



## 저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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](#) 

2012年 8月  
석사학위논문

시료입경이 지오그리드로  
보강된 조립토의 전단거동 특성에  
미치는 영향

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

하 성 우

시료입경이 지오그리드로  
보강된 조립토의 전단거동 특성에  
미치는 영향

**Effects of Particle Size on the Shear Behavior of Coarse Grained  
Soils with Geogrid Reinforcements**

2012년 8월

조선대학교대학원

토목공학과

하성우

시료입경이 지오그리드로  
보강된 조립토의 전단거동 특성에  
미치는 영향

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 4월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

하 성 우

# 하성우의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박길현 (인)

위 원 조선대학교 교수 김운중 (인)

위 원 조선대학교 교수 김대현 (인)

2012년 5월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 국내·외 연구 동향 .....	3
1.3 연구방법 .....	6
1.4 연구범위 및 제한사항 .....	7
제 2 장 이론적 배경 .....	8
2.1 구조물의 파괴면에 따른 마찰형태 .....	8
2.2 조립토의 특성 .....	10
2.2.1 조립토의 입경 .....	10
2.2.2 조립토의 파쇄성 .....	10
2.2.3 전단강도의 영향인자 .....	11
2.2.4 조립토의 전단특성 .....	13
2.3 토목섬유 .....	15
2.3.1 토목섬유의 정의 .....	15
2.3.2 토목섬유의 종류 및 특성 .....	15
2.4 지오그리드의 현장적용성 .....	17
2.5 시험입도의 조제방법 .....	20
2.5.1 상사입도법 .....	20
2.5.2 전두입도법 .....	21
2.6 대형직접전단시험기 .....	22

제 3 장 실내실험 방법 및 절차 .....	23
3.1 실험 내용 .....	23
3.2 시료 준비 .....	23
3.3 실험 절차 .....	28
제 4 장 실험 결과 및 고찰 .....	31
4.1 응력-변형률 관계 .....	31
4.1.1 최대입경 4.75mm인 시료 .....	31
4.1.2 최대입경 7.9mm인 시료 .....	35
4.1.3 최대입경 15.9mm인 시료 .....	39
4.2 강도정수 및 파쇄율 .....	43
4.2.1 최대입경 4.75mm인 시료 .....	43
4.2.2 최대입경 7.9mm인 시료 .....	46
4.2.3 최대입경 15.9mm인 시료 .....	49
4.3 전단실험결과분석 .....	52
4.3.1 최대전단응력 .....	52
4.3.2 내부마찰각 및 점착력 .....	54
제 5 장 결론 .....	55
참고문헌 .....	57

# 표 목 차

표 2.1 상대밀도 및 내부마찰각의 관계 .....	11
표 2.2 토목섬유의 종류와 주요기능 .....	16
표 3.1 상사입도를 적용한 입도분포곡선의 Cu(균등계수) 및 Cg(곡률계수) .....	25
표 3.2 전단시험에 사용된 시료의 Cu(균등계수) 및 Cg(곡률계수) .....	26
표 3.3 기본물성실험 결과 .....	27
표 4.1 A시료의 강도정수 및 파쇄율 .....	45
표 4.2 B시료의 강도정수 및 파쇄율 .....	48
표 4.3 C시료의 강도정수 및 파쇄율 .....	51



# 그림 목 차

그림 2.1	토목섬유로 보강된 구조물의 파괴형태	8
그림 2.2	직접전단시험과 인발시험	9
그림 2.3	느슨한 모래와 조밀한 모래에서 전단변위-시료의 높이 변화 관계	12
그림 2.4	전단응력-변형률	14
그림 2.5	순수한 모래의 전단저항 각	14
그림 2.6	지오그리드의 도로 및 옹벽적용 예시	17
그림 2.7	지오그리드의 분리 기능	18
그림 2.8	상사입도 및 전두입도 조제방법	21
그림 2.9	대형직접전단시험기	22
그림 3.1	입도시험을 통한 입경분류	24
그림 3.2	상사입도를 적용한 입도분포곡선	25
그림 3.3	전단시험에 사용된 시료의 입도분포곡선	26
그림 3.4	물성치실험	27
그림 3.5	지오그리드를 전단상자에 설치	28
그림 3.6	입도분포곡선(시험 전, 후) 및 잔유율 곡선	30
그림 4.1	A시료의 응력-변형률 관계	32
그림 4.2	B시료의 응력-변형률 관계	36
그림 4.3	C시료의 응력-변형률 관계	40
그림 4.4	미보강된 A시료의 전단시험 전후 입도분포곡선	43
그림 4.5	연성그리드 보강된 A시료의 전단시험 전후 입도분포곡선	44
그림 4.6	강성그리드 보강된 A시료의 전단시험 전후 입도분포곡선	44
그림 4.7	A시료의 전단응력-수직응력의 관계	45
그림 4.8	미보강된 B시료의 전단시험 전후 입도분포곡선	46
그림 4.9	연성그리드 보강된 B시료의 전단시험 전후 입도분포곡선	47
그림 4.10	강성그리드 보강된 B시료의 전단시험 전후 입도분포곡선	47
그림 4.11	B시료의 전단응력-수직응력 관계	48
그림 4.12	C시료의 전단시험 전후 입도분포곡선	49
그림 4.13	연성그리드 보강된 C시료의 전단시험 전후 입도분포곡선	50
그림 4.14	강성그리드 보강된 C 시료의 전단시험 전후 입도분포곡선	50
그림 4.15	C시료의 전단응력-수직응력 관계	51
그림 4.16	전단응력 - 수직응력 관계	52

# ABSTRACT

## **Effects of Particle Size on the Shear Behavior of Coarse Grained Soils with Geogrid reinforcements**

**Ha, Sungwoo**

**Advisor : Prof. Kim, Daehyeon**

**Department of Civil Engineering**

**Graduate School of Chosun University**

In this study, large direct shear tests on three types of coarse grained soils (maximum particle sizes of 4.75mm, 7.9mm and 15.9mm, respectively) were performed to understand the effects of particle size on the shear behavior of coarse grained soils with/ without geogrid reinforcements.

In the case of coarse grained soil without geogrid, the maximum shear stress increased with an increase in normal stress for medium and large particle sizes. The volume change of the coarse grained soils was similar to that of dense sand, and the expansion of volume became larger with increasing normal stress.

The larger the particle size, the smaller the internal friction angle. The internal friction angle was in the range of 64% to 95% of the internal friction angle of the coarse grained soil without geogrid. Considering the fact that all the conditions were the same for different particle sizes, the difference in the shear behavior of coarse grained soils with geogrid reinforcement results from the discrepancy in the particle size.

The cohesion of the soil reinforced with stiff geogrid is 37~50% larger than that of the soil reinforced with soft geogrid. This difference is because the case with stiff geogrid has more soil to geogrid contact area, leading to the reduction in interlocking between soil particles.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

자갈 등과 같은 조립토는 국내의 많은 건설현장에서 사용되고 있는 기본재료이며, 사력댐, 항만시설, 원자력폐기물 저장소, 구조물 성토재료, 철도 및 도로 노반재료 등에 사용되고 있다. 하지만 이처럼 사용되고 있는 분야가 방대하지만, 이들 조립토의 특성 규명을 위한 연구들이 국내에서는 매우 미미한 실정이다.

조립토는 다른 지반재료와는 공학적 특성에 많은 차이를 보이고 있으며, 특히 모암의 종류, 입자의 크기, 시료밀도 및 다짐에너지에 따른 입자의 파쇄 등에 의해 다른 지반 재료와는 많은 차이를 보인다. 조립토를 포함하는 지반의 거동은 큰 입자의 영향에 의해 기존의 토질역학 이론으로는 그 특성을 설명하기 곤란하며, 기본적인 성질에 대한 자료가 부족한 경우가 많아 이에 대한 시험적 연구가 더욱더 필요하다.

지반 구조물의 축조 시 이에 대한 정확한 해석과 안전한 설계를 위해서는 사전에 해당 재료에 대한 강도정수 및 변형계수의 확보가 필수적이다. 그러나 현재까지 국내에서는 시험장비의 제약 등으로 인하여 시험을 통해 실제 필요한 값을 직접 얻기보다는 기존 문헌 등에서 제시된 값들을 이용하여 해석 및 설계에 활용하는 경우가 대부분이다. 또한, 입경의 크기에 따른 전단강도의 영향은 모래의 경우 큰 차이가 없다고 알려졌다(Lambe, 1969), 입경이 큰 조립토의 경우에는 학자 간에 많은 이견이 발생되고 있는 실정이다. 이는 시험환경에 따라 결과가 다르다는 것을 의미하고 있으므로 이에 대한 대책으로 자료의 축적과 상세 분석이 필요할 것으로 판단된다.

최근 들어 소수의 대형 지반시험장비가 구축됨에 따라 비교적 입경이 큰 조립토에 대하여 지반시험을 수행하여 강도정수를 산정하는 사례가 증가하고 있으나(김범주 등, 2005; 서민우 등, 2006; 이대수 등, 2008), 대형 지반시험 장비를 이용한다 하더라도 장비에 허용되는 조립토의 최대입경은 일반적으로 실제 현장에서 시공되는 최대입경에 비해 매우 작으므로 대부분 실제 최대입경을 해당 시험장치의 가용크기까지 축소해 시험을 수행하게 된다. 최대입경이 축소된 조립토의 전단거동 특성은 실제 크기의 조립토와 동일하지 않은 것으로 알려져 왔으나, 그 차이나 영향에 관해서는 아직 국내·외 연구자들 사이에서 일관된 결론을 얻지 못하고 있다. 특히 국내에서는 크기별 시험장치 구비의 한계로 이와 관련된 연구사례는 극히 미비한 실정이다.

현재로서는 실제 시공되는 재료에 대한 정확한 강도 및 변형특성을 알 수 없으므로 상사입도 적용 시 발생할 수 있는 실제 거동과의 차이를 정확하게 판단하기는 불가능하다. 특히 상사입도를 적용하여 수행된 시험결과를 설계에 활용하기 위해서는 이러한 실제입도 재료와 상사입도 재료 사이에 존재할 수 있는 강도 및 변형특성 차이를 파악하는 것이 매우 중요하다.

국외에서는 조립토에 대한 응력-변형특성 분석을 위한 연구를 주로 대형삼축압축시험을 이용하여 오래전부터 수행해왔다. 반면 대형직접전단시험은 시험에 드는 시료의 크기와 노력을 고려할 때, 실내시험이 이루어진 경우가 많지 않으며, 시험결과의 활용면에서도 시험의 본질적인 특성상 전단강도의 산정에 치중되어, 삼축압축시험에서와 같은 체적팽창을 포함한 응력-변형률 관계의 체계적 분석은 시도된 바가 극히 드물다. 또한, 시험규모 및 준비에 따른 노력도 등의 어려움으로 인하여, 대형직접전단시험 및 대형삼축압축시험 등을 이용한 시험결과간의 상호 비교분석도 이루어진 바가 흔하지 않다. 일반적으로 직접전단시험은 정밀도가 삼축압축시험에 비해 떨어진다고 알려졌으나, 그 활용도는 대단히 높은 상황이다. 실무적인 측면에서는 두 가지 대형시험법의 장단점을 고려하여, 현장 상황에 맞는 시험법을 선정하여 활용하거나, 여건이 허락한다면 두 시험을 동시에 사용하여 그 결과치를 비교 분석하는 것이 최선의 방법이라 할 수 있다.

국내에서는 최근에 대형전단시험기가 보급되기 시작하였으며, 시험절차도 표준화되지 않은 점을 비추어 볼 때, 관련 연구가 극히 부족한 대형직접전단시험분야의 연구는 반드시 수행되어 시험절차와 해석방법 등이 정립되어야 하며, 이를 통하여 대형직접전단시험의 신뢰도를 한 단계 높여 대형전단시험의 활성화 및 지반구조물의 최적설계에 기여하여야 할 것이다(이대수, 2008).

대형직접전단시험 설비의 미비로 조립토의 설계정수들의 산정에서 시험에 의존하지 않고, 외국에서 수행된 실험값이나 기존문헌에 의존하여 구조물의 설계를 수행한다. 이에 따라 구조물의 안정성에 대한 명확한 판단 기준을 가지지 못하고, 계획구조물에 대해 안전 측의 강도 및 변형특성을 적용하여 구조물을 설계하게 되므로 과다설계 때문에 공사비 증액 요인이 발생할 가능성이 높다.

본 연구의 목적은 최대입경의 차이가 조립토의 전단거동에 어떠한 영향을 미치는가를 이해하기 위함이다. 응력변형률 관계 및 체적변화의 차이를 파악하고자 최대입경이 다른 세가지 조립토(4.75mm 7.9mm와 15.9mm)를 상사입도법을 이용하여 시료를 준비하여 미보강된 시료와, 연성그리드로 보강된 시료, 강성그리드로 보강된 시료에 대하여 대형직접전단시험을 수행하여 실험결과를 분석하였다.

## 1.2 국내·외 연구 동향

먼저 국외의 연구동향을 살펴보면, Bergado(1993) 등은 강철 그리드, 대나무 그리드와 지오그리드의 전단거동에 대해 분석하고자 대형인발 및 직접전단시험기를 이용하여 시험을 수행하였으며, 시험결과 강철 그리드는 지오그리드보다 최대전단응력에 도달하였을 때 작은 변위의 값을 나타내었고, 연결점이 제거된 지오그리드와 제거되지 않은 지오그리드를 비교하여 10%정도의 인발저항력의 차이가 있음을 증명하였으며, 그리드의 구멍 크기에 의해 흙-흙보다 흙-지오그리드의 전단강도는 크거나 같을 수 있다고 보고하였다.

Feda(2002)는 조립재료를 가지고 삼축압축시험과 직접전단시험, 압밀시험을 수행하여 골재파쇄의 영향을 분석하였다. 실험결과, 골재의 파쇄 때문에 응력-변형률 곡선이 불규칙한 비선형성을 띠게 됨을 보였고, 파쇄율은 응력 이력과 하중 및 지속시간에 영향을 받음을 보여주었다.

Varadarajan(2003) 등은 사력댐 재료의 전단 특성을 분석하고자 대형삼축압축시험기를 이용하여 시험을 수행하였으며, 시험결과 둥근형상의 재료보다는 모난 재료에서의 파쇄율이 입자 간 interlocking에 기인하여 더 크게 나타났다. 또한, 입경이 클수록 내부마찰각이 크거나, 작아질 수 있음을 보여주었고, 구속압이 클수록 축차응력, 파괴 시 체적변화율, 파괴 시 축 변형률이 증가함을 보여 주었다.

Yoshida(2004)는 수침된 쇄석에 대해 직접전단시험을 통하여 전단강도가 크게 저하함을 보였고, 수침된 쇄석과 건조된 쇄석의 전단거동 차이는 골재의 고결(cementation)과 엇물림의 변화에 기인한다고 보고하였다.

Daehyeon Kim(2005)은 화강토에 대해 삼축압축시험과 직접전단시험을 수행하였으며, 각 시험 결과 및 시험 전후의 입도시험을 통해 파쇄율을 산정하여 전단강도, 전단 변형, 체적변형 등에 영향이 있다고 보고하였다.

국내에서는 몇몇 대형지반시험장비가 구축됨에 따라 비교적 큰 조립토에 대한 전단 시험이 수행되고 있다. 송신석(1999)은 유리섬유 지오그리드와 PET 지오그리드를 직접전단시험 및 인발시험을 통하여 흙-보강재의 마찰특성을 비교하기 위해 연구를 수행하여 차이점을 규명하였으며, 박종범(2004)은 인발시험상자크기에 따라 흙-띠형 보강재와 흙-지오그리드 보강재의 전단거동특성에 미치는 영향을 인발시험을 통해 연구

를 수행하였다. 시험결과 작은 인발상자가 작은 경우가 큰 경우에 비해 인발력이 작은 값을 보였으며, 이러한 차이는 인발상자에 받는 수직응력에 따라 발생한다고 보고하였다.

장용채(2005) 등은 흙-연성그리드의 마찰특성을 분석하기 위해 표준사를 이용하여 상대밀도를 조절하여 대형직접전단시험을 수행하였다. 시험결과 연성그리드로 보강을 함으로써 흙-흙의 내부마찰각보다 흙-그리드의 내부마찰각이 크게 나타났으며, 최대전단응력에 대한 전단변형률이 감소한다고 보고하였다.

길성국(2005)은 보강토옹벽의 화강풍화토를 사용한 뒷채움흙과 보강재인 지오그리드(연성/강성그리드)사이의 마찰특성을 평가하기 위해 인발시험을 수행하였다. 시험결과 지오그리드가 인발될 때, 토목섬유 내에 유발되는 인발력의 분포는 지오그리드 전면부에는 상당히 큰 인장력이 분포한 반면, 후면부에는 인장력이 떨어지고, 인발저항각은 인장강도가 큰 지오그리드일수록 인발저항각이 크고 연성지오그리드보다는 강성지오그리드의 인발마찰력이 크다고 보고하였다.

김범주(2006) 등은 댐 축조재료를 대상으로 최대입경을 각각 50, 30, 20mm로 달리하면서 상사입도를 구성한 후 대형삼축압축시험을 실시하여 최대입자크기에 따른 전단강도 및 변형 특성을 평가하였으며, 시험결과 동일 조건에서 입자크기가 감소할수록 dilatation이 점차 증가하고 변형률 연화 현상이 두드러졌으며, 결과적으로 최대 전단강도가 다소 증가하여 전체적으로 조밀한 사질토와 유사한 경향을 보인다고 발표하였다.

이대수(2006) 등은 대형직접전단시험을 통해 조립재료를 사용하여 최대 입자크기와 입도 분포가 전단특성에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 시험결과, 전단시 입자상호간의 인터록킹(interlocking)에 의한 전단저항이 발생하기 전에 입자의 파쇄가 먼저 발생하여 최대입경이 커질수록 파쇄율은 더 커지고, 내부마찰각은 감소한다고 보고하였다. 그리고 동일한 최대입도에서 균등계수가 작을 때(빈입도, poorly graded) 약간 큰 마찰각을 보였다고 보고하였다.

서민우(2007)는 원입도와 상사입도 사시에 존재하는 조립재료의 강도 및 변형특성 차이를 파악하기 위해 2종류의 조립재료에 축소비를 달리하여 상사입도를 구성한 후 이들에 대하여 각각 크기별 3종류의 대형, 중형 및 소형 삼축압축시험을 수행하였다. 시험결과 입자크기의 차이는 전단강도보다는 탄성계수와 파괴변형계수와 같은 변형특성에 더 크게 영향이 미친다고 보고하였다.

서민우(2009) 등은 동일한 조립토에 대하여 대형삼축압축시험과 대형직접전단시험을 수행하여 두 시험간의 차이를 평가하였으며, 직접전단시험의 전단상자 크기와 시료입

자 크기가 증가할수록 전단강도비( $\tau_{\text{대형삼축압축시험}}/\tau_{\text{대형직접전단시험}}$ )가 감소한다고 보고하였다.

김광일(2009) 등은 최대입경의 변화에 따른 상사입도시료의 응력-변형특성, 전단강도 특성을 비교하기 위해 댐 축조시료인 하상 사력재에 대해 최대입경을 달리하여 재구성한 상사입도시료를 대상으로 같은 상대밀도로 공시체를 제작하여 대형삼축시험을 수행하였다. 시험결과, 조립재료는 전단과정에서 응력연화 및 체적팽창 거동을 나타내고, 상사입도 시료의 최대입경이 증가할수록 그 현상이 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 내부마찰각, 전단강도는 상사입도 시료의 최대입경이 증가함에 따라 증가한다고 보고하였다.

이정훈(2011)은 부직포, 지오그리드, 지오컴퍼지트에 대해 흙-보강재 접촉면의 전단 거동 특성을 분석하기 위해 직접전단시험 및 인발시험을 수행하였으며, 직접전단시험 결과 마찰효율계수는 지오그리드, 지오컴퍼지트(지오그리드+부직포), 부직포 순으로 0.85, 0.81, 0.68이 나타나 기존의 연구결과를 참고하여 시험결과의 안정성 여부를 판단하였다. 인발시험결과에서는 구속압이 증가할수록 재료에 관계없이 인발저항력이 증가하였지만, 부직포의 경우 신장성이 큰 부직포의 재료 특성상 토체내 구속된 재료가 인발되는 길이보다 하중에 의한 재료의 변형이 크게 작용하여 구속압의 증가에 대한 인발저항력의 증가비가 지오그리드 및 지오컴퍼지트에 비해 매우 작게 나타났다고 발표하였다.

그러나 아직도 국내에 분포하는 조립토를 대상으로 수행된 대형전단시험 사례는 부족한 실정이며, 또한 시험기 규모를 달리하여 입자크기 영향을 파악한 사례는 거의 보고된 바 없다. 따라서 다양한 크기의 지반시험 장비를 이용하여 입자크기와 국내 조립토의 전단특성의 관계를 명확히 정립하기 위해서는 앞으로도 많은 시험사례가 요구된다. 또한 현재 지오그리드의 관한 연구는 인발시험보다 대형직접전단시험을 이용하여 흙-보강재 접촉면의 마찰특성에 대해 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지오그리드(연성/강성그리드)로 보강된 조립토의 전단거동 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 대형직접전단시험을 수행하였다.

## 1.3 연구방법

본 연구에서는 최대입경이 다른 3가지 시료와 지오그리드 간에 접촉면에서 일어나는 전단강도 특성을 파악하기 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- 1) 시험에 사용될 시료의 최대입경은 4.75mm, 7.9mm, 15.9mm로 선정 후 상사입도법을 이용하여 시료를 조제하였다.
- 2) 대형직접전단시험기를 통해 흙-지오그리드의 접촉면에 대한 전단강도특성을 시료별, 보강 및 미보강에 따라 비교분석하여 선행연구와 비교를 하였다.
- 3) 실험결과분석은 전단응력과 전단변형률 곡선에서 최대점을 구한 후 최대전단응력-수직하중의 관계를 이용하여 내부마찰각과 점착력을 도출하였으며, 보강 및 미보강된 조립토의 내부마찰각을 이용하여 마찰효율을 산정하고 비교분석하였다. 최대전단응력이 뚜렷하게 보이지 않을 경우 전단변형률 15%일 때 최대점으로 선정하였다.
- 4) 전단시험 전·후로 입도시험을 통해 입도분포곡선을 그린 후 과쇄율을 산정하여 비교분석 하였다.



## 1.4 연구범위 및 제한사항

본 연구에서는 다음과 같은 조건으로 연구를 수행하였다.

- 대형직접전단시험의 절차는 ASTM이나 KSF에서 규정하고 있는 소형직접전단시험의 절차를 따랐으나, 시료의 준비 등 전반적인 시험절차는 문헌자료를 참조하여 본 연구의 목적에 맞게 새로이 수립한다.
- 미보강된 경우에 전단강도 산정 시 조립토의 실무적인 설계차원에서 점착력은 배제하기 위해 연구에 사용된 시료는 #200체 통과된 시료는 사용하지 않고 내부마찰각만 비교의 대상으로 삼았다.
- 흙-지오그리드의 접촉면에서 발생하는 점착력은 지오그리드를 보강된 경우 전단강도 산정 시 고려하였다. 실험결과와 분석 시 전단응력의 최대치가 산출되지 않을 경우, 전단변형률 15%에서의 응력 값을 강도 산정에 사용한다.
- 파쇄율을 산정하기 위하여 시험 후에도 체분석 시험을 하며, 파쇄율은 Marsal(1967)이 제안한 수정 파쇄율 방법을 사용한다.
- 전단시험 시 수평 변위는 하부 전단 상자 측벽의 중앙에서 계측하고, 수직 변위는 상부 가압 판의 중앙에서 계측한다.
- 대형직접전단시험을 위한 전단 상자의 규모는 30cm(W) × 30cm(L) × 16.5cm(H)이다. 시험에 사용된 시료는 4.75mm, 9.5mm, 15.9mm의 최대입경으로 상사입도법을 적용하여 혼합한 후 시험을 수행한다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 구조물의 파괴면에 따른 마찰형태

그림 2.1은 일반적인 구조물의 파괴면에 따른 파괴형태를 보여주고 있다. 이와 같은 구조물에서 가상활동면을 따라 파괴가 일어날 경우 발생할 수 있는 마찰형태는 크게 3가지로 나눌 수 있다. 그림 2.1에서 점선은 파괴가상활동면을 나타내며, A지점의 마찰 특성은 전단시험의 마찰방식과 유사하고, B지점은 인발시험의 마찰방식, C지점은 경사진 보강재에 대한 전단시험의 마찰방식과 유사하다. 이상과 같이 흙 속에 포설되어 있는 보강재를 대상으로한 마찰특성평가방법 중 대표적인 시험방법으로 서로 다른 상호작용 계수의 영향을 받는 직접전단시험과 인발시험을 들 수 있다.

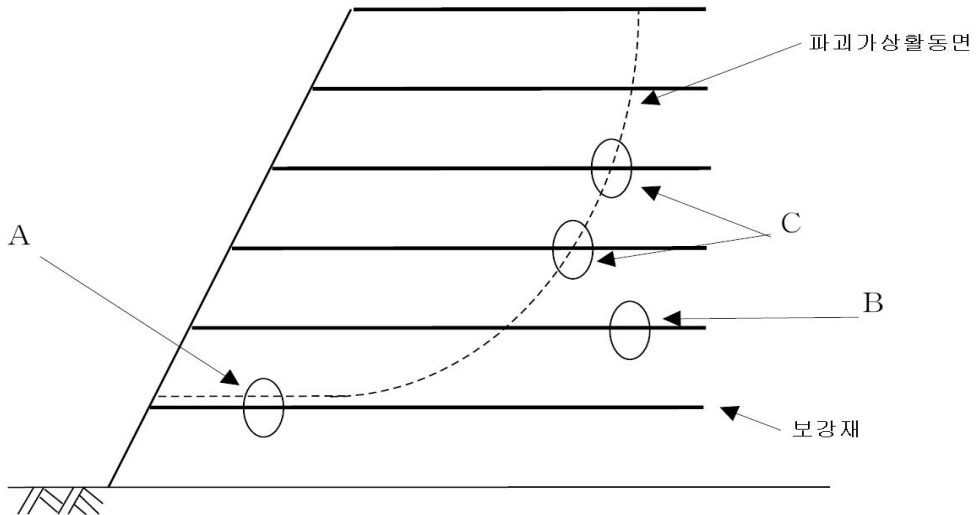
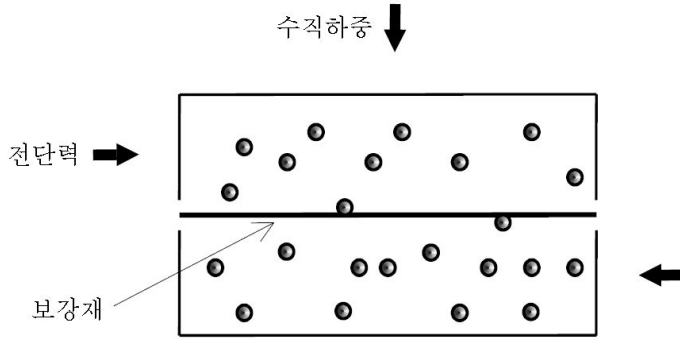
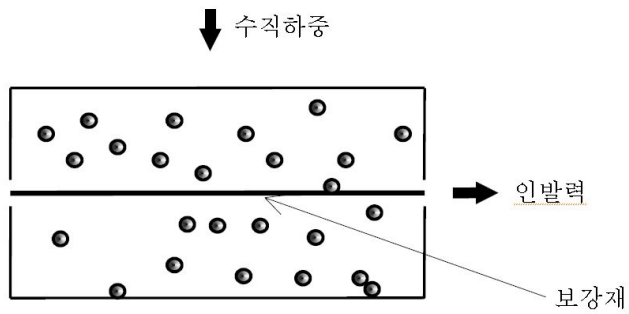


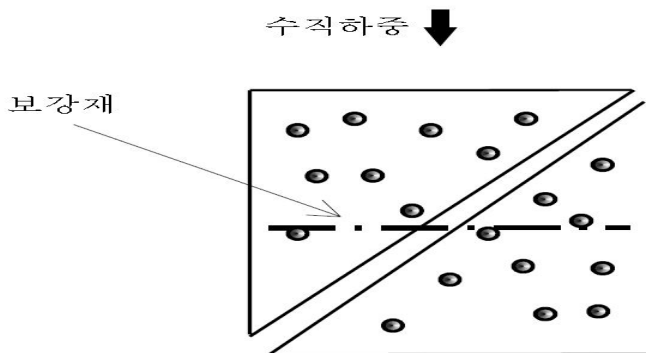
그림 2.1 토목섬유로 보강된 구조물의 파괴형태(백중현, 2003)



(a) A지점의 전단거동



(b) B지점의 전단거동



(c) C지점의 전단거동

그림 2.2 직접전단시험과 인발시험(백중현, 2003)

## 2.2 조립토의 특성

### 2.2.1 조립토의 입경

조립토는 모래보다 입자의 크기가 크다. 모래의 일반적인 크기는 0.075mm ~ 4.75mm 사이의 크기를 말하고 조립토는 이를 포함하여 최대입경의 크기가 1,000mm 범위까지 분포하고 있다. 이처럼 큰 입자를 포함하는 조립토는 그 강도와 변형특성을 도출하기가 쉽지 않다. 모래 정도의 입자크기를 갖는 재료에 대한 시험법은 이미 많은 연구를 통해 표준화되어 있지만, 조립토와 같이 큰 입경을 갖는 재료에 대한 연구 및 시험설비의 규격은 표준화되어 있지 않다. 이는 입경이 크고 시험설비를 갖추는 데에 고가의 비용이 소요되기 때문이며, 이에 대한 연구도 국내에서는 그 실적이 미미한 편이다. 일반적으로는 큰 입경의 시료를 그대로 사용하는 것이 불가능하므로 시료의 크기를 일정비율로 축소한 다음 실험을 실시한 후 실험결과로부터 실제 재료의 역학적 특성을 유추해야 한다. 따라서 실제 크기의 재료와 축소시료와의 사이에 전단거동이 어떠한 변화를 발생시키는지에 대한 고찰이 항상 수반되고 있다.

### 2.2.2 조립토의 파쇄성

조립토의 특성중 하나는 “파쇄성”(crushing or breakage)이 있다는 것이며, 재료의 시험 시 다짐, 전단 등의 외부하중에 의해 골재가 부서지는 현상을 말한다. 이 성질은 조립토의 전단거동에 매우 큰 영향을 미치며, 이를 위하여 파쇄되는 정도를 나타내는 파쇄율의 측정이 필요하게 된다. 이는 입경이 커질수록 입경에 가해지는 하중이 증가하여 낮은 구속압에서부터 입자파쇄가 발생하기 때문이다. 조립토는 구속압이 높은 상태(2MPa이상)의 시험결과, 파쇄율이 전단강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 보고된 바 있으며(Yamamuro와 Lade, 1996), 입자가 큰 조립토의 경우 골재의 형상, 크기, 밀도, 압축강도 등에 영향을 받는다(Marsal, 1967).

보통의 경우 흙 입자는 압축력에 대한 저항이 커서 상당히 큰 압축하중이 작용하지 않는 한, 압축에 의한 파괴는 흔한 현상이 아니다. 따라서 흙 입자의 강도는 마찰력에 의하여 발생하는 전단강도가 가장 큰 의미를 갖게 된다.

이러한 파쇄성 때문에 조립토 중에서도 모래와는 다른 역학적 특성을 보이게 된다.

또한, 조립토가 가지고 있는 파쇄성은 다짐특성에 상당한 영향을 주게 되는데 다짐 시 입자의 파쇄는 과다짐 현상과 동일한 효과를 나타내어 오히려 재료의 강도가 줄어드는 현상도 발생하게 된다.

### 2.2.3 전단강도의 영향인자

조립토의 전단강도는 여러 가지 인자들에 의하여 영향을 받는다.

- ① 흙의 특성(입도분포, 시료 입경, 함수량, 밀도, 파쇄율 등)
- ② 하중조건(구속압, 응력 이력 등)
- ③ 시험방법(직접전단시험, 삼축압축시험 등)

전단강도는 이러한 인자들과 밀접한 관계가 있으며, 특히 구속압 조건, 입자 간의 마찰력, 전단 시 발생하는 체적팽창(dilatancy), 파쇄율 등은 조립토의 전단강도에 큰 영향을 미친다.

#### 가. 상대밀도(relative density)

현장에서 사질토의 단단한 정도와 느슨한 정도를 나타내는데 이를 “상대밀도(relative density)”이라 칭한다. 상대밀도의 값은 흙이 가장 느슨한 상태일 때의 최소값 0%로부터 가장 조밀한 상태일 때의 최대값 100%가 되며, 상대밀도가 클수록, 간극비가 작을수록 내부마찰각은 커진다.

표 2.1 상대밀도 및 내부마찰각의 관계

상대밀도(%)	흙의 상태	내부마찰각( $\phi$ )	
		Peck(°)	Meyerhof(°)
20 이하	매우 느슨	25.5 이하	30 이하
20 ~ 40	느슨	28.5 ~ 30	30 ~ 35
40 ~ 60	보통 조밀	30 ~ 36	35 ~ 40
60 ~ 80	조밀	36 ~ 41	40 ~ 45
80 이상	매우 조밀	41 이상	45 이상

나. 마찰력

조립토는 외력이 작용할 경우, 입자 간의 마찰에 의한 저항력이 발생하여 안정을 유지한다. 즉, 입자 간의 미끄러짐(전단)에 대항하는 수단이 입자 접촉면에 작용하는 수직력에 비례하여 발생하는 마찰저항력(전단강도)으로서, 이의 크기를 산정하는 것이 중요한 작업이 된다.

다. 체적팽창(dilatancy)

조립토에 외력이 작용할 경우, 입자 간에 미끄러짐이 발생하며, 조립토의 형상이 입상체이기 때문에 입자 간에 타고 넘는 현상(rolling over)이 발생하며 이를 "체적팽창(dilatancy)"이라 칭한다. 이 체적팽창현상은 조립토를 다른 지반재료와 구별 짓는 중요한 현상으로서, 즉, 전단 중에 외부에서 가해진 에너지 일부는 시료의 체적팽창에 사용되므로, 체적팽창에 사용된 에너지와 그 나머지의 에너지를 구별해보고자 하는 시도가 있었다. 또한, 입자가 전단변형을 받는 과정에서 체적변화에 의한 변형과 체적변화를 수반하지 않는 입자구조의 변화를 "재배열(re-arrangement)"이라 한다. 이에 따라 입자 간의 마찰력이 크게 작용하고, 체적팽창과 재배열이 크게 나타나는 재료는 일반적으로 전단강도가 크며, 반대로 파쇄율이 높은 재료는 전단강도가 저하된다.

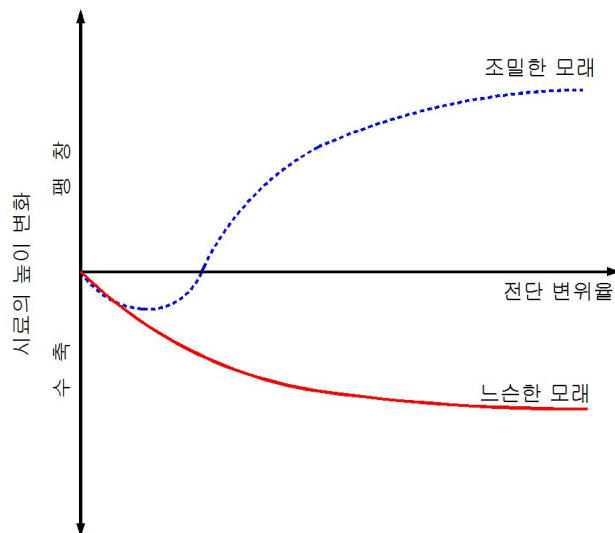


그림 2.3 느슨한 모래와 조밀한 모래에서 전단변위 - 시료의 높이 변화 관계

라. 파쇄성

조립토의 경우 전술한 바와 같이, 입자 간의 마찰력이 크고, 체적팽창이나 재배열 효과가 크면 전단강도가 일반적으로 증가한다. 또한, 입자의 파쇄율이 높은 경우에는 전단강도가 감소한다. 따라서 조립토의 전단강도의 산정 시에는 시험 전후의 입도 변화를 산정하여 파쇄율을 정량화하는 작업이 시험자료의 해석에 긴요하게 사용된다.

마. 구속압 의존성

조립토의 전단강도는 입상체 재료의 마찰력 혹은 맞물림(interlocking) 등에 큰 영향을 받으므로 파괴면 상의 수직응력(구속응력)에 지배된다. 모래는 많은 학자가 전단강도(내부마찰각)의 구속압 의존성을 실험적으로 규명하였으며, 입경이 큰 조립토의 경우도 구속압에 따라 일반적으로 내부마찰각이 저하되는 현상을 보인다. 따라서 구조물의 설계 시 자중이 큰 지반구조물의 경우, 설계강도를 과대하게 평가할 경우, 구조물의 위험도가 증가할 수가 있으므로 조립토의 구속압 의존성은 중요한 의미를 갖게 된다.

## 2.2.4 조립토의 전단특성

가. 사질토의 극한전단응력

그림 2.4와 같이 느슨한 모래의 전단응력은 최대치에 도달할 때까지 전단변위에 따라 증가하며, 그 후에는 일정한 값으로 된다. 조밀한 모래는 변위가 증가하는 동안 전단응력은 빠른 속도로 증가하여 최대값을 보이며, 그 후에는 전단응력은 오히려 감소하다가 결국은 느슨한 모래의 전단응력과 거의 일정한 값이 된다. 따라서 동일한 사질토의 극한 전단응력은 다져진 상태와 상관없이 거의 일정한 값을 보인다.

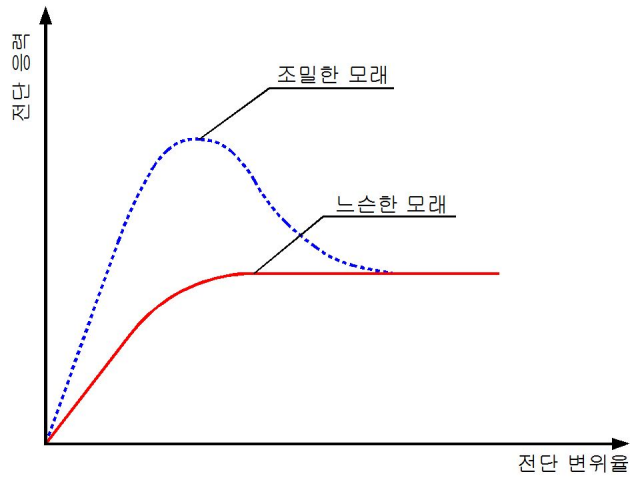


그림 2.4 전단응력-변형률

나. 사질토의 전단저항각

조밀한 모래는 느슨한 모래에 비하여 상대밀도가 크므로 느슨한 모래에 비해 전단저항 각이 크고, 수분을 포함되어 있는 가는 모래에 대해 시험을 하면 모관작용으로 인한 영향 때문에 약간의 점착력을 가질 수 있으므로 Mohr-coulomb 선은 원점을 통과하지 않는다.

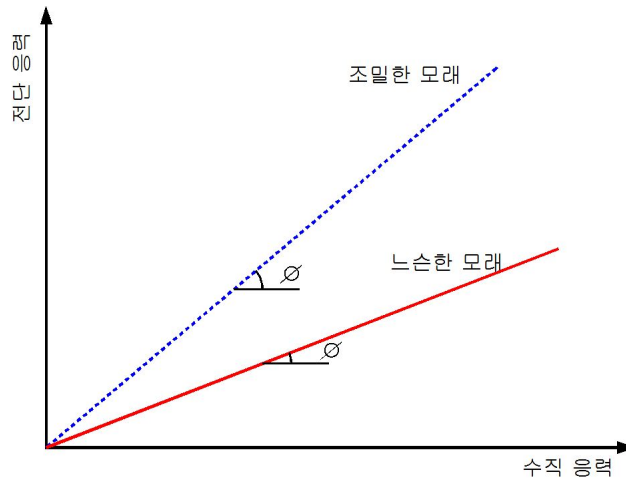


그림 2.5 순수한 모래의 전단저항 각



## 2.3 토목섬유

### 2.3.1 토목섬유의 정의

토목섬유(geosynthetics)란 토목공사 시 배수, 분리, 보강, 필터 등의 용도로 지반 내 설치하는 고분자 재료의 섬유제품을 말하며 이러한 제품을 1986년 국제 토목섬유 학술회의(IGS)에서 geosynthetics란 용어가 사용되었다. 국내에서는 1970년대 주로 지오텍스타일 제품의 시공이 이루어지면서 토목섬유라는 명칭이 사용되고 있다.

사실 토목섬유의 사용은 아주 오래전으로 거슬러 올라가 그 기원을 살펴볼 필요가 있다. 우리나라에서는 황토를 이용해 전통가옥을 축조할 때 흙의 전단강도를 높이기 위하여 새끼줄을 사용한 경우를 비롯하여 고대 바빌로니아의 Ziggural 신전과 중국의 만리장성에서도 구조물 내 섬유 사용의 흔적을 찾아볼 수 있다. 건축기술의 개발과 함께 과거 토목섬유 역할을 하던 나무뿌리, 갈대 다발 등의 천연재료가 PET, PP, PVC, PA 등의 고분자 재료로써 대체 되어 구조물의 내구수명을 연장하고, 공사기간을 단축해 경제적인 효과를 창출할 수 있게 되었다. 또한, 보강용도 이외의 배수, 분리, 여과, 차수 등의 다양한 기능으로 그 활용도가 증가하고 있다.

### 2.3.2 토목섬유의 종류 및 특성

토목섬유제품과 고분자 재료를 표 2.2에 나타내었으며 물성 개선 및 보완용 첨가제로는 내부충전제와 산화방지제, 카본 블랙, 유제, 가소제 등이 이용된다. 한편, 지오텍스타일의 원료로는 폴리프로필렌과 폴리에스터가 주로 사용되며, 지오멤브레인의 원료로는 주로 고밀도 폴리에틸렌(High density polyethylene)이 사용되며 클로로네이티드 폴리에틸렌(chlorinated polyethylene), 클로로술포네이티드 폴리에틸렌(chlorosulphonated polyethylene), 에피클로로 하이드린(epichlorohydrin), 폴리비닐 클로라이드(polyvinyl chloride), 폴리프로필렌(polypropylene) 등이 사용되기도 한다.

한편, 고분자의 특수한 성질 향상을 위해 산화방지제, 카본오 블랙, 오일, 가소제, 충전제 등이 첨가되며, 특수한 성질을 향상하기 위해 두 가지 또는 그 이상의 원료를 제품화하기도 한다. 토목섬유를 장기간 적용할 경우, 내구성은 사용되는 고분자 재료의 특성에 좌우되므로 그 특성을 분석하여 토목섬유를 제조하고 그 용도를 결정하는 것이

매우 바람직하다.

표 2.2 토목섬유의 종류와 주요기능(이정훈, 2011)

종류		형태	주요소재
지오텍스타일 (geotextile)	직포 (woven geotextile)	장섬유사, 모노 장섬유사, 평사 등을 사용하여 날줄과 씨줄을 직각으로 교차하며 엮어서 만든 형태(기본형태:평직, 능직, 주자직)	PET, PP
	부직포 (nonwoven geotextile)	잠섬유사와 단섬유들을 일정한 방향없이 배열시켜놓고 평면적으로 함께 결합시킨 형태(결합방식:니들펀칭, 열융합, 스펀본딩, 화학적 결합)	PET, PP
지오그리드 (geogrid)		폴리머를 판상으로 압축시키면서 격자모양의 그리드 형태로 구멍을 내어 특수하게 만든 후 여러 모양으로 연신한 형태	PET, PP, PE, PVC코팅
지오네트 (geonets)		일정한 각도(보통 60°~90°)로 교차하는 2세트의 평행한, 거친 가닥들로 구성되며 교차점의 가닥들은 용해, 접착된 형태	PE, HDPE
지오매트 (geomats)		꼬불꼬불한 모양의 다소 거칠고 단단한 장섬유들이 각 교차점에서 접착된 형태	PP, Vinyl
웨빙 (webbings)		넓은 폭(보통 3~6cm)의 대상으로 된 매우 거친 직포의 형태	HDPE
지오멤브레인 (geomembrane)		용융된 폴리머를 밀어내어 정형시키거나, 폴리머 합성물로 fabric을 코팅하거나, 폴리머 합성물을 압착시켜 성형된 판상의 형태	HDPE, PVC, VLDPE, CSPE, urethane, CPE
복합포 (geocomposites)		2종류 이상의 토목섬유가 중첩되어 사용된 형태	

## 2.4 지오그리드의 현장적용성

지오그리드는 일반적으로 도로, 철도, 제방, 사면, 옹벽, 교량, 기초 그리고 폐기물 매립장 등 그 사용범위가 매우 광범위하여, 지오텍스타일 등의 토목섬유와 함께 복합적으로 사용되기도 한다.

지오그리드의 도로분야의 적용을 살펴보면, 그림 2.6와 같이 연약지반 상에 비포장도로를 개설할 때 연약지반과 골재층 사이를 보강하여 지지력을 향상시켜 건설장비의 교통하중을 확보하는 방법이 있으며, 골재층 사이에 설치하여 골재층의 포설두께를 줄이면서 지지력을 확보하는 방법이 있다. 또한, 도로포장에서 국내의 도로는 많은 경우 중차량의 과도한 주행 때문에 아스팔트 포장 상단 면에 러팅현상이 발생하는 경우를 확인할 수 있다.

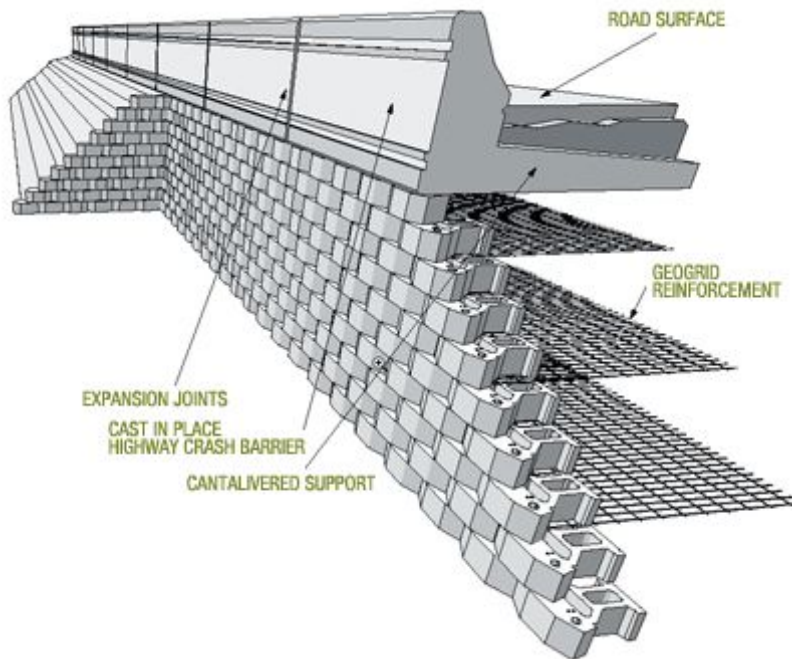


그림 2.6 지오그리드의 도로 및 옹벽적용 예시(URITEC, 2012)

이 경우 아스팔트와 기층사이 콘크리트 포장에서 콘크리트 포설단면 하단과 기층사이에 지오그리드로 포설하면 포장단면의 변형이나 균열을 방지하여 견고한 도로 포장

구조를 갖추게 된다.

철도궤도가 연약지반을 통과할 시 연속적인 동하중의 작용으로 자갈도상과 노상층이 혼합되어 머드펌핑(mud pumping)으로 인한 지지층의 파괴를 유발할 수 있다. 이 경우 기층 지반보강재로 지오그리드를 노상층과 자갈 도상층 사이에 포설하면 지지력을 확보함과 동시에 그림 2.7와 같이 분리기능을 수행하여 머드펌핑(mud pumping)을 방지할 수 있다.

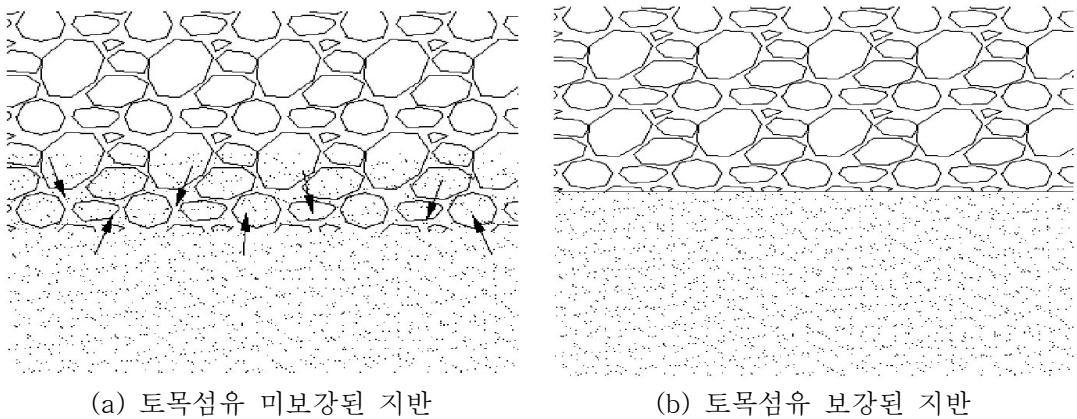


그림 2.7 지오그리드의 분리 기능

제방 및 사면분야의 적용을 살펴보면, 해안제방이나 사면의 축조 시 지오그리드를 보강하여 성토함으로써 흙 입자 간의 전단강도를 증대하고, 지오그리드의 마찰력을 활용하여 이른 시일 안에 보강 및 기능을 수행하여 제방이나 사면의 안정을 취할 수 있다. 또한, 파괴사면의 경우 복구 작업이 어려운 문제점이 있으나, 지오그리드를 활용하면 이른 시일 안에 부분적인 보수 및 보강을 할 수 있으며, 사면의 연직 또는 수평 보강 또한 가능하다. 그리고 연약지반 위의 제방을 위한 3차원적 매트리스 역할까지 수행이 가능하다.

옹벽 및 교량분야를 살펴보면, 최근 현장에서는 교대 하부나 성토구간에 일반 RC 옹벽이 아닌 보강토 옹벽이 시공되고 있다. 이는 지오그리드를 활용한 안정성과 경제성, 시공성의 우수함이 입증된 결과라고 할 수 있다. 교대의 하부 보강, 성토구간에서의 옹벽 등 다양한 분야에서의 지오그리드가 활용되고 있다.

기초 분야는 연약한 흙 위의 기초 보강과 석회암 지대 지하공동이 형성된 지형 위의

기초 보강 및 말뚝 기초 사이의 기초 보강이 가능하며, 파쇄대가 형성된 암반의 보강과 유기토, 동토대, 소택지 위에 매트리스 포설로 인한 보강이 가능하다. 종전에는 고량접속구간이나 박스가 횡단하는 구간은 강성차이 때문에 부등침하의 우려가 있어 어프로치 슬라브 등으로 보강하였으나, 최근에는 지오그리드를 활용한 부등침하의 보강이 가능하다.

그 밖의 폐기물 매립장 분야를 살펴보면 쓰레기 매립장 상부 체계 및 하부체계사면의 안정화와 Tailing 댐 건설과 수중의 부유입자 이동방지, 수중에서의 지표면 침식 방지 등 광범위한 분야에서의 활용이 가능한 토목재료이다.

## 2.5 시험입도의 조제방법

조립토의 입경은 수 cm에서 1m 이상 되므로 전단시험에 사용하는 재료의 입경은 축소 조정하여 사용하는 것이 일반적이다(조립토의 최대입경이 시험공시체의 크기의 1/8 ~ 1/10 이하로 되어야 함). 조립토의 입도(gradation)에는 원입도(original gradation), 시험입도(test gradation) 및 시공입도(fill gradation) 등이 있다. 이중 원입도는 실물재료 또는 시방의 입도, 시험입도는 삼축압축시험 등의 전단시험용 재료의 입도, 시공입도는 실제 시공된 재료의 입도를 말하며, 원입도를 시험입도로 조정하는 방법으로는 다음과 같은 방법이 사용되고 있다.

- o 상사입도법 (parallel grading method)
- o 전두입도법 (scalping and replacement method)

### 2.5.1 상사입도법

상사입도는 그림 2.8 (a)와 같이 시험기의 크기에 맞추어서 최대입경이 제한된 만큼 입도분포곡선을 평행 이동하여 얻어진 입도를 말하며, 식(2.1)의 정의에 따라 입도분포곡선을 작도한다.

$$D_i = \frac{D_{Bi}}{\alpha} \quad (2.1)$$

여기서,  $D_i$  : 상사입도의 입경(mm)

$D_{Bi}$  : 원입도의 입경(mm)

$\alpha$  : 상사비

상사입도법의 특징은 균등계수가 원입도의 것과 동일하고 상사성에 의해 기하학적 입자배열이 원입도와 유사하나, 세립분의 함유율이 상대적으로 높아지는 경향이 있다.

## 2.5.2 전두입도법

전두입도는 그림 2.8 (b)와 같이 실내시험에 필요한 최대입경 이상의 재료를 원입도에서 선별적으로 제거한 입도를 말하며, 식(2.2)로 정의한다.

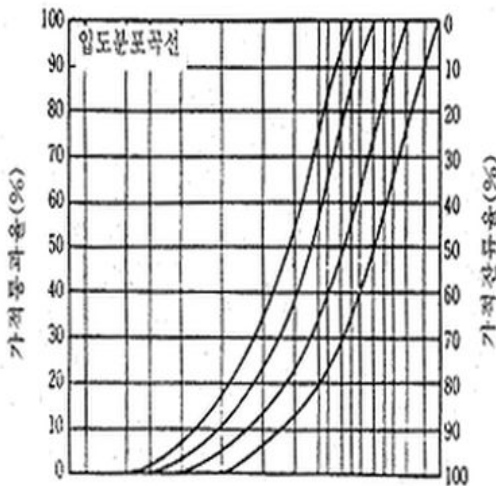
$$P_{Di} = \frac{P_{DBi}}{(1-\beta)} \quad (2.2)$$

여기서,  $P_{Di}$  : 전두입도의 가적통과율 (%)

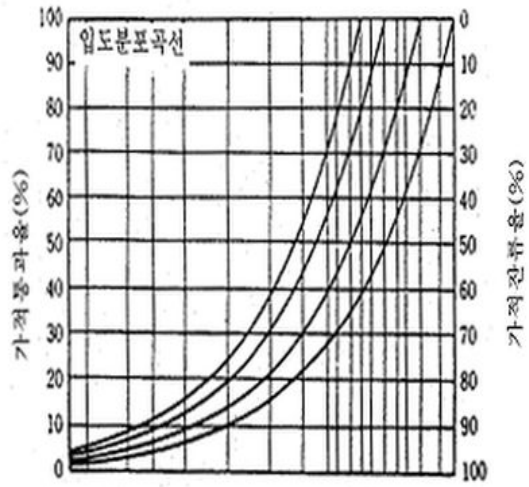
$P_{DBi}$  : 원입도의 입경 가적통과율 (%)

$\beta$  : 전두입도의 최대입경보다 큰 부분이 원입도에서 차지하는 비율

전두입도법의 특징은 원입도에 비하여 입도분포곡선 형태가 급하고 균등계수가 작아 지나 세립분의 함유율은 상대적으로 작다.



(a) 상사입도



(b) 전두입도

그림 2.8 상사입도 및 전두입도 조제방법(임은상, 2009)

## 2.6 대형직접전단시험기

흙-흙, 흙-보강재의 접촉면 마찰시험은 토질시험에 일반적으로 사용되는 직접전단시험기(Direct Shear Test)를 사용하여 수행할 수 있다. 흙-보강재 접촉면 마찰특성을 평가하기 위한 전단시험에서는 하부전단 상자에 강성블록을 설치하고 그 위에 보강재를 고정해서 전단시험을 수행하는 것이 일반적이지만 본 연구에서는 흙-지오그리드의 접촉면 마찰특성을 평가하기 위해 강성블록 대신 흙으로 다짐을 한 후 전단시험을 수행하였다.

그림 2.9은 본 연구에 사용된 대형직접전단시험기의 모습이며, 전단 상자의 크기는 30cm(W) × 30cm(L) × 16.5cm(H)이다.



그림 2.9 대형직접전단시험기



## 제 3 장 실내실험 방법 및 절차

### 3.1 실험 내용

본 연구에서는 최대입경 4.75, 7.9, 15.9mm의 조립토에 대해 연성/강성 그리드를 보강 및 미보강시 조립토의 전단거동을 파악하기 위해 대형직접전단시험기를 통해 전단시험(수직하중 96, 196, 294kPa)을 수행하였으며, 본 연구의 신뢰성을 높이기 위해 수직하중 96kPa의 시험을 추가로 총 36번을 수행하였다.

### 3.2 시료준비

#### 가. 시료의 최대입경

섬진강에서 채취한 시료의 최대입경은 최대 25mm로 다양하지만, 대형시험기의 규모에 제약이 있어 본 연구에서는 시료의 최대입경을 19.5, 7.9, 4.75mm로 설정하여 사용한다. 이때 선정기준은 전단 상자의 길이를 고려하여 시료의 최대입경을 결정한다.

#### 나. 시험입도 조정

흙의 입도시험(체분석)은 조립토의 각 입경에 대한 중량백분율의 비로 나타내어 재료의 입도분포를 분류하기 위한 시험으로써 KS F 2302에 따라 시험을 수행하였으며, 시험입도의 조제를 위해 15.9, 9.5, 7.9, 4.75, 2.0, 0.85, 0.42, 0.25, 0.15, 0.075mm 체를 이용하여 체분석을 수행하였다. 그림 3.1은 섬진강에서 채취해온 시료를 입도시험을 통해 흙을 입경별로 분류한 사진이다.



그림 3.1 입도시험을 통한 입경분류

본 연구에서는 점착력의 영향을 배제하고 내부마찰각만 비교 대상으로 하기 위해 0.075mm 이하의 세립분은 사용하지 않았으며, 4.75 ~ 0.075mm의 조립토 만을 이용하여 입도분포곡선을 그린 후 최대입경 15.9, 7.9mm에 대해서 상사입도법에 의해 입도분포곡선을 평행 이동하여 시험입도분포 곡선을 도출하였다. 이때  $C_u$ (균등계수) 및  $C_g$ (곡률계수)는 표 3.1와 같으며, 조립토의 최대입경 4.75mm이 포함된 시료를 A시료, 7.9mm이 포함된 시료를 B시료, 15.9mm이 포함된 시료를 C시료로 명명하였다.

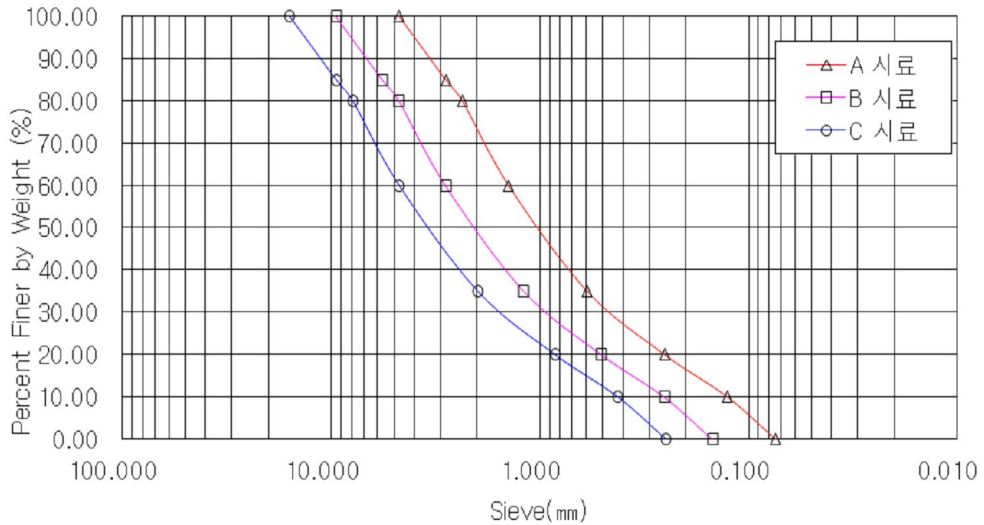


그림 3.2 상사입도를 적용한 입도분포곡선

표 3.1 상사입도를 적용한 입도분포곡선의  $C_u$ (균등계수) 및  $C_g$ (곡률계수)

	$C_u$	$C_g$
A 시료	11.17	1.28
B 시료	11.20	1.25
C 시료	11.18	1.27

그리고 표준체의 크기(15.9mm, 7.9mm, 4.75mm, 2.0mm, 0.85mm, 0.42mm, 0.25mm, 0.15mm, 0.075mm)에 맞게 가적통과율을 육안으로 결정한 다음 그림 3.2와 같이 다시 입도분포곡선을 그린 후  $C_u$  및  $C_g$ 를 산정하면 표 3.2과 같다. 초기의 입도분포곡선의  $C_u$  및  $C_g$ 의 값이 다른 이유는 육안으로 결정하였기 때문이며, 그림 3.2와 같이 입도분포곡선에 맞게 시료를 혼합하여 시험을 수행하였다. A, B, C 시료를 통일분류법(USCS)에 따라  $C_u \geq 6$ ,  $1 \leq C_g \leq 3$ 의 조건을 만족하여 양입도(well-graded)로 SW로 판단되었다.





(a) 비중시험



(b) 입도시험



(c) 상대밀도시험

그림 3.4 물성치시험

표 3.3 기본물성시험 결과

	비중( $G_s$ )	상대밀도	
		$e_{max}$	$e_{min}$
A 시료	2.610	0.821	0.419
B 시료	2.622	0.761	0.380
C 시료	2.638	0.754	0.403

### 3.3 실험 절차

가. 공시체 제작 및 지오그리드 설치

- ①  $e_{max}$ 와  $e_{min}$ 을 이용하여 상대밀도 70%에 해당하는 시료의 무게를 전단 상자 상·하부로 각각 산출한 다음 혼합된 시료를 전단 상자에 담아 다짐을 수행하였다.
- ② 이때 전단 상자 하부에 시료를 2층으로 나눠 골고루 입도 조성하고 다짐을 수행하였으며, 전단 상자 상부도 같은 방법으로 다짐을 수행하였다.
- ③ 마지막 다짐 층에는 상부에 가압판 올릴 것을 고려해 가압판이 기울어지지 않도록 상면을 고르게 단면 처리하였다.
- ④ 지오그리드로 보강된 조립토의 전단시험 시 하부에 혼합된 시료를 넣고 다짐을 수행 후 지오그리드를 전단 상자 위에 설치하고 ②, ③과 같이 다짐을 수행하였다.

그림 3.5는 전단 상자 하부에 지오그리드를 설치 후 전단 상자 상부를 올려놓은 모습이다.



(a) 연성그리드

(b) 강성그리드

그림 3.5 지오그리드를 전단상자에 설치

나. 수직하중 및 전단하중 재하

제작이 완료된 공시체 상부에 가압판을 미세하게 상재시킨 후, 소요 수직하중을 각 시험 단계별로 상재시킨다. 본 연구에서는 선행연구와 비교를 위하여, 선행연구에서 많이 사용되었던 98, 196, 294kPa의 세 가지 수직응력을 직접전단시험에 적용하였다.

전단하중 재하 시 변위 속도는 1mm/min으로 전단시험을 수행하였으며, 전단시험 진행 중에는 불필요한 수직 변위가 생기지 않도록 수직하중을 일정하게 제어하였다.

다. 시험완료 기준

시료의 전단은 최대 전단응력(peak shear stress)에 도달한 후 5% 이상의 추가 변위 시까지 또는 뚜렷하게 최대 전단응력이 보이지 않는다면 수평 변위량이 공시체의 전단 방향의 길이로 15 ~ 20%가 되었을 때 시험을 완료하였다.

라. 시료제거 및 파쇄율 산정

시험이 완료되면 전단하중과 상재하중을 제거한 뒤 시료를 시료상자로 옮겨 담아 전단시험에 따른 파쇄율을 분석하기 위하여 입도시험을 재수행하였다. 이를 바탕으로 원 입도 분포 곡선에 병행 도시하여 입자의 파쇄율을 산정하였다.

본 연구에서는 가장 많이 쓰이는 방법의 하나인 Marsal(1967)이 제안한 파쇄율의 정의에 따라, 전단시험 전후의 잔유율 곡선에서 대표입경에 대한 잔유율 차이를 이용하여 파쇄율을 산정하였다. 즉, 입자의 파쇄란 입자의 크기가 파괴에 따른 원인으로 분리되어 입도분포가 변화하는 형태를 말하며, Marsal(1976)은 입자의 파쇄에 대한 정량적인 경험식을 식 (3.1)과 같이 제안하였다.

$$M = \frac{\sum \Delta f_i}{2} \times 100(\%) \quad (3.1)$$

여기서,  $M$  : 파쇄율  
 $\Delta f_i$  : 파쇄 전·후 대표입경에 대한 잔유율 차

여기서, 파쇄율이란 그림 3.6에서와 같이 최초 시험수행을 위해 조성된 입도의 시료가 파쇄되거나, 입자 간의 마찰에 의해 세립분이 증가하고 입도 재분포가 이루어져 나타난 잔유율 곡선에서 파쇄 전·후 각각의 대표 입경에 대한 잔유율 차를 합하여 반으로 나눈 크기를 말한다.

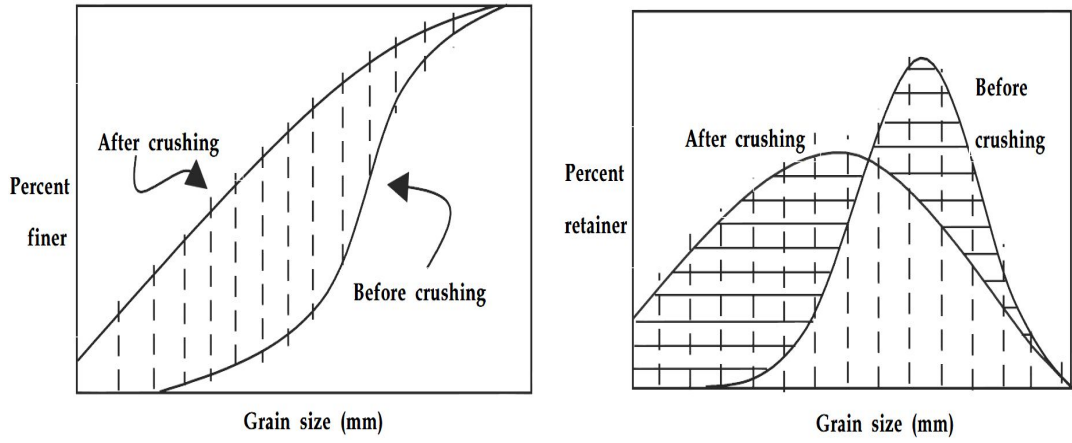


그림 3.6 입도분포곡선(시험 전, 후) 및 잔유율 곡선(이대수, 2008)



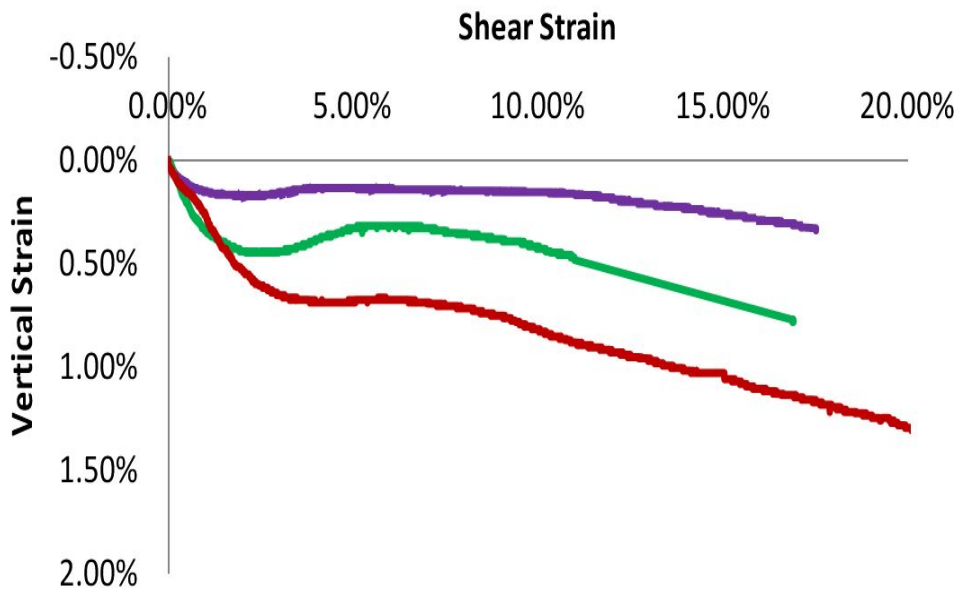
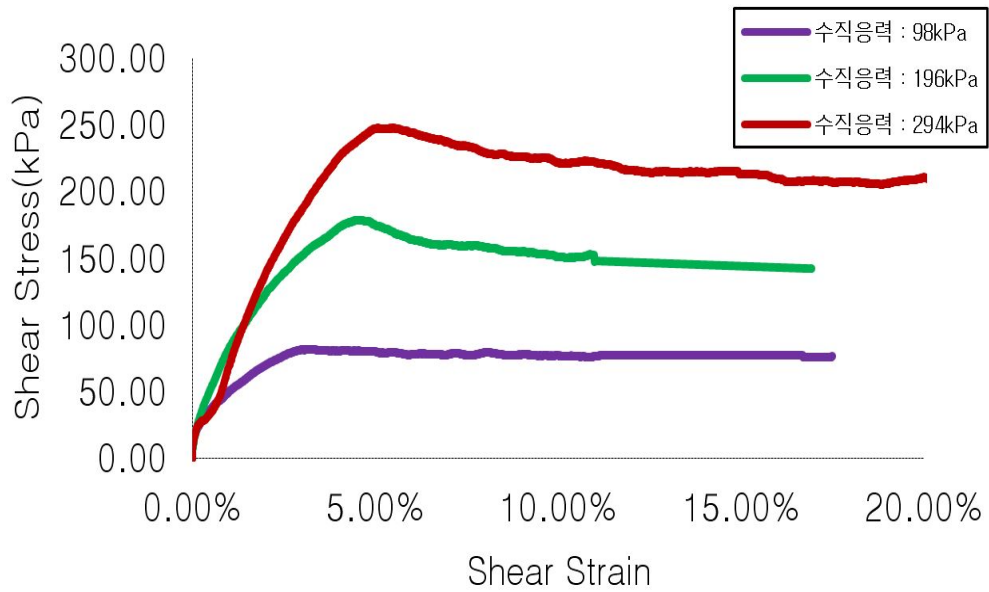
## 제 4 장 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 조립토의 최대입경이 전단거동에 미치는 영향을 확인하기 위해 보강(연성/강성그리드) 및 미보강된 A, B, C 시료에 대해 대형직접전단시험을 수행한 후, 시료별 전단거동을 전단응력-전단변형률 관계를 통하여 분석하였다. 수직응력 재하 시 전단 상자 중앙부의 압축량을 공시체의 초기 높이로 나눈 값의 백분율을 “수직변형률(vertical strain)”로 정의하였으며, 전단변형률을 전단 상자의 길이로 나눈 값의 백분율을 “전단변형률(shear strain)”로 정의하였다. 그림의 수직변형률(vertical strain)에서는 체적팽창을 (-)로 체적수축을 (+)로 표기하였다. 전단응력-전단변형률 곡선에서 전단응력이 최대값이 발생한 경우 수직응력에 대한 최대전단응력값을 사용하였으며, 최대값이 발생하지 않은 경우 전단에 의한 수평변형률이 15%일 때의 값을 최대전단응력으로 선정하였다.

### 4.1 응력-변형률 관계

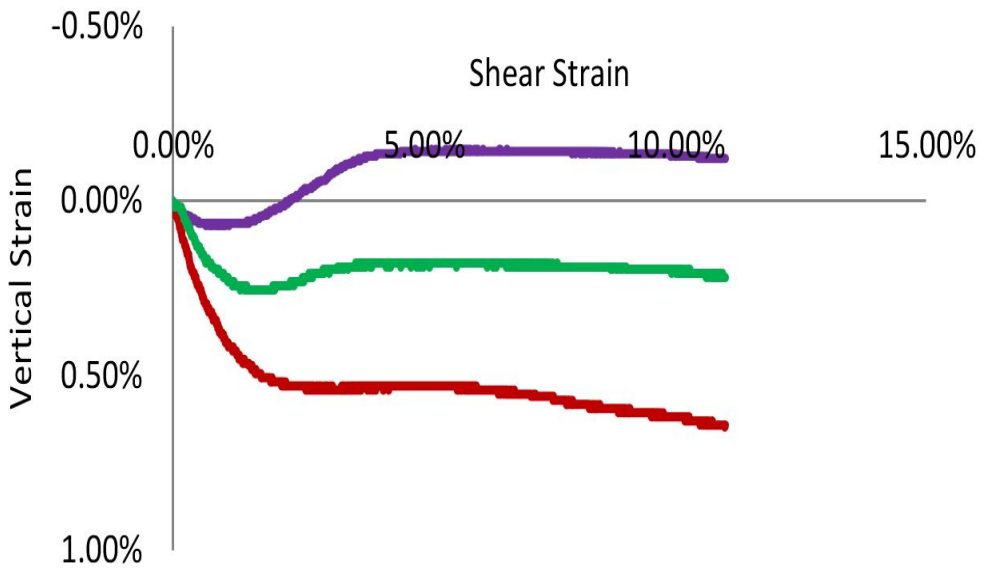
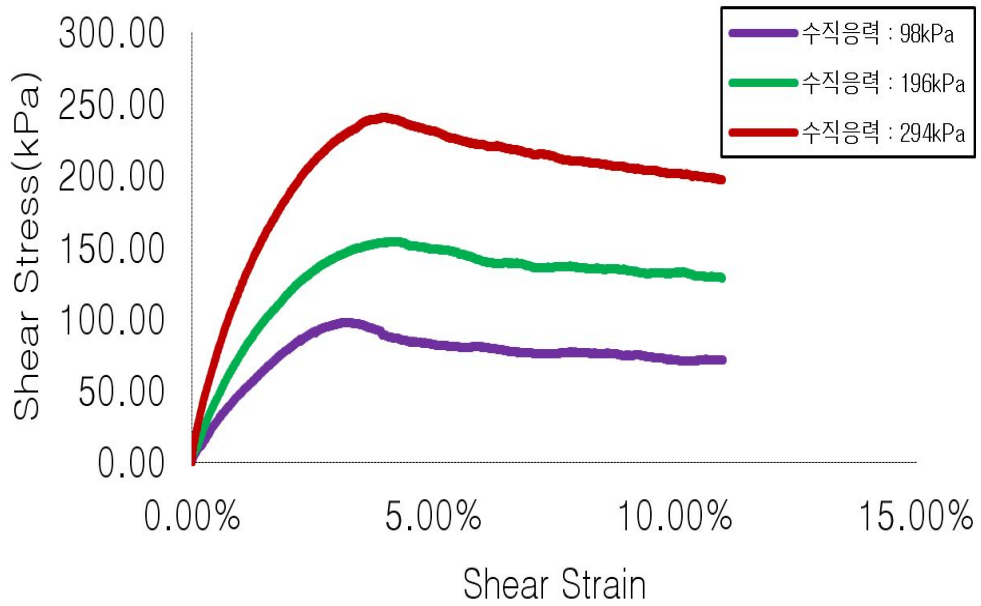
#### 4.1.1 최대입경 4.75mm인 시료(A시료)

수직응력이 증가함에 따라 체적수축도 크게 나타났으며, 느슨한 모래의 거동과 유사한 체적변화를 보였다. 연성그리드 보강시 전단응력은 미보강시 전단응력보다 수직응력 98kPa일 때 4% 증가하였으며, 수직응력 196kPa, 294kPa일 때 11%씩 감소하였다. 강성그리드 보강시 전단응력은 미보강시 전단응력보다 수직응력 98kPa일 때 26% 증가하였으며, 수직응력 196kPa, 294kPa일 때 각각 14%, 3% 감소하였다. 그림 4.1은 직접전단실험결과를 전단응력-전단변형률 관계, 수직변위-전단변위 관계를 나타낸 것이다.

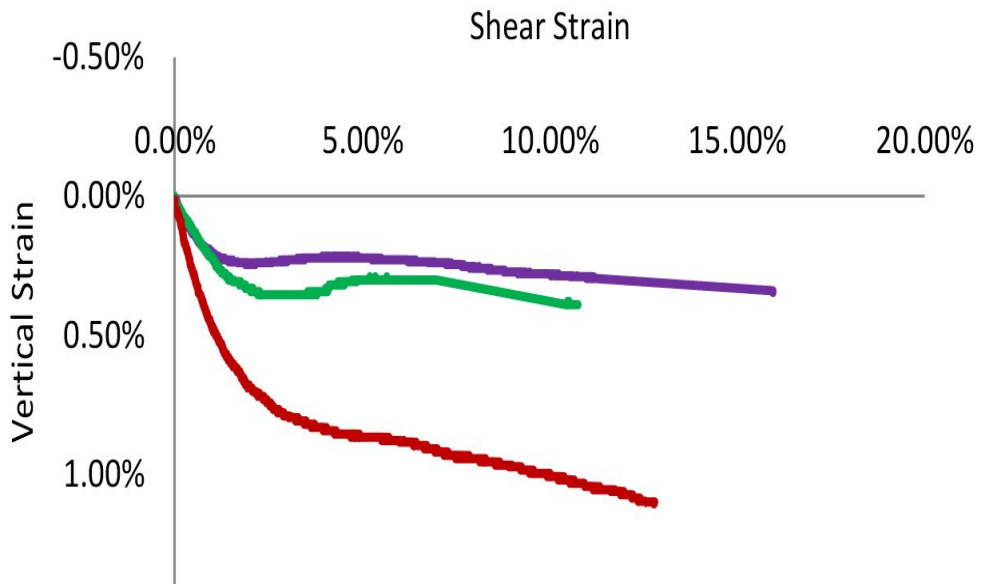
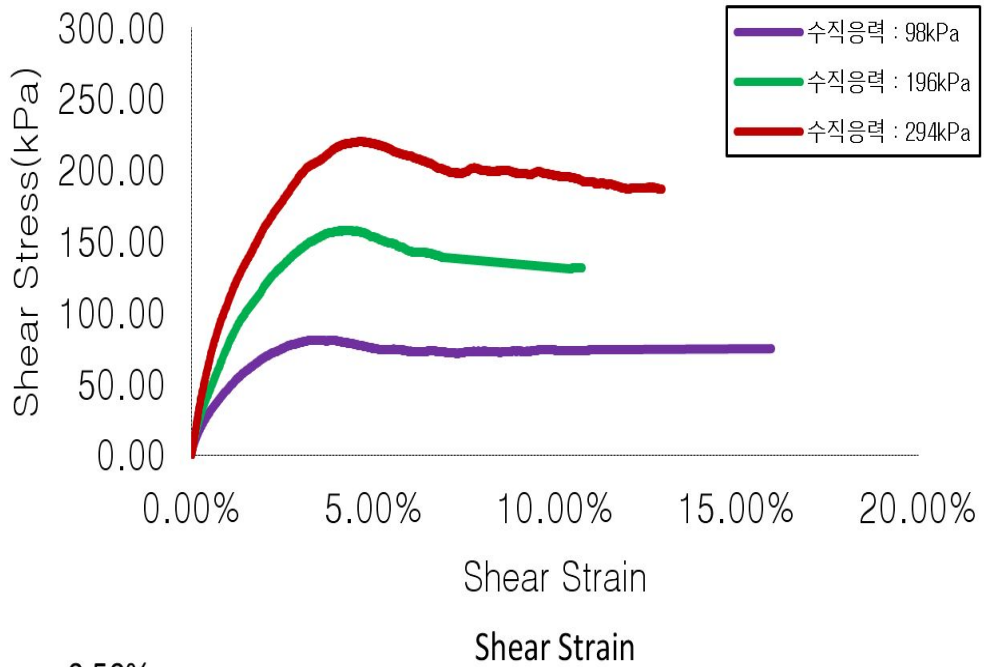


(a) 미보강된 경우

그림 4.1 A시료의 응력-변형률 관계



(b) 연성그리드로 보강된 경우  
 그림 4.1 A시료의 응력-변형률 관계(계속)

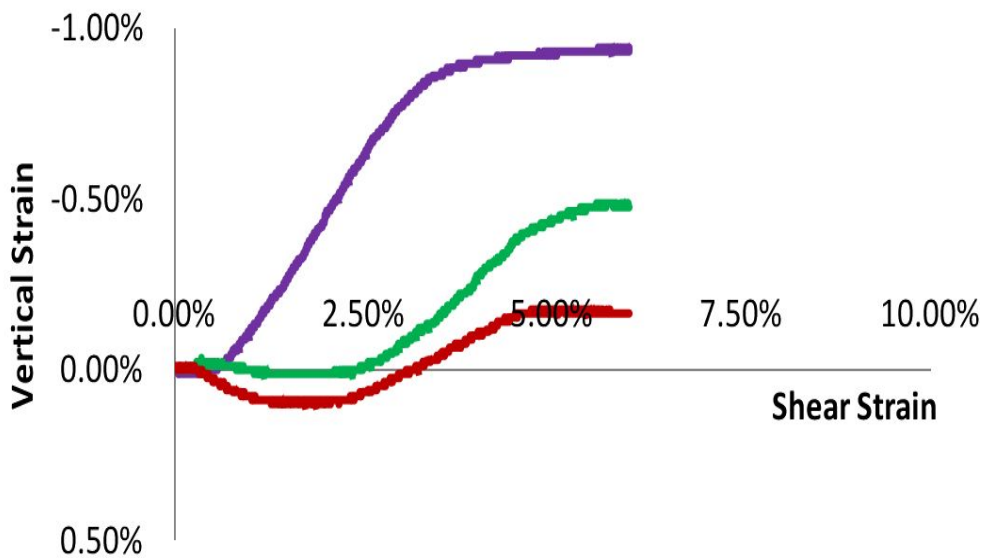
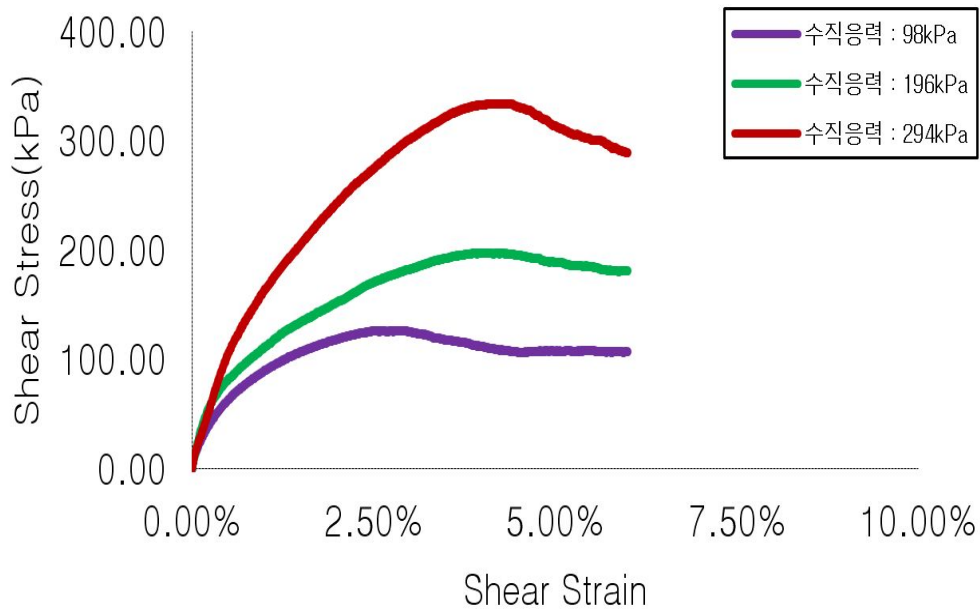


(c) 강성그리드로 보강된 경우  
 그림 4.1 A시료의 응력-변형률 관계(계속)

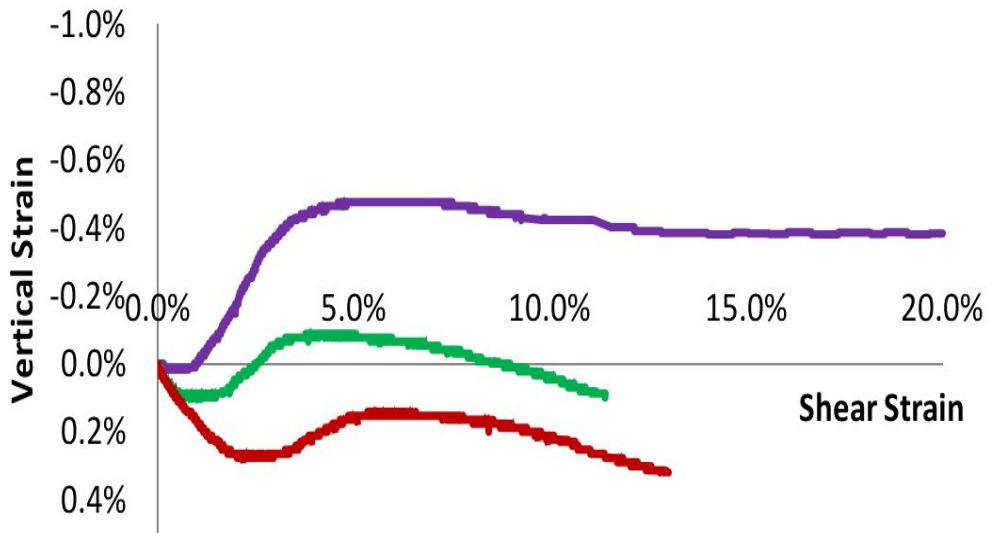
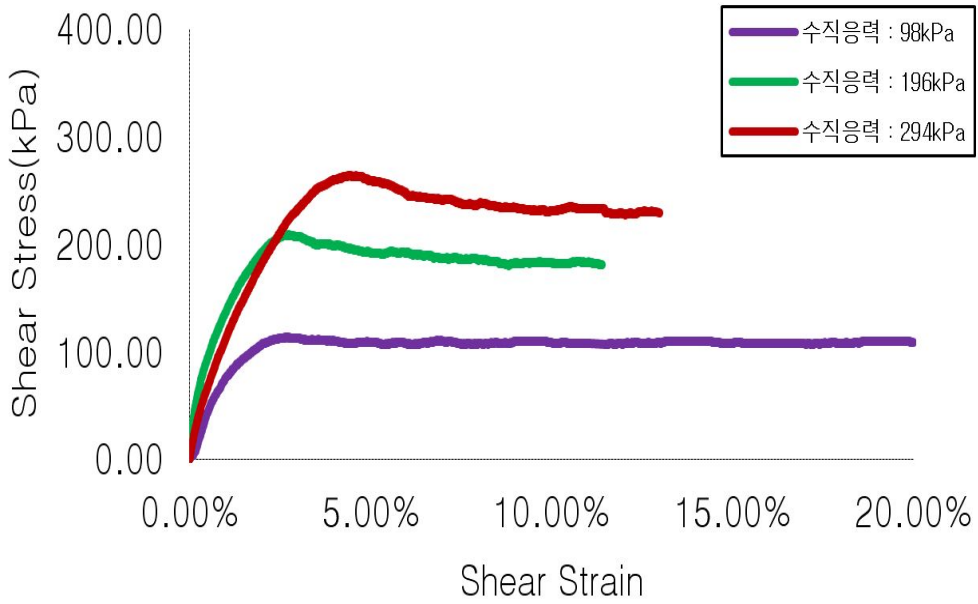
#### 4.1.2 최대입경 7.9mm인 시료(B시료)

연성그리드 보강시 전단응력은 미보강시 전단응력보다 수직응력 196kPa일 때 6% 증가하였으며, 수직응력 98kPa, 294kPa일 때 각각 15%, 21% 감소하였다. 강성그리드 보강시 전단응력은 미보강시 전단응력보다 수직응력 98kPa, 196kPa, 294kPa일 때 각각 25%, 3%, 22% 감소하였다.

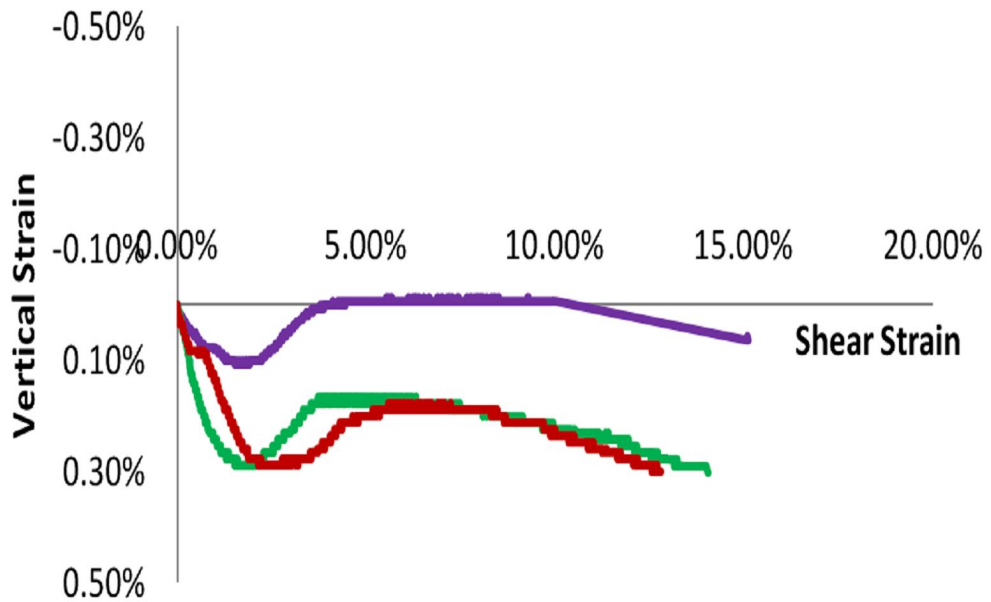
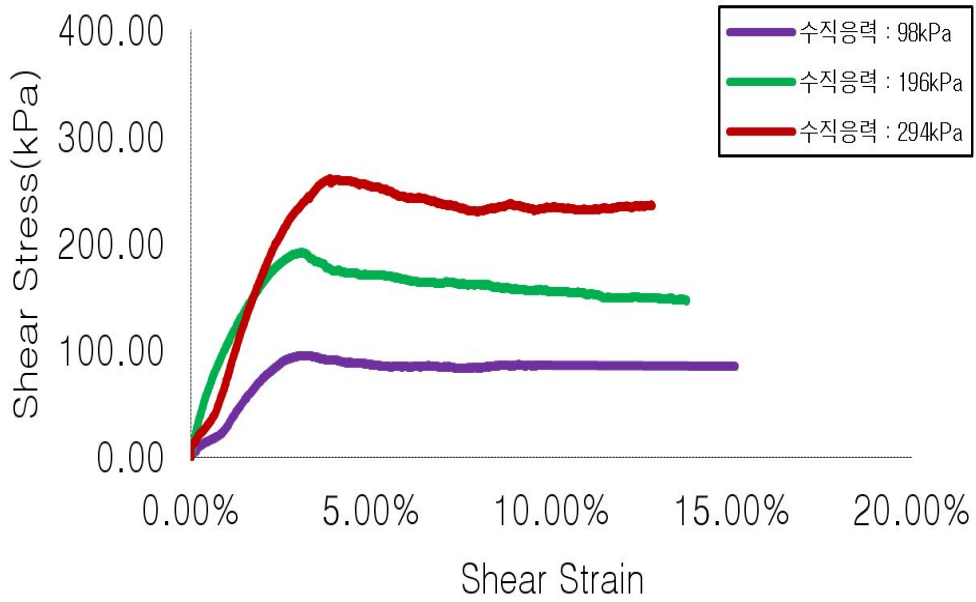
미보강된 경우 수직응력이 작을 때(98kPa) 체적팽창이 약 1%로 높게 나왔고, 조밀한 모래의 거동을 보였으며, 수직응력이 감소할수록 체적팽창은 증가하였는데, 이는 선행 연구(이대수, 2008)의 결과와 유사한 결과를 보였다. 지오그리드(연성/강성그리드)로 보강된 경우 미보강된 경우보다 체적팽창이 전체적으로 감소하였다. 그림 4.2은 직접전단 실험결과를 전단응력-전단변형률 관계, 수직변위-전단변위 관계를 나타낸 것이다.



(a) 미보강된 경우  
 그림 4.2 B시료의 응력-변형률 관계



(b) 연성그리드로 보강된 경우  
 그림 4.2 B시료의 응력-변형률 관계(계속)



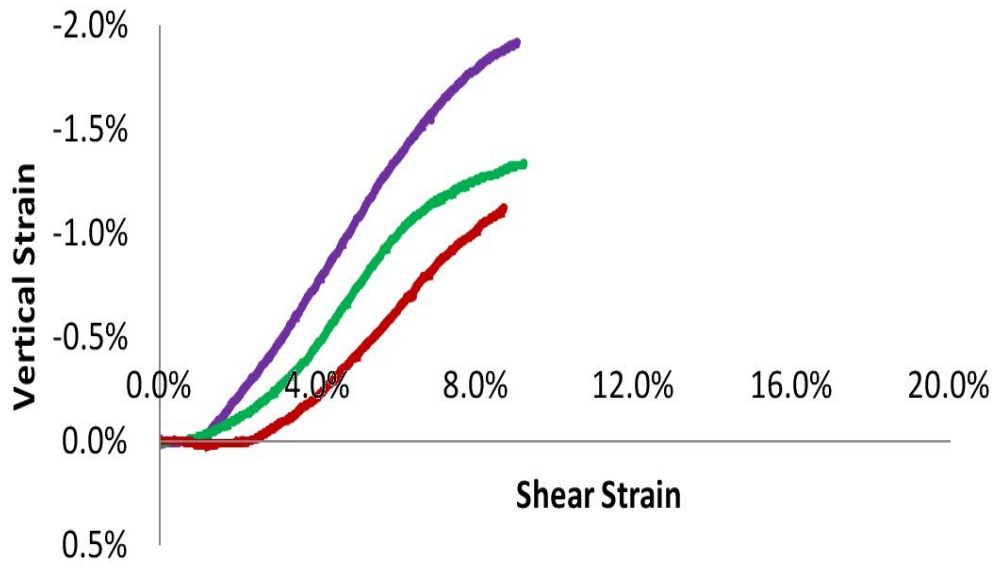
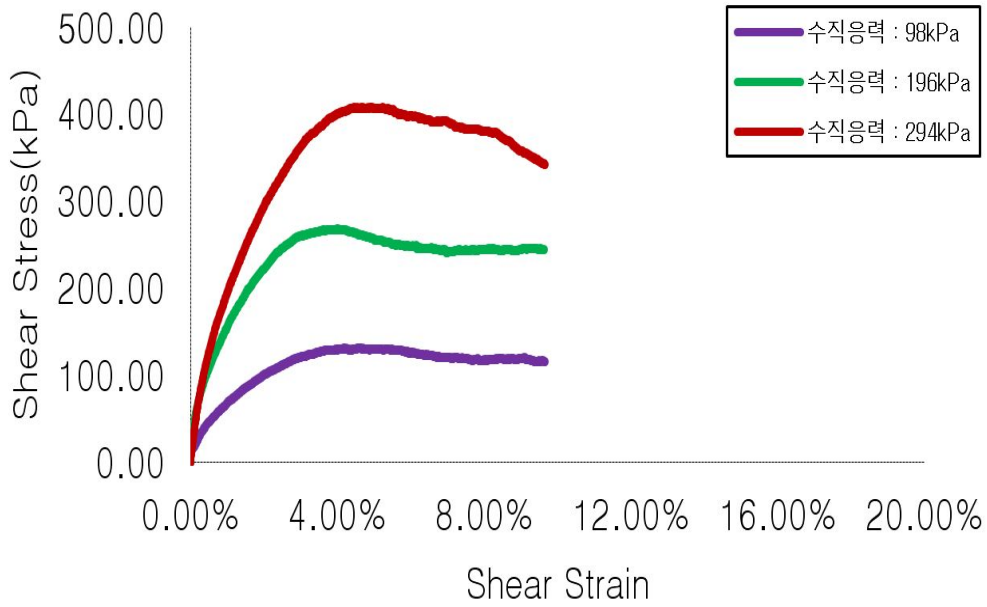
(c) 강성그리드로 보강된 경우  
그림 4.2 B시료의 응력-변형률 관계(계속)



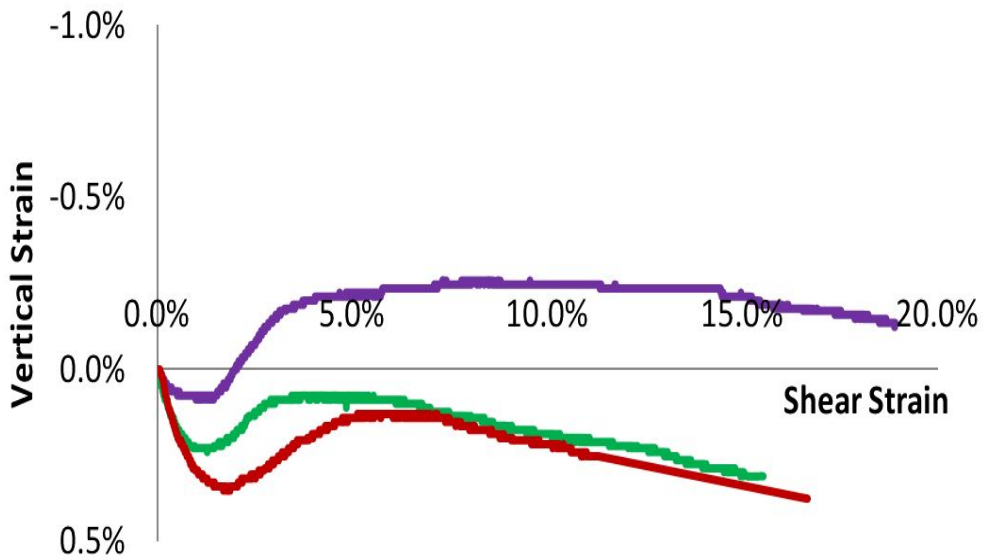
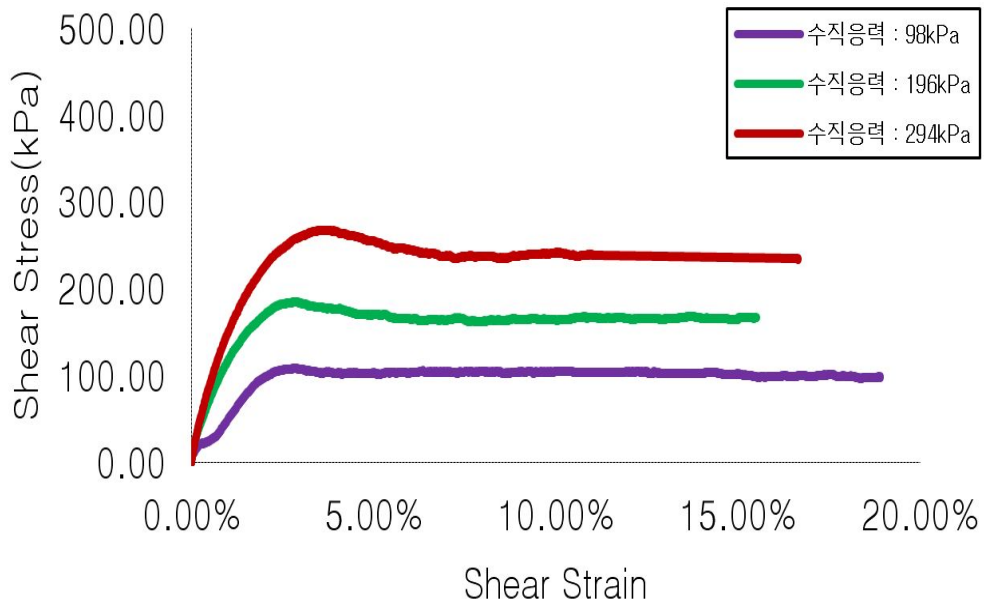
### 4.1.3 최대입경 15.9mm인 시료(C시료)

연성그리드 보강시 전단응력은 미보강시 전단응력보다 수직응력 98kPa, 196kPa, 294kPa일 때 각각 22%, 31%, 34% 감소하였고, 강성그리드 보강시 전단응력은 수직응력 98kPa, 196kPa, 294kPa일 때 각각 15%, 38%, 37% 감소하였다.

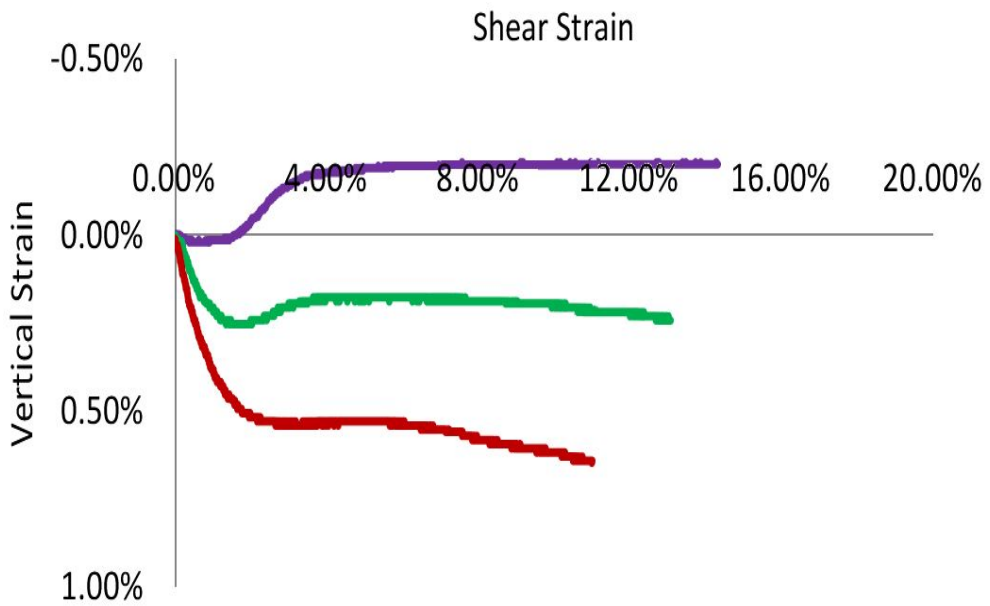
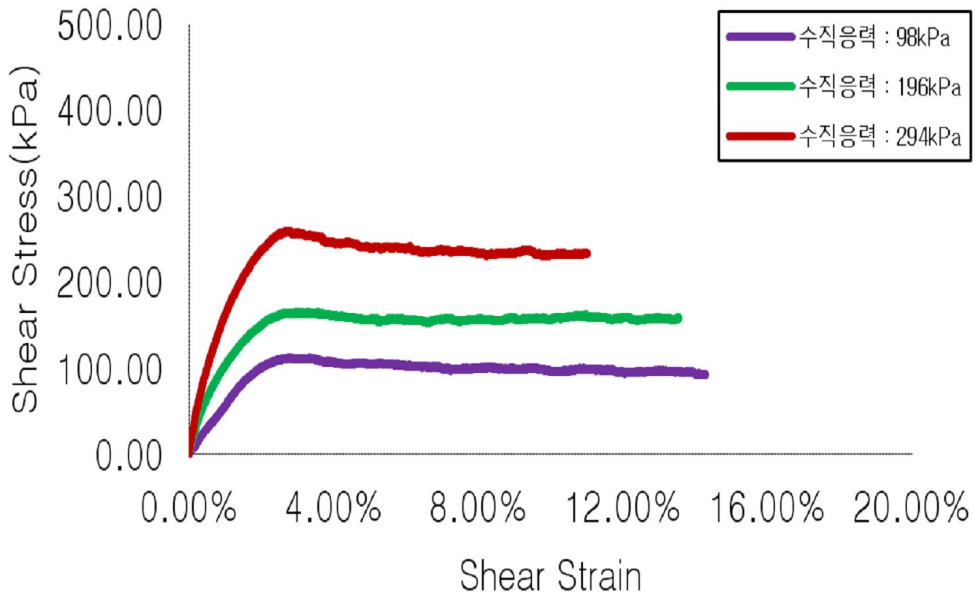
미보강된 경우 조밀한 모래의 거동을 보였고 수직응력이 감소할수록 체적팽창은 증가하였는데, 이는 선행연구(이대수, 2008)의 결과와 유사한 결과를 보였다. 강성그리드로 보강된 경우 수직응력 196kPa, 294kPa에서는 느슨한 모래의 거동을 보였다. 미보강된 경우 수직응력이 작을 때(98kPa) 체적팽창이 약 1%로 높게 나왔으며, 연성 및 강성그리드를 보강된 경우 미보강된 경우보다 체적팽창이 전체적으로 감소하였다. 그림 4.3은 직접전단실험결과를 전단응력-전단변형률 관계, 수직변위-전단변위 관계를 나타낸 것이다.



(a) 미보강로 보강된 경우  
 그림 4.3 C시료의 응력-변형률 관계



(b) 연성그리드로 보강된 경우  
 그림 4.3 C시료의 응력-변형률 관계(계속)



(c) 강성그리드로 보강된 경우  
 그림 4.3 C시료의 응력-변형률 관계(계속)

## 4.2 강도정수 및 파쇄율

### 4.2.1 최대입경 4.75mm인 시료(A시료)

내부마찰각은 미보강된 경우보다 연성그리드로 보강된 경우 7.6%, 강성그리드로 보강된 경우 3.2% 감소하였다. 점착력은 강성그리드로 보강된 경우가 연성그리드로 보강된 경우보다 37% 증가하였다. 표 4.1에서 제시한 ( )안의 값은 흙-지오그리드 접촉면에서의 내부마찰각( $\delta$ )을 흙-흙의 내부마찰각( $\phi$ )으로 나눈 값인 효율  $E(E=\tan\delta/\tan\phi)$ 을 산정한 결과이다.

파쇄율을 산정한 결과 수직응력이 증가할수록 파쇄율은 증가했으며, 수직응력이 98kPa일 때 연성 및 강성그리드로 보강된 경우에 발생된 파쇄율은 미보강된 경우에 발생된 파쇄율보다 0.35%만큼 크게 나타났지만, 수직응력 196kPa, 294kPa일 때 연성그리드로 보강된 경우에 발생된 파쇄율은 0.1%, 0.9%, 강성그리드로 보강된 경우에 발생된 파쇄율은 0.1%, 0.7% 감소하였다. 그림 4.4~4.6은 전단시험 전후 입도분포곡선을, 그림 4.7은 전단응력-수직응력의 관계를 나타낸다.

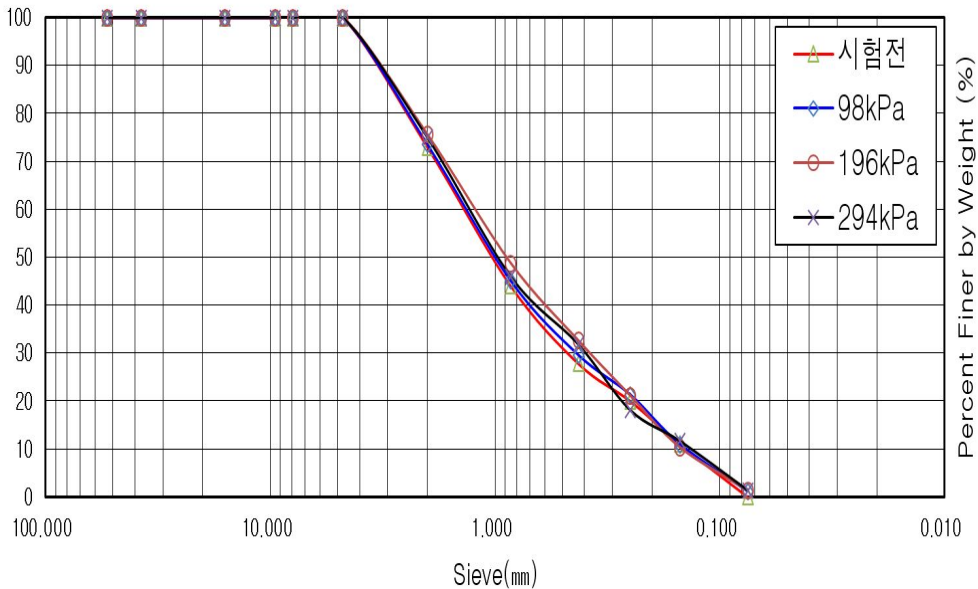


그림 4.4 미보강된 A시료의 전단시험 전후 입도분포곡선

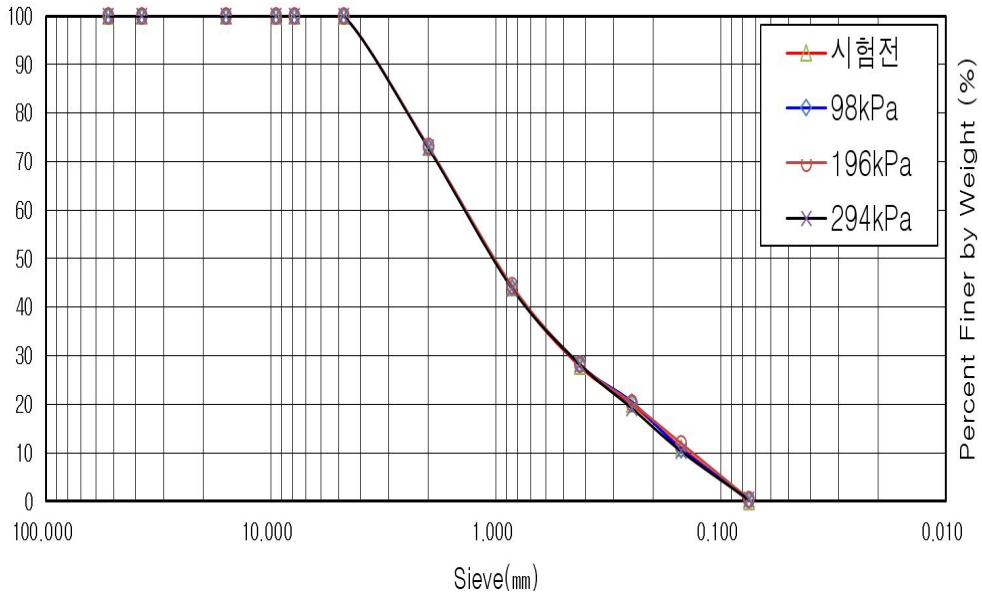


그림 4.5 연속그리드 보강된 A시료의 전단시험 전후 입도분포곡선

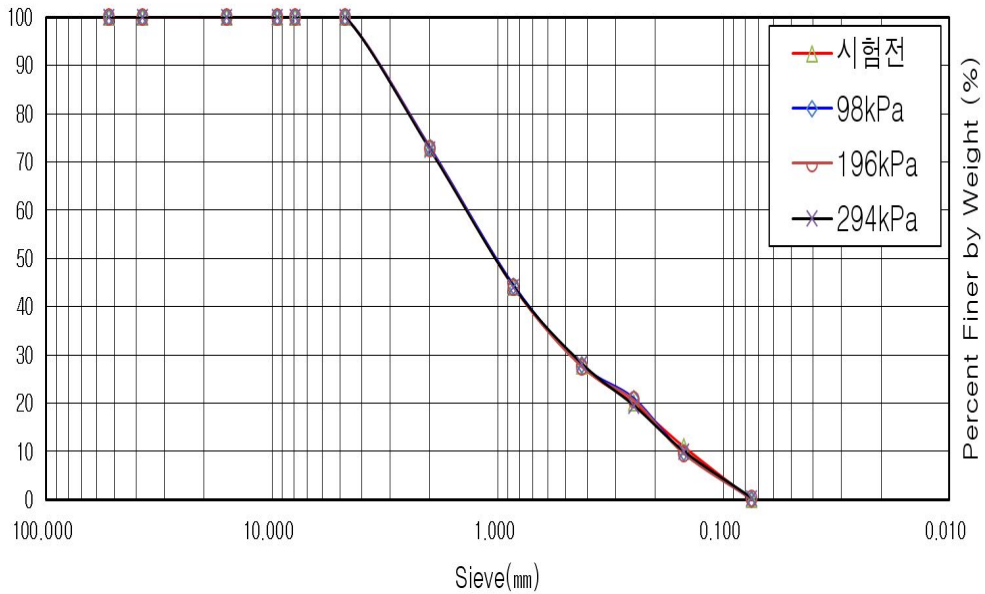


그림 4.6 강성그리드 보강된 A시료의 전단시험 전후 입도분포곡선

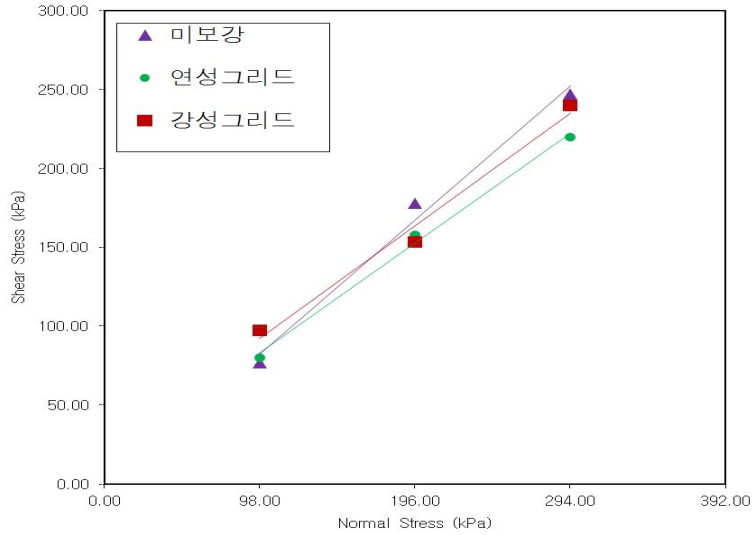


그림 4.7 A시료의 전단응력-수직응력의 관계

표 4.1 A시료의 강도정수 및 파쇄율

		수직응력		
		98kPa	196kPa	294kPa
최대전단 응력(kPa)	미보강시	77.037	178.072	247.179
	연성그리드로 보강시	80.370	157.778	219.946
	강성그리드로 보강시	97.288	153.660	240.120
내부 마찰각(°)	미보강시	40.56		
	연성그리드로 보강시	39.34(0.90)		
	강성그리드로 보강시	37.57(0.95)		
점착력 (kPa)	미보강시	0		
	연성그리드로 보강시	13.12		
	강성그리드로 보강시	20.85		
파쇄율(%)	미보강시	0.65	1.4	2.2
	연성그리드로 보강시	1.0	1.3	1.3
	강성그리드로 보강시	1.0	1.4	1.5

## 4.2.2 최대입경 7.9mm인 시료(B시료)

내부마찰각은 미보강된 경우보다 연성그리드로 보강된 경우 8.5%, 강성그리드로 보강된 경우 11.38% 감소하였다. 점착력은 강성그리드로 보강된 경우가 연성그리드로 보강된 경우보다 50% 증가하였다. 표 4.2에서 제시한 ( )안의 값은 흙-지오그리드 접촉면에서의 내부마찰각( $\delta$ )을 흙-흙의 내부마찰각( $\phi$ )으로 나눈 값인 효율  $E(E=\tan\delta/\tan\phi)$ 을 산정한 결과이다.

과쇄율을 산정한 결과 수직응력이 증가할수록 과쇄율은 증가했으며, 수직응력이 98kPa일 때 연성그리드로 보강된 경우는 미보강된 경우보다 0.2%, 강성그리드로 보강된 경우는 0.6% 증가하였지만, 수직응력 196kPa, 294kPa일 때 연성그리드로 보강된 경우는 0.5%, 0.2%, 강성그리드로 보강된 경우는 0.9%, 0.7% 감소하였다. 이러한 차이는 전단시험 준비과정 중 전단상자의 다짐에 따른 상대밀도의 차이로 판단된다. 그림 4.8~4.10은 전단시험 전후 입도분포곡선을, 그림 4.11은 전단응력-수직응력의 관계를 나타낸다.

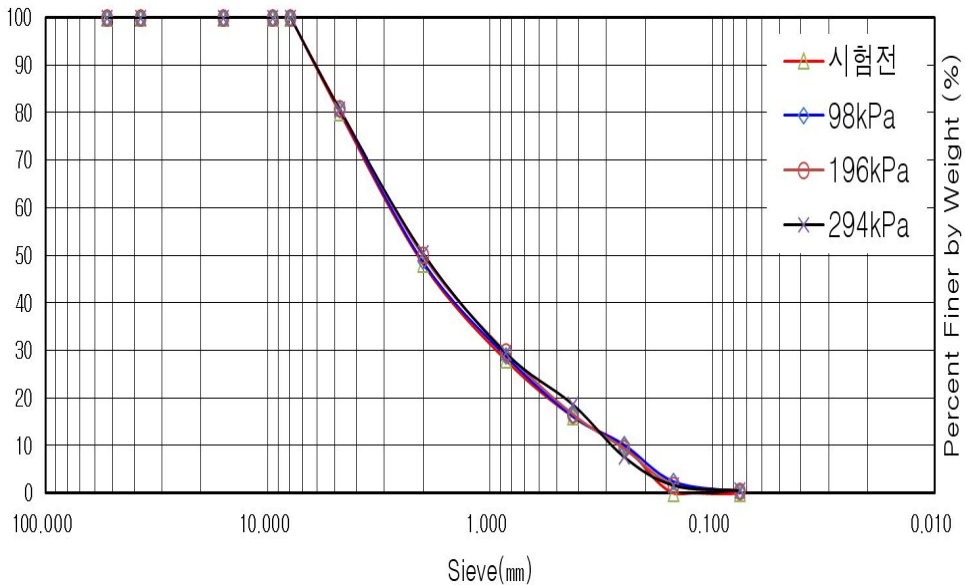


그림 4.8 미보강된 B시료의 전단시험 전후 입도분포곡선



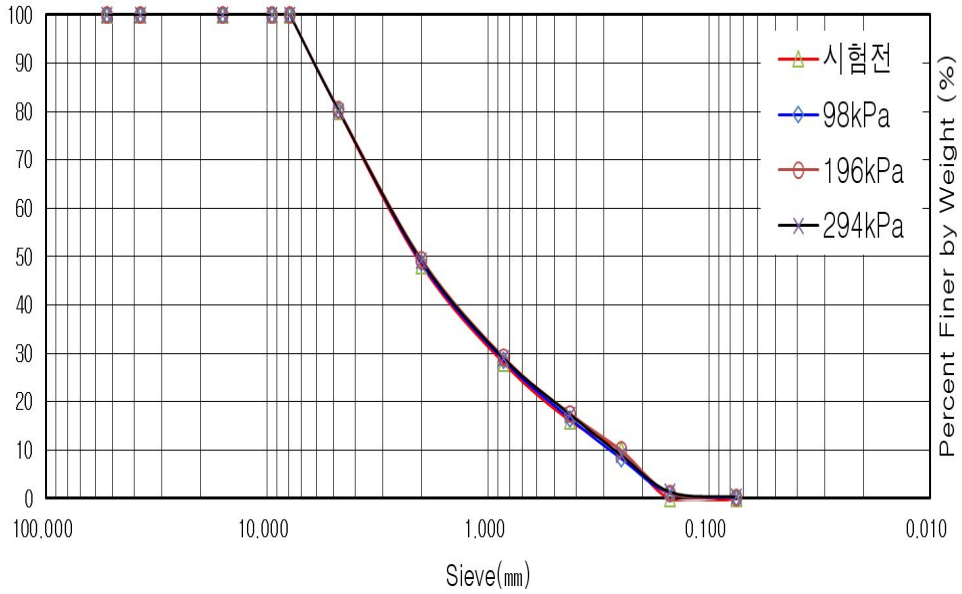


그림 4.9연성그리드 보강된 B시료의 전단시험 전후 입도분포곡선

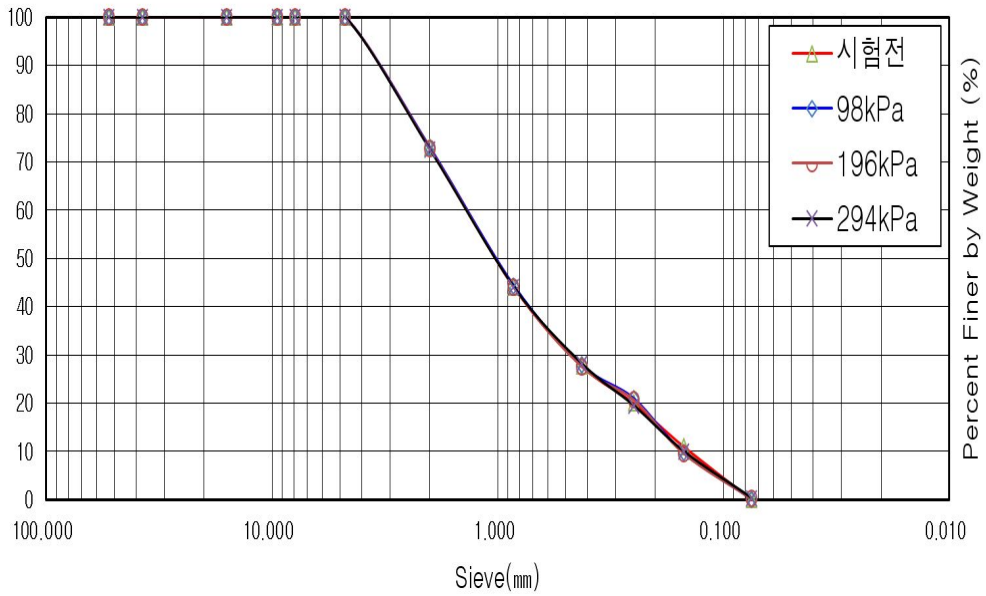


그림 4.10 강성그리드 보강된 B시료의 전단시험 전후 입도분포곡선

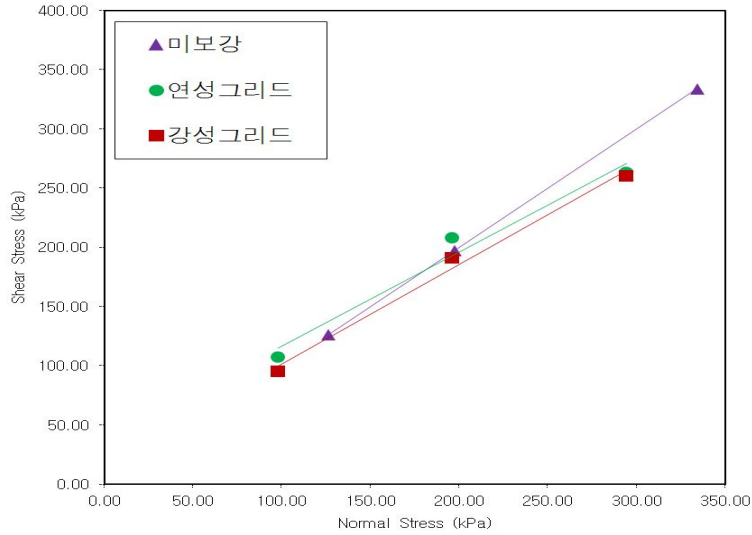


그림 4.11 B시료의 전단응력-수직응력 관계

표 4.2 B시료의 강도정수 및 파쇄율

		수직응력		
		98kPa	196kPa	294kPa
최대전단 응력(kPa)	미보강시	126.202	197.361	334.017
	연성그리드로 보강시	107.603	208.344	263.279
	강성그리드로 보강시	95.174	191.340	260.142
내부 마찰각(°)	미보강시	47.97		
	연성그리드로 보강시	43.75(0.87)		
	강성그리드로 보강시	42.51(0.83)		
점착력 (kPa)	미보강시	0		
	연성그리드로 보강시	17.25		
	강성그리드로 보강시	34.40		
파쇄율(%)	미보강시	0.8	2.0	2.5
	연성그리드로 보강시	1.0	1.5	1.6
	강성그리드로 보강시	2.5	1.8	1.8

### 4.2.3 최대입경 15.9mm인 시료(C시료)

내부마찰각은 미보강된 경우보다 연성그리드로 보강된 경우 20.34%, 강성그리드로 보강된 경우 23.04% 감소하였다. 점착력은 강성그리드로 보강된 경우가 연성그리드로 보강된 경우보다 48% 증가하였다. 표 4.3에서 제시한 ( )안의 값은 흙-지오그리드 접촉면에서의 내부마찰각( $\delta$ )을 흙-흙의 내부마찰각( $\phi$ )으로 나눈 값인 효율  $E(E=\tan\delta/\tan\phi)$ 을 산정한 결과이다.

파쇄율을 산정한 결과 수직응력이 증가할수록 파쇄율은 증가했으며, 연성 및 강성그리드로 보강된 경우 미보강된 경우보다 0.5~3.2% 감소하였다. 그림 4.12~4.14은 전단시험 전후 입도분포곡선을, 그림 4.15은 전단응력-수직응력의 관계를 나타낸다.

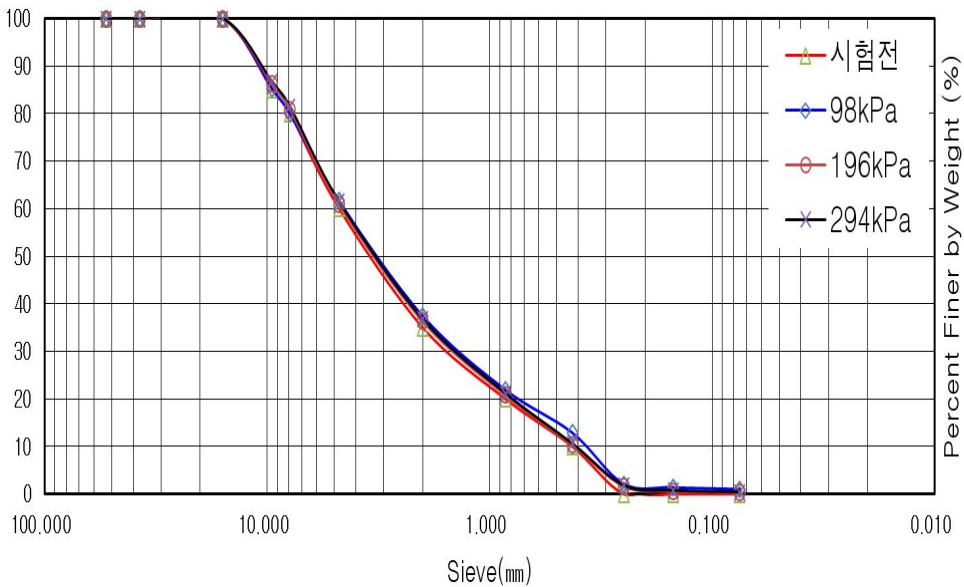


그림 4.12 C시료의 전단시험 전후 입도분포곡선

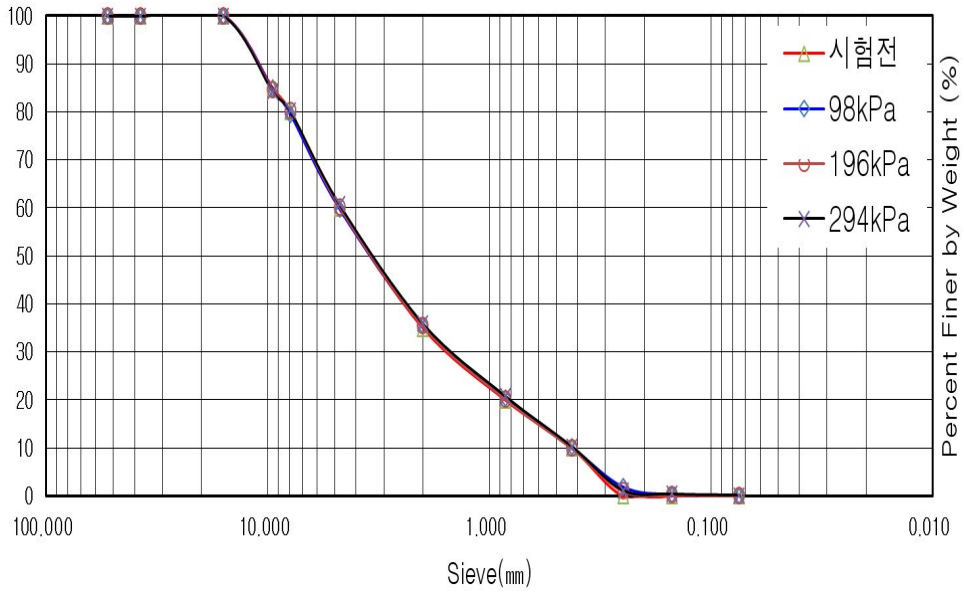


그림 4.13 연속그리드 보강된 C시료의 전단시험 전후 입도분포곡선

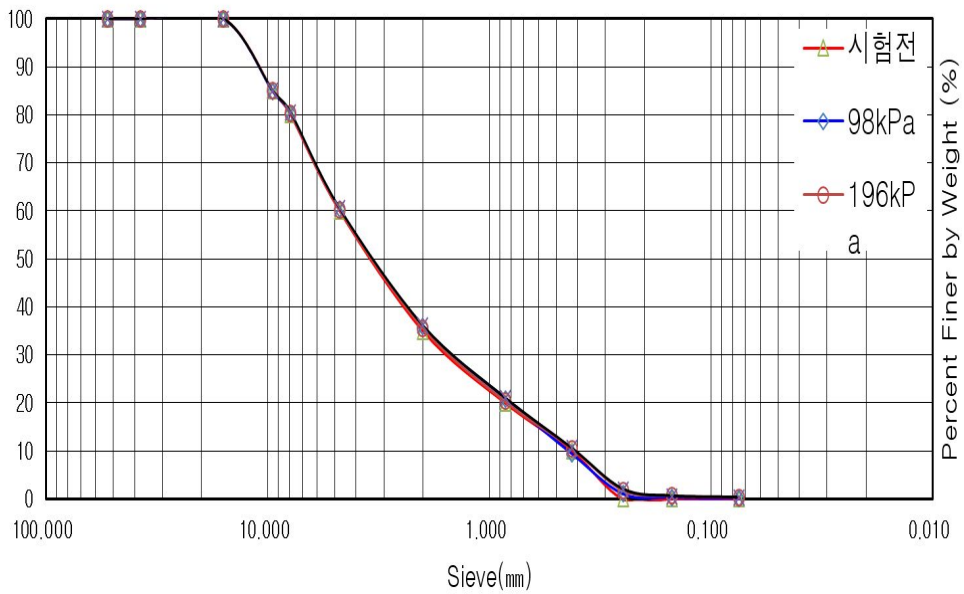


그림 4.14 강성그리드 보강된 C 시료의 전단시험 전후 입도분포곡선

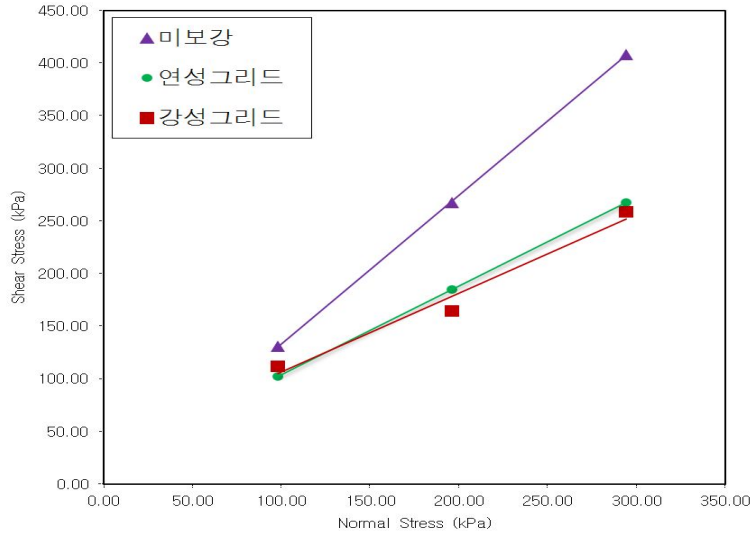


그림 4.15 C시료의 전단응력-수직응력 관계

표 4.3 C시료의 강도정수 및 파쇄율

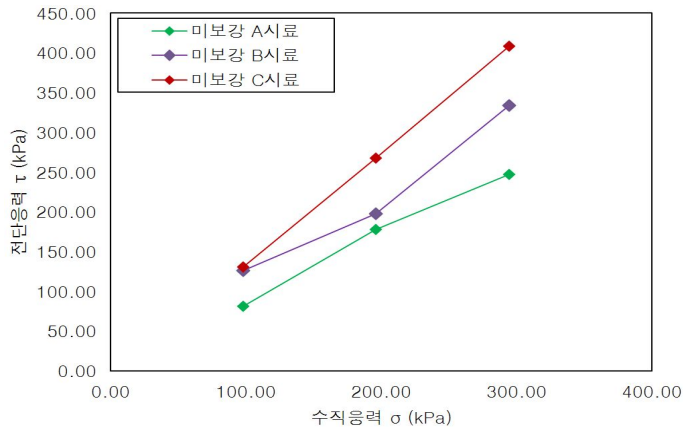
		수직응력		
		98kPa	196kPa	294kPa
최대전단 응력(kPa)	미보강시	130.991	267.974	408.224
	연성그리드로 보강시	102.176	184.946	267.865
	강성그리드로 보강시	111.797	164.858	258.922
내부 마찰각(°)	미보강시	54.04		
	연성그리드로 보강시	42.90(0.68)		
	강성그리드로 보강시	41.59(0.64)		
점착력 (kPa)	미보강시	0		
	연성그리드로 보강시	19.31		
	강성그리드로 보강시	37.41		
파쇄율(%)	미보강시	2.2	4.0	5.0
	연성그리드로 보강시	1.7	1.9	1.8
	강성그리드로 보강시	1.7	1.8	2.1

### 4.3 전단실험결과분석

#### 4.3.1 최대전단응력

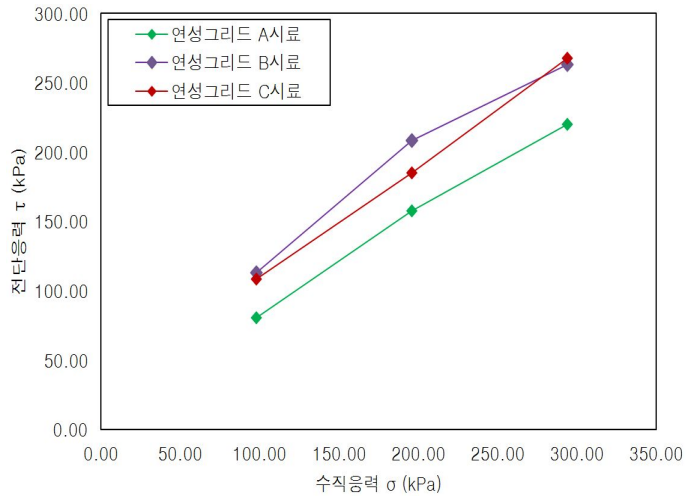
그림 4.16과 같이 미보강된 경우 최대입경 7.9mm인 B시료는 최대입경 4.75mm인 A시료보다 10.83~63.82%, 최대입경 15.99mm인 C시료는 A시료보다 50.49%~70.04%로 증가하였다. 연성그리드로 보강된 경우에는 B시료는 A시료보다 19.70~33.88%, C시료는 A시료보다 17.22~27.13%로 증가하였고, 강성그리드로 보강된 경우에는 B시료가 A시료보다 2.17~24.52%, C시료는 A시료보다 7.29~14.91%로 증가하였다.

그리고 수직응력 196kPa, 294kPa일 때 연성그리드로 보강된 경우에는 C시료가 B시료보다 4.10%, 11.23%로 작고, 강성그리드로 보강된 경우에는 C시료가 B시료보다 13.84%, 0.47%로 작았다. 이는 입경크기 외에 다른 조건은 시료간 모두 동일하였으므로 지오그리드로 보강된 조립토의 전단거동에서의 차이는 입자크기의 차이에서 비롯된 것이라 판단된다.

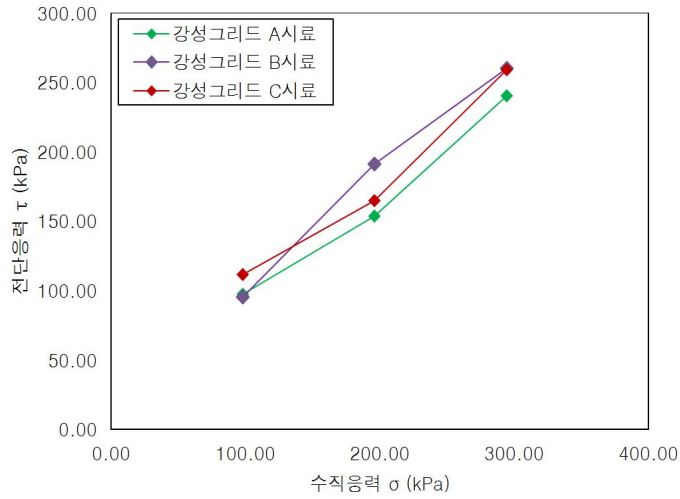


(a) 미보강된 경우

그림 4.16 전단응력 - 수직응력 관계



(b) 연성그리드로 보강된 경우



(c) 강성그리드로 보강된 경우

그림 4.16 전단응력 - 수직응력 관계(계속)

## 4.3.2 내부마찰각 및 점착력

### 가. 내부마찰각

미보강된 경우에는 최대입경이 클수록 내부마찰각은 증가하였고, 지오그리드를 보강된 경우는 미보강된 경우보다 작게 나타났다. 지오그리드를 보강함으로써 내부마찰각이 감소하는 경향은 선행연구 이정훈(2011)의 실험결과와 동일하다.

마찰효율은 최대입경이 커질수록 감소하였는데, A시료에서는 연성 및 강성그리드 보강시 90%, 95%의 내부마찰각을 발현하였다. B시료에서는 연성 및 강성그리드 보강시 87%, 83%의 내부마찰각을 발현하였고 C시료에서는 68%, 64%의 내부마찰각을 발현하였다. 이는 입경크기 외에 다른 조건은 시료간 모두 동일하였으므로 지오그리드로 보강된 조립토의 전단거동에서의 차이는 입자크기의 차이에서 비롯된 것이라 판단된다.

### 나. 점착력

지오그리드(연성/강성그리드)로 보강한 경우 최대입경이 클수록 점착력도 크게 나타났으며, 연성그리드로 보강한 경우 B시료는 A시료보다 31.47% 크게 나타났으며, C시료는 A시료보다 47.18%로 증가하였다. 강성그리드로 보강한 경우 B시료는 A시료보다 64.99%, C시료는 A시료보다 79.42%로 증가하였다. 이러한 차이는 파쇄성과 흙과 지오그리드의 닿는 면적비율이 증가함에 따라 지오그리드의 표면에 흙입자의 미끄러짐이 증가하게 되어 발생한 것으로 판단된다.



## 제 5 장 결론

본 연구에서는 지오그리드(연성/강성그리드)로 보강된 조립토에서 시료의 입경이 조립토의 전단강도에 어떤 영향을 미치는가를 이해하기 위해 상사입도법을 적용하여 최대입경 4.75mm, 7.9mm, 15.9mm의 조립토를 준비하여 미보강 및 지오그리드(연성/강성그리드)로 보강된 경우에 대해 대형직접전단시험을 수행하였다. 시험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 최대입경이 중간과 큰 시료의 체적변화는 미보강된 경우 조밀한 모래의 거동을 보였으며, 수직응력이 감소할수록 체적팽창은 증가하였다.
2. 지오그리드(연성/강성그리드)로 보강한 경우의 내부마찰각은 미보강된 경우의 내부마찰각보다 작게 나타났으며, 이러한 차이는 그리드를 사용한 경우에 흙과 지오그리드의 접촉면적비율이 증가함으로써 흙입자간 맞물림(interlocking)이 감소되어 발생하는 것으로 판단된다. 지오그리드를 보강함으로써 내부마찰각이 감소하는 경향은 기존의 연구결과와 유사하다.
3. 마찰효율은 최대입경이 커질수록 감소하였으며, 최대입경이 작은 시료에 연성 및 강성그리드 보강시 90%, 95%의 내부마찰각을 발현하였다. 최대입경이 중간시료에서는 연성 및 강성그리드 보강시 87%, 83%의 내부마찰각을 발현하였고, 최대입경이 큰 시료에서는 68%, 64%의 내부마찰각을 발현하였다. 이는 입경크기 외에 다른 조건은 시료간 모두 동일하였으므로 지오그리드로 보강된 조립토의 전단거동에서의 차이는 입자크기의 차이에서 비롯된 것이라 판단된다.
4. 지오그리드(연성/강성그리드)로 보강한 경우 최대입경이 클수록 점착력은 증가하였고, 연성그리드로 보강한 시료의 점착력보다 강성그리드로 보강한 시료의 점착력이 크게 발생하였다. 이러한 차이는 파쇄성과 흙입자가 지오그리드 표면에 닿는 면적비율이 증가함에 따라 지오그리드의 표면에 흙입자의 미끄러짐이 증가하게 되어 발생한 것으로 판단된다.

5. 본 연구는 입경 크기에 따른 조립토의 전단거동을 연구하였으며 현장 활용 조립토의 응력-변형 특성을 분석하기 위한 기초 연구로써 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 길성국(2005), “대형인발시험기를 활용한 지오그리드의 인발력평가”, 인천대학교대학원 석사논문.
2. 김대현, 김영수, 김홍택, 신은철, 이영휘(2012), “토질역학”, pp.357-412.
3. 김범주, 조성은, 임은상, 김기영(2006), “Rockfill 재료의 입자크기가 전단강도에 미치는 영향”, 2006, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.1276-1279.
4. 박종범(2004), “인발상자 크기 및 단계적 인발시험에 의한 보강토의 인발특성”, 순천대학교대학원 석사논문.
5. 백종현(2003), “인발시험에 의한 지오그리드 보강토의 마찰특성에 관한 연구”, 순천대학교대학원 석사논문.
6. 서민우, 하익수, 정우성, 김범주(2005), “대형 지반 시험장비를 이용한 댐축조재의 전단 강도 평가”, 2005, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 5352-5355.
7. 서민우, 신동훈, 하익수, 박한규(2006), “대형 삼축압축시험을 통한 석산재와 사력재의 거동 특성 평가”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, 844-853.
8. 서민우, 하익수, 김범주 (2007), “시료입자 크기와 시험장치가 조립토의 거동특성에 미치는 영향” 대한토목공학회논문집, 제27권, 제6C호, pp.393-400.
9. 서민우, 김범주, 하익수(2009), “대형 직접전단시험과 대형삼축압축시험에 의한 조립재료의 전단강도 비교”, 한국지반환경공학회논문집, Vol. 10, No. 1, pp.25-34.
10. 서민우, 김범주, 하익수(2010), “대형 직접전단시험에 의한 조립토의 전단강도 평가”, 한국지반공학회논문집, pp. 157-162.
11. 송신석(1999), “유리섬유 지오그리드의 마찰특성에 관한 실험연구”, 수원대학교대학원 석사논문.
12. 엄세종, 원명수, 김형주(2004), “직접전단시험에 의한 모래의 전단강도 특성”, 대한토목학회 정기학술대회 pp. 5329-5334.
13. 이대수(2008), “대형직접전단시험에 의한 석산골재의 전단거동 분석”, 연세대학교대학원 박사논문.
14. 이대수, 김경열(2008), “대형직접전단시험과 대형삼축시험을 통한 석산골재의 전단 거동 특성 비교”, 한국지반공학회논문집, 제24권 2호, pp.5-14.
15. 이대수, 김경열, 홍성연, 오기대, 정상섭(2009), “대형직접전단시험을 이용한 조립재

- 료의 전단거동 특성(III)”, 한국지반공학회논문집, 제25권 4호, pp.39-54.
16. 이석원, 정경한, 이주공, 윤주문(2005), “대형직접전단시험기를 이용한 쇄석-지오텍스타일간의 마찰 저항각 산정”, 한국토목섬유학회 학술발표회, Vol. 2005, No. 12, pp.57-64.
  17. 이정훈(2011), “지오그리드로 보강된 토목용 필터재의 인발 및 파단저항 특성에 관한 연구”, 부산대학교 대학원 석사논문.
  18. 장용채(2005), “토목섬유를 이용한 대형직접전단시험에 관한 기초적인 연구”, 목포해양대학교, 제13집 2005, pp.81-85.
  19. A. Varadarajan, K.G Sharma, K. Venkatachalam and A.K. Gupta(2003), “Testing and Modeling Two Rockfill Materials”, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol. 129, No. 3, pp.206-218.
  20. Chiwan Wayne Heieh, Gee Ham Chen, Jeng-Han Wu(2011), “The Shear Behavior Obtained from the Direct Shear and Pullout Tests for Different Poor Graded Soil-Geogynthetic Systems”, Journal of GeoEngineering, Vol. 6, No. 1, pp.15-26.
  21. D.T. Bergado, J.C. Chai, H.O. Abiera, M.C. Alfaro, A.S. Balasubramaniam(1993), “Interaction between Cohesive-Frictional Soil and Various Grid Reinforcements”, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 12, No. 4, pp.327-349.
  22. Daehyeon Kim, Myung Sagong, Yonghee Lee(2005), “Effects of Fine Aggregate Content on the Mechanical Properties of the Compacted Decomposed Granitic Soils”, Construction and building Materials, Vol. 19, No. 3, pp.189-196.
  23. K.M. Lee, V.R. Manjunath(2000), “Soil-Geotextile Interface Friction by Direct Shear Tests”, Canadian geotechnical journal, Vol. 37, No. 1, pp.238-252.
  24. N. Yoshida, K. Hosokawa(2004), “Compression and Shear Behaviour of Mudstone Aggregates”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 5, pp.519-525.
  25. R.J. Marsal(1967), “Large Scale Testing of Rockfill Materials”, Journal of Soil Mechanics And Found. Div, ASCE, 93(2), pp.27-43.
  26. T.W. Lambe, R.V. R.V. Whitman(1969), “Soil Mechanics”, John Wiley & Sons, New York.
  27. T. Tanchaisawat, D.T. Bergado, P. Voottipruex, K. Shehzad(2010), “Interaction

between Geogrid Reinforcement and Tire Chip-sand Lightweight Backfill”,  
Geotextiles and Geomembranes, pp.119-127.

## 감사의 글

지난 2년간 대학원 생활을 하면서 새로운 세상에 눈을 뜨게 된 시기였습니다. 제가 몰랐던 전공지식은 물론 학자가 지녀야 할 자세, 사람들이 얽혀 생활하는 사회, 사랑과 관심 등 많은 것을 배우고 생각하게 되기까지 옆에서 지켜봐 주신 많은 분께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

지난 과거로는 전공지식과 사람의 따뜻한 마음가짐을 가르쳐주셨고 현재로는 부족하지만, 논문을 지도해주신 김대현 교수님, 저의 꿈을 향해 나아가기 위해 가장 필요한 대학원 시절을 보내게 해주시고, 인생의 행복에 대해 알게 해주신 교수님께 부족하지만, 글로나마 감사의 말씀을 드립니다.

대학원 생활을 하면서 많은 것을 가르쳐 주신 교수님들께도 감사의 말씀을 드립니다. 항상 웃음으로 대해주시고 학생들이 불편하지 않게 편의를 봐주신 박길현 교수님, 바쁘신 와중에도 시간을 내어 논문수정에 도움을 주신 김운중 교수님, 유익한 시간을 보내기 위해 항상 대학원수업시간에 열정적으로 가르쳐주신 박정웅 교수님, 김성홍 교수님, 이원희 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

또 대학원을 졸업하기까지 도움을 주시고 조언과 따뜻한 마음을 주신 서영대학교 윤선호 교수님께 감사의 말씀을 전하며, 짧지만 2년 동안 토질실험실에서 가르침과 따뜻한 조언을 해주신 김선학 교수님, 논문에 대해 걱정해 주시고 따뜻한 조언을 해주신 박상범 교수님, 항상 웃음을 주시고 따뜻한 마음을 주신 양승현 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

항상 후배들 걱정과 염려, 조언 등을 해주시는 서재우 선배님, 김현태 선배님, 허홍균 선배님 그리고 이번에 박사 졸업하신 임재춘 선배님과 여러 선배님들께 후배에 대한 사랑을 아낌없이 베풀어 주셔서 감사의 말씀을 전합니다.

그리고 때로는 좋은 형처럼 따뜻한 마음을 전해주는 호철이, 바쁜 시간에 논문이 완성되기까지 도움을 줘서 고맙다는 말을 전하고 싶고, 졸업 후 멀리 있지만, 걱정과 걱려를 해준 광기, 힘들어도 내색 없이 대학원 선배로서 도움을 많이 준 경호, 대학원에 들어온 지 얼마 안 되어 힘들지만, 많은 도움을 주고 웃음을 준 실험실의 꿈과 희망 신규와 상주, 너희가 있어 대학원의 생활이 행복했었고, 좋은 추억을 만들어줘서 고맙다는 말을 전합니다.

대학원 생활에 도움을 주고, 걱정해준 정원이, 졸업 동기이자 나이는 어리지만 일 하

나는 푹 부러지게 잘하는 정환이, 우울할 때 웃음을 주고 논문 걱정을 해준 맹선이, 경면이, 인호, 병철이, 승민이, 지승이, 늦은 시간까지 대형직접전단시험에 도움을 많이 준 홍욱이, 종수, 민주, 지금은 다른 일을 하지만 조교생활에 도움을 민영이, 학과 업무를 도맡은 지 얼마 안 된 나리, 문수에게도 고맙다는 말을 전합니다.

그리고 바쁘다는 핑계로 모임에 참가를 못했지만 이해해주는 종수형, 선종형, 순열형, 정웅이, 호민이, 창영이, 진성이 그리고 예비아빠가 될 영동형과 이번에 아빠가 된 왕용이에게도 고맙다는 말을 전하며, 이제 대학교 졸업하고 사회생활에 한지 얼마 안 된 우진이, 광민이, 찬진이, 창호 이외에 모든 분들께 감사의 말을 전합니다.

끝으로 항상 아들을 위해 몸과 마음고생을 하시고 어려운 생활 속에서도 아낌없이 사랑을 주시는 아버지, 어머니, 긍정적인 마음으로 아들을 믿어주시고 학문에 전념할 수 있도록 해주신 부모님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 때로는 아버지, 어머니와 같이 따뜻한 마음을 주시는 큰매형, 큰누나, 작은누나, 작은매형께도 감사의 말을 전하며, 항상 재롱을 피워 웃음을 주는 예쁜 우리 혜주와 윤아, 멀리 떨어져 있어 자주 못 만나지만, 어려서 말도 잘 못하지만 사랑스러운 건이와 민서에게도 사랑의 말을 전합니다.

2012년 8월

하 성 우