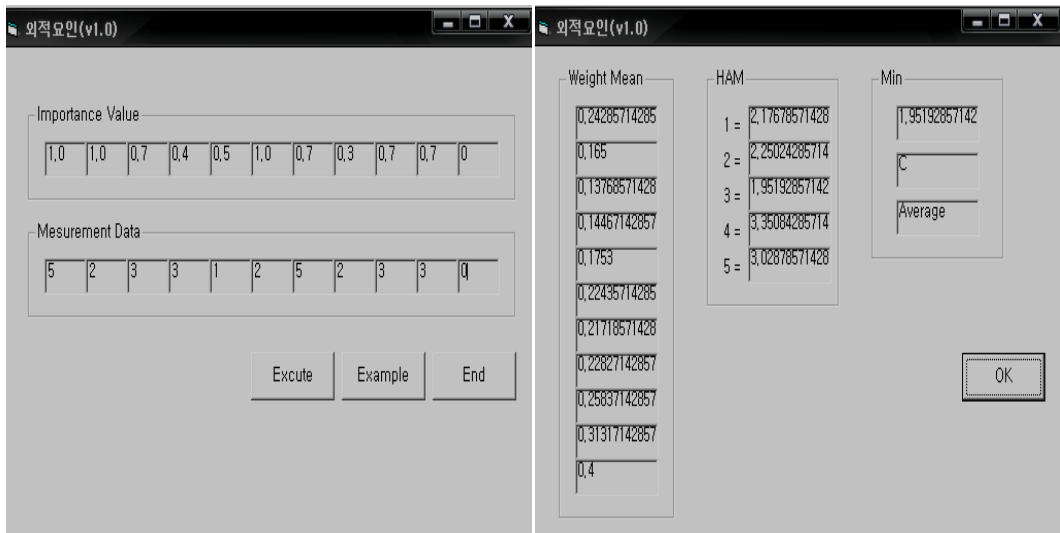
퍼지 외적안정에 대한 입력 및 결과 창(암반사면 1구간)



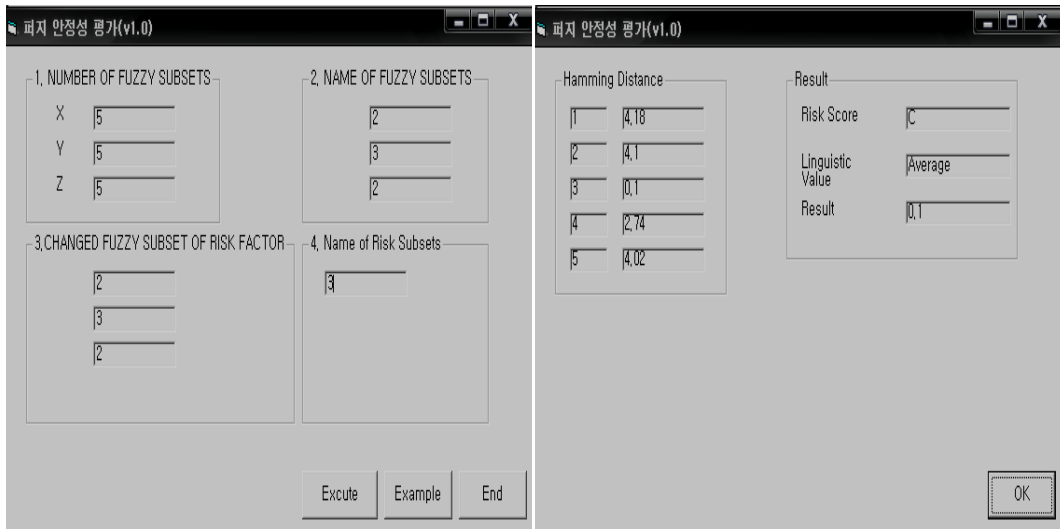
퍼지 안정성 평가 입력 및 결과 창(암반사면 1구간)



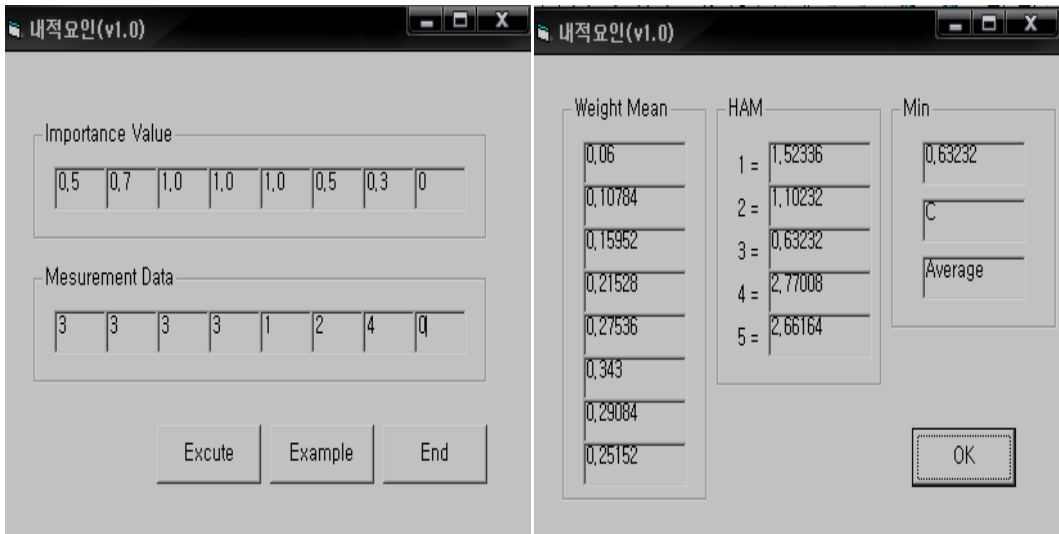
퍼지 내적안정에 대한 입력 및 결과 창(암반사면 2구간)



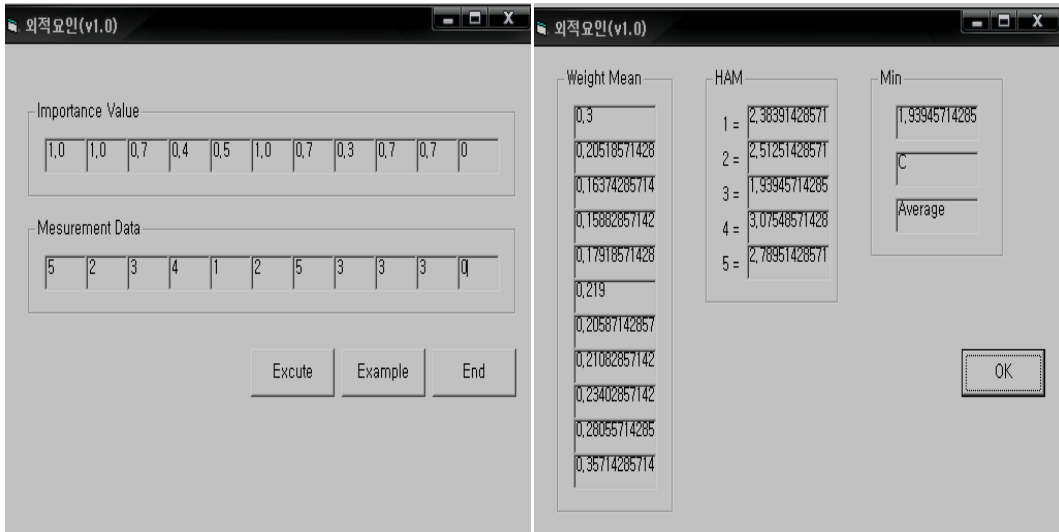
퍼지 외적안정에 대한 입력 및 결과 창(암반사면 2구간)



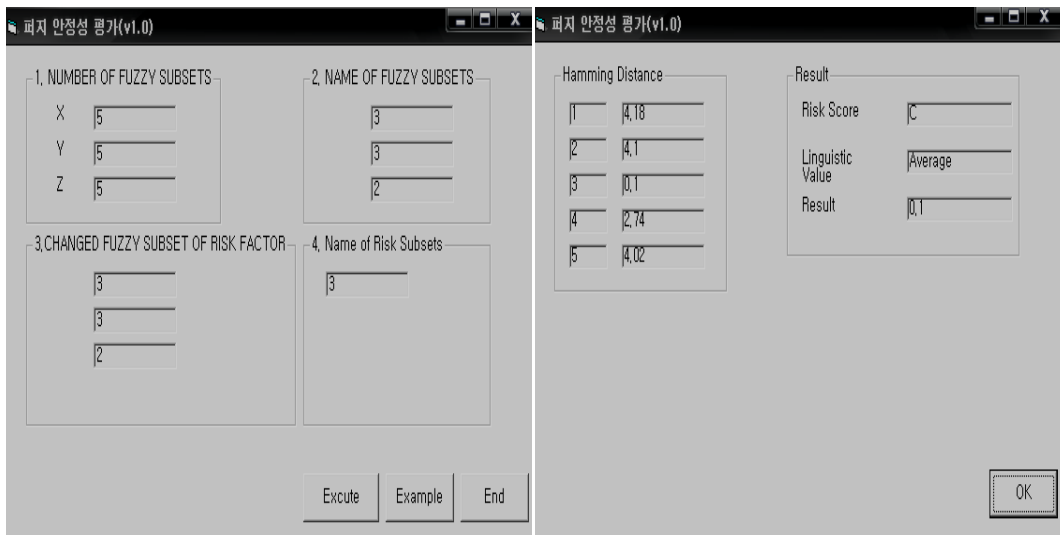
퍼지 안정성 평가 입력 및 결과 창(암반사면 2구간)



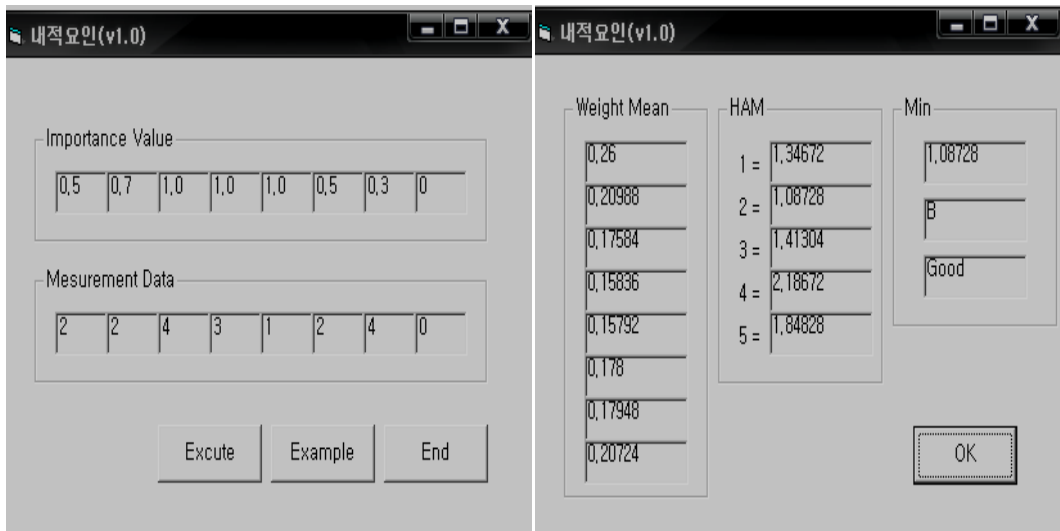
퍼지 내적안정에 대한 입력 및 결과 창(암반사면 3구간)



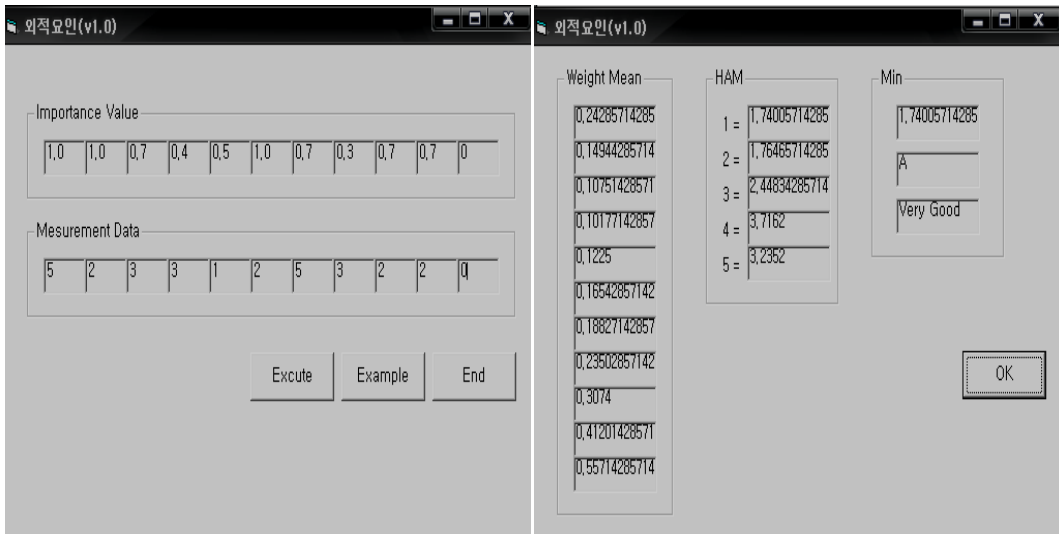
퍼지 외적안정에 대한 입력 및 결과 창(암반사면 3구간)



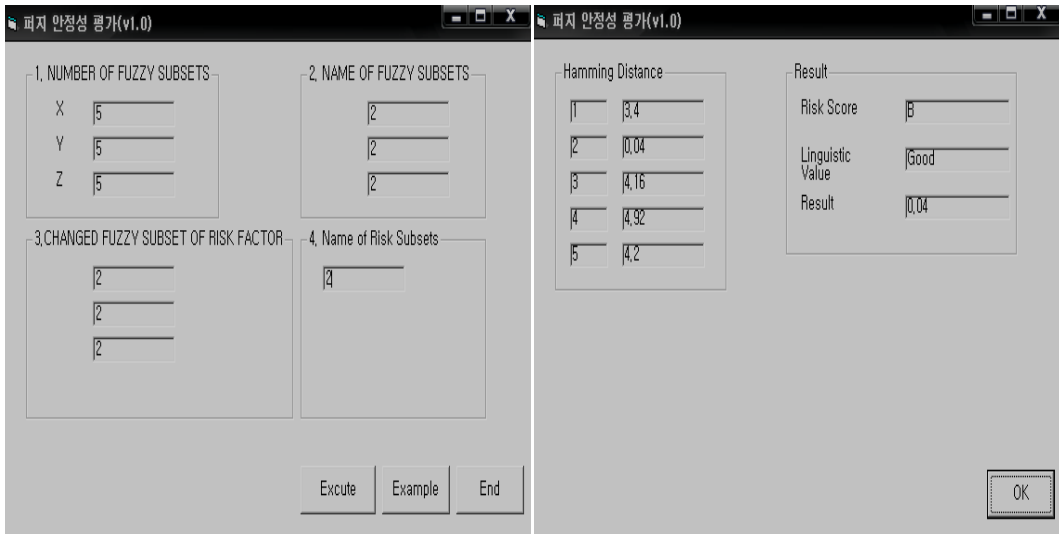
퍼지 안정성 평가 입력 및 결과 창(암반사면 3구간)



퍼지 내적안정에 대한 입력 및 결과 창(암반사면 4구간)



퍼지 외적안정에 대한 입력 및 결과 창(암반사면 4구간)



퍼지 안정성 평가 입력 및 결과 창(암반사면 4구간)

C. 퍼지-신경망 시스템 평가결과

#####토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[인공신경망에 의한 방법]#####

#####[제1구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1); 0.496483
외적의 안정성판정 값(ak2); 0.527919
전체의 안정성판정 값(akt); 0.52391

1. 내적안정성판정등급

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 내적사면안정성 조치

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 외적안정성판정등급

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 외적사면안정성 조치

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 전체안정성판정등급

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 전체사면안정성 조치

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석

사면의 상태능지수(fsc); 0.790436
본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
손상의 객관적신뢰성지수(damagebeta); 2.46088
본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.00692981
수치적정보에 의한 예측상태지수(obxo); 0.791575
낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoa); 0.752509
평균적정보에 의한 예측상태지수(obxob); 0.640667
보수적정보에 의한 예측상태지수(obxoc); 0.593413
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxod); 0.660881

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.51207
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.0060012
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.753407
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000616481

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.45334
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00707684
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.735792
외적안정의 점검시점 기율기(ytaagk); 0.00066052

1.결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)

전체의 성능지수(확률)(betafscp); 0.780437
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscp); 0.667111

1.결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

1.결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1.내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)

전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.0130356
전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta); 2.22487
내적안정의 상태지수(xfsc); 0.801407
외적안정의 상태지수(yfsc); 0.788832
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafsc); 0.738054
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscfta); 0.667271
전체안정의 본래안전을(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FS); 1.21534
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFS); 1.19075
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우

내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.777103
내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.738989
내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxob); 0.632086
내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoc); 0.58755
내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxod); 0.651226
외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxo); 0.793661
외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxo); 0.754474
외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxob); 0.641932
외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoc); 0.59428
외적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxod); 0.662302
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxo); 0.850965
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxo); 0.810279
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxob); 0.680256
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoc); 0.620959
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxod); 0.704974

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬합인경우

전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpx); 0.822395
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxa); 0.795925
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxb); 0.749501
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxc); 0.765544
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxd); 0.752418

#####토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[퍼지로직에 의한 방법]#####

#####토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[퍼지로직에 의한 방법]#####

#####[제1구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1); 0.492766

외적의 안정성판정 값(ak2); 0.503332

전체의 안정성판정 값(akt); 0.494455

1.내적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 내적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.외적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 외적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.전체안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 전체사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.퍼지신경망에 의한 신뢰성해석

사면의 상태지수(ffsc); 0.802218

본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428

손상의 객관적신뢰성지수(damagebetaf); 2.51583

본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652

손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.00593761

수치적정보에 의한 예측상태지수(obxof); 0.776021

낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoaf); 0.737985

평균적정보에 의한 예측상태지수(obxobf); 0.631457

보수적정보에 의한 예측상태지수(obxocf); 0.587121

비관적정보에 의한 예측상태지수(obxodf); 0.650517

1.내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428

내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652

내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.51896

내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00588513

내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.755472

내적안정의 점검시정 기울기(xtaagk); 0.000611319

1.외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428

외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652

외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.49936

외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00622094

외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc): 0.749594
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk): 0.000626016

1.결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)
전체의 성능지수(확률)(betafscpf): 0.79182
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscpf): 0.670392

1.결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

1.결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1.내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)
전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob): 0.0120695
전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebetaf): 2.25462
내적안정의 상태지수(xffsc): 0.802894
외적안정의 상태지수(yffsc): 0.798667
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafscf): 0.754534
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscftaf): 0.676194
전체안정의 본래안전률(확률기법)(FS0): 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FSf): 1.22121
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFSf): 1.19379
전체안정의 변동계수(ors): 0.072

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우
내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxof): 0.775117
내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoaf): 0.737148
내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxobf): 0.630933
내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxocf): 0.586765
내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxodf): 0.649927
외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxof): 0.780748
외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoaf): 0.742376
외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxobf): 0.634216
외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxocf): 0.589002
외적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxodf): 0.653626
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxof): 0.844149
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoaf): 0.803428
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxobf): 0.675263
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxocf): 0.617434
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxodf): 0.699457

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬함인경우
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpxf): 0.815354
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxaf): 0.789558
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxbf): 0.745832
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxcf): 0.763272
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxdf): 0.748196>>

#####토사 및 암반사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[인공신경망에 의한 방법]#####

#####[제2구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1): 0.550305
외적의 안정성판정 값(ak2): 0.753975
전체의 안정성판정 값(akt): 0.68241

1. 내적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 내적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 외적안정성판정등급#####

불량(불합격; 중결함(D등급))

2. 불합격 외적사면안정성 조치#####

부분결함인 경우는 국부보강및 국부재시공

1. 전체안정성판정등급#####

불량(불합격; 중결함(D등급))

2. 불합격 전체사면안정성 조치#####

부분결함인 경우는 국부보강및 국부재시공

1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석

- 사면의 상태능지수(fsc); 0.727036
- 본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
- 손상의 객관적신뢰성지수(damagebeta); 2.15037
- 본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
- 손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.015763
- 수치적정보에 의한 예측상태지수(obxo); 0.867206
- 낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoa); 0.826888
- 평균적정보에 의한 예측상태지수(obxob); 0.692778
- 모수적정보에 의한 예측상태지수(obxoc); 0.629872
- 비관적정보에 의한 예측상태지수(obxod); 0.718743

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

-
- 내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
 - 내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
 - 내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.41094
 - 내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.0079557
 - 내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.723076
 - 내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.00069231

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

-
- 외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
 - 외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
 - 외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.00118
 - 외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.0226863
 - 외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.600183
 - 외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000999541

1. 결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)

- 전체의 성능지수(확률)(betafscp); 0.721732
- 전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscp); 0.633147

1. 결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

1.결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

불량(불합격:중결함(D등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

- 1.내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)
 - 전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.0304615
 - 전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta); 1.87385
 - 내적안정의 상태지수(xfsc); 0.779878
 - 외적안정의 상태지수(yfsc); 0.69841
 - 전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafsc); 0.644927
 - 전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscfta); 0.561994
 - 전체안정의 본래안전률(확률기법)(FSO); 1.31591
 - 전체안정의 안전률(확률기법)(FS); 1.18319
 - 전체안정의 안전률(결함수기법)(FFS); 1.15596
 - 전체안정의 변동계수(ors); 0.072

- 1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우
 - 내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.80517
 - 내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.765386
 - 내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxob); 0.64905
 - 내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoc); 0.599175
 - 내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxod); 0.670282
 - 외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxo); 0.89585
 - 외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxo); 0.857329
 - 외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxob); 0.717584
 - 외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoc); 0.647876
 - 외적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxod); 0.745731
 - 전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxo); 0.916449
 - 전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxo); 0.880363
 - 전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxob); 0.738436
 - 전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoc); 0.663426
 - 전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxod); 0.768084

- 1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬합인경우
 - 전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpx); 0.899076
 - 전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxa); 0.866677
 - 전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxb); 0.789707
 - 전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxc); 0.790164
 - 전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxd); 0.798941

#####토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[퍼지로직에 의한 방법]#####

#####[제2구간]#####

- ##### 사면의 안정성평가(안정성판정구분) #####
 - 내적의 안정성판정 값(ak1); 0.623145
 - 외적의 안정성판정 값(ak2); 0.588235
 - 전체의 안정성판정 값(akt); 0.612843

1.내적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 내적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.외적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 외적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 전체안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 전체사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

- 1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석
 - 사면의 상태지수(ffsc): 0.754863
 - 본래의 객관적신뢰성지수(be(1)): 3.33428
 - 손상의 객관적신뢰성지수(damagebetaf): 2.28986
 - 본래의 객관적파괴확률(beprob): 0.000427652
 - 손상의 객관적파괴확률(damageprob): 0.0110146
 - 수치적정보에 의한 예측상태지수(obxof): 0.835889
 - 낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoaf): 0.795211
 - 평균적정보에 의한 예측상태지수(obxobf): 0.669394
 - 보수적정보에 의한 예측상태지수(obxocf): 0.613311
 - 비관적정보에 의한 예측상태지수(obxodf): 0.692956

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

-
- 내적안정의 신뢰성지수(xbe): 3.33428
 - 내적안정의 파괴확률(xbeprob): 0.000427652
 - 내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta): 2.26953
 - 내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob): 0.0116179
 - 내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc): 0.680666
 - 내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk): 0.000798336

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

-
- 외적안정의 신뢰성지수(ybe): 3.33428
 - 외적안정의 파괴확률(ybeprob): 0.000427652
 - 외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta): 2.33798
 - 외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob): 0.00969421
 - 외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc): 0.701193
 - 외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk): 0.000747017

- 1. 결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)
 - 전체의 성능지수(확률)(betafscpf): 0.746944
 - 전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscpf): 0.646344

1. 결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

1. 결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

불량(불합격; 중결함(D등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

- 1. 내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)
 - 전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob): 0.0211995
 - 전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta): 2.02935
 - 내적안정의 상태지수(xffsc): 0.750742
 - 외적안정의 상태지수(yffsc): 0.764706
 - 전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafscf): 0.686763

전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscftaf); 0.608632
전체안정의 본래안전을(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FSf); 1.19742
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFSf); 1.17112
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우
내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxof); 0.840727
내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoaf); 0.800012
내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxobf); 0.672808
내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxocf); 0.615707
내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxodf); 0.69674
외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxof); 0.824069
외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoaf); 0.783605
외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxobf); 0.66131
외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxocf); 0.607666
외적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxodf); 0.683971
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxof); 0.890777
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoaf); 0.851816
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxobf); 0.712885
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxocf); 0.644427
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxodf); 0.74065

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬함인경우
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpxf); 0.862982
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxaf); 0.834372
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxbf); 0.773582
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxcf); 0.780748
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxdf); 0.779837>>

#####도사 및 암반사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[인공신경망에 의한 방법]#####

#####[제3구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1); 0.273132
외적의 안정성판정 값(ak2); 0.220285
전체의 안정성판정 값(akt); 0.201441

1.내적안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2.불합격 내적사면안정성 조치#####

조치필요없음

1.외적안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2.불합격 외적사면안정성 조치#####

조치필요없음

1.전체안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2.불합격 전체사면안정성 조치#####

조치필요없음

1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석

사면의 상태능지수(fsc); 0.919424
본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
손상의 객관적신뢰성지수(damagebeta); 3.02229
본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.00125444
수치적정보에 의한 예측상태지수(obxo); 0.610171
낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoa); 0.592271
평균적정보에 의한 예측상태지수(obxob); 0.548385
보수적정보에 의한 예측상태지수(obxoc); 0.531693
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxod); 0.555771

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.9046
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00183865
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.871133
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000322168

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.99171
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00138716
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.897258
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000256856

1. 결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)

전체의 성능지수(확률)(betafscsp); 0.911768
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscsp); 0.730115

1. 결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

매우 양호:합격(A등급)

1. 결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

양호:합격(B등급)

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1. 내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)

전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.00322326
전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta); 2.72368
내적안정의 상태지수(xfsc); 0.890747
외적안정의 상태지수(yfsc); 0.911886
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafsc); 0.906427
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscfta); 0.81687
전체안정의 본래안전률(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FS); 1.27813
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFS); 1.24394
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우

내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.651315
내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoa); 0.627308
내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxob); 0.567279

내적안정성의 (비관적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (xobxoc); 0.544143
 내적안정성의 (보수적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (xobxod); 0.577474
 외적안정성의 (수치적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (yobxo); 0.620938
 외적안정성의 (낙관적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (yobxoa); 0.601394
 외적안정성의 (평균적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (yobxob); 0.553263
 외적안정성의 (비관적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (yobxoc); 0.534902
 외적안정성의 (보수적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (yobxod); 0.56138
 전체의 (수치적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (oobxo); 0.711948
 전체의 (낙관적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (oobxoa); 0.680062
 전체의 (평균적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (oobxob); 0.59679
 전체의 (비관적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (oobxoc); 0.563746
 전체의 (보수적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (oobxod); 0.611218

1. 비교대안별 파괴가능성 (퍼지 파괴 발생 확률): 격렬함인 경우
 전체의 (수치적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (tpx); 0.689258
 전체의 (낙관적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (tpxa); 0.678518
 전체의 (평균적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (tpxb); 0.684823
 전체의 (비관적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (tpxc); 0.725926
 전체의 (보수적정보) 퍼지 파괴 발생 확률 (tpxd); 0.677541

토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과

[퍼지로직에 의한 방법]

[제3구간]

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1); 0.449257
 외적의 안정성판정 값(ak2); 0.467511
 전체의 안정성판정 값(akt); 0.440166

1. 내적안정성판정등급

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 내적사면안정성 조치

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 외적안정성판정등급

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 외적사면안정성 조치

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 전체안정성판정등급

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 전체사면안정성 조치

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석

사면의 상태지수(ffsc); 0.823934
 본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
 손상의 객관적신뢰성지수(damagebetaf); 2.61503
 본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
 손상의 객관적파괴확률(damageprobfb); 0.00446102
 수치적정보에 의한 예측상태지수(obxof); 0.746456
 낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoaf); 0.710915
 평균적정보에 의한 예측상태지수(obxobf); 0.61489

보수적정보에 의한 예측상태지수(obxocf); 0.575895
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxodf); 0.631789

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.5986
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00468026
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.779358
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000551605

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.5654
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00515293
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.769399
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000576502

1. 결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)

전체의 성능지수(확률)(betafscpf); 0.813154
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscpf); 0.679482

1. 결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

양호(합격(B등급))

1. 결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1. 내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)

전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.00980907
전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta); 2.33326
내적안정의 상태지수(xffsc); 0.820297
외적안정의 상태지수(yffsc); 0.812996
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafscf); 0.784285
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscftaf); 0.699777
전체안정의 본래안전률(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FSf); 1.23196
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFSf); 1.20192
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률): 대수합인 경우

내적안정의 (수치적정보) 퍼지파괴발생확률(xobxof); 0.751478
내적안정의 (낙관적정보) 퍼지파괴발생확률(xobxoaf); 0.715468
내적안정의 (평균적정보) 퍼지파괴발생확률(xobxobf); 0.617627
내적안정의 (비수적정보) 퍼지파괴발생확률(xobxocf); 0.577742
내적안정의 (보수적정보) 퍼지파괴발생확률(xobxodf); 0.63489
외적안정의 (수치적정보) 퍼지파괴발생확률(yobxof); 0.761479
외적안정의 (낙관적정보) 퍼지파괴발생확률(yobxoaf); 0.724588
외적안정의 (평균적정보) 퍼지파괴발생확률(yobxobf); 0.623168
외적안정의 (비관적정보) 퍼지파괴발생확률(yobxocf); 0.58149
외적안정의 (보수적정보) 퍼지파괴발생확률(yobxodf); 0.64116
전체의 (수치적정보) 퍼지파괴발생확률(oobxof); 0.825173
전체의 (낙관적정보) 퍼지파괴발생확률(oobxoaf); 0.784682
전체의 (평균적정보) 퍼지파괴발생확률(oobxobf); 0.66205
전체의 (비관적정보) 퍼지파괴발생확률(oobxocf); 0.608182

전체의 (보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxodf); 0.684795

1. 비교대안별 파괴가능성 (퍼지파괴발생확률): 격렬함인 경우

전체의 (수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpxf); 0.796702

전체의 (낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxaf); 0.772523

전체의 (평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxbf); 0.735854

전체의 (비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxcf); 0.757072

전체의 (보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxdf); 0.736735>>

#####토사 및 암반사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[인공신경망에 의한 방법]#####

#####[제4구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1); 0.271445

외적의 안정성판정 값(ak2); 0.156993

전체의 안정성판정 값(akt); 0.173686

1. 내적안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2. 불합격 내적사면안정성 조치#####

조치필요없음

1. 외적안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2. 불합격 외적사면안정성 조치#####

조치필요없음

1. 전체안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2. 불합격 전체사면안정성 조치#####

조치필요없음

1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석

사면의 상태능지수(fsc); 0.930526

본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428

손상의 객관적신뢰성지수(damagebeta); 3.06686

본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652

손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.00108166

수치적정보에 의한 예측상태지수(obxo); 0.594408

낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoa); 0.578962

평균적정보에 의한 예측상태지수(obxob); 0.541312

보수적정보에 의한 예측상태지수(obxoc); 0.527047

비관적정보에 의한 예측상태지수(obxod); 0.547632

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428

내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652

내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.90742

내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.0018222

내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.871977
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000320059

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 3.09342
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.000989397
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.927761
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000180599

1. 결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)

전체의 성능지수(확률)(betafscp); 0.923681
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscp); 0.737517

1. 결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

매우 양호:합격(A등급)

1. 결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

양호:합격(B등급)

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1. 내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)

전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.00280979
전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta); 2.76868
내적안정의 상태지수(xfsc); 0.891422
외적안정의 상태지수(yfsc); 0.937203
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafsc); 0.919796
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscfta); 0.830368
전체안정의 본래안전을(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FS); 1.28339
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFS); 1.24898
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우

내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.650343
내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoa); 0.626474
내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxob); 0.566824
내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoc); 0.543842
내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxod); 0.576952
외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxo); 0.584993
외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoa); 0.571038
외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxob); 0.537123
외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoc); 0.524298
외적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxod); 0.542808
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxo); 0.697185
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoa); 0.667065
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxob); 0.589372
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoc); 0.558797
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxod); 0.602756

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬함인경우

전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpx); 0.677215
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxa); 0.667149
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxb); 0.67795
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxc); 0.721651
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxd); 0.669662

#####토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[퍼지로직에 의한 방법]#####

#####[제4구간]#####

사면의 안정성 평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1); 0.449257
외적의 안정성판정 값(ak2); 0.455314
전체의 안정성판정 값(akt); 0.439391

1. 내적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 내적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 외적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 외적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 전체안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 전체사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석

사면의 상태 지수(ffsc); 0.824244
본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
손상의 객관적신뢰성지수(damagebetaf); 2.61643
본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.00444281
수치적정보에 의한 예측상태지수(obxof); 0.746027
낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoaf); 0.710527
평균적정보에 의한 예측상태지수(obxobf); 0.614657
보수적정보에 의한 예측상태지수(obxocf); 0.575738
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxodf); 0.631525

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.5986
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00468026
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.779358
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000551605

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.58762
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00483215
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.776064
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000559841

1.결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보))
전체의 성능지수(확률)(betafscpf); 0.813462
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscpf); 0.680917

1.결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

양호:합격(B등급)

1.결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1.내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)

전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprobf); 0.0094898
전체의 객관적체계손상시뢰성지수(ddamagebetaf); 2.34561
내적안정의 상태지수(xffsc); 0.820297
외적안정의 상태지수(yffsc); 0.817875
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafscf); 0.784704
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscftaf); 0.703483
전체안정의 본래안전률(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FSf); 1.23211
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFSf); 1.2032
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우

내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxof); 0.751478
내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoaf); 0.715468
내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxobf); 0.617627
내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxocf); 0.577742
내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxodf); 0.63489
외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxof); 0.754808
외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoaf); 0.718497
외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxobf); 0.619459
외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxocf); 0.57898
외적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxodf); 0.636964
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxof); 0.822065
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoaf); 0.781655
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxobf); 0.659973
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxocf); 0.606736
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxodf); 0.682482

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬합인경우

전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpxf); 0.793579
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxaf); 0.769747
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxbf); 0.734304
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxcf); 0.756119
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxdf); 0.734943>>

>>

#####암반사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[인공신경망에 의한 방법]#####

#####[제1구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분) #####
내적의 안정성판정 값(ak1); 0.439227
외적의 안정성판정 값(ak2); 0.393569
전체의 안정성판정 값(akt); 0.378972

1. 내적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 내적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 외적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 외적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 전체안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 전체사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석
사면의 상태능지수(fsc); 0.848411
본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
손상의 객관적신뢰성지수(damagebeta); 2.72376
본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.00322727
수치적정보에 의한 예측상태지수(obxo); 0.712082
낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoa); 0.680179
평균적정보에 의한 예측상태지수(obxob); 0.596858
보수적정보에 의한 예측상태지수(obxoc); 0.563791
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxod); 0.611295

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.61672
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00443897
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.784793
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000538018

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652

외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.69811
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.0034868
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.809201
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000476997

1.결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)
전체의 성능지수(확률)(betafscp); 0.83772
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscp); 0.689145

1.결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

양호(합격(B등급))

1.결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1.내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)
전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.00791028
전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta); 2.41268
내적안정의 상태지수(xfsc); 0.824309
외적안정의 상태지수(yfsc); 0.842572
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafsc); 0.816894
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscfta); 0.723599
전체안정의 본래안전을(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FS); 1.24395
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFS); 1.21023
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우
내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.745936
내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoa); 0.710445
내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxob); 0.614608
내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoc); 0.575705
내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxod); 0.63147
외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxo); 0.720359
외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoa); 0.687517
외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxob); 0.601097
외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoc); 0.566627
외적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxod); 0.616122
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxo); 0.804612
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoa); 0.764854
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxob); 0.6487
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoc); 0.598933
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxod); 0.66989

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬합인경우
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpx); 0.777139
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxa); 0.75473
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxb); 0.725536
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxc); 0.750681
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxd); 0.724865

#####토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[퍼지로직에 의한 방법]#####

#####토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[퍼지로직에 의한 방법]#####

#####[제1구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분) #####
내적의 안정성판정 값(ak1); 0.457967
외적의 안정성판정 값(ak2); 0.450724
전체의 안정성판정 값(akt); 0.440916

1.내적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 내적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.외적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 외적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.전체안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 전체사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.퍼지신경망에 의한 신뢰성해석
사면의 상태 지수(ffsc); 0.823634
본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
손상의 객관적신뢰성지수(damagebetaf); 2.61368
본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
손상의 객관적파괴확률(damageprobfb); 0.00447873
수직적정보에 의한 예측상태지수(obxof); 0.746871
낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoaf); 0.711291
평균적정보에 의한 예측상태지수(obxobf); 0.615115
보수적정보에 의한 예측상태지수(obxocf); 0.576047
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxodf); 0.632044

1.내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.58279
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00490022
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.774617
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000563457

1.외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.59594
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00471661
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.778561
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000553597

1.결합수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)
전체의 성능지수(확률)(betafscpf); 0.812856
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscpf); 0.680438

1.결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

양호:합격(B등급)

1.결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1.내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)

- 전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob): 0.00959372
- 전체의 객관적체계손상시뢰성지수(ddamagebeta): 2.34155
- 내적안정의 상태지수(xffsc): 0.816813
- 외적안정의 상태지수(yffsc): 0.81971
- 전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafscf): 0.783879
- 전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscftaf): 0.702265
- 전체안정의 본래안전률(확률기법)(FS0): 1.31591
- 전체안정의 안전률(확률기법)(FSf): 1.23181
- 전체안정의 안전률(결함수기법)(FFSf): 1.20278
- 전체안정의 변동계수(ors): 0.072

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우

- 내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxof): 0.756264
- 내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoaf): 0.719824
- 내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxobf): 0.620263
- 내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxocf): 0.579524
- 내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxodf): 0.637875
- 외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxof): 0.752286
- 외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoaf): 0.716202
- 외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxobf): 0.61807
- 외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxocf): 0.578041
- 외적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxodf): 0.635392
- 전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxof): 0.82309
- 전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoaf): 0.782652
- 전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxobf): 0.660656
- 전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxocf): 0.607211
- 전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxodf): 0.683243

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬함인경우

- 전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpxf): 0.794586
- 전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxaf): 0.770653
- 전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxbf): 0.73482
- 전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxcf): 0.756438
- 전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxdf): 0.735538>>

#####토사 및 암반사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[인공신경망에 의한 방법]#####

#####[제2구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

- 내적의 안정성판정 값(ak1): 0.286622
- 외적의 안정성판정 값(ak2): 0.224648
- 전체의 안정성판정 값(akt): 0.214808

1.내적안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2.불합격 내적사면안정성 조치#####

조치필요없음

1. 외적안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2. 불합격 외적사면안정성 조치#####

조치필요없음

1. 전체안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2. 불합격 전체사면안정성 조치#####

조치필요없음

- 1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석
 - 사면의 상태능지수(fsc): 0.914077
 - 본래의 객관적신뢰성지수(be(1)): 3.33428
 - 손상의 객관적신뢰성지수(damagebeta): 3.00062
 - 본래의 객관적파괴확률(beprob): 0.000427652
 - 손상의 객관적파괴확률(damageprob): 0.0013472
 - 수치적정보에 의한 예측상태지수(obxo): 0.617804
 - 낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoa): 0.598735
 - 평균적정보에 의한 예측상태지수(obxob): 0.551839
 - 보수적정보에 의한 예측상태지수(obxoc): 0.533964
 - 비관적정보에 의한 예측상태지수(obxod): 0.559743

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

-
- 내적안정의 신뢰성지수(xbe): 3.33428
 - 내적안정의 파괴확률(xbeprob): 0.000427652
 - 내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta): 2.88204
 - 내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob): 0.00197562
 - 내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc): 0.864365
 - 내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk): 0.000339087

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

-
- 외적안정의 신뢰성지수(ybe): 3.33428
 - 외적안정의 파괴확률(ybeprob): 0.000427652
 - 외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta): 2.9846
 - 외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob): 0.00141983
 - 외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc): 0.895124
 - 외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk): 0.00026219

1. 결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보))

- 전체의 성능지수(확률)(betafscp): 0.906062
- 전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscp): 0.727833

1. 결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

매우 양호:합격(A등급)

1. 결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

양호:합격(B등급)

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1. 내적 및 외적 안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)
 전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.00339264
 전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta); 2.70673
 내적안정의 상대지수(xfsc); 0.885351
 외적안정의 상대지수(yfsc); 0.910141
 전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafsc); 0.899931
 전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscfta); 0.811787
 전체안정의 본래안전률(확률기법)(FS0); 1.31591
 전체안정의 안전률(확률기법)(FS); 1.27558
 전체안정의 안전률(결함수기법)(FFS); 1.24206
 전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률): 대수합인 경우
 내적안정의 (수치적정보) 퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.65909
 내적안정의 (낙관적정보) 퍼지파괴발생확률(xobxoa); 0.633989
 내적안정의 (평균적정보) 퍼지파괴발생확률(xobxob); 0.570936
 내적안정의 (비관적정보) 퍼지파괴발생확률(xobxoc); 0.546561
 내적안정의 (보수적정보) 퍼지파괴발생확률(xobxod); 0.581667
 외적안정의 (수치적정보) 퍼지파괴발생확률(yobxo); 0.623437
 외적안정의 (낙관적정보) 퍼지파괴발생확률(yobxoa); 0.603516
 외적안정의 (평균적정보) 퍼지파괴발생확률(yobxob); 0.554402
 외적안정의 (비관적정보) 퍼지파괴발생확률(yobxoc); 0.535651
 외적안정의 (보수적정보) 퍼지파괴발생확률(yobxod); 0.562689
 전체의 (수치적정보) 퍼지파괴발생확률(oobxo); 0.717433
 전체의 (낙관적정보) 퍼지파괴발생확률(oobxoa); 0.684919
 전체의 (평균적정보) 퍼지파괴발생확률(oobxob); 0.599592
 전체의 (비관적정보) 퍼지파괴발생확률(oobxoc); 0.565619
 전체의 (보수적정보) 퍼지파괴발생확률(oobxod); 0.614409

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률): 격렬함인 경우
 전체의 (수치적정보) 퍼지파괴발생확률(tpx); 0.694595
 전체의 (낙관적정보) 퍼지파괴발생확률(tpxa); 0.682917
 전체의 (평균적정보) 퍼지파괴발생확률(tpxb); 0.686971
 전체의 (비관적정보) 퍼지파괴발생확률(tpxc); 0.727205
 전체의 (보수적정보) 퍼지파괴발생확률(tpxd); 0.680066

토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과

[퍼지로직에 의한 방법]

[제2구간]

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1); 0.449257
 외적의 안정성판정 값(ak2); 0.46728
 전체의 안정성판정 값(akt); 0.440153

1. 내적안정성판정등급

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 내적사면안정성 조치

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 외적안정성판정등급

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 외적사면안정성 조치

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 전체안정성판정등급

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 전체사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석

사면의 상태지수(ffsc); 0.823939
본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
손상의 객관적신뢰성지수(damagebetaf); 2.61505
본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.00446071
수치적정보에 의한 예측상태지수(obxof); 0.746449
낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoaf); 0.710909
평균적정보에 의한 예측상태지수(obxobf); 0.614886
보수적정보에 의한 예측상태지수(obxocf); 0.575892
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxodf); 0.631785

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.5986
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00468026
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.779358
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000551605

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.56582
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00514668
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.769526
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000576186

1. 결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)

전체의 성능지수(확률)(betafscpf); 0.813159
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscpf); 0.67951

1. 결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

양호:합격(B등급)

1. 결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1. 내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)

전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.00980285
전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebetaf); 2.33349
내적안정의 상태지수(xffsc); 0.820297
외적안정의 상태지수(yffsc); 0.813088
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafscf); 0.784292
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscftaf); 0.699848
전체안정의 본래안전률(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FSf); 1.23196
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFSf); 1.20194
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우
 내적안정성의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxof); 0.751478
 내적안정성의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoaf); 0.715468
 내적안정성의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxobf); 0.617627
 내적안정성의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxocf); 0.577742
 내적안정성의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxodf); 0.63489
 외적안정성의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxof); 0.761353
 외적안정성의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoaf); 0.724473
 외적안정성의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxobf); 0.623097
 외적안정성의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxocf); 0.581443
 외적안정성의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxodf); 0.64108
 전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxof); 0.825113
 전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoaf); 0.784624
 전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxobf); 0.66201
 전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxocf); 0.608154
 전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxodf); 0.684751

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬함인경우
 전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpxf); 0.796642
 전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxaf); 0.772469
 전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxbf); 0.735825
 전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxcf); 0.757054
 전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxdf); 0.7367>>

#####토사 및 암반사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[인공신경망에 의한 방법]#####

#####[제3구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1); 0.404204
 외적의 안정성판정 값(ak2); 0.443168
 전체의 안정성판정 값(akt); 0.397257

1. 내적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 내적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 외적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 외적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 전체안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2. 불합격 전체사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석

사면의 상태능지수(fsc); 0.841097
 본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
 손상의 객관적신뢰성지수(damagebeta); 2.6916

본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.00355556
수치적정보에 의한 예측상태지수(obxo); 0.722444
낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxo); 0.689371
평균적정보에 의한 예측상태지수(obxob); 0.602174
보수적정보에 의한 예측상태지수(obxoc); 0.567348
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxod); 0.617348

1. 내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.67931
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00368875
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.803564
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.00049109

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.60961
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00453228
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.782661
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000543349

1. 결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)

전체의 성능지수(확률)(betafscp); 0.830324
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscp); 0.687476

1. 결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

양호(합격(B등급))

1. 결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1. 내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)

전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.00820431
전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta); 2.39936
내적안정의 상태지수(xfsc); 0.838319
외적안정의 상태지수(yfsc); 0.822733
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafsc); 0.80725
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscfta); 0.719602
전체안정의 본래안전률(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FS); 1.24038
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFS); 1.20883
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1. 비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우

내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.726362
내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.692862
내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxob); 0.60421
내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoc); 0.568713
내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxod); 0.619664
외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxo); 0.748117
외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxo); 0.712419
외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxob); 0.615792
외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoc); 0.576503

외적안정의 (보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxod); 0.632812
전체의 (수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxo); 0.808157
전체의 (낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoa); 0.76824
전체의 (평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxob); 0.650939
전체의 (비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoc); 0.600478
전체의 (보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxod); 0.672396

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬함인경우
전체의 (수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpx); 0.780431
전체의 (낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxa); 0.757742
전체의 (평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxb); 0.727298
전체의 (비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxc); 0.751774
전체의 (보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxd); 0.72689

#####토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[퍼지로직에 의한 방법]#####

#####[제3구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분) #####
내적의 안정성판정 값(ak1); 0.455204
외적의 안정성판정 값(ak2); 0.531546
전체의 안정성판정 값(akt); 0.486172

1.내적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 내적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.외적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 외적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.전체안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 전체사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.퍼지신경망에 의한 신뢰성해석
사면의 상태지수(ffsc); 0.805531
본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
손상의 객관적신뢰성지수(damagebetaf); 2.53114
본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
손상의 객관적파괴확률(damageprobfb); 0.00568465
수치적정보에 의한 예측상태지수(obxof); 0.77158
낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoaf); 0.733876
평균적정보에 의한 예측상태지수(obxobf); 0.628894
보수적정보에 의한 예측상태지수(obxocf); 0.585378
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxodf); 0.647628

1.내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.58782
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00482936
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.776123
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000559691

1. 외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.4465
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00721248
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.733742
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000665646

1.결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)
전체의 성능지수(확률)(betafscpf); 0.795046
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscpf); 0.671025

1.결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

1.결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1.내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)
전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.012007
전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta); 2.25662
내적안정의 상태지수(xffsc); 0.817918
외적안정의 상태지수(yffsc); 0.787382
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafscf); 0.759125
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscftaf); 0.676792
전체안정의 본래안전률(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전률(확률기법)(FSf); 1.22286
전체안정의 안전률(결함수기법)(FFSf); 1.194
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우

내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxof); 0.754748
내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoaf); 0.718443
내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxobf); 0.619425
내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxocf); 0.578957
내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxodf); 0.636927
외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxof); 0.795543
외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoaf); 0.756249
외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxobf); 0.643079
외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxocf); 0.595068
외적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxodf); 0.66359
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxof); 0.843685
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoaf); 0.802964
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxobf); 0.674928
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxocf); 0.617198
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxodf); 0.699087

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬합인경우

전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpxf); 0.816476
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxaf); 0.789775
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxbf); 0.745129

전체의 (비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxcf); 0.762722
전체의 (보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxdf); 0.747508>>

#####도사 및 암반사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[인공신경망에 의한 방법]#####

#####[제4구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1); 0.292462
외적의 안정성판정 값(ak2); 0.457993
전체의 안정성판정 값(akt); 0.334579

1.내적안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2.불합격 내적사면안정성 조치#####

조치필요없음

1.외적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 외적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.전체안정성판정등급#####

양호:합격(B등급)

2.불합격 전체사면안정성 조치#####

조치필요없음

1. 퍼지신경망에 의한 신뢰성해석

사면의 상태능지수(fsc); 0.866168
본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
손상의 객관적신뢰성지수(damagebeta); 2.80068
본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.00254978
수치적정보에 의한 예측상태지수(obxo); 0.686702
낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoa); 0.657901
평균적정보에 의한 예측상태지수(obxob); 0.584204
보수적정보에 의한 예측상태지수(obxoc); 0.555358
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxod); 0.596854

1.내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.87223
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00203802
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.861422
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000346444

1.외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.58275
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00490088
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.774603
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000563492

1.결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보)
전체의 성능지수(확률)(betafscp); 0.855865
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscp); 0.697077

1. 결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

양호:합격(B등급)

1. 결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격: 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1.내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)
전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.00692892
전체의 객관적체계손상신뢰성지수(ddamagebeta); 2.46056
내적안정의 상태지수(xfsc); 0.883015
외적안정의 상태지수(yfsc); 0.816803
전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafsc); 0.839966
전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscfta); 0.737958
전체안정의 본래안전율(확률기법)(FS0); 1.31591
전체안정의 안전율(확률기법)(FS); 1.25258
전체안정의 안전율(결함수기법)(FFS); 1.2153
전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우
내적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxo); 0.662457
내적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoa); 0.636888
내적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxob); 0.57253
내적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoc); 0.547615
내적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxod); 0.583493
외적안정의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxo); 0.756278
외적안정의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoa); 0.719836
외적안정의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxob); 0.620271
외적안정의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoc); 0.579529
외적안정의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxod); 0.637884
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxo); 0.791562
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoa); 0.752497
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxob); 0.640659
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoc); 0.593408
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxod); 0.660872

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬함인경우
전체의(수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpx); 0.769867
전체의(낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxa); 0.745346
전체의(평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxb); 0.717281
전체의(비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxc); 0.745204
전체의(보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxd); 0.715765

#####토사사면의 안정성평가 시스템 분석 결과#####

#####[퍼지로직에 의한 방법]#####

#####[제4구간]#####

사면의 안정성평가(안정성판정구분)

내적의 안정성판정 값(ak1); 0.449257
외적의 안정성판정 값(ak2); 0.450724
전체의 안정성판정 값(akt); 0.439047

1.내적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 내적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.외적안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 외적사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

1.전체안정성판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

2.불합격 전체사면안정성 조치#####

시공시에 세밀한 점검이 필요함

- 1.퍼지신경망에 의한 신뢰성해석
사면의 상태지수(ffsc); 0.824381
본래의 객관적신뢰성지수(be(1)); 3.33428
손상의 객관적신뢰성지수(damagebetaf); 2.61705
본래의 객관적파괴확률(beprob); 0.000427652
손상의 객관적파괴확률(damageprob); 0.00443475
수치적정보에 의한 예측상태지수(obxof); 0.745836
낙관적정보에 의한 예측상태지수(obxoaf); 0.710354
평균적정보에 의한 예측상태지수(obxobf); 0.614554
보수적정보에 의한 예측상태지수(obxocf); 0.575668
비관적정보에 의한 예측상태지수(obxodf); 0.631408

1.내적안정의 객관적신뢰성지수

내적안정의 신뢰성지수(xbe); 3.33428
내적안정의 파괴확률(xbeprob); 0.000427652
내적안정의 손상신뢰성지수(xdamagebeta); 2.5986
내적안정의 손상파괴확률(xdamageprob); 0.00468026
내적안정의 보유신뢰성(성능지수)(xbetafsc); 0.779358
내적안정의 점검시점 기울기(xtaagk); 0.000551605

1.외적안정의 객관적신뢰성지수

외적안정의 신뢰성지수(ybe); 3.33428
외적안정의 파괴확률(ybeprob); 0.000427652
외적안정의 손상신뢰성지수(ydamagebeta); 2.59594
외적안정의 손상파괴확률(ydamageprob); 0.00471661
외적안정의 보유신뢰성(성능지수)(ybetafsc); 0.778561
외적안정의 점검시점 기울기(ytaagk); 0.000553597

- 1.결함수기법에 의한 전체 안정성능지수(평균적정보))
전체의 성능지수(확률)(betafscpf); 0.813598
전체의 성능지수(퍼지)(bbetafscpf); 0.681452

1.결함수기법에 의한 확률적 안정성능판정등급#####

양호:합격(B등급)

1.결함수기법에 의한 퍼지적 안정성능판정등급#####

보통(불합격; 경미결함(C등급))

#####퍼지결함수분석기법(체계신뢰성해석)#####

1.내적 및 외적안정의 신뢰성지수(대수합인 경우)

- 전체의 객관적체계손상파괴확률(ddamageprob); 0.0093748
- 전체의 객관적체계손상시뢰성지수(ddamagebetaf); 2.35015
- 내적안정의 상태지수(xffsc); 0.820297
- 외적안정의 상태지수(yffsc); 0.81971
- 전체안정의 성능지수(신뢰성기법)(betafscf); 0.78489
- 전체안정의 성능지수(결함수기법)(betafscftaf); 0.704844
- 전체안정의 본래안전률(확률기법)(FS0); 1.31591
- 전체안정의 안전률(확률기법)(FSf); 1.23218
- 전체안정의 안전률(결함수기법)(FFSf); 1.20367
- 전체안정의 변동계수(ors); 0.072

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):대수합인경우

- 내적안정의 (수치적정보)퍼지파괴발생확률(xobxof); 0.751478
- 내적안정의 (낙관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxoaf); 0.715468
- 내적안정의 (평균적정보)퍼지파괴발생확률(xobxobf); 0.617627
- 내적안정의 (비관적정보)퍼지파괴발생확률(xobxocf); 0.577742
- 내적안정의 (보수적정보)퍼지파괴발생확률(xobxodf); 0.63489
- 외적안정의 (수치적정보)퍼지파괴발생확률(yobxof); 0.752286
- 외적안정의 (낙관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxoaf); 0.716202
- 외적안정의 (평균적정보)퍼지파괴발생확률(yobxobf); 0.61807
- 외적안정의 (비관적정보)퍼지파괴발생확률(yobxocf); 0.578041
- 외적안정의 (보수적정보)퍼지파괴발생확률(yobxodf); 0.635392
- 전체의 (수치적정보)퍼지파괴발생확률(oobxof); 0.820915
- 전체의 (낙관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxoaf); 0.780537
- 전체의 (평균적정보)퍼지파괴발생확률(oobxobf); 0.65921
- 전체의 (비관적정보)퍼지파괴발생확률(oobxocf); 0.606206
- 전체의 (보수적정보)퍼지파괴발생확률(oobxodf); 0.681632

1.비교대안별 파괴가능성(퍼지파괴발생확률):격렬함인경우

- 전체의 (수치적정보)퍼지파괴발생확률(tpxf); 0.792446
- 전체의 (낙관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxaf); 0.768731
- 전체의 (평균적정보)퍼지파괴발생확률(tpxbf); 0.733727
- 전체의 (비관적정보)퍼지파괴발생확률(tpxcf); 0.755764
- 전체의 (보수적정보)퍼지파괴발생확률(tpxdf); 0.734278>>

>>

논문요지

사면은 지층의 구성상태, 지형조건, 용출수의 유·무, 토질 및 암반의 공학적 특성, 사면의 안정성 및 경제성, 보강공법의 적용 여부 등을 종합적으로 검토하여 결정되므로 사면의 안정성을 장기적으로 유지하기 위해서는 체계적이고 합리적인 분석과정을 거쳐야 한다.

이에 본 연구는 토사 및 암반사면 안정성 평가에 한계평형해석방법, 경험적 사면 안정성 평가방법, 평사투영해석법, RMR에 의한 평가방법 등의 기존의 평가방법과 점추정법에 의한 신뢰성 해석방법, 퍼지이론에 의한 방법, 인공신경망이론에 의한 방법, 퍼지-신경망에 의한 평가방법 등의 안정성 예측방법을 실제 토사 및 암반사면 각각 4개 구간에 적용하여 상호 비교·분석하여 각 사면에 대한 안정성 평가와 신뢰성 및 타당성 등을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

한계평형해석방법은 토사사면의 경우 지반 중 간극수압의 영향과 흙의 성질에 따라 사면의 안정성이 크게 달라질 수 있으며, 암반사면의 경우는 평사투영해석에 대한 신뢰성 및 지표지질조사 등으로 안정성 평가에 대한 한계와 평가된 안전율도 임의의 한 구간에 대한 안전율을 나타낸 값으로 전체사면에 대한 안정성을 평가하기에는 다소 불안정한 부분이 있는 것으로 판단되었다.

토사사면에 대한 경험에 의한 평가방법은 사면의 불안정의 원인 분석 및 보수·보강 대책을 수립하는데 유효한 것으로 생각할 수 있으나, 해석방법에 대한 객관성이 미흡하여 사면안정성 평가 시 다소 어려움이 있을 것으로 판단된다. 또 암반사면에 대한 암반 분류법에 의한 평가는 분석과정에 영향을 미치는 인자들 중 암석의 압축강도 및 RQD 값의 비중이 크기 때문에 이를 수치로 환산하는 과정에서 오차가 발생할 수 있어, 판단에 대한 객관성이 미흡하다고 판단된다.

반면, 사면안정성 예측방법들 중 점추정법에 의한 신뢰성해석은 확률변수의 평균과 표준편차만으로 사면 전체의 구간에 대해 신뢰성지수와 안전율을 도출할 수 있고, 안전율도 한계평형해석방법의 안전율보다 안전한 값을 나타내고 있어, 사면의 안정성 결정에 신중을 기할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 퍼지근사추론법에 의한 평가는 각 사면에 내재되어 있는 다양한 내·외적요인을 정량적으로 평가할 수 있으므로 기존의 토사사면 안정해석방법과 병행하면 사면안정 해석을 보다 합리적으로 평가할 수 있을 것으

로 판단된다.

그리고 본 연구에서 구축한 퍼지-신경망에 의한 사면안정 평가시스템은 인간의 신뢰성 해석에 대한 정보를 제대로 반영한 방법으로 애매성과 모호성을 갖는 주관적 상태평가를 퍼지로지 및 인공신경망 결합수기법으로 객관화시킬 수 있고, MATLAB 프로그램에 의해 빠르고 정확한 수치해석이 가능하므로 각 사면에 대한 안정성 평가 예측에 효과적인 역할을 기대할 수 있어 보다 체계적이고 종합적인 안정해석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

이와 같이 토사 및 암반사면의 안정성 평가에 사용되는 기존의 사면안정 해석방법과 본 연구에서 비교·분석한 점추정법에 의한 신뢰성 해석방법, 퍼지근사추론법에 의한 해석방법, 그리고 본 연구에서 구축한 인공신경망 및 퍼지-신경망 이론에 의한 사면안정성 평가방법 등을 사면안정 평가 시 서로 병행하여 사용한다면, 보다 안전하고 경제적인 사면을 확보할 것으로 기대되며, 이를 위해 확률변수 및 불확실량 산정 등에 대한 D/B 구축이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

“네 시작은 미약하였으나, 네 나중은 심히 창대하리라“는 하나님 말씀처럼, 오늘 이렇게 영광된 자리에 설 수 있게 많은 사랑과 은혜를 베풀어 주신 하나님, 부모님, 그리고 변함없는 사랑과 열정으로 저에 대한 배려를 아끼지 않으신 안종필 교수님께 깊은 존경과 감사의 말씀을 드립니다(감사합니다!).

바쁘신 가운데 귀한 시간 허락하시어 본 논문에 대해 세심한 지도·격려·조언을 아끼지 않으신 조선대학교 심태섭 교수님, 서울시립대학교 이송 교수님, 동국대학교 장연수 교수님, 전남대학교 김종렬 교수님께 깊은 감사에 말씀 드리며, 조선대학교 토목공학과 오재화 교수님, 박길현 교수님, 김운중 교수님, 김성홍 교수님, 박정웅 교수님, 김대현 교수님, 순천대학교 주재우 교수님, 광주대학교 권호진 교수님들께 깊은 감사를 드립니다(존경합니다!).

본 연구에 대해 함께 고민하면서 많은 지혜와 용기를 주신 이증빈 교수님, 박주원 박사님 그리고 박상범·박경호·유덕찬·이정욱·김규덕·손영현·주승완·양승현·김선학 선배 박사님들께 깊은 감사를 드립니다. 또한 변함없는 사랑과 믿음으로 함께한 박사과정 동기인 안기문형님과 항상 옆에서 나를 즐겁게 해준 최진호·김진택 후배 그리고 지반공학연구실 김석호·김건국·박병길·윤순홍·박용훈·김동철·주종혁 선배님, 서재우·김현태·김병호 친구, 임춘호·나상훈·임재춘·오희주·최병남·허홍균·강준원·김대해·김석재·윤현주·정양준·이현석 후배님들 응원에 깊은 감사를 드립니다(감사합니다!).

따뜻한 마음씨를 가진 내 친구 윤영채·고재필·이복주·오명철, 보고 있어도 보고 싶은 송남석·박희주·박재주·이제광·송신종·박종주·송용훈·류희권·김도영·송금중·류점호·장호순·신세호·송석주·류정우·장계환·송금근·류숙현·박경화·신근영·정미정·신수현·송경미·송금숙·김소라·송방자, 항상 변함없는 김종필·송경성·노형기·김종연·김기분 등 많은 친구들에게도 감사에 마음 전하며 앞으로도 오랜 우정 계속되길 기원합니다(변치말자!).

항상 만나면 즐거운 최부식·이재경·최진선·정원복·배충환 형님 내외분들과 내 친구 김기준의 변함없는 사랑에 깊은 감사를 드리며, 운대교회 이명하 목사님, 풍암전원교회 변찬 목사님, 김윤근·손용담·채규진·신수현·조영상 장로님들과

교회 각 기관에서 봉사하시는 모든 분들께 감사드립니다(사랑합니다!).

사회생활 어려움 속에서도 도움을 주신 신화종합건설(주) 최홍사장님과 모든 임·직원들, 비봉건설(주) 김오봉·선종후사장님, 윤경호부장님, 김광현소장님, 김순미과장, 서림종합건설(주) 모주창사장님, 지성기획 김병률사장님, 금풍중기 주창수사장님, 대천조경 김선국사장님, 영진조경(주) 나영식사장님, 국제산업 손상훈사장님과 저에 직장 동료이자 친 동생 같은 송영진·김중현·김동수·백동인·박지훈·나선희 당신들의 사랑과 응원 잊지 않겠습니다(고맙습니다!).

마지막으로 항상 저를 믿어주시고 꿈을 꾸게 하신 어머니, 항상 기도해 주신 장모님, 아버지, 장인어른, 큰외삼촌을 비롯한 모든 친지 분들께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 우리 가족을 위해 헌신 봉사한 큰누나·큰형·작은형·작은누나·동생 가족들과 함께 기뻐해 줄 처남·처형·처제가족들에게도 깊은 감사를 드립니다. 사랑하는 나의 아내 류정란과 바르고 씩씩하게 자란 어진·예림·시온, 너희들의 믿음과 사랑이 있어 나는 꿈(목표)을 꾸며 그 꿈을 이룰 수 있습니다. 그래서 나의 삶이 더욱 행복합니다. 고맙고 사랑합니다(사랑합니다!).

“꿈은 꾸는 자의 것이고, 내일은 믿는 자의 것이다”라는 말처럼 항상 노력하고, 진취적인 사고로 훌륭하게 살겠습니다. 도와주시고 격려해 주신 모든 분들께 다시 한 번 머리 숙여 감사에 말씀 올립니다. 건강하시고 항상 행복한 삶, 도전하는 삶, 승리하는 삶 사시길 기원합니다. 감사합니다(아자! 아자! 화이팅!!!!).

2008년 12월 24일

조선대학교 공과대학 지반공학연구실에서

멋쟁이 / 靑岩 金日球 拜上

저작물 이용 허락서

학 과	토목공학과	학 번	20057395	과 정	박사
성 명	한글 : 김 일 구 한문 : 金 日 球 영문 : Kim, Ill-Goo				
주 소	광주광역시 서구 풍암동 동부센트레빌 107/106				
연락처	E-mail : kik1933 @ nate.com				
논 문 제 목	한글 : 퍼지-신경망에 의한 사면지반의 안정성 평가방법에 관한 연구				
	영문 : Assessment Method of Stability in Slopes by Fuzzy-Neural Network				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(0) 반대()

2009년 2월

저작자 : **金 日 球** (인)

조선대학교 총장 귀하