



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](#)

2016년 2월

석사학위논문

무등산국립공원 입석대
주상절리대에 대한 공학적 특성

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김마루찬

무등산국립공원 입석대
주상절리대에 대한 공학적 특성

Engineering Properties on Ipseok-dae Columnar Joints
of Mt. Mudeung National Park

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김마루찬

무등산국립공원 입석대
주상절리대에 대한 공학적 특성

지도교수 강 성 승

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 마 루 찬

김마루찬의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 장 일 식 (인)

위 원 조선대학교 교수 최 태 진 (인)

위 원 조선대학교 교수 강 성 승 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

- 목 차 -

List of 표s	i
List of 그림s	ii
Abstract	iv
1. 서론	1
2. 연구배경	3
3. 연구지역	5
4. 시험방법	8
4.1 암반의 물리적 특성	8
4.1.1 시험편 제작	8
4.1.2 공극률 및 밀도	12
4.1.3 종파속도	14
4.2 암반의 역학적 특성	15
4.2.1 일축압축강도 시험	14
4.2.2 절리면 전단시험	16
4.2.3 불연속면 방향	17
4.2.4 불연속면 거칠기	18
4.2.5 불연속면 표면강도	20
4.3 입석대 주상절리대 현장 조사	21
4.3.1 입석대 주상절리대 크기 측정	21
4.3.2 진동 및 소음 측정	22
4.3.3 국지 기상 측정	24
4.4 수치해석	25
4.4.1 3DEC 소개	25
4.4.2 3DEC을 이용한 입석대 주상절리의 거동 평가	25

4.4.3 Soilworks 소개	27
4.4.4 Soilworks를 이용한 입석대 주상절리대 하중에 의한 지반 변형 평가	27
5. 연구결과	29
5.1 무등산옹회암의 물리·역학적 특성	29
5.1.1 공극률 및 밀도	29
5.1.2 종파속도	30
5.1.3 일축압축강도	31
5.1.4 절리면전단강도	33
5.1.5 불연속면 방향	38
5.1.6 불연속면 거칠기	39
5.1.7 불연속면 표면강도	40
5.2 입석대 주상절리대 현장 조사	42
5.2.1 입석대 주상절리대 크기 측정	42
5.2.2 진동 및 소음 측정	43
5.2.3 국지 기상 측정	46
5.3 수치해석	51
5.3.1 3DEC을 이용한 입석대 주상절리대의 거동 평가	51
5.3.2 Soilworks를 이용한 주상절리대 하중에 의한 지반변형 평가	54
6. 무등산국립공원 입석대 주상절리에 대한 공학적 고찰	66
7. 결론	67
참고문헌	68

List of 표s

표 3.1 무등산국립공원 지질계통표	7
표 4.1 무등산응회암 시험편	11
표 5.1 무등산응회암 물성값, M_i : 초기무게, M_{sub} : 수중무게, M_{dry} : 건조무게, M_{sat} : 포화무게, G_s : 비중, S : 포화도, Po : 공극률, ρ : 밀도	29
표 5.2 무등산응회암 종파속도 (V_p)	30
표 5.3 무등산응회암 일축압축도; 영률(E), 포아송비(ν)	31
표 5.4 절리면전단시험 결과; 수직강성(k_n), 전단강성(k_s), 점착력(c), 마찰각(θ) ...	34
표 5.5 입석대 주상절리대 불연속면 방향	38
표 5.6 JRC 표준도와 JRC 차트를 통한 불연속면 거칠기 측정값	39
표 5.7 입석대 주상절리대 표면강도	40
표 5.8 무등산국립공원 입석대 주상절리대 크기	42
표 5.9 월별 진동소음 측정 결과	45
표 5.10 월별 입석대 주상절리대 국지 기상 측정 결과	47
표 5.11 입석대 주상절리대 최대 변위값	53
표 5.12 Case 1, 2, 3 입석대 주상절리대 지반 변형 결과값	63

List of 그림s

그림 3.1 연구지역, (a) 지형위치 및 지질(Kim, et al., 2002), (b) 입석대 위치	6
그림 4.1 시험편 제작 장비, (a) 드릴링머신, (b) 암석절단기, (c) 연마기	9
그림 4.2 시험편 제작 장비, (a) 드릴링머신, (b) 암석절단기, (c) 몰딩	9
그림 4.3 무등산응회암 일축압축시험용 시험편	10
그림 4.4 무등산응회암 절리면 전단시험용 시험편	10
그림 4.5 밀도 및 공극률 측정과정, (a) 테시케이터 및 진공오일펌프, (b) 전자저울, (c) 건조기	13
그림 4.6 종파속도 측정장비 CND의 구성도	14
그림 4.7 일축압축강도 시험을 위한 장비 구성도	15
그림 4.8 절리면 전단시험기 장비 구성도	16
그림 4.9 불연속면 방향 측정, (a) 측정방법, (b) 클리노미터(Clinometer)	17
그림 4.10 입석대 주상절리 불연속면 측정, (a) 입석대 15번 주상절리대, (b) 거칠기 측정 모습	18
그림 4.11 절리 거칠기 상수 산정 방법, (a) JRC standard (Barton and Choubye, 1977), (b) JRC chart (Barton and Bandis, 1982)	19
그림 4.12 그림 4.12 불연속면 표면강도 측정, (a) 표면강도 측정모습, (b) 실버 슈 미트헤머 구성도	20
그림 4.13 그림 4.13 입석대 주상절리대 크기 측정, (a) 주상절리대 크기 측정 모습, (b) 거리 측정기 구성도	21
그림 4.14 진동소음 측정기 구성도	22
그림 4.15 진동소음 측정기 설치위치, SV-1(전망대 탐방로 부근), SV-2(입석대 표 석지 부근)	23
그림 4.16 그림 4.16 입석대 주상절리대 국지 기상 측정, (a) 국지 기상 측정 모습, (b) 국지 기상 측정 장비	25
그림 4.17 3DEC에 적용될 입석대 주상절리대 페이스맵핑	26
그림 4.18 Soilworks에 적용될 입석대 주상절리대 페이스맵핑	28
그림 5.1 시험편별 종파속도 그래프	30
그림 5.2 시험편별 일축압축강도 그래프	32

그림 5.3 시험편별 영률 그래프 32
 그림 5.4 시험편별 포아송비 그래프 32
 그림 5.5 시험편 MJT-1의 단계별 수직강성 그래프, (a) 1단계, (b) 2단계, (c) 3단계, (d) 4단계, (e) 5단계, (f) 전체단계 35
 그림 5.6 시험편 MJT-2의 단계별 수직강성 그래프, (a) 1단계, (b) 2단계, (c) 3단계, (d) 4단계, (e) 5단계, (f) 전체단계 36
 그림 5.7 전단강성 그래프, (a) MJT-1 전단강성, (b) MJT-2 전단강성 37
 그림 5.8 마찰각 및 점착력 그래프, (a) MJT-1 마찰각 및 점착력, (b) MJT-2 마찰각 및 점착력 37
 그림 5.9 15번 주상절리대의 불연속 거칠기 39
 그림 5.10 주상절리대 표면강도, (a) 발반결도(Q값), (b) 일축압축강도(MPa) 41
 그림 5.11 월별 진동 측정값 44
 그림 5.12 무등산국립공원 입석대 국지기상 측정결과 그래프, (a) 표면온도, (b) 주변온도, (c) 습도, (d) 풍속 50
 그림 5.13 3DEC을 이용한 입석대 주상절리대 모델링 52
 그림 5.14 입석대 주상절리대 거동, (a) 전체변위, (b) X축 변위, (c) Y축 변위, (d) Z축 변위 52
 그림 5.15 Soilworks를 이용한 입석대 주상절리대 지반 모델링 54
 그림 5.16 Case1의 거리 및 심도별 변위 그래프, (a) 0m, (b) 1m, (c) 2m, (d) 3m 55
 그림 5.17 Case1의 거리 및 깊이, (a)수평변위, (b)수직변위, (c)전체변위 56
 그림 5.18 Case2의 거리 및 심도별 변위 그래프, (a) 0 m, (b) 1 m, (c) 2 m, (d) 3m, (e) 4m, (f) 5m, (g) 6m, (h) 7m 58
 그림 5.19 Case2의 거리 및 깊이, (a)수평변위, (b)수직변위, (c)전체변위 59
 그림 5.20 Case3의 거리 및 심도별 변위 그래프, (a) 0 m, (b) 1 m, (c) 2 m, (d) 3 m, (e) 4 m, (f) 5 m 61
 그림 5.21 Case3의 거리 및 깊이, (a)수평변위, (b)수직변위, (c)전체변위 62
 그림 6.1 입석대 주상절리대 표면상태, (a) 변질 및 식생 (b) 균열 및 박리박락 ... 66

Abstract

Engineering Properties on Ipseok-dae Columnar Joints of Mt. Mudeung National Park

By MA RU CHAN KIM

Adv. Prof. : Seong-Seung Kang, Ph.D,
Dept. of Energy and Resources Engineering
Graduate School of Chosun University

There are increasing internal and external concern of protecting and managing the natural heritages, and many projects are currently in progress to utilize such attention in the field of education or tourist attractions. The two examples are UNESCO's designation of World Natural Heritage and Global Geoparks. In Korea, various shapes of geologically valuable columnar joint, which is sufficient to be designated as a National Geopark or a World Geopark are distributed in the specific areas of the country. However, a delicate engineering approach has not been performed, but studies about the domestic columnar joints have been commonly focused on lithological, geological, geomorphological, historical and cultural aspects. If the study combining geology, geomorphology, biology, history, culture and engineering regarding the columnar joint is performed, it will coincide with the definition of the World Geopark suggested by UNESCO. In this study, we assessed the engineering characteristics of the Ipseok-dae columnar joints, Mt. Mudeung national park in order to maintain a stability of them.

According to the results, the physical properties of Mt. Mudeung tuff, which is consisted of the Ipseok-dae columnar joints showed 0.65 % of porosity, 2.67 g/cm³ of density, and 2,427 m/s of P-wave velocity. The uniaxial compressive strength were 322 MPa with 81 GPa of Young's modulus and 0.25 of Poisson's ratio. The normal and shear stiffnesses by joint shear test are 3.15 G Pa/m and 0.38 G Pa/m, and the internal friction angle and cohesion are 35° and 0.5 MPa, respectively. The maximum vibration around the Ipseock-dae columnar joints

was 2.35 PPV(m/s). There are mainly caused by the visitors, and its effect is very small. The average hardness Q-value measured by the Silver Schmidt hammer was 57. Since the Ipseok-dae columnar joints is located at an altitude of 1,107m, the Ipseok-dae columnar joints might undergo various environmental influences such as temperature, humidity, wind, freezing and thaw, plants. The behavior of the columnar joints using 3DEC software represented with the maximum bilateral displacement (X-axis) of 83.9 μ m, the maximum front and rear displacement (Y-axis) of 0.8mm and the maximum vertical displacement (Z-axis) of 1.26mm. The ground deformation using Soilworks software represented the minimum ground deformation of 0.01mm the maximum ground deformation of 8.41mm in Case-1, the minimum of 0.01mm of the maximum of 57.75mm in Case-2, and the minimum of 0.01mm and the maximum of 12.2mm in Case-3. The above results means that the behavior and ground deformation of the Ipseok-dae columnar joints affect very little, that is, the Ipseok-dae columnar joints are under overall stable condition.

In conclusion, the engineering approach for the stability of the Ipseok-dae columnar joints will play an important role in preserving the natural heritage, as well as securing the visitor's trails. However, it is considered that more engineering data for evaluating stability of the columnar joints with a long-term plan is needed.

1. 서론

최근 국내외적으로 자연유산을 보호하고 관리하고자 하는 관심이 증가하고 있으며, 이를 교육과 관광자원에 활용하기 위한 다양한 프로젝트가 진행되고 있다. 그 대표적인 예로 유네스코의 세계자연유산과 세계지질공원 등재를 들 수 있다. 국내에는 지질학적으로 충분히 가치가 있는 주상절리대가 전국적으로 특정한 지역에 다양한 형태로 분포하고 있다. 이는 지질학적으로 매력이 있을 뿐만 아니라 지형학적으로도 아름다움을 주고 역사와 문화의 이야기를 전달해 줄 수 있으며 경제적 가치가 매우 크다. 이는 지질학적으로 가치가 있는 자연유산이므로 국가지질공원이나 세계지질공원에 등재될 가능성이 충분하다. 지금까지 국내 주상절리대에 대한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 수행된바 있다(윤성호 외, 2005; 황상구와 김재호, 2009; 김영석과 진광민, 2010; 안건상, 2010, 2014(a), 2014(b); 장윤득 외, 2013; 우경식, 2014). 윤성호 외(2005)는 제주도 남부 대포동 해안 일대 지삿개 주상절리를 이루는 현무암에 대한 주상절리의 형태학과 암석기재 및 주성분 암석화학적 특징을 연구하였다. 황상구와 김재호(2009)는 주왕산 국립공원의 수직절리는 주왕산용회암이 냉각되는 직후에 생성되는 냉각 주상절리이며, 이러한 특징은 주왕산용회암의 치밀용결대에 여러 방향으로 교차되면서 수직으로 발달하는 주상절리에 그 원인이 있다고 연구하였다. 김영석과 진광민(2010)는 울산 정자해수욕장과 경주 읍천해안에서 관찰되는 주상절리의 발달특성을 분석하고 이는 용암분출에 의한 상하부로부터의 냉각이 아닌 횡적인 바닷물의 유입이나 접촉과 같은 비정상적인 냉각작용에 의해 주상절리가 형성되었다고 연구하였다. 안건상(2010)은 무등산은 중생대 백악기에 형성된 광주함몰대의 화산활동으로 형성되었으며, 무등산의 정상부는 암회색을 띠는 석영안산암이 분포한다고 연구하였다. 장윤득 외(2013)은 울릉도 국수바위 양측면에 노출된 주상절리의 대조를 바탕으로 용암의 분출 이후의 냉각과정에 대해 형태 및 광물학적인 측면으로 연구하였다. 안건상(2014(a))는 남한에서의 주상절리 분포지역과 그들의 형태학적, 암석학적 특징을 연구하였다. 안건상(2014(b))는 우리나라에 분포하는 주상절리를 이해하고, 활용하기 위해서는 기하학적 형태, 형성 메커니즘, 수평단면과 내부 구조, 화산암의 산출 상태에 따른 주상절리 형태와 크기, 절리 형성에 대한 수치 모델 및 컴퓨터 그래픽 활용, 모암의 암석학적 및 광물학적 연구, 또한 지표에 노출된 후의 변질, 풍화작용의 결과에 의한 2

차적인 경관에 대한 접근이 필요하다고 연구하였다. 우경식(2014)는 국가와 세계지질공원의 자격을 갖추기 위해서는 지역이 가져야할 지질유산의 지질학적 가치와 중요성의 의미, 지질명소의 보전방법, 관리기구의 역할, 교육관광의 지향점, 지역경제 활성화와 지질공원망의 의미를 설명하였다. 이상과 같이 국내 주상절리대에 연구는 주로 암석학적, 지질학적, 지형학적, 역사와 문화 등에 집중되어 이루어졌다. 반면에 주상절리대에 대한 공학적 접근은 구체적으로 수행된 바가 없다. 따라서 주상절리의 지질학적 특성 규명 못지않게 주상절리의 과학적인 보존과 안정성을 확보하기 위해서는 공학적 특성을 함께 살펴보는 것이 중요하다. 본 연구에서는 무등산국립공원의 입석대 주상절리대를 대상으로 실내시험, 현장시험을 통하여 물리적 및 역학적 특성, 풍화상태를 살펴보고 수치해석을 통해 주상절리대의 안정성 및 지반변형을 평가하여 자연유산에 대한 공학적인 접근에 대한 가능성을 살펴보고자 한다.

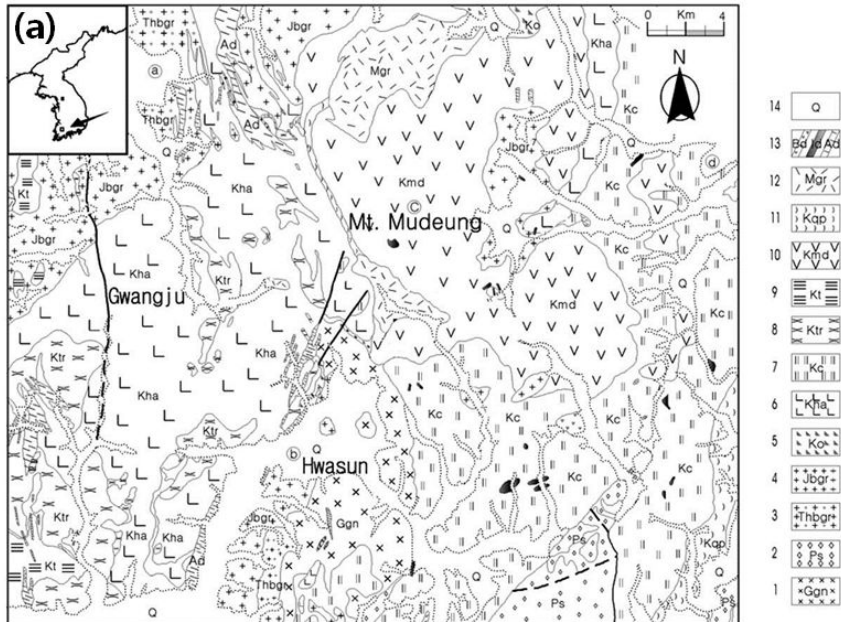
2. 연구배경

국내에는 자연경관적인 측면은 물론 지질학적인 면에서도 경제적 및 교육적으로 충분한 가치가 있는 주상절리대가 여러 지역에 분포하고 있다. 대표적으로는 현무암에 해당하는 제주도 중문-대포 주상절리대를 예로 들 수 있다. 또한 신생대 제3기 말 플라이오세에서 제4기 홀로세 시기에 형성된 조면암 내지 현무암질 울릉도 주상절리대와 현무암 용암류에 형성된 한탄강 유역 주상절리대를 들 수 있다. 그리고 화산쇄설층내 응회암질의 주왕산국립공원과 무등산국립공원의 주상절리대가 있다. 이들 주상절리대 외에도 여러 지역에 소규모로 발달해 있다. 여러 지역에 분포하고 있는 주상절리대는 형성시기와 구성암석이 다르며, 더군다나 분포하고 있는 위치가 해안, 강, 산 등으로 다양한 자연환경에 놓여 있다. 따라서 주상절리대가 오랜 기간 자연상태에 노출되면서 온도, 습도, 바람과 같은 기상의 영향, 봄, 여름, 가을, 겨울 등의 계절적 영향, 강우나 눈 등의 영향, 식물이나 이끼 등의 영향 등으로 인하여 변형되거나 변질되기도 한다. 이러한 변형과 변질이 계속적으로 반복되면 주상절리 표면뿐만 아니라 내부로까지의 변형이 진행될 수 있다. 주상절리 표면의 대표적인 변형으로는 박리박락을 들 수 있고, 내부의 변형으로는 크고 작은 균열의 생성을 들 수 있다. 이러한 변형이 가속화되면 결국에는 원래의 안정적인 상태를 잃고 파괴에 이르게 된다. 무등산국립공원에 분포하고 있는 주상절리대의 경우 대부분 해발 1,000 m 높이의 고원에 위치해 있기 때문에 이러한 자연현상의 영향을 받기가 쉽다. 따라서 주상절리대의 장기적인 보존과 안정성을 확보하기 위해서는 이에 대한 다양한 관리대책이 세워져야 할 것이다. 국내 주상절리대에 대한 연구는 주상절리의 생성과 변화에 대한 연구로서 지질학적 조사(안건상, 2010; 장윤득 외, 2013), 지형학적 조사(황상구와 김재호, 2009; 윤성효 외, 2005, 안건상, 2014(a)), 주상절리의 위치와 규모(크기, 수량, 면적 등)의 조사(김영석과 진광민, 2010) 등을 들 수 있다. 즉, 주상절리의 생성 원인, 주상절리의 형태학적 분석, 주상절리의 암석학적 분석 등의 지질학적인 관점의 연구와 논의가 주로 이뤄졌다. 하지만 앞으로는 지질학적인 관점뿐만 아니라 주상절리의 거동과 지반변형에 대한 안정성을 평가하기 위해서는 공학적인 관점도 고려해야 한다. 본 연구는 이러한 공학적인 측면을 고려하기 위한 연구의 시작으로 기초적인 연구를 수행하고자 한다. 이를 위해 첫째, 주상절리대 암반에 대한 기본적인 특성을 파악하기 위해 암석의 물리적 특성과

역학적 특성을 살펴보았다. 둘째, 주상절리대의 풍화상태와 원인을 살펴보기 위하여 불연속면 방향성, 거칠기, 표면강도, 국지 기상 측정, 진동 및 소음 등의 현장 시험을 실시하였다. 마지막으로 주상절리대의 거동과 주상절리대에 의한 지반변형 상태를 파악하여 주상절리대 안정성을 평가하기 위해 수치해석을 실시하였다.

3. 연구지역

무등산국립공원은 동경 126°06′-127°01′, 북위 35°06′-35°10′에 위치하며, 행정구역상으로는 광주광역시와 전라남도 담양군, 화순군에 걸쳐 있으며, 27.0km²가 광주광역시, 2.4km²가 화순군, 0.8km²가 담양에 속한다(그림 3.1(a)). 무등산국립공원 입석대의 지형은 해발 약 1,017m에 위치하며, 5-18m의 높이로 노출되어 있으며, 돌기둥 30여개가 동서 120m 폭으로 나란히 늘어서있다(그림 3.1(b)). 또한 입석대 주상절리대의 모양은 원기둥 형태가 아니라 한 면이 1~2m 정도의 길이로 단면은 5~6각형의 기둥형태로 발달되어 있다. 무등산국립공원 지질은 중생대 백악기 초부터 신생대 제3기초까지 한반도에서 격렬한 화산활동에 의해 한반도 남부에서는 경상분지를 비롯하여 서남해안 일원과 옥천습곡대에 북동-남서 또는 남부방향의 큰 구조선을 따라 여러 개의 소분지가 형성되었다. 이러한 분지가 형성되면 분지 내부에 퇴적물이 쌓이는 동시에 화산암이 분출하여 넓은 지역을 덮는다. 옥천습곡대에는 영동분지, 순창분지, 능주분지와 같은 소분지가 형성되었다(진명식 외, 2005). 이 중 능주분지는 광주광역시를 포함하는 직경 약 40 km 크기의 원형 함몰체로서, 함몰대 동쪽에는 안산암과 유문암으로 구성된 무등산 화산암체가, 함몰체 남부-남서부에는 유문암류로 구성되어 있는 능주화산암체가 분포한다(표 3.1). 이 두 화산암체의 분출물은 화순지역에서 서로 교호하는 산상을 보여준다. 또한 무등산 남서부 약 4km와 동쪽 약 10km보다 더 바깥쪽에는 환상의 암맥이 특징적으로 관입하고 있다.(차문성과 윤성호, 1988). 최근까지 무등산국립공원 정상부인 천왕봉을 포함하여, 서석대, 입석대, 등 주상절리를 이루는 암체는 용암류에 의해 형성된 석영안산암이라고 해석되어 왔다(김봉균과 박병권, 1966; 김용준 외., 2002; 안건상, 2010). 하지만 김용준 외(2002)은 무등산의 다양한 고도에 분포하는 본암에서 화산력(lapilli) 크기의 암편과 부석편이 관찰되며, 입석대 정상부에서도 수평방향으로 반복되는 엽리와 신장된 피아메가 보인다. 용결구조를 보이는 사장석 반정들을 발견하여 일부는 용결응회암일 가능성을 제시한 바 있다. 따라서 현재 무등산국립공원의 주상절리대를 이루는 암석은 용결응회암이라는 정식명칭으로 사용되고 있다.



1: Precambrian granite gneiss, 2: Pyeongan Super Group, 3: Jurassic hornblende biotite granodiorite, 4: biotite granite, 5: Cretaceous Orei formation, 6: Hwasun andesite, 7: Jangdong formation, 8: Dogok rhyolite, 9: tuffs, 10: Mudeungsan Quartz andesite, 11: Quartz porphyry, 12: Micrographic granite, 13: dikes, 14: Alluvium

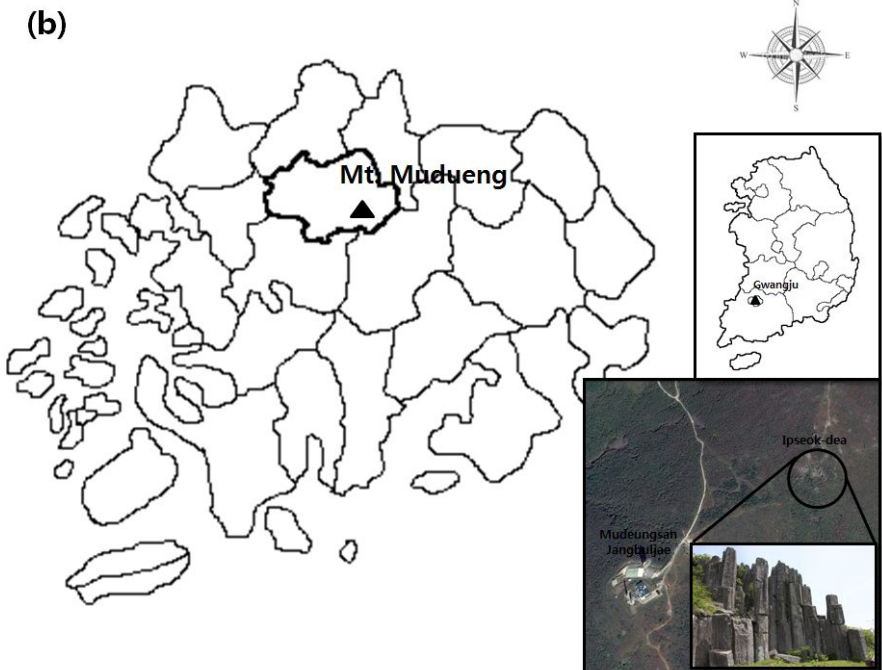


그림 3.1 연구지역, (a) 지형위치 및 지질(김용준 외, 2002), (b) 무등산국립공원 입석대 주상절리대 위치

표 3.1 무등산국립공원 지질계통표(김용준 외, 2002)

Quat.		Alluvium ~ ~ ~ unconformity ~ ~ ~
Cret.		Dikes ----- intrusion ----- Micrographic granite ----- intrusion ----- Quartz porphyry ----- intrusion ----- Mudeung-san dacite ----- ? ----- Dogok rhyolite Changdong Formation Hwasun andesite Manweol-san tuff Oeri Formation
Jura.		~ ~ ~ unconformity ~ ~ ~ Quartz diorite ----- ? -----
Tria.		Homblende-biotite granodiorite (Gwangju granites)
Paleo.		----- intrusion ----- Meta-Pyeongan Supergroup
Pre-camb.		~ ~ ~ unconformity ~ ~ ~ Granite gneiss

4. 시험방법

무등산국립공원 입석대 주상절리대의 풍화 메커니즘과 안정성 평가를 위해서 실내 및 현장시험을 실시하였다. 실내시험으로는 무등산국립공원 입석대 주상절리대 구성 암석인 무등산응회암에 대한 기본 물성값을 살펴보기 위하여 물리적 성질(밀도, 공극률, 종파속도)시험과 역학적 성질(일축압축강도 시험, 절리면 전단시험) 시험을 실시하였다. 또한 입석대 주상절리대의 거동 평가와 지반변형 상태를 평가하기 위하여 개별요소법인 3DEC과 유한요소법인 Soilworks 프로그램을 이용한 수치해석을 실시하였다.

4.1 암반의 물리적 특성

4.1.1 시험편 제작

무등산국립공원 입석대 주상절리대의 역학적 거동 및 특성을 관찰하기 위하여 입석대 주상절리대 부근에서 무등산응회암을 채취하였다. 무등산응회암 일축압축시험용 시험편 제작은 그림 4.1과 같다. 시험편은 한국암반공학회 암석표준시험법(2010)에 근거하여 제작하였다. 즉 시험편의 크기는 NX코어 직경 약 54 mm, 길이는 직경의 1.5배~2.5배 크기의 원형시험편으로 제작하였다. 시험편의 편평도는 연마기를 이용하여 상하 압축면에 대해 일정한 하중이 작용하도록 다이아몬드 연마편(diamond grinding wheel)을 이용하여 편평도의 오차가 ± 0.02 mm 이내가 되도록 정밀하게 연마를 하였다. 절리면 전단시험용 시험편 제작은 그림 4.2에서 보는 바와 같이 절리면전단시험용 액세서리 규격에 맞추어 100×100×50으로 제작하였다. 일축압축시험용 시험편은 건조 상태의 무등산응회암 MT-1, MT-2, MT-3으로 분류하여 표기하였으며, 절리면 전단시험용은 MJT-1, MJT-2으로 분류하여 표기하였다. 각 시험편은 표 4.1에 정리하였다. 일축압축시험용으로 성형된 시험편은 그림 4.3에서 보이며, 절리면 전단시험용으로 성형된 시험편은 그림 4.4에서 보인다.



그림 4.1 시험편 제작 장비, (a) 드릴링머신, (b) 암석절단기, (c) 연마기

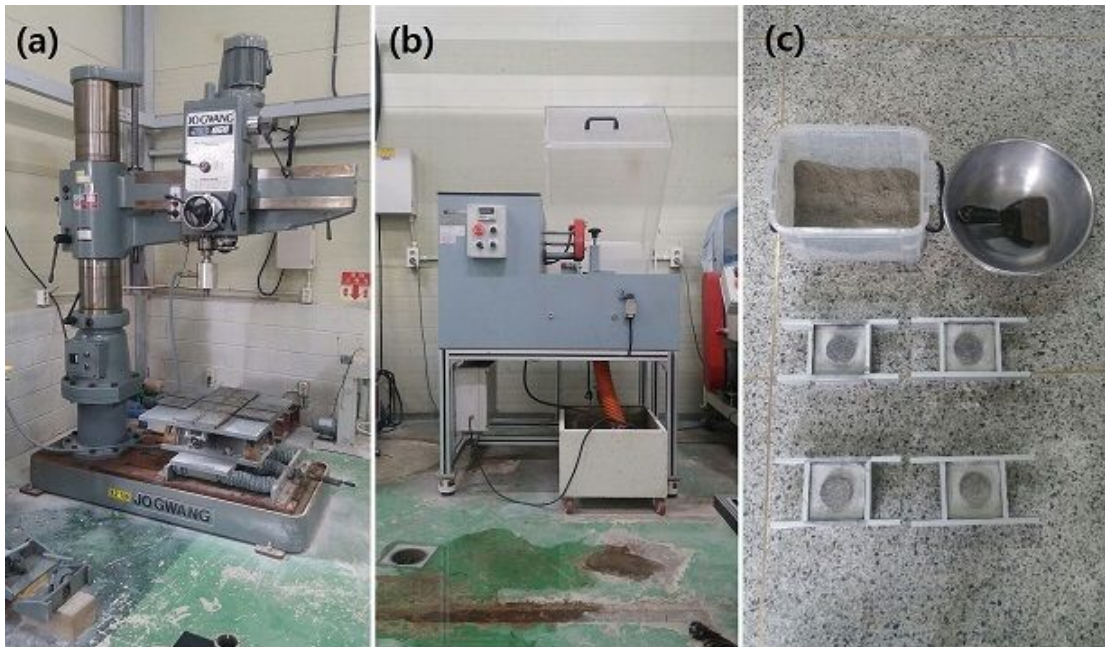


그림 4.2 시험편 제작 장비, (a) 드릴링머신, (b) 암석절단기, (c) 물딩



그림 4.3 무등산응회암 일축압축시험용 시험편

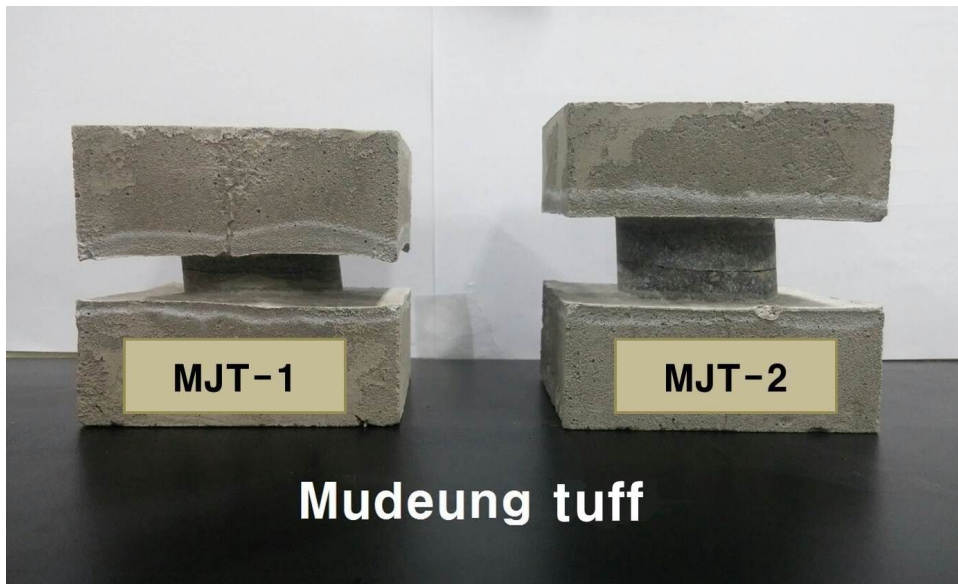


그림 4.4 무등산응회암 절리면 전단시험용 시험편

표 4.1 무등산응회암 시험편

실험방법	시험편 번호	직경 (mm)	길이 (mm)	몰드 약세서리 (mm)
일축압축 강도시험	MT-1	55.0	108.5	-
	MT-2	54.5	107.4	-
	MT-3	54.9	108.5	-
절리면 전단시험	MJT-1	56.2	-	100×100×50
	MJT-2	55.8	-	100×100×50

4.1.2 공극률 및 밀도

무등산응회암의 공극률 및 밀도 측정을 실시하였다. 시험편은 앞서 제작된 무등산응회암 MT-1, MT-2, MT-3 시험편을 사용하였다. 측정 방법은 한국암반공학회 암석표준시험법(2010)에서 규정한 시험법에 근거하여 총 3단계에 걸쳐 실시하였다(그림 4.5). 먼저, 앞서 제작된 무등산응회암 MT-1, MT-2, MT-3 시험편의 초기 질량(M_i)를 측정하였다. 다음으로 데시케이터와 진공오일펌프(ULVAC KIKO, Inc., 모델번호 GLD-051)를 이용하여 시험편을 12시간 이상 800 Pa(6 torr)이하의 진공 상태에서 수침하여 포화시킨다. 그 후 포화된 시험편은 모델번호 JH-600의 수중무게 측정 장치에 있는 바구니에 넣고, 0.001g까지 측정이 가능한 전자저울(Precisa Gravimetrics AG, 모델번호 Precisa Balances 320XT)을 이용하여 시험편의 수중무게(M_{sub})을 측정한다. 측정된 시험편을 수조에서 꺼내어 젖은 천으로 표면을 닦아내고 시험편의 표면건조 포화 상태의 무게(M_{sat})를 측정한다. 마지막으로, 건조기를 이용하여 24시간 이상 105°C에서 ± 3 정도의 온도를 유지한 이후에 시험편의 건조무게(M_{dry})를 측정한다. 마지막으로 앞서 측정된 수중무게, 포화무게, 건조무게를 각각 이용하여 식 (4.1)~(4.5)로부터 공극률과 밀도를 산출한다.

$$\text{공극률}(n) = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\text{포화도}(s) = \frac{1-n}{1} \times G_S \times \frac{M_i - M_{dry}}{M_{dry}} \quad (4.2)$$

$$\text{비중}(G_S) = \frac{M_{dry}}{M_{sat} - M_{sub}} \quad (4.3)$$

$$\text{물의 밀도}(\rho_w) = 1g/cm^3 \quad (4.4)$$

$$\text{밀도}(\rho_i) = (1-n) \times G_S \times ns \times \rho_w [kg/m^3] \quad (4.5)$$

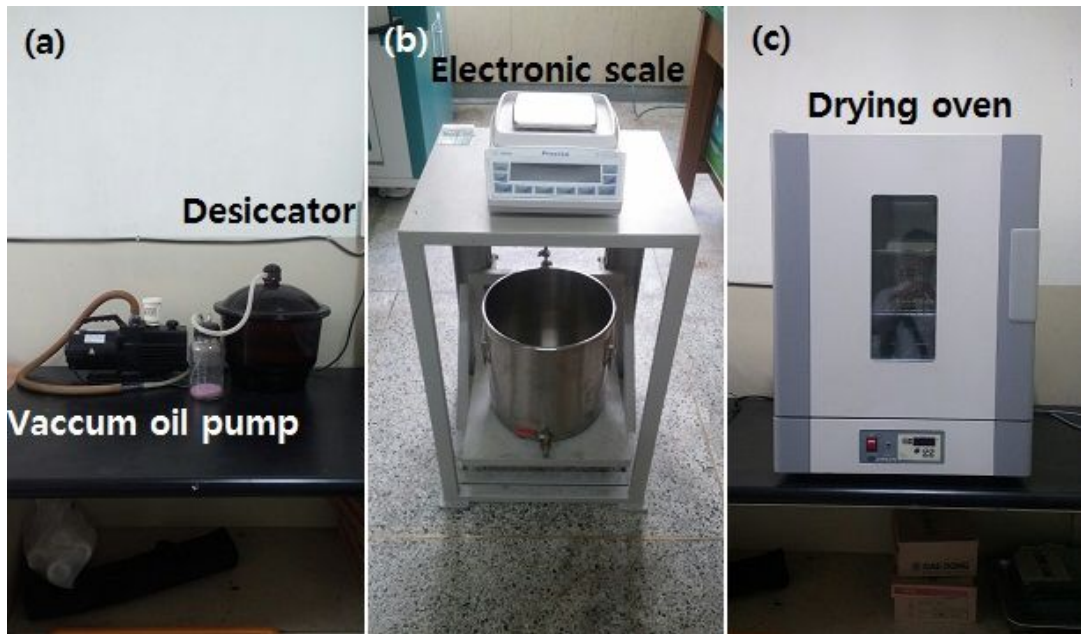


그림 4.5. 밀도 및 공극률 측정과정, (a) 데시케이터 및 진공오일펌프, (b) 전자저울, (c) 건조기

4.1.3 종파속도

무등산응회암의 내부에 존재하는 공극이나 균열에 의해 나타날 수 있는 속도 차이를 살펴보기 위하여 시험편 MT-1, MT-2, MT-3에 대한 종파속도(V_p)를 측정하였다. 종파속도는 Concrete Non-Destructive Tester(CND)(MISUNG C & S INSPECTION Co. Ltd., 모델 번호 CND02-02)를 사용하여 측정하였다. 이 장치는 본체와 발신과 수신용 센서, 그리고 센서에서 본체로 신호를 전달 할 수 있는 BNC connector cable로 구성되어 있다(그림 4.6). 측정 방법은 CND 본체에 시험편의 길이를 입력한 이후 발신 감지기로부터 생성된 펄스가 시험편을 통과하여 수신 감지기에 도달할 때의 초기시간을 기록한다. 측정값은 각 시험편 별로 3번 측정해서 얻은 값에 대한 평균값을 사용하였다.

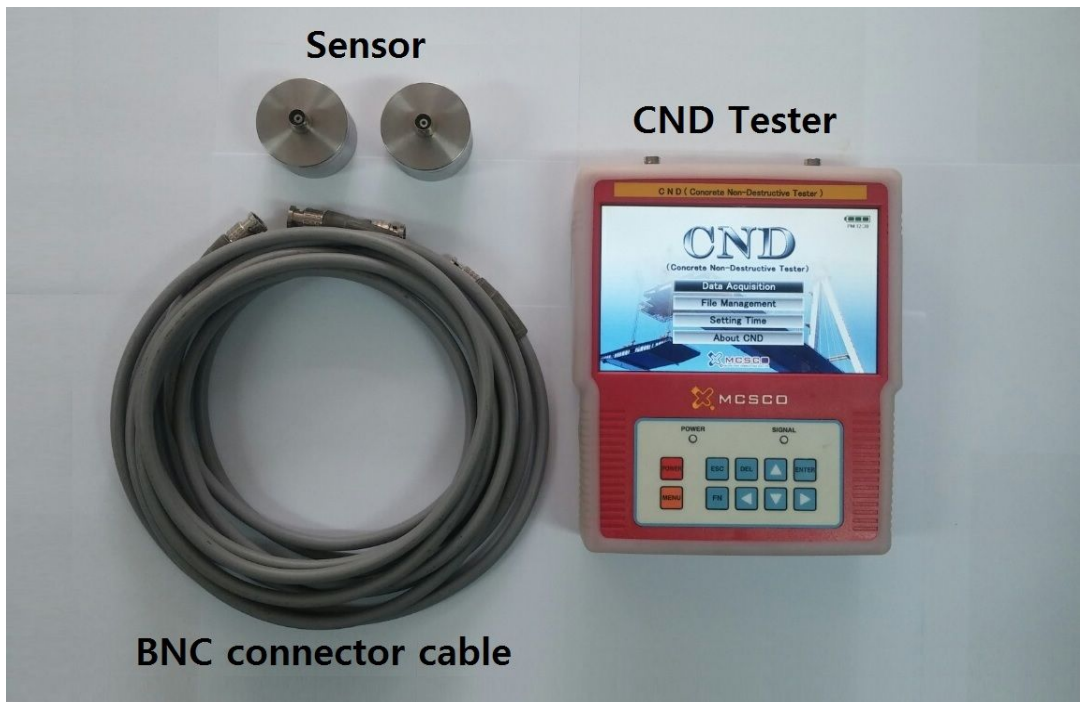


그림 4.6 종파속도 측정장비 CND의 구성도

4.2 암반의 역학적 특성

4.2.1 일축압축강도 시험

일축압축강도 시험을 통하여 무등산응회암의 일축압축강도(uniaxial compression strength), 영률(Young's modulus), 포아송비(Poisson's ratio)를 살펴 보았다. 시험편은 무등산응회암 MT-1, MT-2, MT-3 시험편을 사용하였다. 일축압축시험은 ISRM(1979)과 한국암반공학회 암석표준시험법(2010)에서 규정한 시험법에 근거하여 실시하였다. 일축압축강도 시험은 Servo controller를 이용하여 1mm/min으로 변위조절이 가능한 만능재료 시험기(DEAKYOUNG TECH & TESTER MTG. Co. Ltd.의 모델 번호 DTU-900HC)를 사용하였으며 측정 시 변형률과 축하중 값들은 일본 KYOWA사(모델 번호 UCAM-65B-AC M14)의 데이터로거를 통해서 획득되며, 모든 자료는 컴퓨터를 사용하여 처리된다.

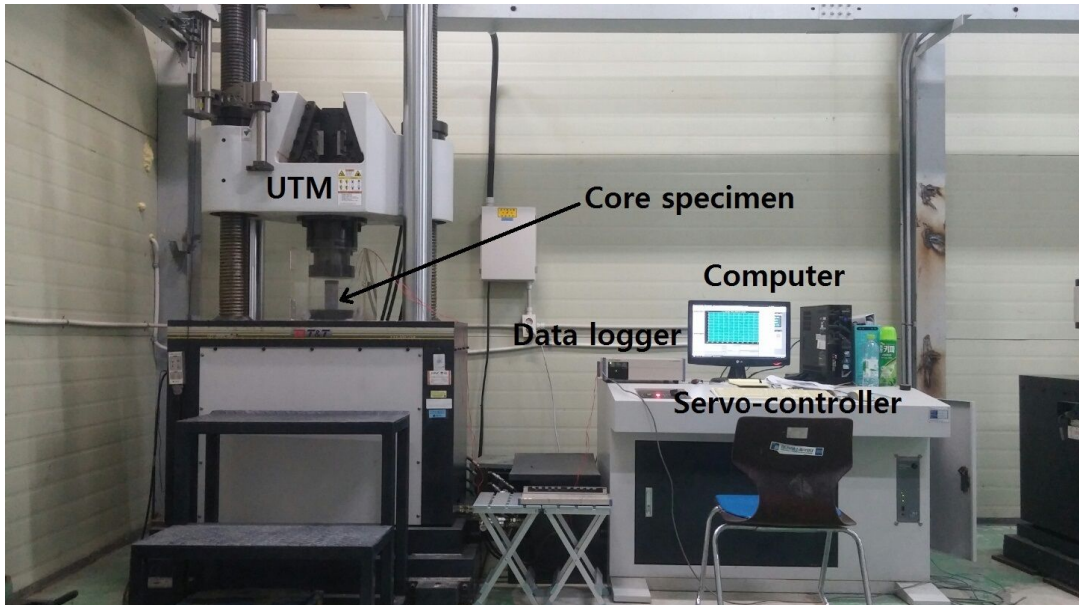


그림 4.7 일축압축강도 시험을 위한 장비 구성도

4.2.2 절리면 전단시험

입석대 주상절리대 암석블록들의 경계면을 따라 발생하는 암반의 파괴와 변형을 이해하기 위해서는 절리면들의 거동 특성을 파악해야 한다. 본 시험에서는 절리면 전단시험을 통하여 압축응력과 전단응력이 동시에 가해진 경우의 무등산옹회암 절리면의 수직강성(k_n), 전단강성(k_s)과 마찰각(θ), 점착력(c)을 알아보기 위하여 절리면 전단시험을 실시하였다. 시험편은 무등산옹회암 MJT-1, MJT-2 시험편을 사용하였다. 절리면 전단시험은 한국암반공학회 암석표준시험법(2010)에서 규정한 시험법에 근거하여 실시하였다. 절리면 전단시험은 5단계로 이루어졌으며, 이후 산출된 결과값을 수치해석에 입력데이터 적용하기 위해서는 절리면 전단시험 결과가 도시된 그래프 상에서 대표적인 응력-변위 구간을 선정하여 수직강성 및 전단강성을 산정하였다. 절리면 전단시험에 사용된 절리면 전단 시험기(GEOTM & GEO Testing management의 모델 번호 GTR01-NO1)는 그림 4.8에서 보인다. 측정 시 각각의 수직응력, 전단응력 및 수직변위, 전단변위 값들은 Touch Panel PC의 프로그램인 GRDS-1000을 통해서 저장이 되며, 모든 자료는 컴퓨터를 사용하여 처리된다.

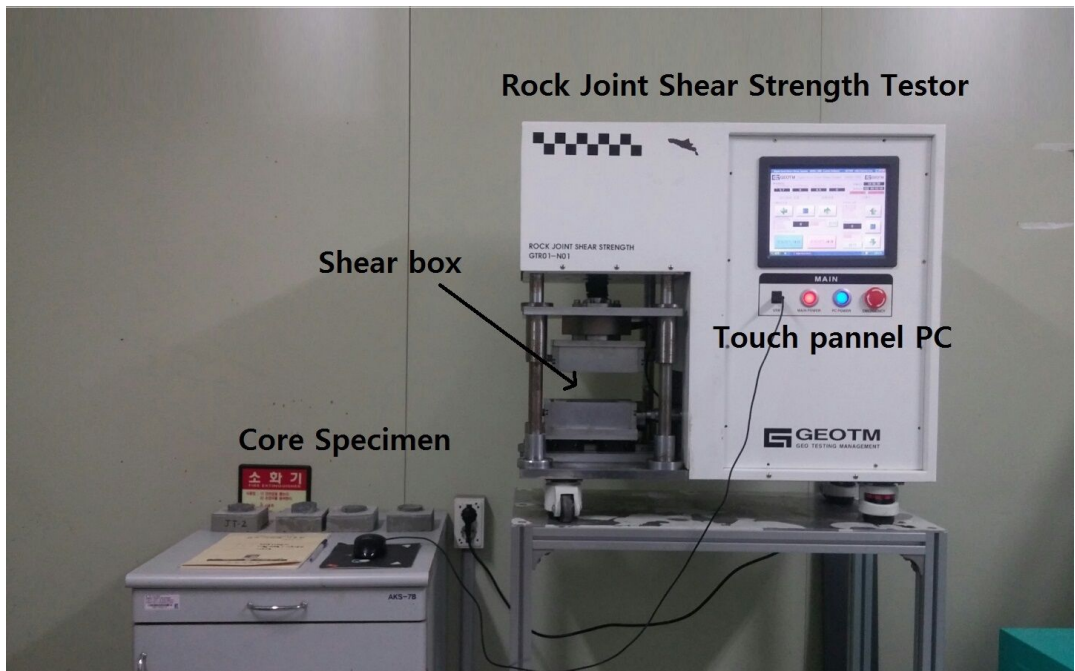


그림 4.8 절리면 전단시험 장비 구성도

4.2.3 불연속면 방향

암반 내 불연속면은 암반의 성질, 강도 변형 거동 및 수리적 거동의 조절에 결정적인 역할을 한다. 따라서 입석대 주상절리대의 불연속면 특성 및 성질을 파악하기 위해 주상절리 내 발달해 있는 절리 및 균열 방향성을 측정하였다. 측정방법은 경사방향(Dip direction)은 진북(N)을 기준으로 경사진 방향까지 시계방향으로 측정하였으며, 경사각(Dip)은 수평면에 대한 기울어진 각도로 측정하였다(그림 4.9(a)). 불연속면 측정에 사용된 장비는 그림 4.9(b)와 같다.

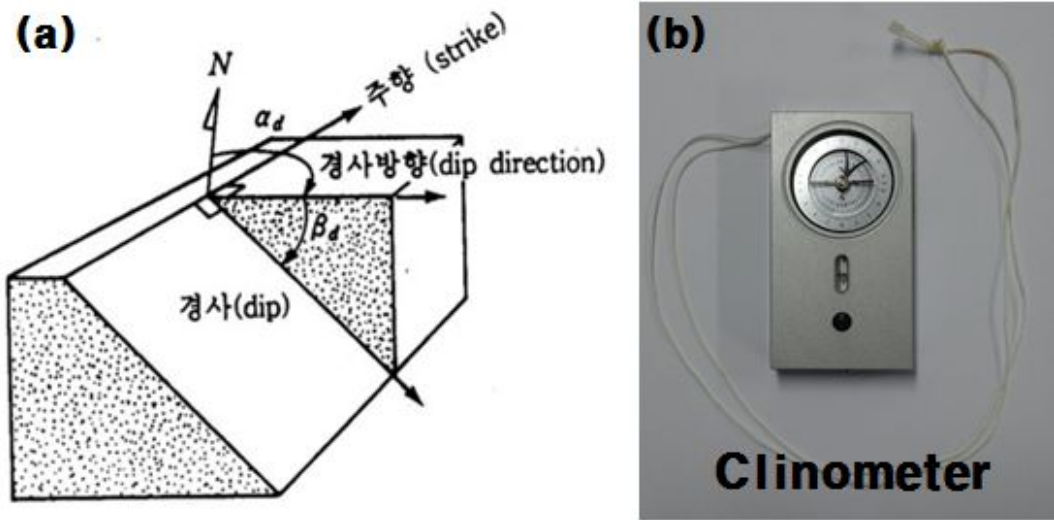


그림 4.9 불연속면 방향 측정, (a) 측정방법, (b) 클리노미터(Clinometer)

4.2.4 불연속면 거칠기

암반 내 불연속면은 암반의 성질, 강도 변형 거동 및 수리적 거동의 조절에 결정적인 역할을 한다. 따라서 입석대 주상절리대의 불연속면 특성 및 성질을 파악하기 위해 15번 주상절리의 불연속면 거칠기 측정을 실시하였다. 불연속면 거칠기 측정은 프로파일 게이지(profile gauge)를 사용하여 작은 규모의 요철(unevenness)과 큰 규모의 만곡(waviness)유형을 고려하여 총 가로 2개, 세로 2개를 측정을 실시하였다(그림 4.10). 측정된 결과 값은 그림 4.11(a)에서 보이는 JRC 표준도(Barton and Chouby, 1977)와 그림 4.11(b)에서 보이는 JRC 차트(Barton and Bandis, 1982) 두 가지 방법을 비교하여 절리 거칠기 상수(joint roughness coefficient, JRC)를 산출하였다.

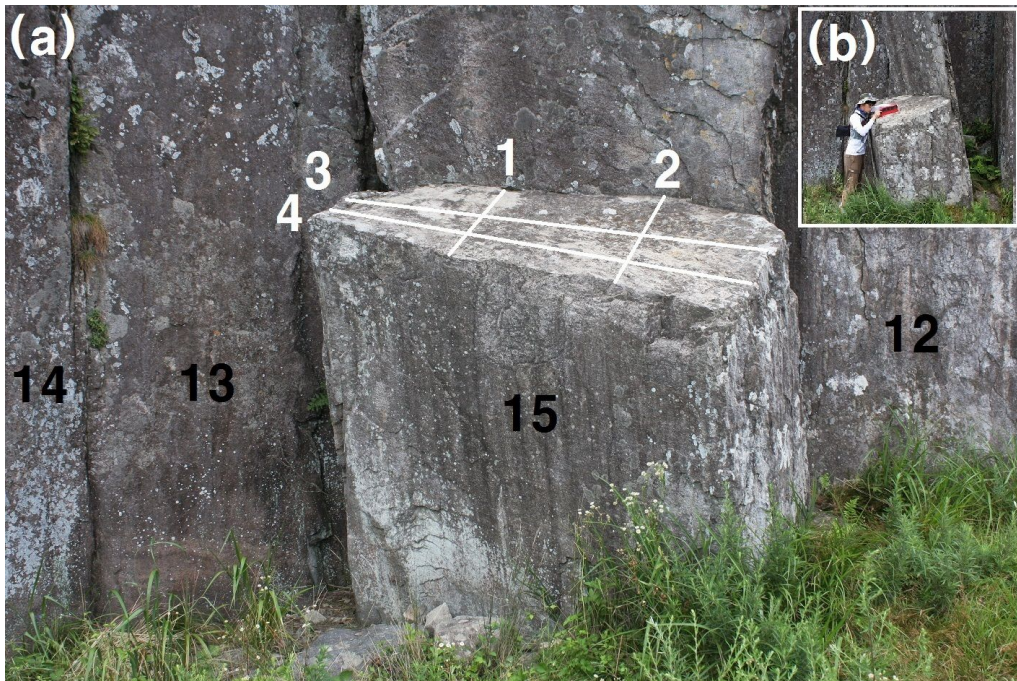
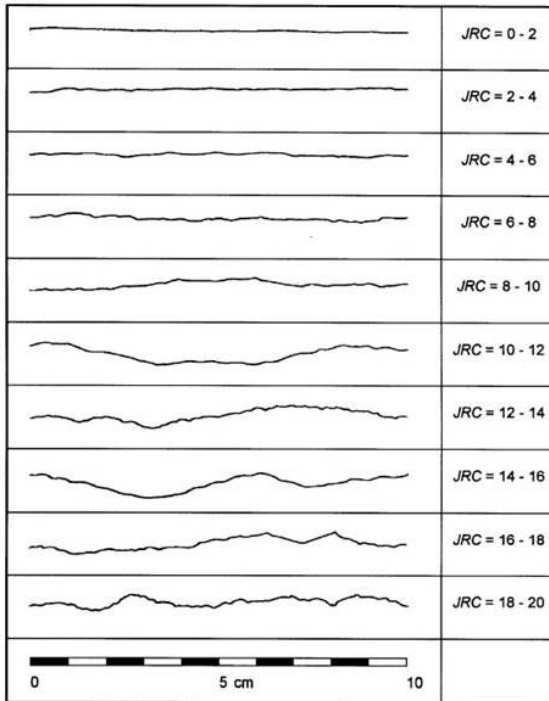


그림 4.10 입석대 주상절리 불연속면 측정, (a) 입석대 15번 주상절리대, (b) 거칠기 측정 모습

(a)



(b)

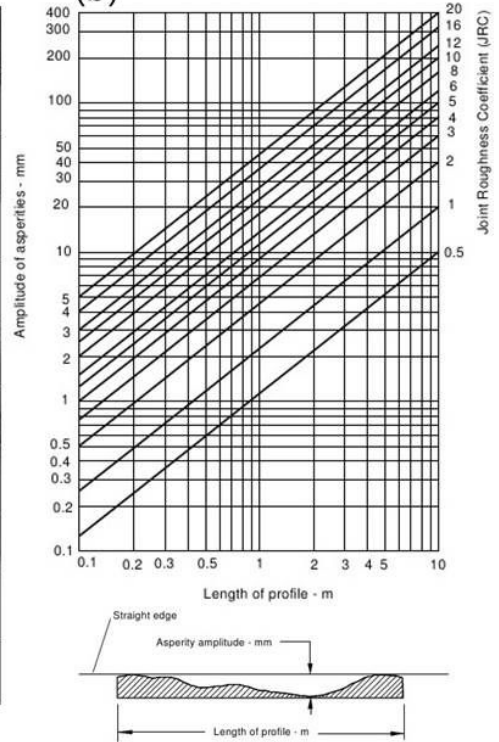


그림 4.11 절리 거칠기 상수 산정 방법, (a) JRC standard (Barton and Choubye, 1977), (b) JRC chart (Barton and Bandis, 1982)

4.2.5 불연속면 표면강도

암반 내 불연속면은 암반의 성질, 강도 변형 거동 및 수리적 거동의 조절에 결정적인 역할을 한다. 따라서 입석대 주상절리대의 불연속면 특성 및 성질을 파악하기 위해서 각 주상절리에 실버 슈미트해머 측정을 실시하였다(그림 4.12(a)). 불연속면 표면강도 측정 시 사용된 실버 슈미트해머는 스웨덴 Proceq SA에서 개발된 Silver Schmit L-type hammer로 그림 4.12(b)와 같다. 표면강도 산출은 식 (4.6)과 같이 타격 직전과 직후의 속도를 측정하여 측정 시편에 축적된 에너지를 계산하는 실제 반발계수 Q 값으로 나타난다. 측정 대상은 각 1, 2, 4, 7, 11, 12, 14, 15번 주상절리에 대하여 총 10회를 타격한 후 최대값과 최소값을 제외한 나머지 값들의 평균값을 산출하였다.

$$Q = 100 \times \frac{Energy_{restored}}{Energy_{input}} \quad (3.6)$$

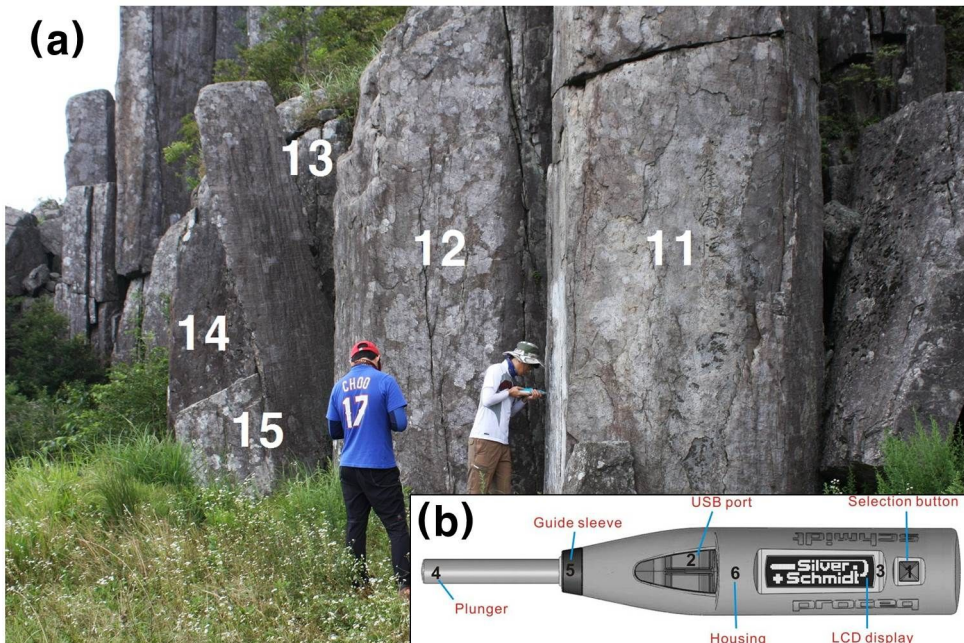


그림 4.12 불연속면 표면강도 측정, (a) 표면강도 측정모습, (b) 실버 슈미트해머 구성도

4.3 입석대 주상절리대 현장 조사

4.3.1 입석대 주상절리대 크기 측정

암석블록들의 경계면을 따라 발생 할 수 있는 암반의 파괴형태와 지반변형을 해석하기 위해 수치해석 모델링 데이터 자료로 입석대 주상절리대의 크기 측정을 실시하였다. 측정은 그림 4.13(a)에서 보는 바와 같이 입석대 주상절리대 내 측정 가능한 주상절리를 선택하여 총 15개 주상절리를 측정하였다. 이때 주상절리대의 크기 측정에 사용된 거리측정기(Leica DISTOTM D8)는 그림 4.13(b)에서 보인다. 입석대 주상절리의 모델 크기 측정 후 측정값들은 현장에서 기록하여 저장된다.



그림 4.13 입석대 주상절리대 크기 측정, (a) 15개의 입석대 주상절리대, (b) 주상절리대 크기 측정 모습

4.3.2 진동 및 소음 측정

구조물이나 사람은 지표에 있으므로 지표에 전파되는 진동과에 주로 영향을 받게 되며 따라서 지표중의 암반이나 표토는 진동값에 큰 영향을 주게 된다. 본 시험은 입석대 주상절리대 탐방로 주변에 진동소음측정기를 설치하여 탐방객들의 탐방 형태와 훼손도 원인 조사를 실시하였다. 소음 및 진동은 측정은 그림 4.14에서 보는 바와 같이 Blastmate III (Vibration Level Meter TYPE-3233)를 사용하여 측정하였다. 설치 장소는 그림 4.15와 같이 SV-1(전망대 탐방로 부근)과 SV-2(입석대 표석지 부근)로 표기된 두 곳의 장소에 각각 설치하였다. 입석대 주상절리대 주변 진동 측정기간은 2015년 5월부터 10월까지 총 5회 실시하였다. 측정 후 진동값은 Blastmate III의 내장메모리에 저장되며, 모든 자료는 컴퓨터에서 Blastware Software를 사용하여 처리된다.



그림 4.14 진동소음 측정기 구성도



그림 4.15 진동소음 측정기 설치위치, SV-1(전망대 탐방로 부근), SV-2(입석대 표석지 부근)

4.3.3 국지 기상 측정

무등산국립공원 주상절리대는 높은 고도에 위치에 있으므로 계절적 영향에 의해 기온 및 습도의 변화가 심하고 자연상태에 오랫동안 노출되어 있어 암석 표면의 풍화가 상대적으로 빠르게 진행되고 있었다. 무등산국립공원 주상절리에 대한 계절적인 영향에 따른 변화를 측정하기 위해 조사 가능한 주상절리 15개를 선정 한 후, 각 주상절리에 대한 표면온도, 주상절리 주변온도, 습도, 풍속 측정을 실시 하였다(그림 4.16(a)). 주상절리에 표면 온도 측정에 사용된 장비로는 온도측정기 (Testo 830-T4)를 사용하여 측정하였으며 주상절리 주변 온도, 습도, 풍속 측정은 디지털 측정기(Lutron LM-8000)를 사용하여 측정하였다(그림 4.16(b)). 측정값들은 현장에서 기록하여 저장된다.

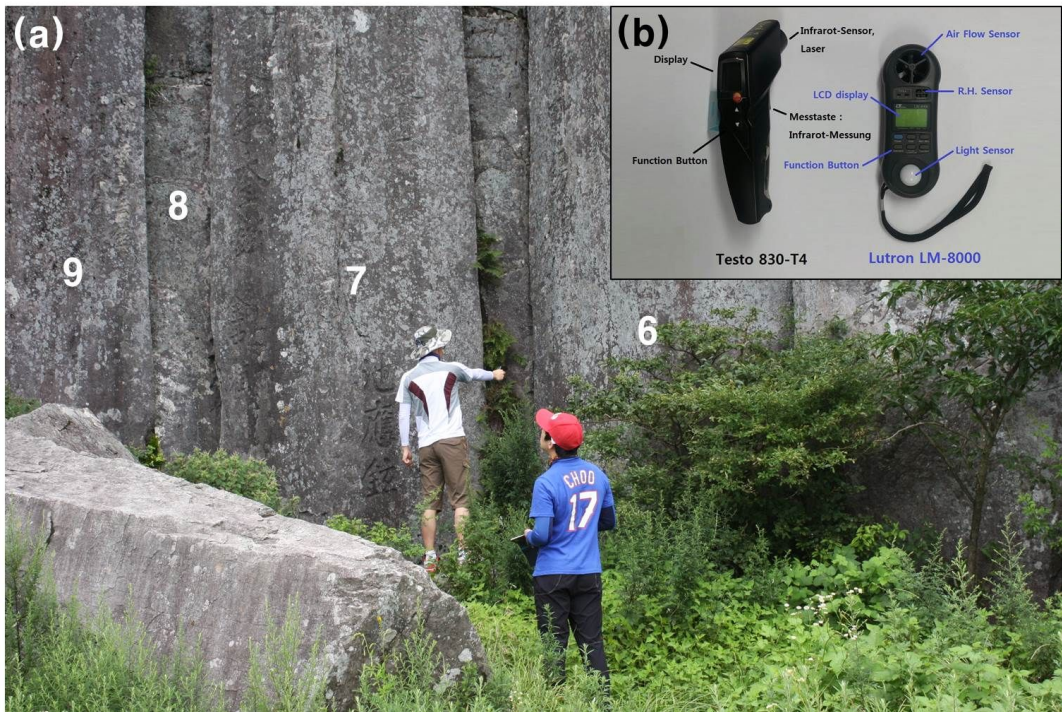


그림 4.16 입석대 주상절리대 국지 기상 측정, (a) 국지 기상 측정 모습, (b) 국지 기상 측정 장비

4.4 수치해석

4.4.1 3DEC 소개

3DEC(3Dimensional Distinct Element Code)은 불연속체 모델링을 위한 개별요소 법에 기초한 3차원 수치해석 프로그램으로 Static 혹은 Dynamic 하중에 놓여 있는 절리 암반과 같은 불연속 매질의 반응을 시뮬레이션이 가능하다. 불연속 매질은 개별 블록들의 집합으로 표현하고 불연속면들은 블록들 간의 경계 조건으로 취급한다. 불연속면 상의 대규모 변위와 블록들의 회전이 허용된다. 개별 블록들은 강체나 변형 가능한 블록으로 거동 가능하고, 변형 가능한 블록들은 유한차분 요소들로 세분화된다. 각 요소들은 미리 결정된 선형 혹은 비선형 응력-변형률 관계 법칙에 의하여 반응한다. 불연속면들의 상대적 운동은 수직과 전단 방향의 운동에 대한 선형 혹은 비선형 힘-변위법칙에 의해 지배된다. 3DEC은 대규모 운동과 블록 시스템의 변형을 모델링하는데 적합한 “Lagrangian” 계산법에 기초한다.

4.4.2 3DEC을 이용한 입석대 주상절리대의 거동 평가

무등산국립공원 입석대 주상절리대의 거동을 평가하기 위해 수치해석을 실시하였다. 수치해석 프로그램은 3차원 개별요소법 프로그램인 Itasca의 제품 3DEC(3Dimensional Distinct Element Code) 소프트웨어를 사용하였다. 수치해석 순서 다음과 같다. 먼저 입석대 주상절리대 및 지반 형상은 선행연구에서 측정된 입석대 주상절리대 크기 측정값 데이터를 이용하여 그림 4.17과 같이 주상절리대의 직경은 1~3 m, 높이는 5~18 m로 설정하였고, 지반은 가로(x), 세로(y), 높이(z), 40m, 40m, 5m로 적용하여 주상절리대 모델을 생성하였다. 재료물성은 불연속면 방향, 수직강성(k_n), 전단강성(k_s), 점착력(c), 마찰각(θ)를 활용하였다. 다음으로 하중 및 경계 조건을 적용하였다. 하중조건으로는 무등산 입석대의 주상절리의 자중을 적용하였으며 경계조건으로는 지반 x,y,z 방향에 대해서만 구속을 적용하였다. 마지막으로 해석시간으로는 10000step을 설정하였으며 이 후 해석을 실시하여 입석대 주상절리의 거동을 측정하였다.

Ipseok-dae Columnar joint

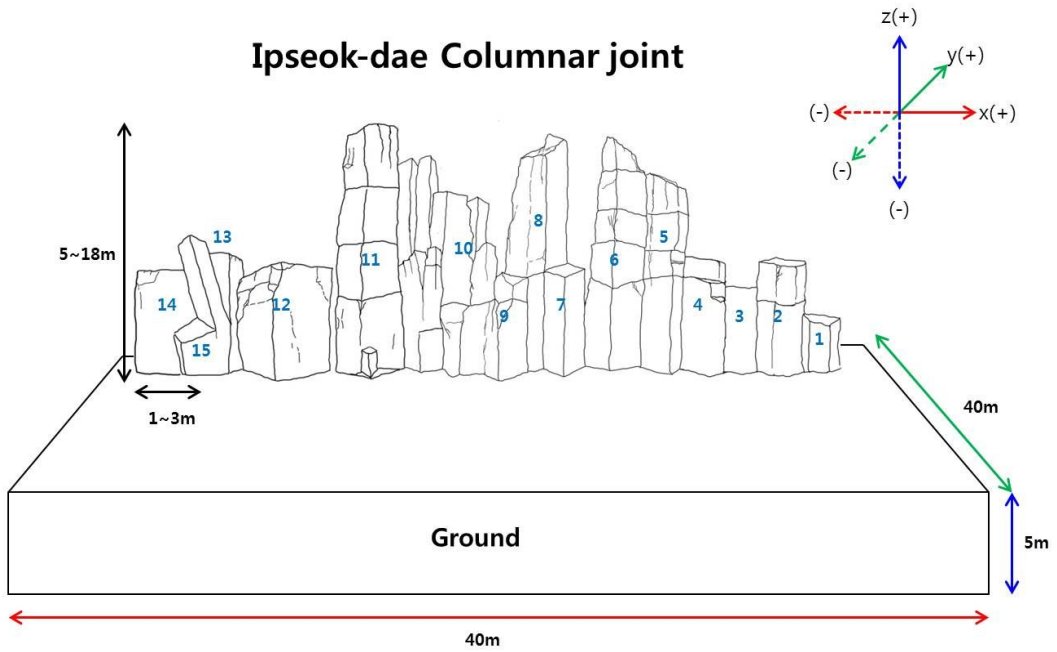


그림 4.17 3DEC에 적용될 입석대 주상절리대 페이스맵핑

4.4.3 Soilworks 소개

Soilworks는 터널, 사면, 기초, 연약지반, 침투, 동해석 등의 설계 분야별 소프트웨어가 가지고 있는 다양한 문제를 모두 해소하고 설계에 필요한 탁월한 기능을 추가 보완하여 하나의 제품에 통합한 솔루션이다. 기존 소프트웨어에서의 방법과는 차원이 다른 획기적인 모델링, 해석, 결과정리, 설계 보고서 기능을 제공하며 다양한 케이스의 일괄해석, 설계오류 검토 기능 등을 이용하여 설계 시 발생하는 단순 반복 업무를 최소화시키고, 우수한 품질의 결과물을 손쉽게 얻을 수 있는 프로그램이다.

4.4.4 Soliworks을 이용한 입석대 주상절리대 하중에 의한 지반 변형 평가

입석대 주상절리대의 하중이 지반에 작용하면 이에 발생하는 지반변형을 수치 해석 프로그램인 Midas 제품 Soliworks를 이용하여 평가를 실시하였다. 입석대 주상절리대 지반 모델 크기와 형상은 그림 4.18과 같이 3개의 측정케이스를 설정하였다. Case-1은 입석대 1번 주상절리대의 하중이 작용하는 지점, Case-2는 입석대 7, 8번 주상절리대의 하중이 작용하는 지점, Case-3은 입석대 13, 14번 주상절리대의 하중이 작용하는 지점으로 나타냈다. 위에 대한 설정으로부터 수치해석 순서도는 다음과 같다. 먼저, 입석대 주상절리대 지반 형상은 2D 평면모델링으로 3개를 생성하였으며, 탄성 모델(Elastic)로 나타내었다. 생성된 지반 모델링은 순서대로 Case-1부터 넓이 9m, 높이(기반암 7.5m, 지반 2.5m), Case-2는 넓이 19m, 높이(기반암 3m, 지반 7m), Case-3은 넓이 16.5m 높이(기반암 5m, 지반 5m)로 생성하였다. 지반 재료물성으로는 실내 및 현장 시험 자료데이터 습윤단위중량(γ), 탄성계수 (E), 포아송비(ν)를 재료물성 입력 데이터로 적용하였다. 재료 물성을 적용한 후 지반 형상에 2D 요소망 영역을 유한개의 요소로 나누워 해석의 정확도와 해석시간 효율을 고려하여 사상요소망으로 생성하였다. 이후 하중조건 및 경계조건을 적용하였다. 경계조건은 해석결과에 영향을 미치지 않도록 경계가 하중작용점으로부터 충분히 멀게 선정하였으며, 모델의 하단은 (X, Z 방향 구속) 고정, 좌·우는 (X 방향 구속) 고정하였다. 하중조건은 Case-1은 1번 주상절리대의 하중을 값을 적용하였으

며, Case-2는 7, 8번 주상절리의 하중 값을 적용하였고, Case-3은 14, 15번 주상절리의 하중 값을 적용하였다. 마지막으로 해석을 하여 지반의 변형을 측정하였다.

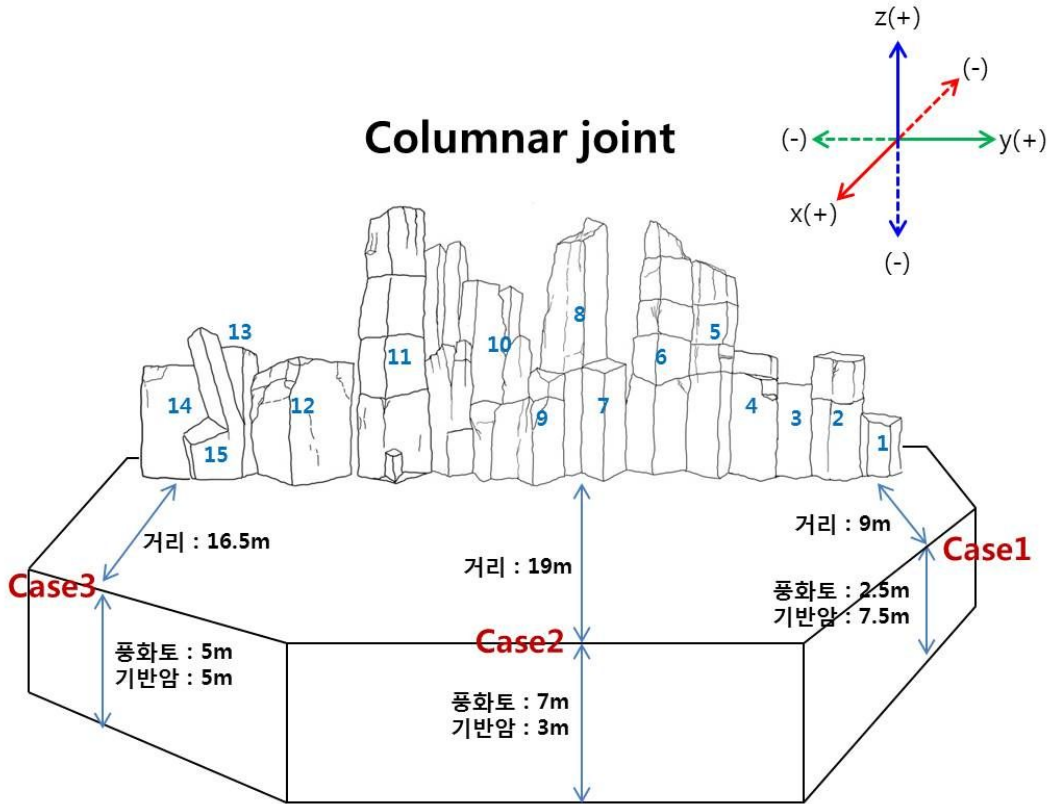


그림 4.18 Soilworks에 적용될 입석대 주상절리대 페이스맵핑

5. 연구결과

5.1 무등산응회암 물리·역학적 특성

5.1.1 공극률 및 밀도

무등산응회암 MT-1, MT-2, MT-3 시험편 물성 값을 정리하면 다음 표 5-1과 같다. 무등산응회암 MT-1 시험편의 공극률은 0.66 %, MT-2 시험편의 공극률은 0.60 %, MT-3 시험편의 공극률은 0.68 %로 산출된다. MT-1 ~ MT-3의 차이는 0.05 %로 미세한 차이로 보이며, 공극률 평균값은 0.65 %으로 산출된다. 무등산응회암 밀도를 산출하기 위해 비중, 포화도를 먼저 산출하였다. 무등산응회암 MT-1 시험편의 비중은 2.71, MT-2 시험편의 비중은 2.70, MT-3 시험편의 비중은 2.68로 산출된다. 시험편 MT-1 ~ MT-3 비중의 차이는 0.03 차이를 보이며, 평균값은 2.70으로 산출된다. 무등산응회암 MT-1 시험편의 포화도는 0.49, MT-2 시험편의 포화도는 0.45, MT-3의 포화도는 0.55로 산출된다. 시험편 MT-1 ~ MT-3의 포화도 차이는 0.10로 차이를 보이며, 평균값은 0.49로 산출된다. 물의 밀도(ρ_w)는 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 고정계수이며, 위 값들로부터 무등산응회암 MT-1 시험편의 밀도는 $2.69\text{g}/\text{cm}^3$, MT-2 시험편의 밀도는 $2.68\text{g}/\text{cm}^3$, MT-3 시험편의 밀도는 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 산출된다. 시험편 MT-1 ~ MT-3의 밀도 차이는 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 차이를 보이며, 평균값은 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ 로 보인다.

표 5.1 무등산응회암 물성값, M_i : 초기무게, M_{sub} : 수중무게, M_{dry} : 건조무게, M_{sat} : 포화무게, G_s : 비중, S : 포화도, Po : 공극률, ρ : 밀도

시험편 번호	M_i (g)	M_{sub} (g)	M_{dry} (g)	M_{sat} (g)	Po (%)	G_s	S (%)	ρ (g/cm^3)
MT-1	687.50	432.71	686.94	687.94	0.66	2.71	0.49	2.69
MT-2	676.81	425.72	675.67	677.19	0.60	2.70	0.45	2.68
MT-3	681.35	426.21	679.96	681.70	0.68	2.68	0.55	2.66
평균	681.89	428.21	680.85	682.27	0.65	2.69	0.49	2.68

5.1.2 종파속도

무등산응회암 시험편에 대한 종파속도(V_p)의 결과를 정리하면 표 5.2와 같다. 측정 결과 무등산응회암 MT-1 종파속도는 2427 m/s, MT-2 종파속도는 2410 m/s, MT-3 종파속도는 2443 m/s로 보였다(그림 5.1). MT-1 ~ MT-3의 종파속도 차이는 32.7 m/s로 나타났으며 평균값은 2427.03 m/s로 나타났다.

표 5.2 무등산응회암 종파속도 (V_p)

시험편 번호	V_p (m/s)
MT-1	2427
MT-2	2410
MT-3	2443
평균	2427

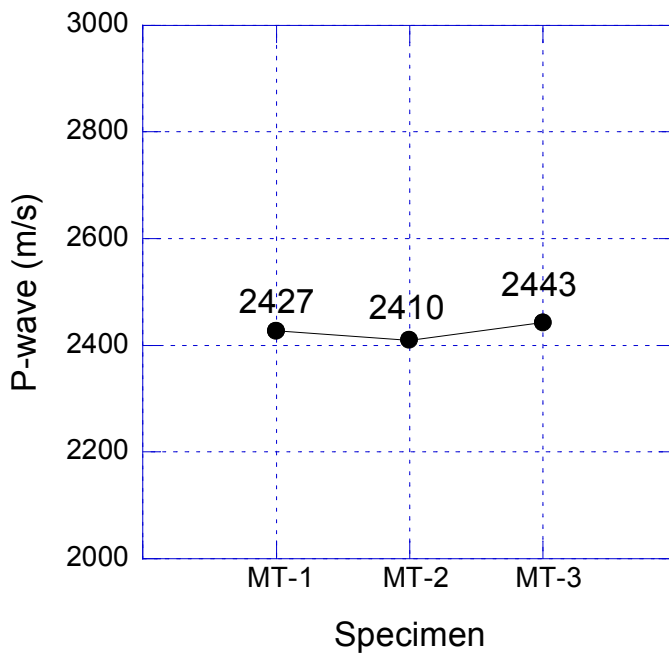


그림 5.1 시험편별 종파속도 그래프

5.1.3 일축압축강도

무등산응회암 MT-1, MT-2, MT-3 시험편에 대한 일축압축 강도시험 결과 일축압축강도(uniaxial compression strength, UCS), 영률(Young's modulus), 포아송비(Poisson's ratio)를 정리하면 표 5.3과 같다. 일축압축강도(UCS) 결과 값으로 시험편 MT-1은 288 MPa, MT-2는 360 MPa, MT-3는 320 MPa로 산출된다. 시험편 MT-1 ~ MT-3의 일축압축강도 차이는 72MPa를 보이며 평균일축압축강도는 323 MPa로 산출된다(그림 5.2). 영률(Young's modulus, E)의 결과 값으로 시험편 MT-1은 78, MT-2는 84로 산출되며 MT-3은 strain gage 부착이 불량상태로 데이터 값이 부정확하게 산출되어 제외하였다. 영률의 범위는 78 ~ 84의 범위를 보이며, 평균값은 81로 나타났다(그림 5.3). 포아송비(Poisson's ratio, ν)의 결과 값으로 시험편 MT-1은 0.23, MT-2는 0.26로 산출되며 MT-3은 strain gage 부착이 불량상태로 데이터 값이 부정확하게 산출되어 제외하였다. 포아송비의 범위는 0.23~0.26의 범위를 보이며, 평균값은 0.25으로 나타났다(그림 5.4).

표 5.3 무등산응회암 일축압축도; 영률(E), 포아송비(ν)

시험편 번호	일축압축강도(MPa)	영률(GPa)	포아송비
MT-1	288	78	0.23
MT-2	360	84	0.26
MT-3	320	-	-
평균	323	81	0.25

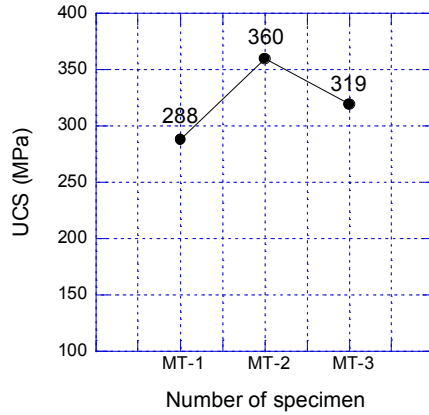


그림 5.2 시험편별 일축압축강도 그래프

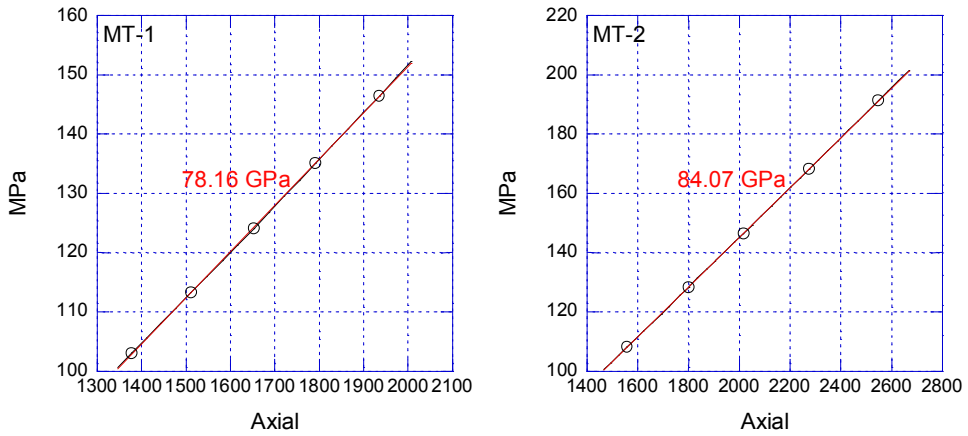


그림 5.3 시험편별 영률 그래프

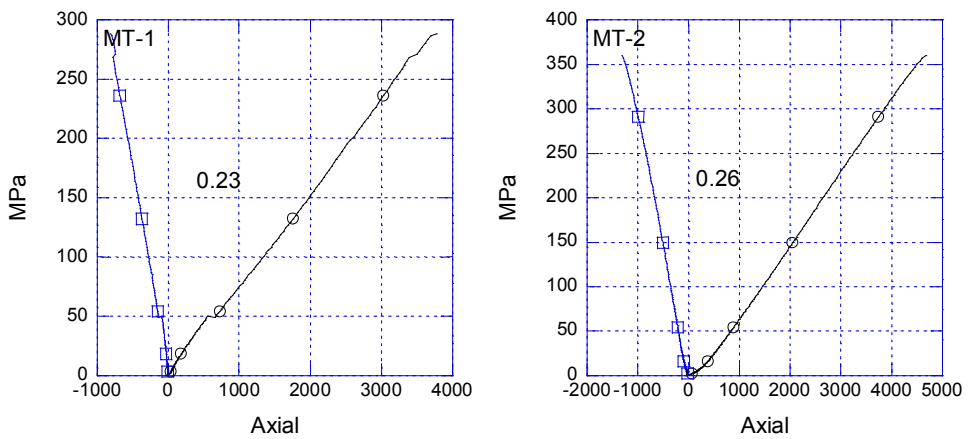


그림 5.4 시험편별 포아송비 그래프

5.1.4 절리면전단강도

무등산응회암 MJT-1, MJT-2 시험편에 절리면 전단시험 결과 수직강성 (Normal stiffness, k_n), 전단강성(Shear stiffness, k_s), 점착력(Cohesion, c), 마찰각 (Friction, θ)를 정리하면 표 5.4과 같다. 먼저, 시험편 MJT-1의 수직강성(k_n) 결과 값은 1단계 0.44 GPa/m, 2단계 0.36 GPa/m, 3단계 1.64 GPa/m, 4단계 2.59 GPa/m, 5단계 3.30 GPa/m로 보이며 이 중 대표적인 응력-변위 구간으로 5단계 3.30 GPa/m을 선정하였다(그림 5.5). 시험편 MJT-2의 수직강성(k_n) 결과값은 1단계 0.62 GPa/m, 2단계 3.00 GPa/m, 3단계 2.10 GPa/m, 4단계 2.40 GPa/m, 5단계 2.62 GPa/m로 보이며 이 중 대표적인 응력-변위 구간으로 2단계 3.00 GPa/m을 선정하였다(그림 5.6). 즉, 시험편 MJT-1과 MJT-2의 대표적인 수직강성(k_n)의 차이는 0.30 GPa/m로 보이며, 평균수직강성은 3.15 GPa/m로 산출된다. 전단강성(k_s)의 결과값은 MJT-1은 0.45 GPa/m, MJT-2는 0.30 GPa/m으로 보이며 평균값은 0.38 GPa/m로 산출된다(그림 5.7). 점착력(c)과 마찰각(θ)은 수직응력-전단응력 관계의 기울기로 나타난다(그림 5.8). 점착력(c) 결과 값으로 MJT-1은 0.60 MPa, MJT-2는 0.42 MPa로 보이며, 이들의 평균값은 0.50으로 산출된다. 마찰각(θ) 결과 값은 MT-1은 36°, MT-2는 30°으로 보이며 평균값은 35°로 나타난다.

표 5.4 절리면전단시험 결과; 수직강성(k_n), 전단강성(k_s), 점착력(c), 마찰각(θ)

구분	단계	시험편	결과값	시험편	결과값	평균값
수직강성 (GPa/m)	1단계	MJT-1	0.44	MJT-2	0.62	3.15
	2단계	MJT-1	0.36	MJT-2	3.00	
	3단계	MJT-1	1.64	MJT-2	2.10	
	4단계	MJT-1	2.59	MJT-2	2.40	
	5단계	MJT-1	3.30	MJT-2	2.62	
구분	단계	시험편	결과값	시험편	결과값	평균값
전단강성 (GPa/m)	1~5단계	MJT-1	0.45	MJT-2	0.30	0.38
점착력 (MPa)	1~5단계	MJT-1	0.60	MJT-2	0.42	0.50
마찰각 (Degree)	1~5단계	MJT-1	36°	MJT-2	30°	35°

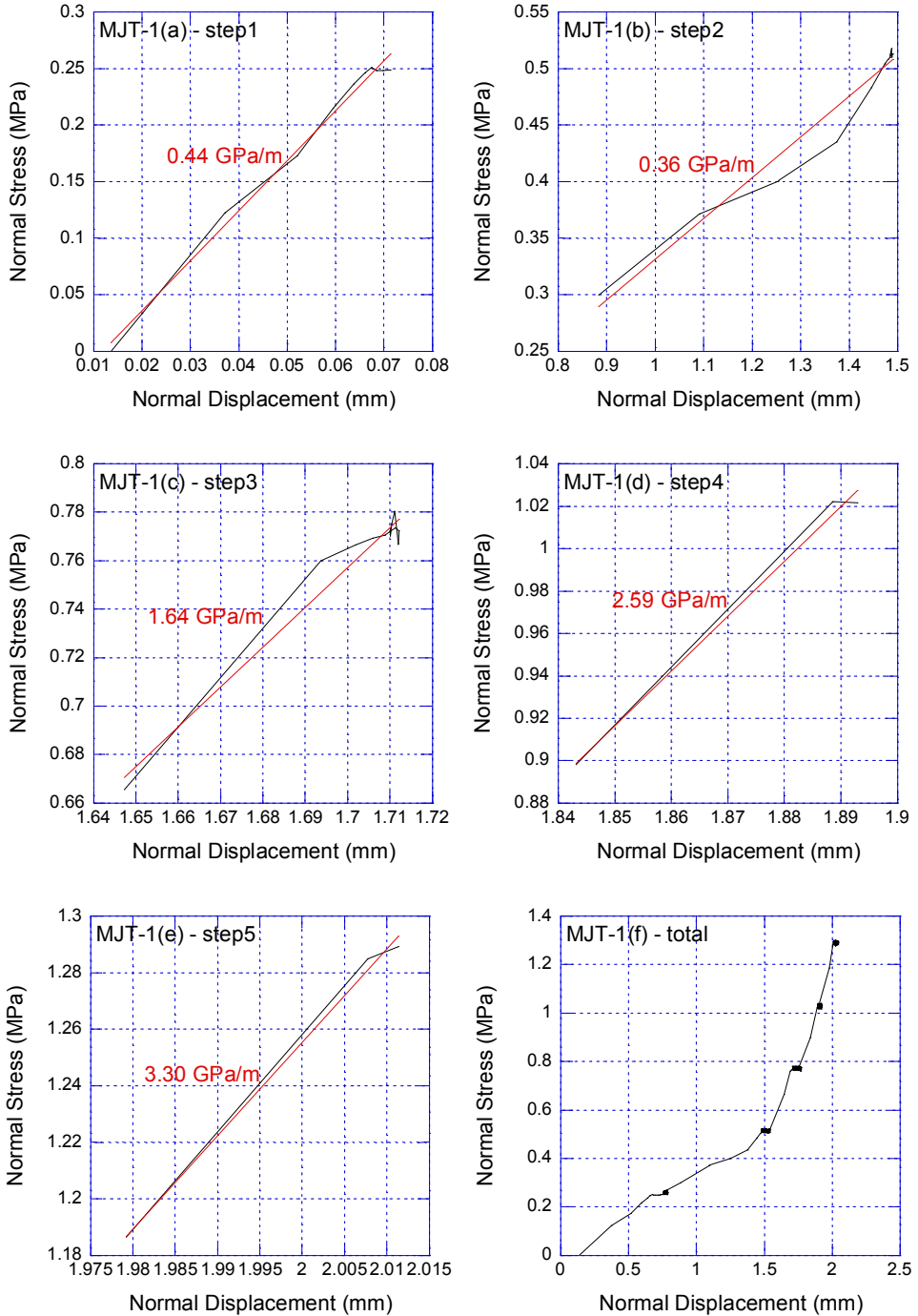


그림 5.5 시험편 MJT-1의 단계별 수직강성 그래프, (a) 1단계, (b) 2단계, (c) 3단계, (d) 4단계, (e) 5단계, (f) 전체단계

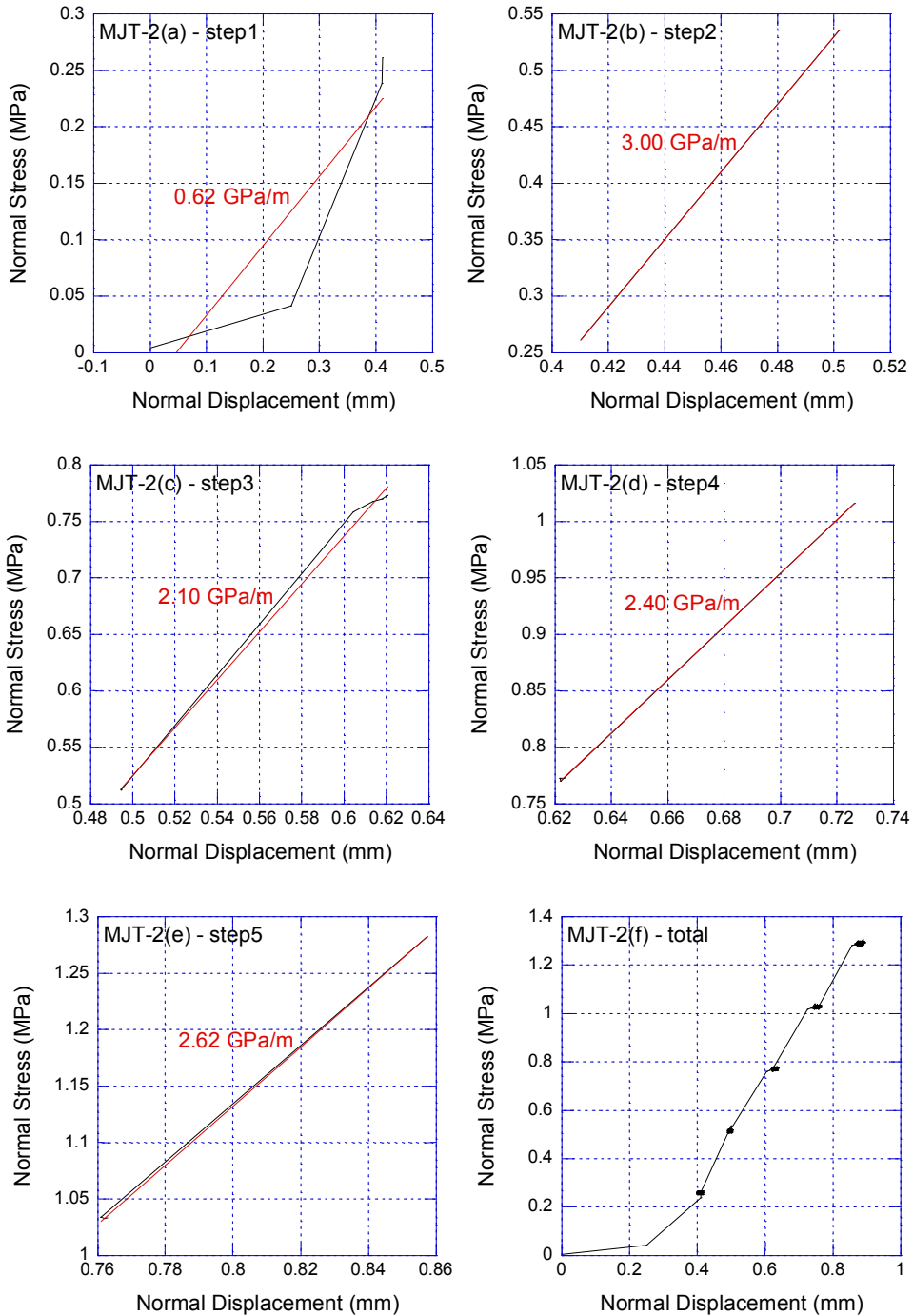


그림 5.6 시험편 MJT-2의 단계별 수직강성 그래프, (a) 1단계, (b) 2단계, (c) 3단계, (d) 4단계, (e) 5단계, (f) 전체단계

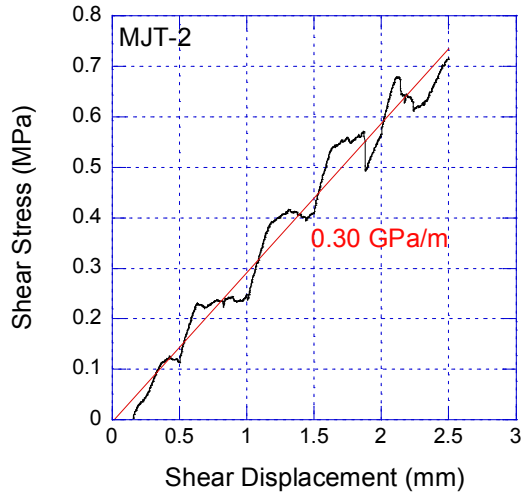
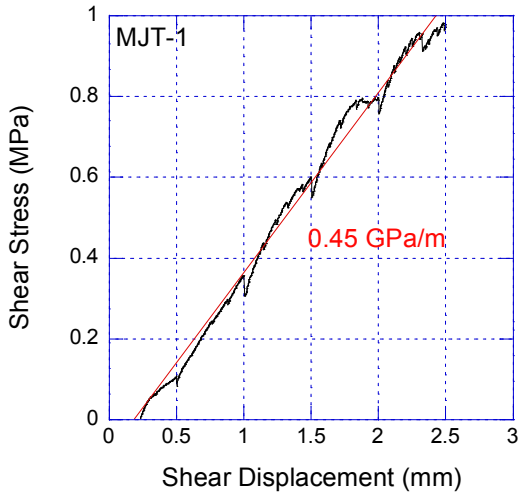


그림 5.7 전단강성 그래프, (a) MJT-1 전단강성, (b) MJT-2 전단강성

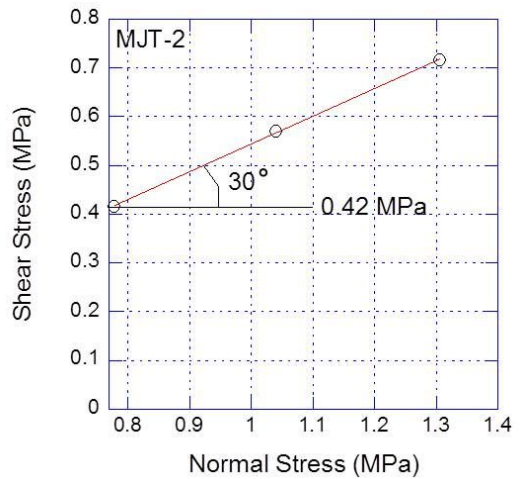
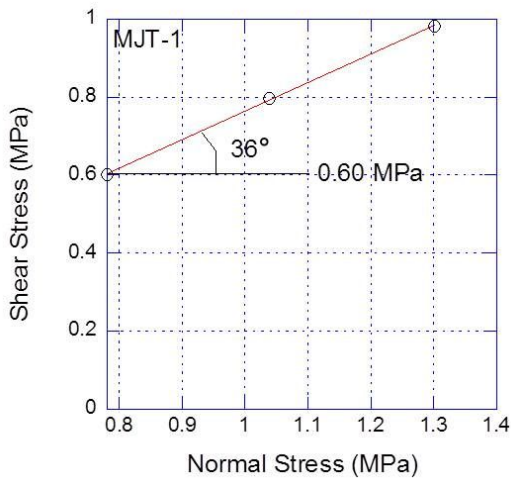


그림 5.8 마찰각 및 점착력 그래프, (a) MJT-1 마찰각 및 점착력, (b) MJT-2 마찰각 및 점착력

5.1.5 불연속면 방향

입석대 주상절리대 1번~15번의 불연속면 방향을 측정한 결과를 정리하면 다음 표 5.5와 같다. 불연속면 방향 측정 결과 주상절리대는 일반적으로 수직적인 방향으로 우세하게 나타났으며 몇몇 주상절리대는 수평절리가 발달하여 여러 개의 블록을 쌓아 하나의 돌기등을 세워놓은 것처럼 나타났다.

표 5.5 입석대 주상절리대 불연속면 방향

주상절리대 번호	측정횟수					
	1회		2		3	
	주향	경사	주향	경사	주향	경사
1	N16W	88E	-	-	-	-
2	N74W	89E	N18E	88E	N78E	82E
3	N50W	89E	N60E	15E	-	-
4	N4W	89E	N68E	84E	-	-
5	N40W	89E	-	-	-	-
6	N8W	89E	N38W	80W	-	-
7	N68E	89E	N48W	89E	-	-
8	N18W	88E	-	-	-	-
9	EW	88E	N24E	78W	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	N46E	89E	N70W	89W	-	-
12	N89W	88W	N60W	88E	N24W	80E
13	N70W	88E	N88E	88W	-	-
14	N78E	89W	-	-	-	-
15	N89W	89W	-	-	-	-

5.1.6 불연속면 거칠기

대표적으로 측정된 15번 주상절리에 대한 거칠기 측정 결과는 그림 5.9와 같다. 15번째 입석대 주상절리의 불연속면을 JRC standard (Barton and Choubey, 1977) 기준과 JRC chart (Barton and Choubey, 1982) 기준으로 분석하여 그 결과를 표 5.6에 나타냈다. 불연속면 거칠기를 JRC 표준도(Barton and Choubey, 1977) 기준으로 측정한 결과 각각의 거칠기 값은 (1) 6~8, (2) 4~6, (3) 4~6, (4) 4~6으로 대략 4~6 범위가 우세하게 나타나며 분석한 결과 약간 거침으로 판단된다. 다른 방법으로 15번 주상절리대 거칠기를 JRC 차트(Barton and Bandies, 1982) 기준으로 측정한 결과 각각의 거칠기 값은 (1) 2.8~3, (2) 1~1.5, (3) 1~1.2, (4) 1~1.2으로 대략 1~1.5 범위가 우세하게 나타나며 약간 거침으로 판단된다. 즉, 이들 거칠기는 약간 거침에 해당된다.

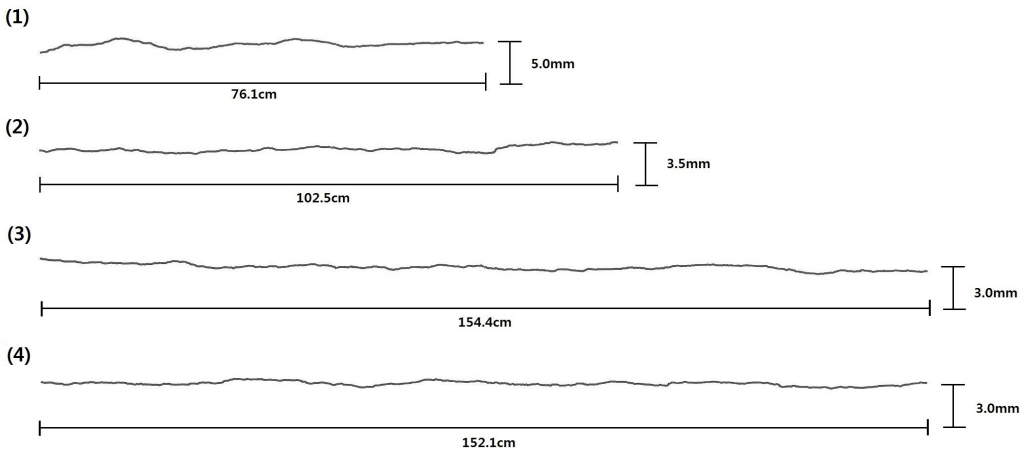


그림 5.9 15번 주상절리대의 불연속 거칠기

표 5.6. JRC 표준도와 JRC 차트를 통한 불연속면 거칠기 측정값

주상절리대 번호	JRC standard (Barton and Choubey, 1977)				JRC Chart (Barton and Bandies, 1982)			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
15	6~8	4~6	4~6	4~6	2.8~3	1~1.5	1~1.2	1~1.2

5.1.7 불연속면 표면강도

입석대 주상절리대 1, 2, 4, 7, 11, 12, 14, 15번에 대한 불연속면 표면강도를 측정
 한 결과를 정리하면 표 5.7과 같다. 불연속면 표면 강도 측정 결과 반발경도 Q값
 은 51~62범위를 보이며 평균 57로 나타났다(그림 5.10(a)). 반발경도 Q값을 일축압
 축강도 환산식을 이용하여 변환하면 75~103 MPa의 범위를 보이며 평균 90 MPa
 로 나타난다(그림 5.10(b)). 각 주상절리마다 Q값의 차이를 보이는 원인은 입석대
 주상절리의 표면이 오랜 기간 동안 자연상태에 노출되어 계절적 변화와 날씨의 영
 향에 의해 주상절리마다 표면 풍화 정도가 다르게 나타났기 때문으로 사료된다.

표 5.7 입석대 주상절리대 표면강도

주상절리대 번호	반발경도 (Q)	일축압축강도 (MPa)
1	60.20	98.3530
2	60.75	99.8701
3	-	-
4	57.71	91.6250
5	-	-
6	-	-
7	51.20	75.1207
8	-	-
9	-	-
10	-	-
11	61.70	102.5169
12	56.88	89.4334
13	-	-
14	54.30	82.7840
15	54.57	83.4683
평균	57	90

$$UCS = 0.081527 + 0.51667Q + 0.018534Q^2$$

식 6

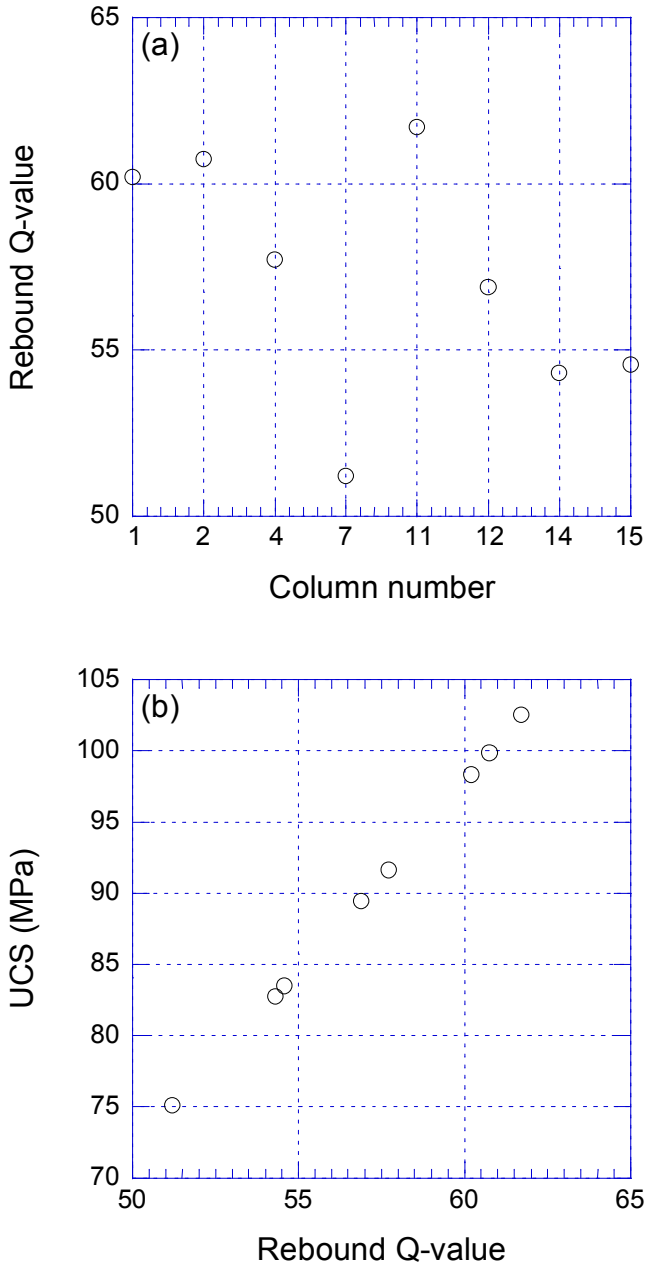


그림 5.10 주상절리대 표면강도, (a) 발반결도(Q값), (b) 일축압축강도(MPa)

5.2 입석대 주상절리대 대한 현장 조사

5.2.1 입석대 주상절리대 크기 측정

입석대 주상절리대의 모델 크기 측정 결과는 표 5.8과 같다. 주상절리대에 대한 크기 측정 결과 길이는 대략 1.5~2 m 범위를 보이며 높이는 4.5~19 m 범위로 나타난다. 지반의 크기 측정 결과 거리는 5~10 m 범위를 보이며 높이는 2~7 m 범위로 나타난다.

표 5.8 무등산국립공원 입석대 주상절리대 크기

주상절리대 번호	주상절리대 모델 크기				지반 모델 크기	
	길이 (m)	높이 (m)	면적 (m ²)	체적 (m ³)	거리 (m)	높이 (m)
1	1.5	4.5	6.63	29.85	5	2
2	2.0	8.0	11.22	89.79	-	-
3	1.5	6.0	6.63	39.80	-	-
4	2.5	11	16.77	184.43	-	-
5	2.5	15	16.77	251.49	-	-
6	2.5	19	16.77	318.56	-	-
7	2.5	9.0	16.77	150.90	-	-
8	2.5	18	16.77	301.79	-	-
9	1.5	9.0	6.63	59.69	-	-
10	2.5	18	16.77	301.79	-	-
11	2.0	12	11.22	134.68	10	7
12	2.5	5.0	16.77	83.83	-	-
13	1.5	5.5	6.63	36.48	-	-
14	1.5	4.5	6.63	29.85	8.5	5
15	1.5	5.0	6.63	33.16	-	-

5.2.2 진동 및 소음 측정

입석대 주상절리대 주변에 진동 및 소음 측정 결과는 그림5.11과 같이 나타난다. 6월은 오전10:00~오후13:00까지 측정을 실시하였다. 전망대 탐방로 부근(SV-1)은 0.98~1.77 PPV(mm/s) 범위를 보이며 입석대 표석지 부근(SV-2)은 0.78~2.35 PPV(mm/s)로 나타났다. 진동 최대값은 2.35 PPV(mm/s)로 입석대 표석지 부근에서 나타났다. 7월은 오후15:00~오후16:00까지 측정을 실시하였다. 전망대 탐방로 부근(SV-1)은 0.19~0.39 PPV(mm/s) 범위를 보이며 입석대 표석지 부근(SV-2)은 0.5~1.48 PPV(mm/s)로 나타났다. 진동 최대값은 1.48 PPV(mm/s)로 입석대 표석지 부근에서 나타났다. 8월은 오후13:00~오후15:00까지 측정을 실시하였다. 전망대 탐방로 부근(SV-1)은 1.48~1.92 PPV(mm/s) 범위를 보이며 입석대 표석지 부근(SV-2)은 0.42~0.68 PPV(mm/s)로 나타났다. 진동 최대값은 1.92 PPV(mm/s)로 전망대 탐방로 부근에서 나타났다. 9월은 오후13:00~오후15:00까지 측정을 실시하였다. 전망대 탐방로 부근(SV-1)은 0.42~0.68 PPV(mm/s) 범위를 보이며 입석대 표석지 부근(SV-2)은 0.42~0.86 PPV(mm/s)로 나타났다. 진동 최대 값은 0.86 PPV(mm/s)로 입석대 표석지 부근에서 나타났다. 10월은 오후15:00~오후16:00까지 측정을 실시하였다. 전망대 탐방로 부근(SV-1)은 0.45~0.57 PPV(mm/s) 범위를 보이며 진동 최대 값은 0.57 PPV(mm/s)로 나타났다. 진동 및 소음 측정 결과를 정리하면 표 5.9와 같다. 월별 주상절리대 주변 진동 측정 결과 진동의 주발생원은 주로 탐방객들이 활동하는 탐방로 시간과 일치하였다. 하지만 탐방객에 의한 진동은 매우 미세한 값으로 입석대 주상절리대에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

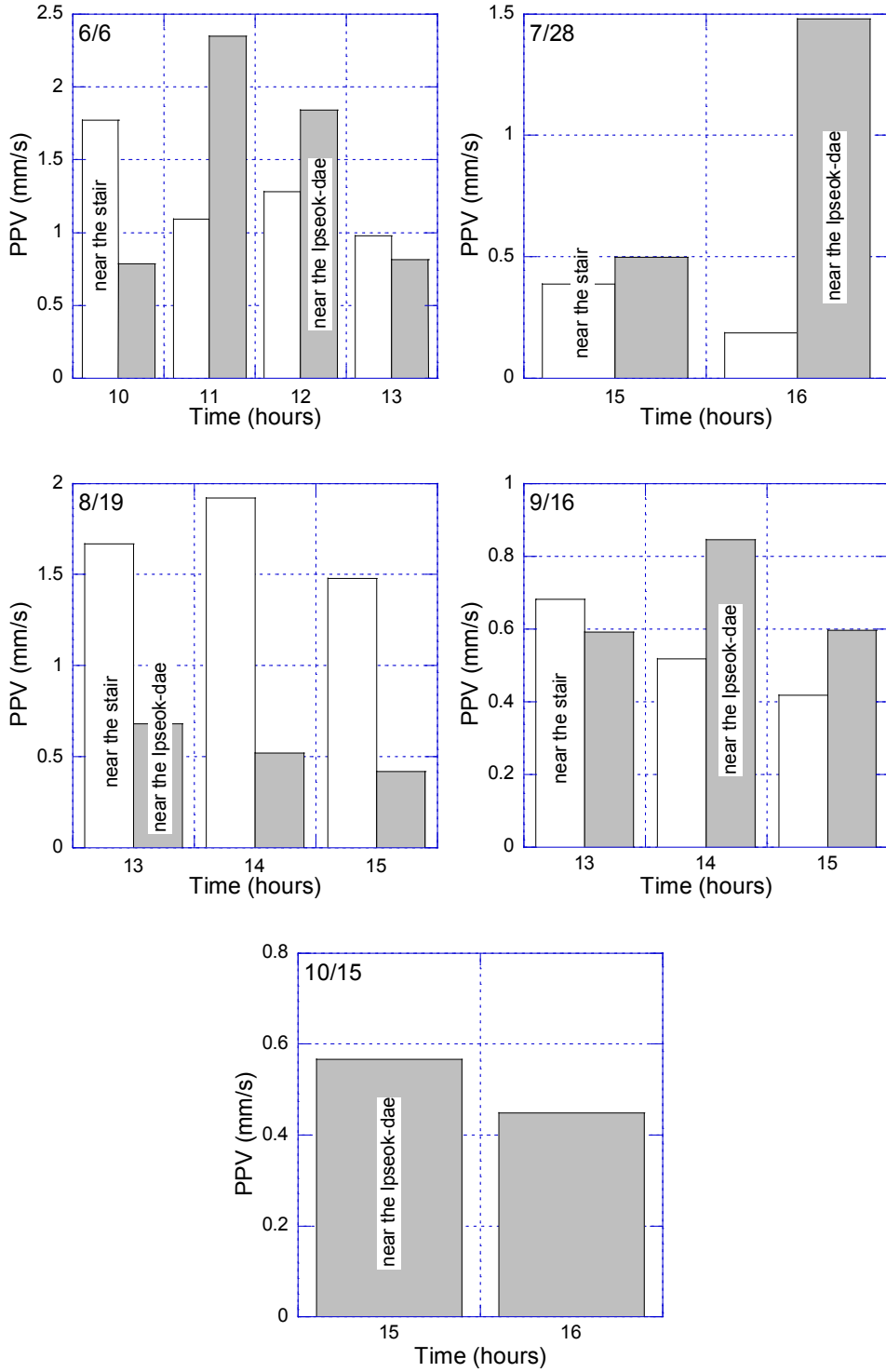


그림 5.11 월별 진동 측정값

표 5.9 월별 진동소음 측정 결과

월	측정시간	진동값 PPV(mm/s)	
		측정지점(SV-1)	측정지점(SV-2)
6월	AM 10:00	1.77	0.78
	AM 11:00	1.09	2.35
	AM 12:00	1.28	1.84
	PM 13:00	0.98	0.81
7월	PM 15:00	0.39	0.50
	PM 16:00	0.19	1.48
8월	PM 13:00	1.67	0.68
	PM 14:00	1.92	0.52
	PM 15:00	1.48	0.42
9월	PM 13:00	0.68	0.59
	PM 14:00	0.52	0.86
	PM 15:00	0.42	0.42
10월	PM 15:00	0.57	-
	PM 16:00	0.45	-

5.2.3 국지 기상 측정

입석대 주상절리대에 대한 표면온도, 주변 온도, 습도, 풍속 측정 결과를 정리하면 표 5.10과 같다. 5월 측정 날씨는 정오 근방으로 바람이 적고 햇빛이 따듯한 화창한 날씨였다. 측정결과 표면온도는 15.4~26.0℃, 주변온도는 28.2~32.5℃, 습도는 20.3~25.0%, 풍속은 0.2~3.4 m/s 범위로 나타났다. 6월 측정 날씨는 정오 근방으로 화창한 날씨였으나 햇볕이 뜨겁고 더웠다. 측정결과 표면온도는 16.7~23.4℃, 주변온도는 28.6~30.0℃, 습도는 29.1~32.4%, 풍속은 0.5~0.9 m/s 범위로 나타났다. 7월 측정 날씨는 오후 3시 근방으로 비오는 흐린 날씨였다. 측정결과 표면온도는 19.10~22.8℃, 주변온도는 22.1~24.6℃, 습도는 73.5~79.0% 분포를 보이고, 풍속은 0.1~0.5 m/s 범위로 나타났다. 8월 측정 날씨는 오후 1시 근방으로 비온 후 다음 날이라 햇볕은 쨍쨍하였지만 바람이 많이 불고 덥고 습한 날씨였다. 측정결과 표면온도는 19.1~23.4℃, 주변온도는 23.1~24.4℃, 습도는 69.6~73.5%, 풍속은 1.4~1.8 m/s 범위로 나타났다. 9월 측정 날씨는 오후 1시 근방으로 측정당일의 날씨는 매우 흐리고, 습도가 다소 높은 날씨였다. 측정결과 표면온도는 17.9~23.0℃, 주변온도는 21.0~22.6℃, 습도는 60.0~62.8%, 풍속은 0~0.8 m/s 범위로 나타났다. 10월 측정 날씨는 오후 3시 근방으로 측정당일의 날씨는 햇빛이 많이 강했으며 습도는 매우 낮은 날씨였다. 측정결과 표면온도 값은 19.1~31.9℃, 주변온도는 23.4~25.2℃, 습도는 42.6~46.3%, 풍속은 0.1~1.4 m/s 범위로 나타났다. 위 측정값을 정리하면 그림 5.12와 같다. 표면온도는 5, 6월보다 날씨가 흐린 7, 8, 9월의 표면온도가 높게 나타났다. 이는 주상절리 위치에 따라 표면온도차가 다르게 나타남을 알 수 있다. 주변온도는 5, 6월 보다 7, 8, 9, 10월이 더 낮게 나타났다. 반면, 습도는 5, 6월보다 7, 8월이 큰 값을 보였다. 이는 7, 8, 9월은 하늘이 흐리거나 비가 온 날씨의 영향을 받은 것으로 판단된다. 풍속은 날씨, 측정 시간, 주상절리 위치 등 여러 요인에 따라 다르게 나타났다. 결론적으로 입석대 주상절리대는 다른 지역의 주상절리대와 다르게 높은 고지대에 분포해 있으며 계절적 영향과 날씨의 변화에 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 이러한 요인에 의해 무등산국립공원 입석대 주상절리대는 시간이 지남에 따라 암석 표면의 풍화가 가속화 될 것으로 사료된다.

표 5.10 월별 입석대 주상절리대 국지 기상 측정 결과

5월				
주상절리대 번호	표면온도 (°C)	주변온도 (°C)	습도 (%)	풍속 (m/s)
1	18.70	28.20	25.00	0.90
2	17.60	-	-	-
3	17.00	-	-	-
4	16.60	31.50	20.30	0.20
5	17.10	-	-	-
6	17.70	-	-	-
7	18.50	32.50	21.20	0.40
8	17.10	-	-	-
9	19.00	-	-	-
10	15.40	-	-	-
11	22.60	31.40	21.90	3.40
12	25.80	-	-	-
13	15.50	-	-	-
14	23.60	30.70	20.40	0.60
15	26.00	-	-	-
6월				
1	18.00	29.00	32.40	0.90
2	17.20	-	-	-
3	17.30	-	-	-
4	17.10	29.10	29.10	0.60
5	17.50	-	-	-
6	16.70	-	-	-
7	17.00	28.60	28.60	0.60
8	16.70	-	-	-
9	22.10	-	-	-
10	23.40	-	-	-
11	-	29.10	29.70	0.80
12	-	-	-	-
13	-	-	-	-
14	-	30.0	30.00	0.50
15	-	-	-	-

표 5.10 계속

7월				
주상절리대 번호	표면온도 (°C)	주변온도 (°C)	습도 (%)	풍속 (m/s)
1	22.80	22.10	79.00	0.40
2	22.30	-	-	-
3	21.50	-	-	-
4	22.50	24.00	77.60	0.50
5	22.00	-	-	-
6	20.90	-	-	-
7	21.30	24.60	73.50	0.10
8	19.40	-	-	-
9	20.20	-	-	-
10	20.80	-	-	-
11	21.90	24.00	75.20	0.40
12	20.90	-	-	-
13	19.10	-	-	-
14	20.30	24.40	73.50	0.40
15	22.30	-	-	-
8월				
1	22.70	24.40	72.40	1.70
2	22.10	-	-	-
3	22.60	-	-	-
4	23.20	23.80	72.00	1.50
5	21.60	-	-	-
6	20.60	-	-	-
7	21.70	24.40	69.60	1.40
8	19.10	-	-	-
9	20.50	-	-	-
10	20.30	-	-	-
11	22.50	23.10	73.50	1.40
12	22.40	-	-	-
13	22.50	-	-	-
14	23.40	23.80	71.70	1.80
15	22.90	-	-	-

표 5.10 계속

9월				
주상절리대 번호	표면온도 (°C)	주변온도 (°C)	습도 (%)	풍속 (m/s)
1	21.2	22.2	61.0	0.4
2	19.8	-	-	-
3	20.9	-	-	-
4	23.0	22.6	60.0	0
5	19.7	-	-	-
6	21.0	-	-	-
7	20.1	21.7	61.6	0.6
8	17.9	-	-	-
9	20.1	-	-	-
10	17.9	-	-	-
11	20.4	21.4	62.8	0
12	21.2	-	-	-
13	21.3	-	-	-
14	22.1	21.0	62.5	0.8
15	21.2	-	-	-
10월				
1	27.0	23.4	46.2	0.2~0.6
2	27.4	-	-	-
3	29.3	-	-	-
4	30.3	23.9	46.3	0.1~0.4
5	29.8	-	-	-
6	31	-	-	-
7	26	23.9	45.0	0.2~0.8
8	22.5	-	-	-
9	25.4	-	-	-
10	19.1	-	-	-
11	30.1	24.0	46.3	0.3~0.8
12	31.9	-	-	-
13	31.4	-	-	-
14	28.4	25.2	42.6	0.3~1.4
15	29.7	-	-	-

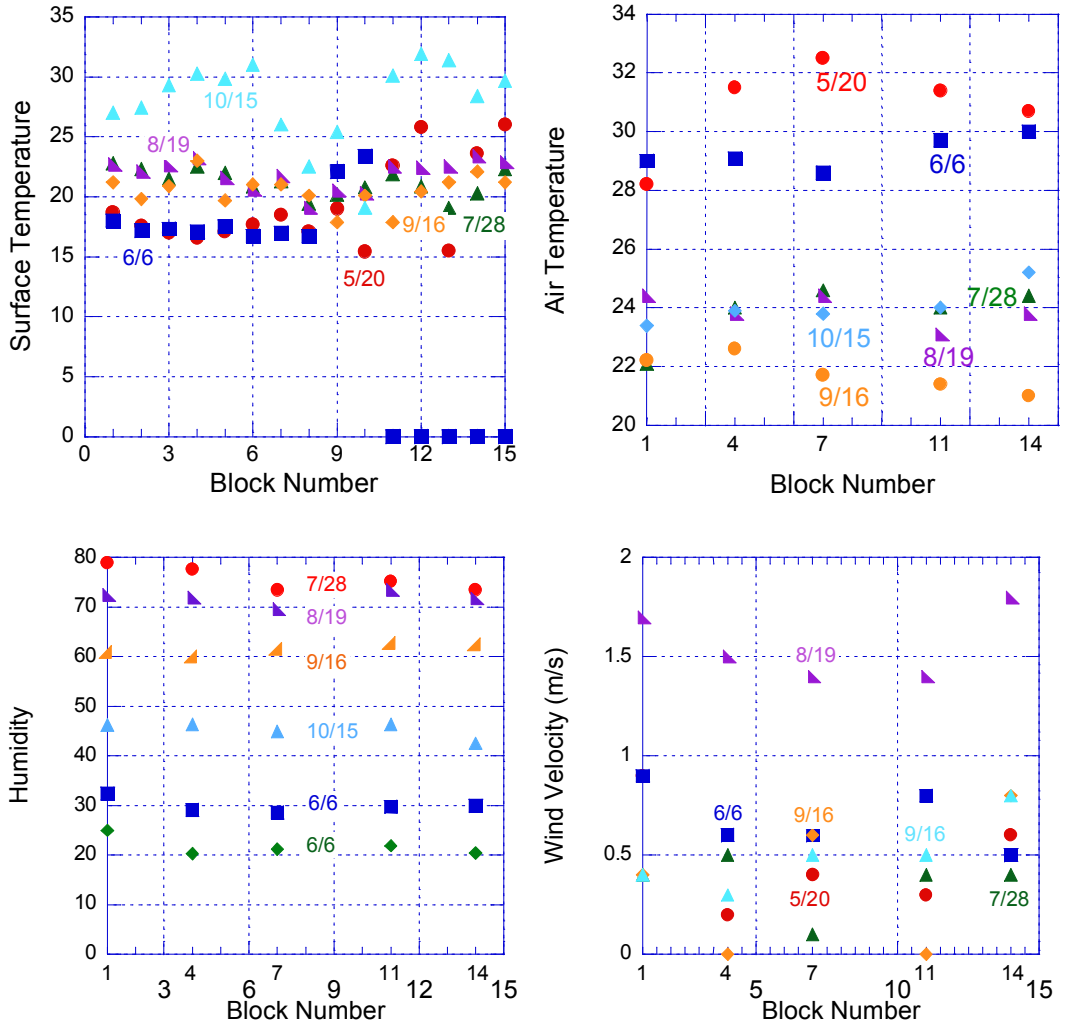


그림 5.12 무등산국립공원 입석대 국지기상 측정결과 그래프, (a) 표면온도, (b) 주변온도, (c) 습도, (d) 풍속

5.3 수치해석

5.3.1 3DEC을 이용한 입석대 주상절리대의 거동 평가

3DEC 수치해석 프로그램을 사용하여 입석대 주상절리를 구현한 결과 그림 5.13와 같다. 입석대 주상절리의 거동을 측정한 결과는 전체적인 변위, 좌·우(X축) 방향에 대한 변위, 전·후(Y축) 방향에 대한 변위, 상·하(Z축) 방향에 대한 변위는 그림 5.14에서 보인다. 전체적인 방향에 대한 측정결과 전체 주상절리대 중 3번, 5번, 6번, 11번, 15번의 주상절리대 거동이 가장 크게 나타난다. 또한 상부 블록의 거동이 하부 블록의 거동에 비해 크게 나타난다(그림 5.14(a)). 좌·우(X축) 방향에 대한 측정결과 주상절리대 1번, 2번, 3번, 4번, 5번, 11번, 12번, 15번은 우측방향으로 변위가 최대 $23.2 \mu\text{m}$ 나타나며 6번, 7번, 8번, 9번, 13번, 14번은 좌측방향으로 최대 $83.9 \mu\text{m}$ 변위가 나타난다(그림 5.14(b)). 전·후(Y축) 방향에 대한 측정결과 주상절리대 3번, 4번, 5번, 6번, 7번, 8번, 9번, 10번, 11번, 15번은 하반 블록에 비해 상반 블록의 변위가 최대 0.8 mm 로 나타난다. 즉 주상절리대 전체적인 움직임이 전방으로 나타난다(그림 5.14(c)). 상·하(Z축) 방향에 대한 측정결과 주상절리대 5번, 6번, 11번, 12번, 15번은 상부 블록의 움직임이 하부 블록에 비해 변위가 최대 1.8mm 로 나타난다. 이는 전체적으로 주상절리대의 움직임은 하부로 나타난다(그림 5.14(d)). 입석대 주상절리대 변위값을 정리하면 표 5.11과 같다. 3DEC 소프트웨어를 이용한 입석대 주상절리대의 거동을 살펴보면 입석대 주상절리대는 매우 작은 변위로 나타났다. 이는 현재 입석대 주상절리대의 전도파괴 가능성은 적으며 안전하다 판단된다.

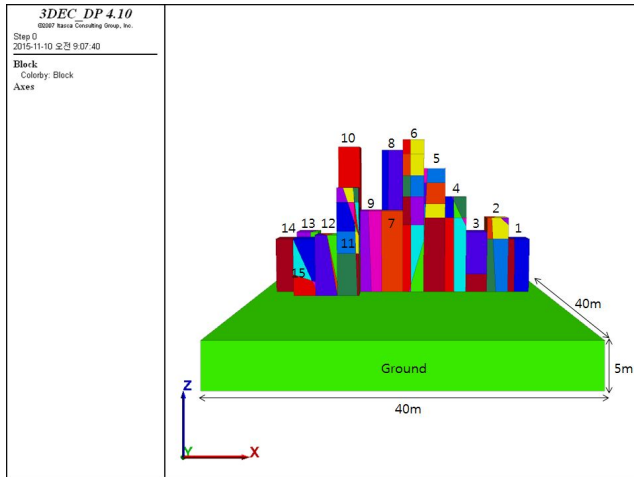


그림 5.13 3DEC을 이용한 입석대 주상절리대 모델링

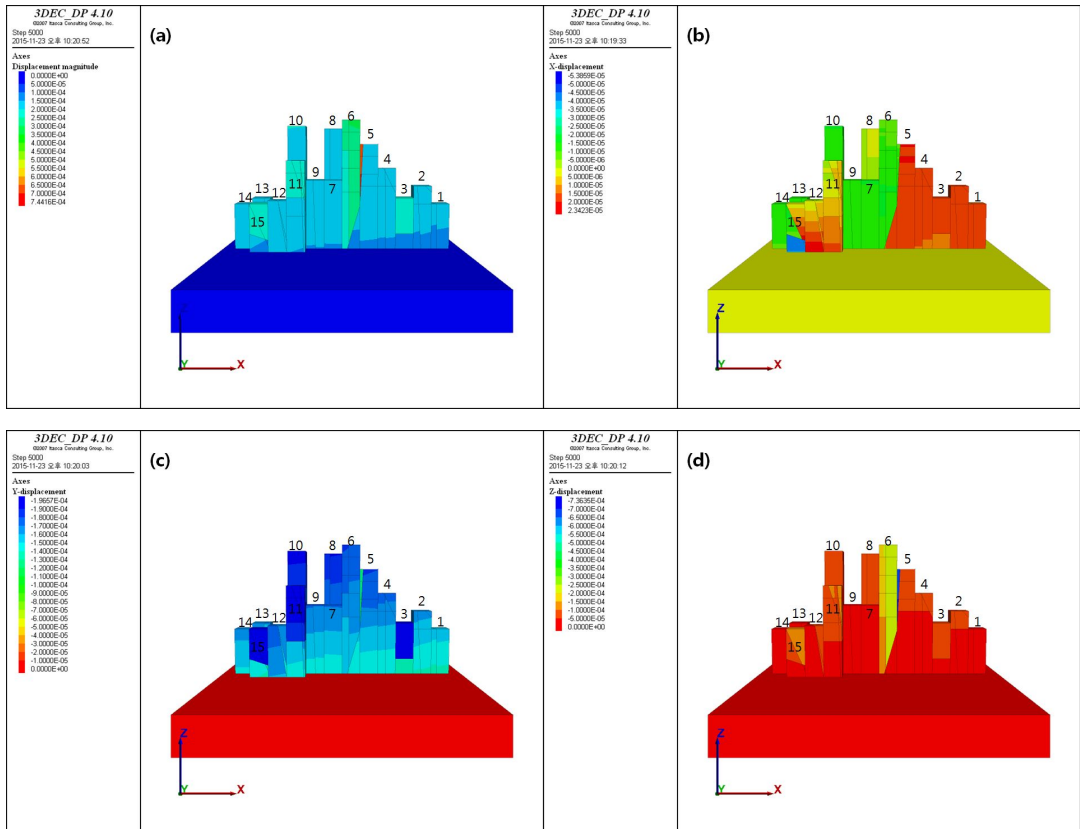


그림 5.14 입석대 주상절리대 거동, (a) 전체변위, (b) X축 변위, (c) Y축 변위, (d) Z축 변위

표 5.11 입석대 주상절리대 최대 변위값

주상절리대 번호	X축 방향(μm)		Y축 방향 (mm)		Z방향 (mm)	
	좌 (-)	우 (+)	전 (-)	후 (+)	하 (-)	상 (+)
1	-0.72	9.79	-0.11	-	-0.28	-
2	-10.3	13.1	-0.12	-	-0.52	-
3	-0.45	6.35	-0.14	-	-0.45	-
4	-1.85	15.4	-0.13	-	-0.49	-
5	-60.7	12.4	-0.14	-	-1.8	-
6	-83.9	51.4	-0.13	-	-1.26	-
7	-44.9	-	-0.14	-	-0.34	-
8	-29.0	-	-0.17	-	-0.45	-
9	-37.6	-	-0.13	-	-0.33	-
10	-33.4	-	-0.82	-	-0.39	-
11	-25.6	13.2	-0.16	-	-0.74	-
12	-66.0	23.2	-0.16	-	-0.59	-
13	-48.3	5.84	-0.20	-	-0.37	-
14	-22.5	-	-0.14	-	-0.31	-
15	-19.5	-	-0.12	-	-0.31	-

5.3.2 Soliworks을 이용한 입석대 주상절리대 하중에 의한 지반 변형 평가

입석대 주상절리대의 지반변형 평가를 위한 모델 크기와 형상은 그림 5.15와 같다. 이를 해석 후 측정된 입석대 주상절리대 지반 변형에 대한 값을 정리하면 다음 표 5.12와 같다.

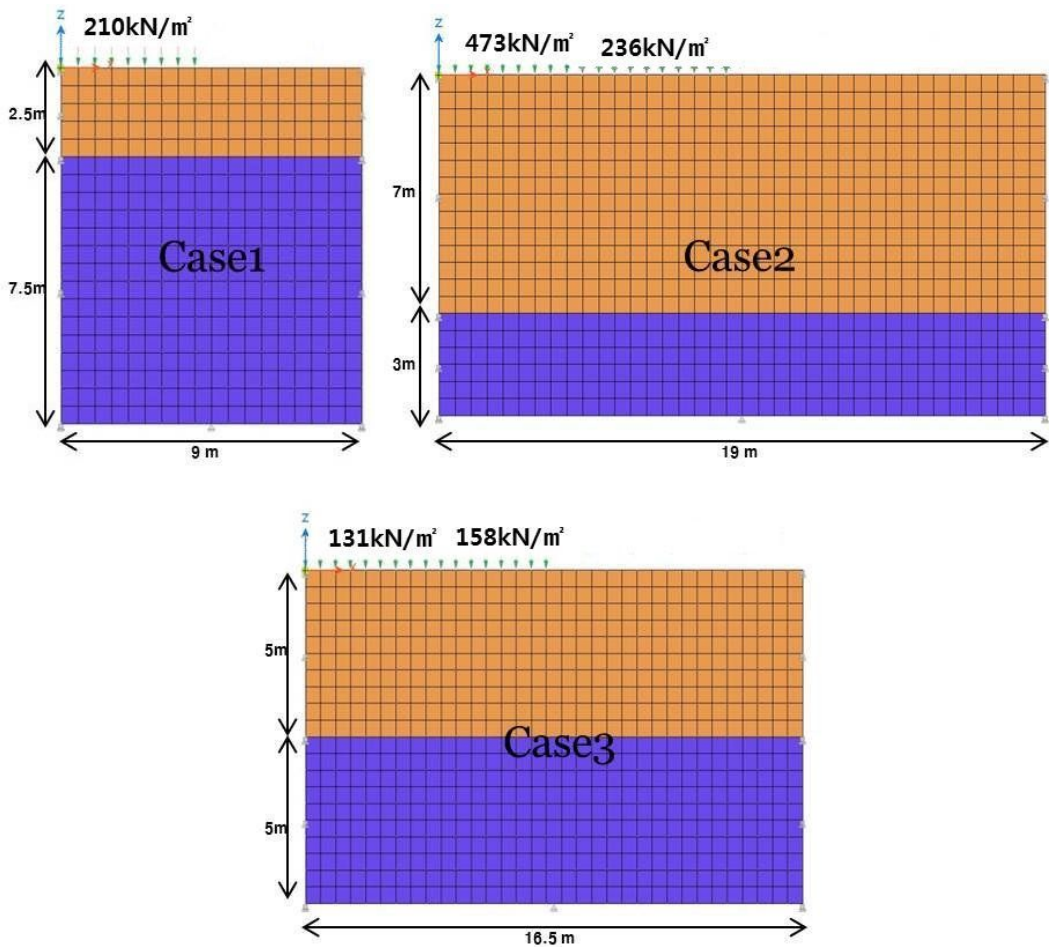


그림 5.15 Soilworks를 이용한 입석대 주상절리대 지반 모델링

Case-1 해석결과에 의하면 지표면 0m 지점의 최대 지반 변형은 8.4mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.25mm으로 나타났다. 깊이 1m 지점은 최대 지반 변형 5.15mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.07mm으로 나타났다. 깊이 2m 지점은 최대 지반 변형 1.75mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.02mm으로 나타났다. 깊이 3m 지점은 최대 지반 변형 0.08mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.01mm으로 나타났다(그림 5.16). 즉 Case-1 지반의 변형은 하중 작용점으로부터 최소 0.01mm, 최대 8.41mm로 나타났다(그림 5.17).

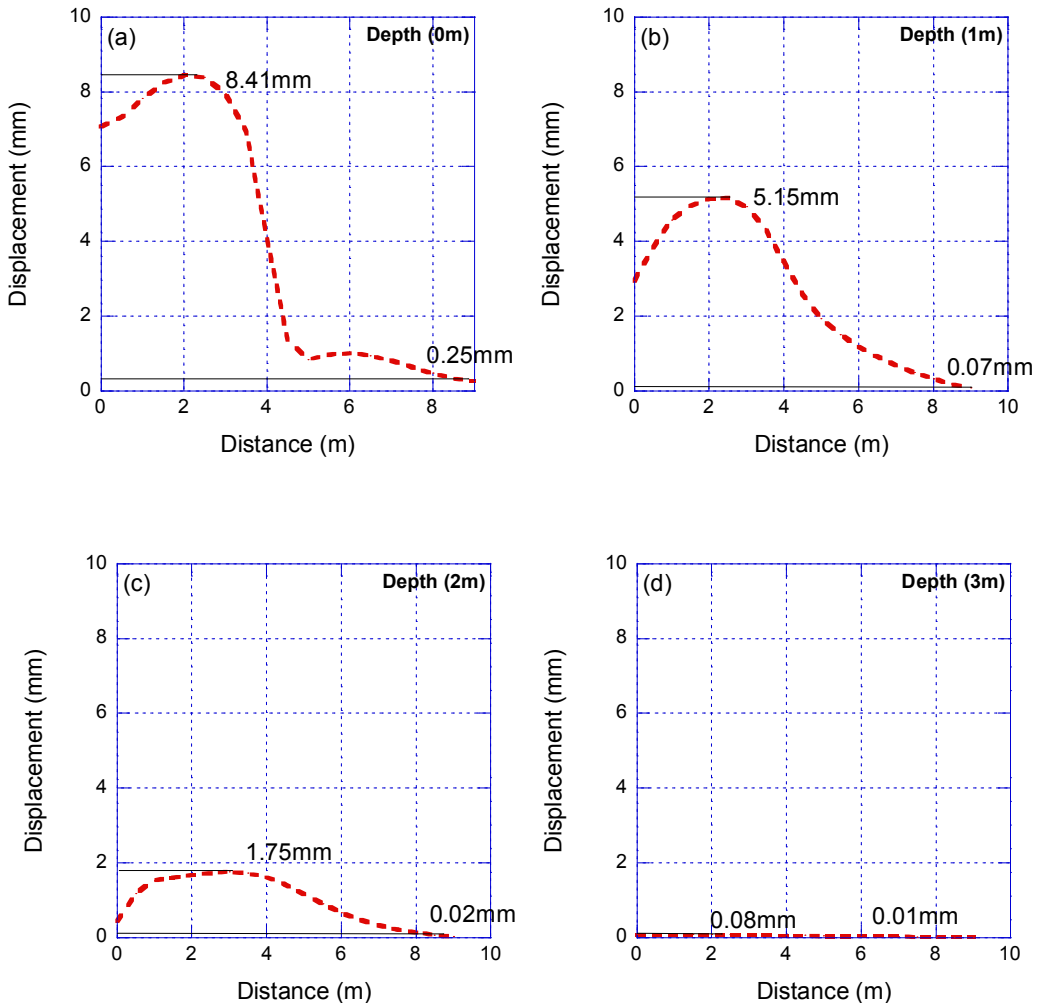
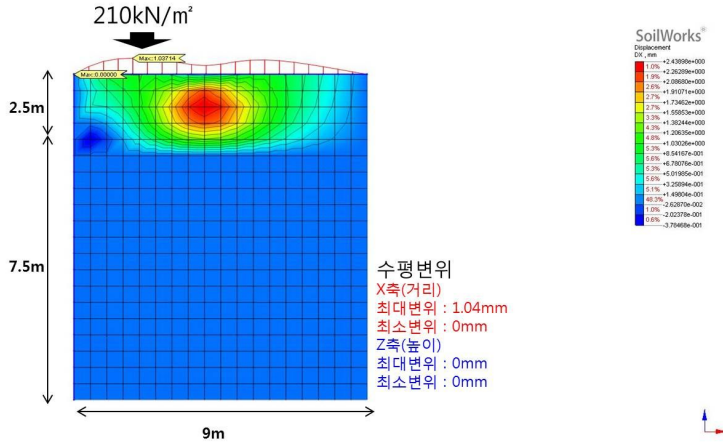
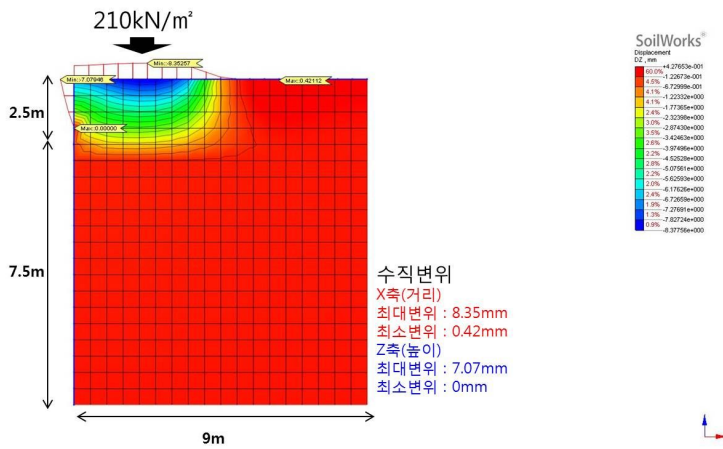


그림 5.16 Case1의 거리 및 심도별 변위 그래프, (a) 0m, (b) 1m, (c) 2m, (d) 3m

(a)



(b)



(c)

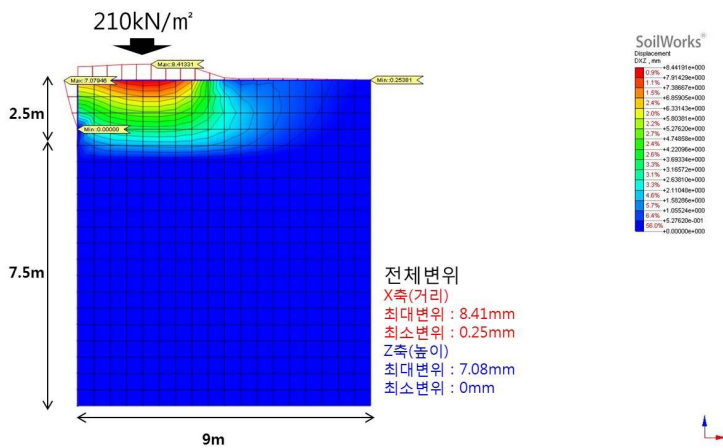
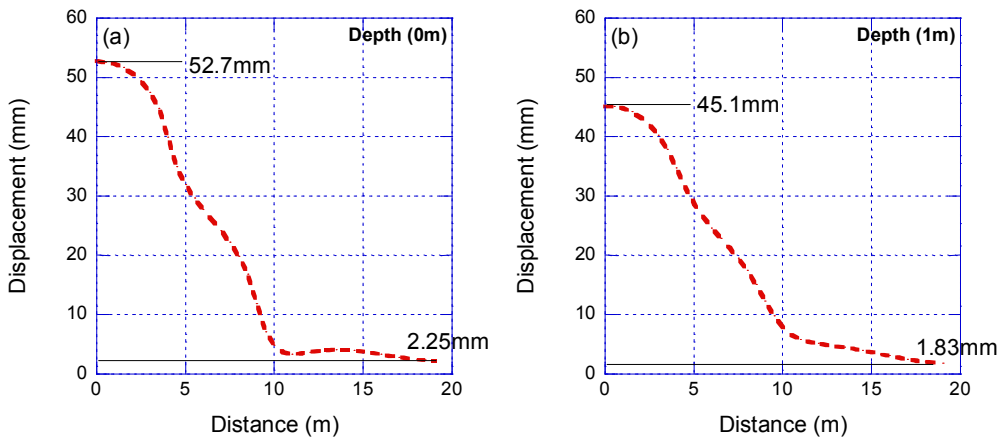


그림 5.17 Case1의 거리 및 깊이, (a)수평변위, (b)수직변위, (c)전체변위

Case-2 해석결과에 의하면 지표면 0m 지점의 최대 지반 변형은 52.7mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 2.25mm으로 나타났다. 깊이 1m 지점은 최대 지반 변형 45.1mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 1.83mm으로 나타났다. 깊이 2m 지점은 최대 지반 변형 37.1mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 1.40mm으로 나타났다. 깊이 3m 지점은 최대 지반 변형 28.7mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.95mm으로 나타났다. 깊이 4m 지점은 최대 지반 변형 20.4mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.53mm으로 나타났다. 깊이 5m 지점은 최대 지반 변형 13.2mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.18mm으로 나타났다. 깊이 6m 지점은 최대 지반 변형 6.4mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.01mm으로 나타났다. 깊이 7m 지점은 최대 지반 변형 0.09mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.002mm으로 나타났다(그림 5.18). 즉 Case-2 지반의 변형은 하중 작용점으로부터 최소 0.01 mm, 최대 57.75 mm로 나타났다(그림 5.19).



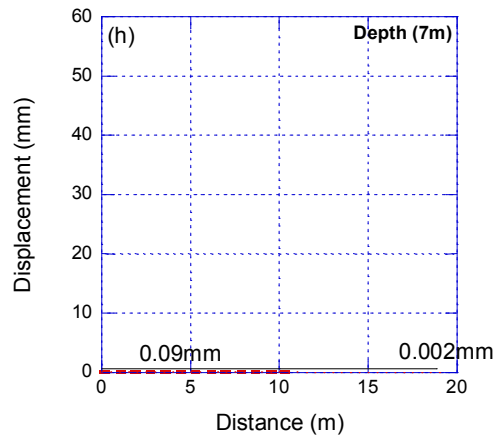
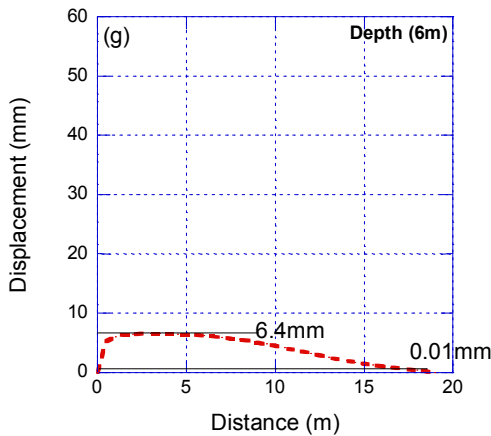
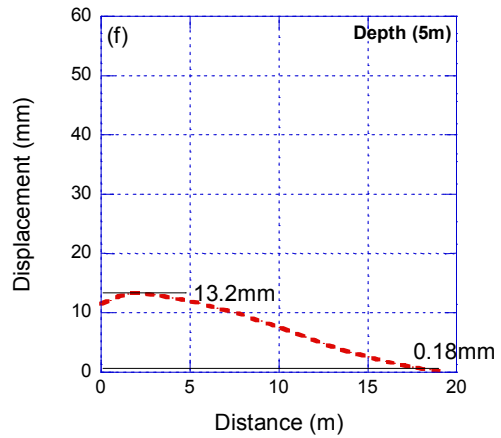
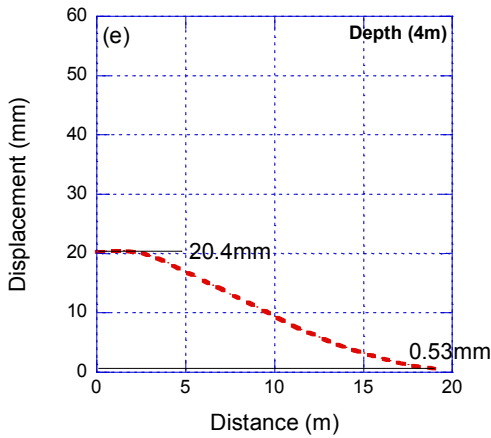
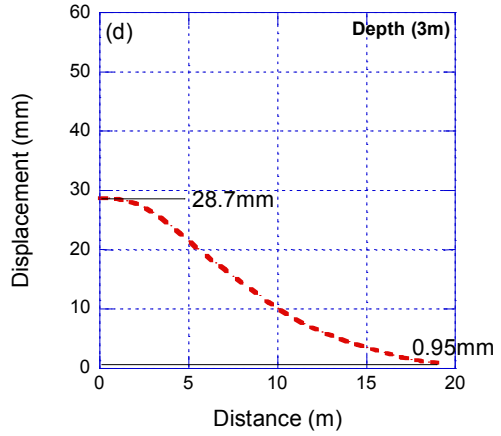
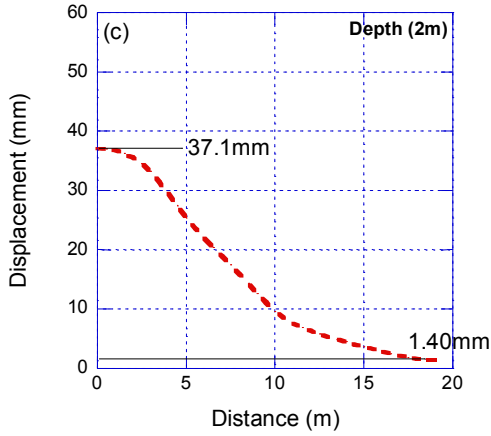


그림 5.18 Case2의 거리 및 심도별 변위 그래프, (a) 0 m, (b) 1 m, (c) 2 m, (d) 3m (e) 4m, (f) 5m, (g) 6m, (h) 7m

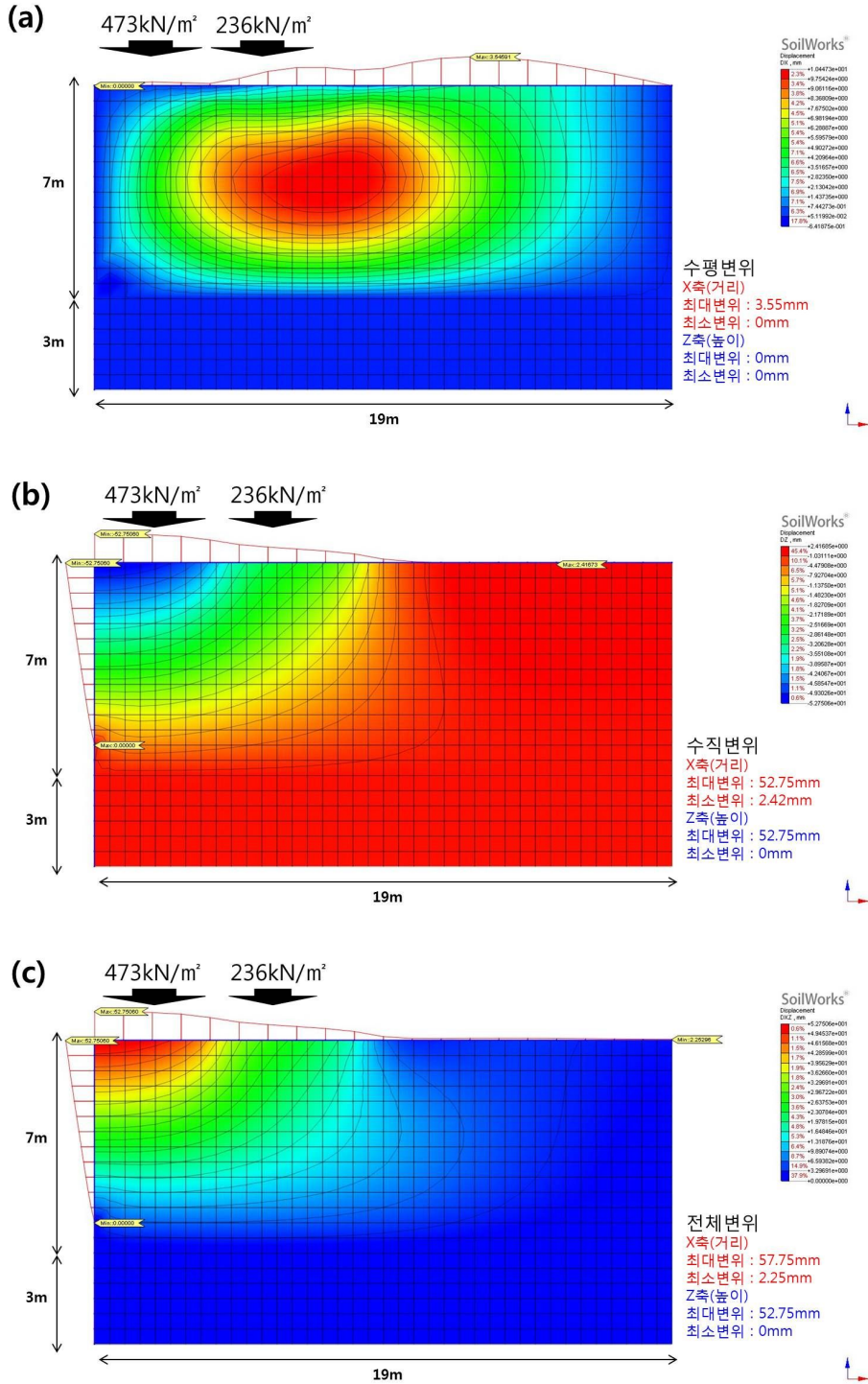
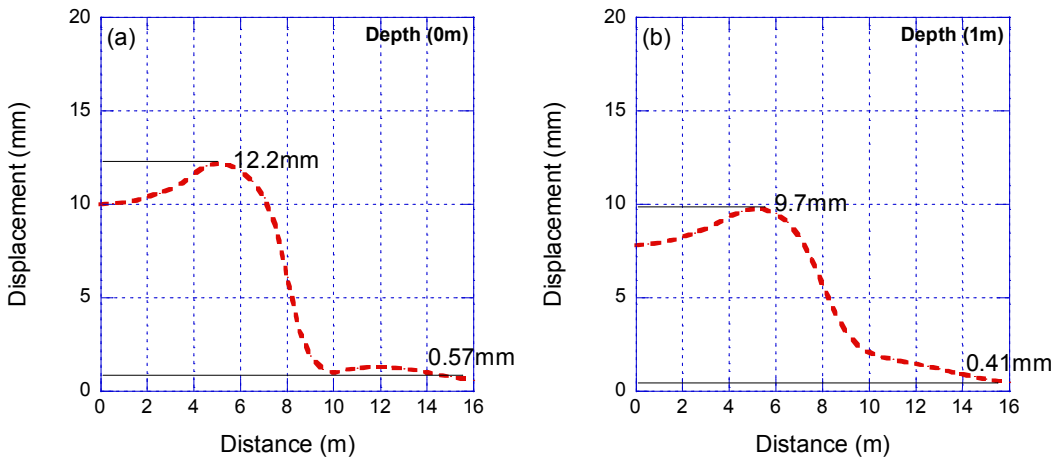


그림 5.19 Case2의 거리 및 깊이, (a)수평변위, (b)수직변위, (c)전체변위

Case-3 해석결과에 의하면 지표면 0m의 최대 지반 변형은 12.2mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.57mm으로 나타났다. 깊이 1m 지점은 최대 지반 변형 9.7mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.41mm으로 나타났다. 깊이 2m 지점은 최대 지반 변형 7.23mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.24mm으로 나타났다. 깊이 3m 지점은 최대 지반 변형 4.7mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.10mm으로 나타났다. 깊이 4m 지점은 최대 지반 변형 2.4mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.01mm으로 나타났다. 깊이 5m 지점은 최대 지반 변형 0.05mm으로 나타났으며, 최소 지반 변형은 0.002mm으로 나타났다(그림 5.20). 즉 Case-3 지반의 변형은 하중 작용점으로부터 최소 0.002 mm, 최대 12.2 mm로 나타났다(그림 5.21). 즉 입석대 주상절리대의 지반은 하중에 따른 지반의 변형이 하중이 작용하는 위치로부터 멀어지고 심도가 깊어질수록 지반변형이 작게 나타나므로 현재의 상태에서 탐방로에 대한 지반변형의 영향은 매우 미미한 것으로 판단된다.



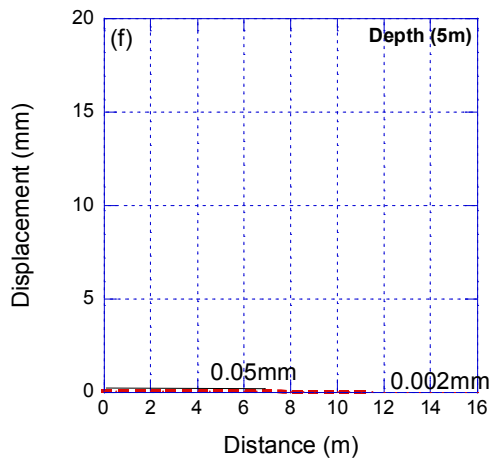
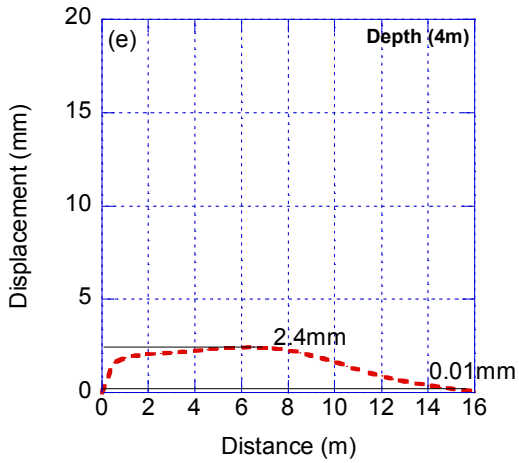
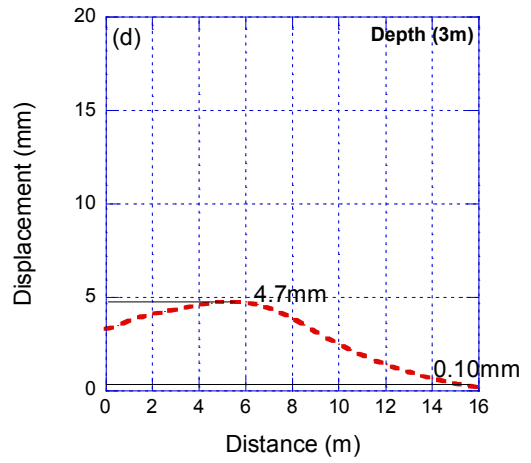
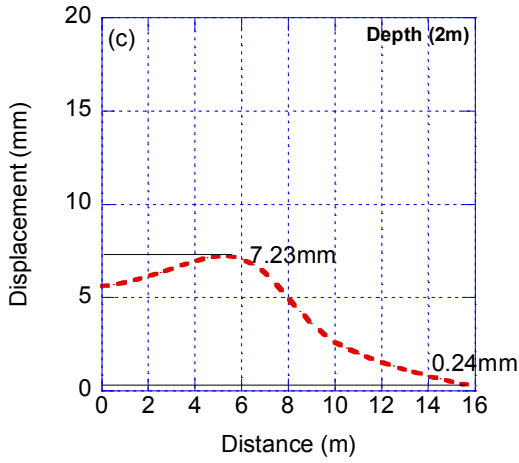


그림 5.20 Case3의 거리 및 심도별 변위 그래프, (a) 0 m, (b) 1 m, (c) 2 m, (d) 3 m, (e) 4 m, (f) 5 m

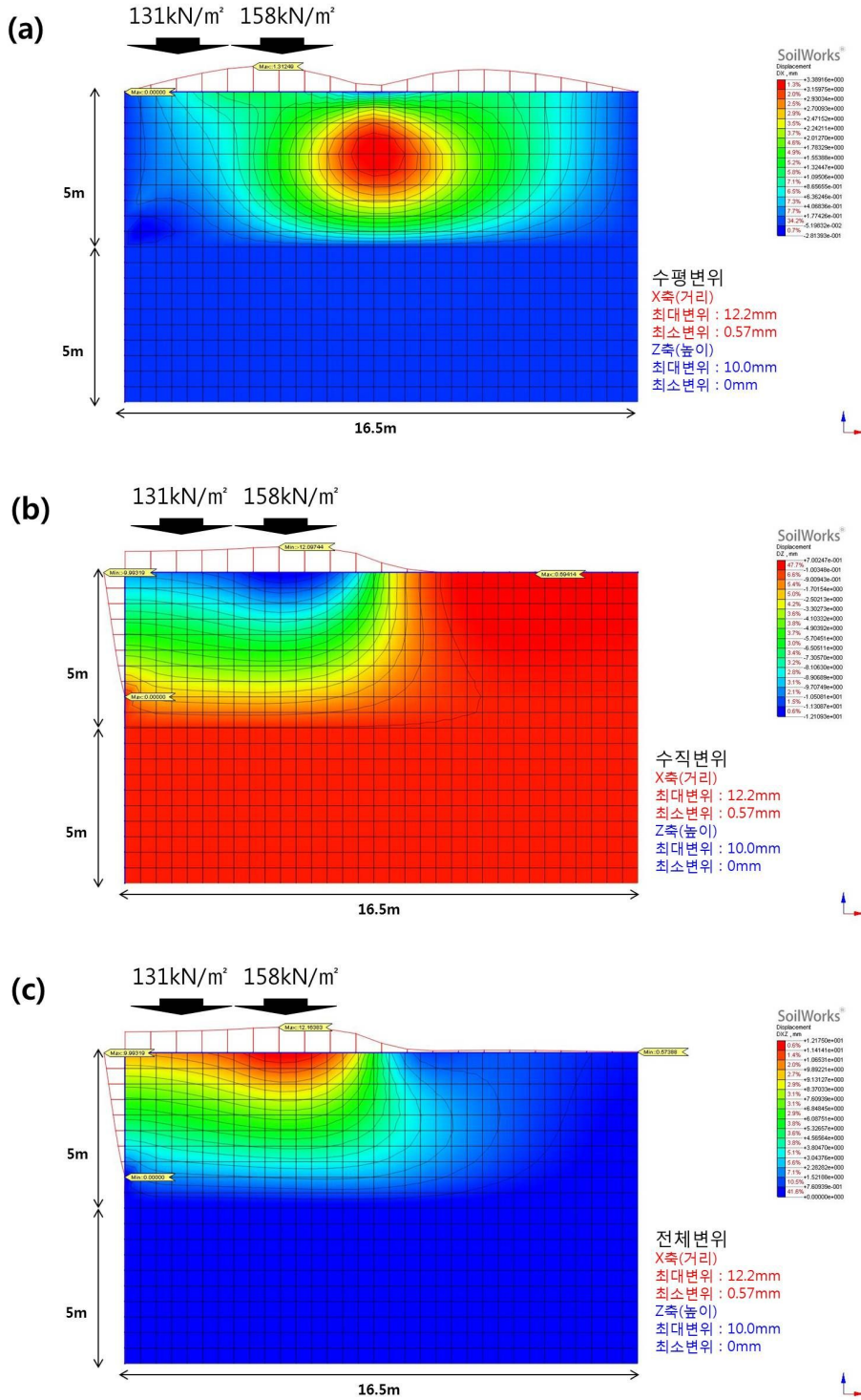


그림 5.21 Case3의 거리 및 깊이, (a)수평변위, (b)수직변위, (c)전체변위

표 5.12 Case 1, 2, 3 입석대 주상절리대 지반 변형 결과값

Case-1				
거리(m)	변위 (mm)			
	심도 (0m)	심도 (1m)	심도 (2m)	심도 (3m)
0	7.08	2.95	0.44	0.08
1	7.82	4.58	1.53	0.08
2	8.44	5.14	1.68	0.08
3	7.96	4.93	1.75	0.07
4	4.10	3.47	1.61	0.06
5	0.84	1.94	1.16	0.04
6	1.01	1.18	0.67	0.03
7	0.81	0.68	0.33	0.02
8	0.47	0.32	0.13	0.02
9	0.25	0.08	0.02	0.02

표 5.12 계속

Case-2								
거리(m)	변위 (mm)							
	심도 (0m)	심도 (1m)	심도 (2m)	심도 (3m)	심도 (4m)	심도 (5m)	심도 (6m)	심도 (7m)
0	52.8	45.2	37.1	28.7	20.2	11.5	0.0	0.08
1	52.3	44.8	36.8	28.5	20.4	12.8	6.0	0.09
2	50.8	43.4	35.6	27.8	20.4	13.3	6.4	0.08
3	47.6	40.3	33.2	26.3	19.6	13.0	6.5	0.09
4	39.9	34.8	29.5	24.0	18.4	12.5	6.5	0.09
5	31.9	28.7	25.4	21.4	16.9	11.9	6.4	0.08
6	27.7	24.6	21.9	19.0	15.4	11.2	6.2	0.09
7	24.1	21.2	18.9	16.7	14.0	10.4	5.9	0.07
8	19.8	17.4	15.9	14.5	12.5	9.5	5.5	0.06
9	11.8	12.3	12.6	12.2	10.9	8.6	5.0	0.05
10	4.7	7.8	9.6	10.1	9.4	7.5	4.5	0.06
11	3.3	5.7	7.6	8.3	7.9	6.4	3.8	0.05
12	3.7	5.1	6.2	6.8	6.5	5.3	3.2	0.04
13	4.0	4.6	5.3	5.6	5.3	4.2	2.5	0.03
14	4.0	4.2	4.4	4.5	4.2	3.3	2.0	0.03
15	3.7	3.6	3.6	3.5	3.2	2.5	1.5	0.02
16	3.3	3.0	2.9	2.6	2.3	1.7	1.0	0.01
17	2.8	2.5	2.2	1.9	1.5	1.1	0.7	0.01
18	2.4	2.0	1.6	1.2	0.9	0.5	0.3	0.01
19	2.3	1.8	1.4	1.0	0.5	0.1	0.0	0.00

표 5.12 계속

Case-3						
거리(m)	변위 (mm)					
	심도 (0m)	심도 (1m)	심도 (2m)	심도 (3m)	심도 (4m)	심도 (5m)
0	9.99	7.82	5.64	3.31	0.00	0.05
1	10.10	7.94	5.82	3.75	1.88	0.05
2	10.39	8.25	6.16	4.10	2.05	0.05
3	10.83	8.71	6.56	4.35	2.15	0.05
4	11.63	9.33	6.97	4.59	2.25	0.06
5	12.18	9.75	7.23	4.76	2.35	0.05
6	11.80	9.50	7.08	4.73	2.42	0.05
7	10.35	8.28	6.32	4.43	2.41	0.05
8	6.08	5.69	4.99	3.86	2.27	0.04
9	1.88	3.14	3.60	3.16	1.99	0.03
10	1.01	2.06	2.63	2.48	1.63	0.03
11	1.22	1.69	2.01	1.90	1.25	0.02
12	1.31	1.45	1.55	1.40	0.90	0.01
13	1.20	1.18	1.15	0.99	0.62	0.01
14	1.00	0.90	0.81	0.66	0.40	0.01
15	0.77	0.63	0.51	0.38	0.22	0.00
16	0.60	0.44	0.29	0.16	0.07	0.00

6. 무등산국립공원 입석대 주상절리에 대한 공학적 고찰

무등산국립공원 입석대는 해발 약 1,017m에 위치하며, 5-18m의 높이로 노출되어 있으며, 돌기둥 30여개가 동서 120m 폭으로 나란히 늘어져 있다 또한 입석대 주상절리대의 모양은 원기둥 형태가 아니라 한 면이 1~2m 정도의 길이로 단면은 5~6각형의 기둥형태로 발달되어 있다. 그 중 몇몇 주상절리는 수평절리가 발달하여 여러 개의 블록을 쌓아 하나의 돌기둥을 세워놓은 것처럼 보인다. 이처럼 입석대 주상절리의 표면은 높은 고도 위치해 있어 계절적 영향에 의한 기온 및 습도의 변화가 심하고, 자연 상태에 오랫동안 노출되다 보니 표면의 풍화상태가 심각하다. 이러한 요인에 의해 주상절리대 표면에는 암석의 조직, 색, 화학조성 등이 변화된 화학적 풍화 지의류 등에 의한 생물학적 풍화 그리고 수직으로 발달한 절리 및 박리박락과 같은 물리적 풍화가 복합적으로 관찰된다(그림 6.1). 이는 시간이 지날수록 풍화상태가 더 급속하게 발달하여 주상절리의 안정성에 위협적인 인자로 작용할 가능성이 있다. 이를 고려하여 풍화가 심각하게 나타나고 있는 주상절리를 대상으로 주상절리대 불연속면에 절리변수(물의 유입, 동결융해)와 하중변수(설하중, 지진에 따른 여진 하중)등을 적용하여 보다 더 정확하고 세밀한 조사를 하여 주상절리대의 안정성에 평가를 추가적으로 실시한다면 이는 자연유산 보존 및 세계지질공원 정의에 한발 다가갈 것으로 사료된다.



그림 6.1 입석대 주상절리대 표면상태, (a) 변질 및 식생 (b) 균열 및 박리박락

7. 결론

본 연구는 무등산국립공원 입석대 주상절리대를 구성하고 있는 암석의 물리·역학적 특성 파악으로부터 풍화상태를 살펴보았으며, 수치해석을 통하여 주상절리대의 안정성 및 지반변형을 평가하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다. 무등산용회암에 대한 평균 물성값은 공극률 0.65 %, 밀도 2.68 g/cm³, 종파속도 2,427 m/s이며, 일축압축강도 시험에 의한 강도는 322 MPa, 영률 81 GPa, 포아송비 0.25로 나타났다. 절리면전단시험에 의한 수직강성 3.15 GPa/m, 전단강성(k_s) 0.38 GPa/m, 마찰각 35°, 점착력 0.5 MPa로 나타났다. 입석대 주상절리대의 주변 진동 및 소음 측정값은 2.35 PPV(mm/s)로 나타났으며, 이는 탐방객의 탐방로 이용시간과 일치하였다. 또한, 입석대 주상절리대 국지기상을 측정된 결과 입석대 주상절리대는 다른 지역의 주상절리대와 다르게 해발 1,017 m 이상의 고지대에 분포해 있으며 계절적 영향과 날씨의 변화에 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 이러한 요인에 의해 무등산국립공원 입석대 주상절리대는 시간이 지남에 따라 암석 표면의 풍화가 가속화 될 것으로 판단된다. 불연속면 거칠기 측정 결과 노출된 불연속면의 거칠기는 JCR 표준과 차트에 근거할 때 약간 거침으로 나타났으며, 실버 슈미트해머에 의한 평균 Q값은 57로 나타났다. 3DEC을 이용한 주상절리대 거동 평가결과, 좌·우 방향에 대한 변위는 최대 83.9 μm , 앞·뒤 방향에 대한 변위는 최대 0.8 mm, 상·하 방향에 대한 변위는 최대 1.26 mm로 거동이 나타나며 이는 매우 작은 거동으로 보인다. 이는 현재 입석대 주상절리대의 전도과괴 가능성은 적으며 안전하다 판단된다. Soilworks를 이용한 주상절리대 하중에 의한 지반변형 평가 결과, Case-1의 지반 변위는 최소 0.01 mm, 최대 8.41 mm, Case-2는 최소 0.01 mm, 최대 57.75 mm, Case-3는 0.01 mm, 최대 12.2 mm로 나타났다. 즉, 입석대 주상절리대의 지반은 하중에 따른 지반의 변형이 하중이 작용하는 위치로부터 멀어지고 심도가 깊어질수록 지반변형이 작게 나타나므로 현재의 상태에서 탐방로에 대한 지반변형의 영향은 매우 미미한 것으로 안전하다 판단된다.

결론적으로, 공학적인 접근을 통한 입석대 주상절리대의 안정성 평가로 인해 자연유산 보존은 가능하며 이를 바탕으로, 공학적 특성(물리적, 역학적 특성, 풍화 상태, 안정성 등)에 대한 많은 자료를 확보하여 보다 더 적절한 보존 방법과 구체적인 대안을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 광주광역시, 2013, 무등산 주상절리대 일대 학술조사 및 세계유산 등재 추진방안 연구보고서, pp.1-336.
2. 국립공원관리공단 국립공원연구원, 2014, 2013 무등산국립공원 자연자원조사(요약본), p.1-58.
3. 김규봉, 이병주, 황상구, 1990, 광주도폭지질보고서(1:50,000), 한국동력자원연구소, p.1-20.
4. 김봉균, 박병권, 1966, 한국지질도 동북지질도폭 및 설명서 (1:5만), 상공부 국립지질조사소, 30 p.
5. 김영석과 진광민, 2010, 울산 정자해수욕장과 경주 읍천해안에서 관찰되는 수평 주상절리(와상절리)의 발달특성 및 관광지질자원으로서의 가치 연구, 지질학회지 제 46권, 제 4호, p. 413~427.
6. 김용준, 박재봉, 박병규, 2002, 무등산 지역에 분포하는 화성암류의 암석화학, 암석학회지, 제11권, 제3·4호, 214-233.
7. 안건상, 2010, 무등산 도립공원의 지질과 경관, 암석학회지, 19, 2, p.109~121
8. 안건상, 2014(a), 남한에서 주상절리의 분포와 암석학적 특성, 암석학회지 제 23권 제 2호, p. 45~59.
9. 안건상, 2014(b), 우리나라 주상절리에 대한 연구 전략, 한국지구과학회지 제 25권 제 7호, p. 501~517.
10. 우경식, 2014, 국가와 세계지질공원의 자격과 전망, 지질학회지 제 50권 제 1호, p. 3~19.
11. 윤성효, 고정선, 홍현주, 2005, 제주도 대포동현무암에 발달한 지샓개 주상절리의 형태학 및 암석학적 연구, 암석학회지 제 14권, 제 4호, p. 212~225.
12. 장윤득, 우현동, 박진수, 오한솔, 2013, 울릉도 국수바위 주상절리의 형성과정과 자연유산적인 가치, 암석학회지 제 22권, 제 1호, p. 9~17.
13. 진명식, 신흥자, 권석기, 2005, 한반도의 화성암과 화성활동, 한국지질자원연구원, 310 p.
14. 차문성, 윤성효, 1988, 한반도의 화산암물구조 및 환상복합암체에 대한 연구, 지질학회지, 24(특별호), 67-86
15. 한국암반공학회, 2010, 암석표준시험법, pp. 1-123.

16. 황상구와 김재호, 2009, 주왕산 국립공원의 지형경관과 지질학적 지배 요인: 용결상과 주상절리, 암석학회지 제 18권, 제 3호, p. 195~209.
17. Barton, N.R. and Bandis, S.C., 1982. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock, 23rd U.S. symp. on rock mechanics, Berkeley, pp. 739-760.
18. ISRM, 1979, The ISRM Suggested Methods for Rock Chracterization Testing and Monitering L 2007-2014, pp. 1-293.
19. N. Barton and V. Choubey., 1977, The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mechanics, vol. 10, 1/2, pp. 1-54.

감사의 글

어느덧 길고도 짧은 2년간의 대학원 생활을 마치면서 그동안 저에게 많은 도움을 주신 모든 분들께 글로나마 감사의 말씀을 드립니다.

먼저 학부시절부터 지금까지 부족한 저를 이끌어 주시고 학업뿐만 아니라 인생을 살아가는데 있어서 많은 가르침을 주신 저의 지도교수 강성승 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 부족한 저의 논문을 심사하시느라 고생 많으신 장일식 교수님과 최태진 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 또한 학부시절부터 지금까지 관심과 애정을 갖고 열정적으로 지도해 주신 한오형 교수님, 박천영 교수님, 고진석 교수님과 지금은 은퇴하신 박영석 교수님, 강추원 교수님께도 감사의 말씀을 전해드리고 싶습니다.

제가 조선대학교 에너지자원공학과 대학원에 와서 얻은 것 중 가장 중요한 것이 인맥이라고 생각합니다. 모든 분들을 열거할 순 없지만 에너지자원공학과와 모든 선·후배님들 정말 감사드립니다. 우선 제 대학원 생활에서 절대 빼놓을 수 없는 나의 동기들 노정두, 이윤섭, 남현승, 신주호, 김양수에게 정말 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 자원개발 및 암석역학 실험실로 인연을 맺은 나태유 선배님, 이건주 후배님, 신지현 후배님, 실험실은 다르지만 저에게 대학원 생활에 있어 많은 도움을 준 응용광물 실험실 조강희 선배님, 김봉주 선배님, 임대학 후배님, 김현수 후배님, 명은지 후배님, 광물처리 실험실 김우람 선배님, 최진영 선배님, 김동규 후배님 그리고 석유공학 실험실 김영경 선배님, 나주환 후배님, 김유미 후배님, 강현정 후배님, 물리탐사 김종혁 후배님, 또한 다른 학교이지만 같은 전공으로써 저에 도움이 되어주신 모든 분들께 진심으로 감사드립니다.

마지막으로 제가 어떠한 힘든 고난과 역경이 있어도 살아가는 이유인 사랑하는 가족 할머니, 외할머니, 아버지, 어머니, 아름찬, 보미찬, 모든 친척 분들, 하늘에 계신 할아버지, 외할아버지 너무 사랑하고 감사합니다. 그리고 항상 옆에서 누구보다 믿어주고 힘이 되어주며 웃을 수 있게 해준 명희, 평생 나와 함께할 든든한 나의 친구들 고영우, 김동욱, 노홍수, 문현중, 박영찬, 서경우, 서기남, 서재식, 신상민, 양환준, 오해준, 유정균, 이권호, 장경식, 조익현, 지청재, 최상근에게도 고맙고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

저작물 이용 허용서					
학과	에너지자원공학과	학번	20147262	과정	석사
성명	한글 : 김 마 루 찬 한문 : 영문 : MA RU CHAN KIM				
주소	광주광역시 남구 방림동 삼일아파트 11동 307호				
연락처	E-MAIL : maruchi13@naver.com				
논문제목	한글 : 무등산국립공원 입석대 주상절리에 대한 공학적 특성 영어 : Engineering Properties of Mount Mudeung National Park Ipseok-dae Columnar Joint				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·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 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(○) 반대()</p> <p style="text-align: center;">2016 년 2 월 일</p> <p style="text-align: center;">저작자: 김 마 루 찬 (인)</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;">조선대학교 총장 귀하</p>					