



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](#)

碩士學位論文

제주도 표선리 현무암의 역학적 특성  
및 강도에 관한 연구



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

金 俊 昊

2006年 12月

# 제주도 표선리 현무암의 역학적 특성 및 강도에 관한 연구

指導教授 南 正 萬

金 俊 昊

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2006年 12月

金俊昊의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

濟州大學校 大學院

2006年 12月

# A Study on the Mechanical Characteristics and the Strength in Pyoseonri Basalt

Jun-Ho Kim

(Supervised by professor Jung-Man Nam)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for  
the degree of Master of Engineering

2006. 12.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, *Byung-Gul Lee* , Prof. of Civil engineering

Thesis director, *Sang-Yeol Park* , Prof. of Civil engineering

Thesis director, *Jung-Man Nam* , Prof. of Civil engineering

*December. 2006*

Department of Civil & Ocean Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	v
Summary .....	ix
<b>I. 서 론</b> .....	1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 연구내용 및 범위 .....	2
<b>II. 연구지역</b> .....	3
2.1 제주도의 지형적 특성 .....	3
2.2 제주도의 지질학적 특성 .....	5
2.3 시료채취지역의 현황 .....	10
2.3.1 표선리 현무암 .....	13
2.3.2 조면암질 현무암 .....	15
2.3.3 Scoria .....	16
<b>III. 실험방법 및 결과</b> .....	17
3.1 시료채취 및 준비 .....	17
3.2 흡수율 및 비중시험 .....	20
3.3 암반투수시험 .....	25
3.4 Schmidt hammer test .....	32
3.5 탄성파시험 .....	34
3.6 일축압축시험 .....	37
3.7 압열인장시험(Brazilian test) .....	44
3.8 삼축압축시험 .....	49

<b>IV. 실험결과의 분석</b> .....	54
4.1 각 시료별 역학적 특성 .....	54
4.1.1 표선리 현무암 .....	54
4.1.2 조면암질 현무암 .....	56
4.1.3 Scoria .....	57
4.2 Schmidt hammer 반발계수와 일축압축강도의 상관관계 .....	59
4.3 암석 강도에 미치는 영향요소 .....	61
4.3.1 가압속도 .....	61
4.3.2 암석의 이방성 .....	62
4.3.3 수분의 함유량 .....	63
4.4 암반의 파괴규준 .....	64
4.4.1 Mohr-Coulomb의 파괴규준 .....	64
4.4.2 Hoek-Brown의 파괴규준 .....	68
4.4.3 Lade의 파괴규준 .....	77
4.4.4 각 파괴규준의 비교 .....	86
<b>V. 결 론</b> .....	90
<b>VI. 참고문헌</b> .....	92

## List of Tables

Table 2.1 Geological properties of intact rock in Jeju Island (KIGAM, 1:250,000) .....	9
Table 2.2 Mineral data of Alkali basalt from Jeju Island .....	14
Table 3.1 Result of Absorption and Specific gravity test .....	23
Table 3.2 Result of Permeability test .....	31
Table 3.3 Result of Schmidt hammer test .....	33
Table 3.4 Result of Ultrasonic velocity test .....	35
Table 3.5 Classification of rock masses : <A, B Group> .....	36
Table 3.6 Relationship between Ultrasonic velocity and Uniaxial compressive strength .....	36
Table 3.7 Result of Uniaxial compression test in the Pyoseonri Basalt .....	38
Table 3.8 Result of Uniaxial compression test in the Trachybasalt .....	40
Table 3.9 Result of Uniaxial compression test in the Scoria .....	42
Table 3.10 Result of Brazilian test in the Pyoseonri Basalt .....	46
Table 3.11 Result of Brazilian test in the Trachybasalt .....	47
Table 3.12 Result of Brazilian test in the Scoria .....	48
Table 3.13 Result of Triaxial compression test .....	52
Table 4.1 Comparison with each Basalt ( I ) .....	55
Table 4.2 Comparison with each Basalt ( II ) .....	56
Table 4.3 Comparison with each Scoria .....	58
Table 4.4 Parameter of each samples .....	60
Table 4.5 Calculation of $\sigma_3/\sigma_c$ and $((\sigma_{1f} - \sigma_3)/\sigma_c)^2$ in the Pyoseonri Basalt .....	69
Table 4.6 Calculation of $\sigma_3/\sigma_c$ and $((\sigma_{1f} - \sigma_3)/\sigma_c)^2$ in the Trachybasalt .....	72
Table 4.7 Calculation of $\sigma_3/\sigma_c$ and $((\sigma_{1f} - \sigma_3)/\sigma_c)^2$ in the Scoria .....	74

Table 4.8 Geological Strength Index ..... 76  
Table 4.9 Comparison with failure criterion estimated by each method .... 86



## List of Figures

Fig. 2.1	Geologic map of Jeju Island (KIGAM, 1:250,000, 1973)	6
Fig. 2.2	Location map of the study area	10
Fig. 2.3	Geologic map of the study area	11
Fig. 2.4	Geologic columnar section of sampling site	12
Fig. 3.1	Photograph of collected cores	17
Fig. 3.2	Coring machine	18
Fig. 3.3	Diamond cut-off saw	18
Fig. 3.4	Surface grinder	18
Fig. 3.5	Photograph of specimens for this study (43mm×86mm)	19
Fig. 3.6	Photograph of Absorption test	20
Fig. 3.7	Apparatus for Specific gravity test	22
Fig. 3.8	Absorption and Specific gravity of the Pyoseonri Basalt	23
Fig. 3.9	Absorption and Specific gravity of the Trachybasalt	24
Fig. 3.10	Absorption and Specific gravity of the Scoria	24
Fig. 3.11	Apparatus for Permeability test of rock	25
Fig. 3.12	Schematic diagram of Permeability test setup	26
Fig. 3.13	Support mold	27
Fig. 3.14	Setting feature	27
Fig. 3.15	Fixing cap	27
Fig. 3.16	Setting feature	27
Fig. 3.17	Container lid	28
Fig. 3.18	Setting feature	28
Fig. 3.19	Measurement equipment	28
Fig. 3.20	Diamond thin-wall bit (33mm, 127mm)	29
Fig. 3.21	Photograph of the making specimen procedure	29

Fig. 3.22 Prepared specimens for this study .....	29
Fig. 3.23 Plane schematic diagram of radial flow .....	31
Fig. 3.24 Sectional view of specimen .....	31
Fig. 3.25 Photograph of Schmidt hammer test .....	32
Fig. 3.26 Conversion diagram of Uniaxial compressive strength .....	33
Fig. 3.27 Schematic diagram of Ultrasonic velocity test .....	35
Fig. 3.28 Photograph of Ultrasonic velocity test .....	35
Fig. 3.29 Photograph of system for Compression test .....	37
Fig. 3.30 Photograph of Uniaxial compression test .....	38
Fig. 3.31 Compressive strength of the Pyoseonri Basalt in the dry state ..	39
Fig. 3.32 Compressive strength of the Pyoseonri Basalt in the wet state ..	39
Fig. 3.33 Compressive strength of the Trachybasalt in the dry state .....	41
Fig. 3.34 Compressive strength of the Trachybasalt in the wet state .....	41
Fig. 3.35 Compressive strength of the Scoria in the dry state .....	43
Fig. 3.36 Compressive strength of the Scoria in the wet state .....	43
Fig. 3.37 Apparatus for Brazilian test .....	45
Fig. 3.38 Stress distribution of Brazilian test .....	45
Fig. 3.39 Photograph of Brazilian test .....	45
Fig. 3.40 Tensile strength of the Pyoseonri Basalt .....	46
Fig. 3.41 Tensile strength of the Trachybasalt .....	47
Fig. 3.42 Tensile strength of the Scoria .....	48
Fig. 3.43 Tri-axial chamber and Stress-strain curve .....	50
Fig. 3.44 Mohr stress circle and Failure line .....	50
Fig. 3.45 Apparatus for Triaxial compression test .....	51
Fig. 3.46 Photograph of Triaxial compression test .....	51
Fig. 3.47 Stress-strain behavior of the Pyoseonri Basalt .....	52
Fig. 3.48 Stress-strain behavior of the Trachybasalt .....	53
Fig. 3.49 Stress-strain behavior of the Scoria .....	53
Fig. 4.1 Photograph of the Pyoseonri Basalt .....	54

Fig. 4.2	Photograph of the Trachybasalt .....	56
Fig. 4.3	Photograph of the Scoria .....	57
Fig. 4.4	Diagram showing relationship between Schmidt hammer rebound value and Uniaxial compressive strength .....	59
Fig. 4.5	Change of compressive strength by loading speed .....	61
Fig. 4.6	Relationship between Tilt angle and Compressive strength .....	62
Fig. 4.7	Influence of moisture on compressive strength .....	63
Fig. 4.8	Influence of moisture on tensile strength .....	63
Fig. 4.9	Mohr-Coulomb failure criterion .....	65
Fig. 4.10	Mohr's circles and Failure envelope for the Pyoseonri Basalt .....	66
Fig. 4.11	Mohr's circles and Failure envelope for the Trachybasalt .....	66
Fig. 4.12	Mohr's circles and Failure envelope for the Scoria .....	67
Fig. 4.13	Relationship between $\frac{\sigma_3}{\sigma_c}$ and $\left(\frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_c}\right)^2$ in the Pyoseonri Basalt .....	69
Fig. 4.14	Estimation of failure criterion in the Pyoseonri Basalt by liner regression method .....	71
Fig. 4.15	Hoek-Brown failure envelope of the Pyoseonri Basalt .....	71
Fig. 4.16	Relationship between $\frac{\sigma_3}{\sigma_c}$ and $\left(\frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_c}\right)^2$ in the Trachybasalt .....	72
Fig. 4.17	Estimation of failure criterion in the Trachybasalt by liner regression method .....	73
Fig. 4.18	Hoek-Brown failure envelope of the Trachybasalt .....	73
Fig. 4.19	Relationship between $\frac{\sigma_3}{\sigma_c}$ and $\left(\frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_c}\right)^2$ in the Scoria .....	74
Fig. 4.20	Estimation of failure criterion in the Scoria by liner regression ..	75
Fig. 4.21	Hoek-Brown failure envelope of the Scoria .....	75
Fig. 4.22	Lade failure criterion .....	78
Fig. 4.23	Estimation of $m$ and $\eta_1$ in the Pyoseonri Basalt .....	79

Fig. 4.24 Lade failure criterion of the Pyoseonri Basalt .....	79
Fig. 4.25 Estimation of $m$ and $\eta_1$ in the Trachybasalt .....	80
Fig. 4.26 Lade failure criterion of the Trachybasalt .....	80
Fig. 4.27 Estimation of $m$ and $\eta_1$ in the Scoria .....	81
Fig. 4.28 Lade failure criterion of the Scoria .....	81
Fig. 4.29 Traces of failure surfaces shown in Octahedral plane .....	82
Fig. 4.30 Failure surfaces for the Pyoseonri Basalt shown in Octahedral plane. Mohr-Coulomb failure surfaces shown for comparison .....	83
Fig. 4.31 Failure surfaces for the Trachybasalt shown in Octahedral plane. Mohr-Coulomb failure surfaces shown for comparison .....	84
Fig. 4.32 Failure surfaces for the Scoria shown in Octahedral plane. Mohr-Coulomb failure surfaces shown for comparison .....	85
Fig. 4.33 Plot of failure criterion estimated by each method in the Pyoseonri Basalt .....	87
Fig. 4.34 Plot of failure criterion estimated by each method in the Trachybasalt .....	88
Fig. 4.35 Plot of failure criterion estimated by each method in the Scoria .....	89

## Summary

Recently, as the scale of national and international construction has become bigger and also as Jeju island is named as Jeju Special Self-Governing Province, it is inevitable to build large scaled public works for it to be reborn as a free international city in the world. And also with the gathering of population into Jeju city, there will be enlargement of dwelling site and business area, so that skyscrapers will be built and the underground space will be used. As the city is enlarged, the skyscrapers will gradually go upward to the mountain. Then it is expected of large scaled public works, big building structures, underground structures, and high earth cut slope therefore there will be a demand for study about earth foundation. At present in the case of Jeju, the study about soil is vivid, but it is not sufficient about rock mass. Therefore it needs mechanical data about basalt, the volcanic rocks, and other various data about engineering trait of the rock mass.

So this study researched the physical and mechanical traits of Pyoseonri basalt (the Acicular Feldspar Olivine Basalt; FOB), Trachybasalt, and Scoria and then implemented absorption test, bulk specific gravity test, permeability test, and strength test to see their influence on strength, and at last analysed the failure criterion on rock mass. The result of this study is as following.

The basic physical traits of the three intact rock are as the following Table 4.1~3. As the bulk specific gravity is higher, it showed the tendency of decreased absorption and permeability, and the tensile strength showed as much as  $1/9 \sim 1/18$  of compressive strength.

It showed a little difference between anticipated strength from schmidt hammer test and the real strength from uniaxial compression test, and there we

re more errors in high strength given intact rock. Therefore I expressed them in exponential function as the following.  $\sigma_{pre} = a \cdot e^{b \cdot R}$ , a and b are variables accordant to the kinds of intact rocks and are suggested as following.

The strength of intact rock is dependant upon various elements but this study took the strength test according to loading speed, anisotropy of the intact rocks, and water content. The result showed a tendency of that the more loading speed is fast, the more they are closing to horizontal or vertical direction, and the less they have water content, the higher is the strength.

It showed different result on the failure criterion of rock mass according to each of them. While the failure criterion of Hoek-Brown evaluates cohesion much lower than that of Mohr-Coulomb, it evaluates higher in the aspect of internal friction angle and the failure criterion of Lade evaluates both cohesion and internal friction higher than that of Mohr-Coulomb. As there are different results according to the failure criterion, it needs thoughtful decision to select failure criterion of rock mass.

# I. 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

최근 건설공사의 규모가 국내외적으로 점점 대형화되어가고 있고 제주도도 제주특별자치도를 출범함으로서 세계 속의 국제자유도시로 거듭나기 위해서는 대규모의 토목공사는 피할 수 없을 것이다. 또한 제주도의 인구가 제주시로 몰리면서 주거지와 상업지역의 확대에 의해 점점 고층건물들이 들어서고 지하의 공간도 활용하게 될 것이다. 그리고 도시의 확장으로 점점 산으로도 건물들이 들어서게 될 것이다. 최근 육지에서는 대학가에 지하캠퍼스 시대가 열리고 있다고 한다. 확장할 땅은 부족하고 학교 공간은 확충해야하고 그래서 생각해낸 게 지하공간을 이용하는 것이다. 최근 8천 500평 규모의 지하광장을 완공한 고려대에 이어 이화여대, 서강대가 착공을 갖는다고 한다. 이처럼 대규모 토목공사나 대형 건축구조물, 지하구조물, 대절토사면 등이 예상됨으로 이에 지반에 대한 연구가 필요하게 될 것이다. 그러나 제주도 현장에서는 제주도의 특수한 지질학적 특성에 의해 공사수행에 많은 시행착오를 겪고 있으며, 이들 지반 특성에 대한 정리가 매우 시급한 실정이라 할 수 있다. 그래서 제주도 지역에 분포하고 있는 화산암인 현무암에 대한 역학적 자료의 필요성과 암반의 공학적 성질에 대한 여러 가지 자료가 요구되고 있다.

본 연구에서는 일명 표선리 현무암인 침상장석감람석현무암에 관해 물리적·역학적 특성을 다루어 추후에 제주도 화산암에 관한 연구에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

## 1.2 연구내용 및 범위

본 연구에서는 표선리 현무암(침상장석감람석현무암)이 가지고 있는 물리적·역학적 특성을 살펴보고 강도에 미치는 영향을 알아보려고 한다. 우선 시료는 훼손이 없고 방향성을 잃지 않은 자연그대로의 상태여야 함으로 최근에 시추조사한 제주특별자치도 서귀포시 성산읍 일대의 시추공 중에서 한 지점을 선정하여 시료를 채취하였다. 모든 시료는 동일구역에서 채취하였으며 시료의 상태와 채취 깊이를 표시하였다.

본 연구에서 실시할 시험은 기본적인 물성치 시험인 흡수율 시험, 비중시험, 투수시험, 강도시험이며, 그리고 비파괴시험인 Schmidt hammer test와 탄성파시험을 실시하였다. 그리고 암석의 강도에 영향을 미치는 요소로 하중가압속도를 달리 해보고 방향별로도 강도시험을 하고 함수상태에 따른 시험도 실시하였다. 시험에 있어서 시험조건에 따라 함수상태와 방향성을 고려하였으며 동일시험에는 가능한한 동일깊이의 시료를 사용하고자 하였다.

그리고 강도시험은 중소기업청의 시험센터에서 만능재료시험기(600kN)를 이용하여 시험하였으며 탄성파속도시험은 한국건자재연구소에 의뢰하여 시험을 하였다.

## II. 연구지역

### 2.1 제주도의 지형적 특성

제주도는 섬전체가 거의 화산암류로 구성되어 있으며 형성시기가 비교적 젊고 개석(開析)의 정도가 얼마 되지 않아 화산원지형이 잘 보존되고 있다. 제주도의 평면상의 형태는 동서장축의 길이가 약 74km, 남북단축의 길이는 약 34km인 타원형으로 그 면적은 1,848.3km<sup>2</sup>이다. 장축방향은 N75E°로서 한반도의 남해안 선과 나란하며 이는 요동방향과 일치한다. 본도는 해발고도 1950m인 한라산을 정점으로 동서사면은 경사가 3°~5°로서 전체적으로 순상화산에서 흔히 볼 수 있는 아스피테(Aspitem)형이다. 그러나 제주도는 크게 5단계 이상의 화산활동주기를 거치면서 여러 분화구에서, 수십 회 이상의 현무암류 용암을 분출하여 이루어진 섬으로서 특이한 화산지형들이 많이 발달하여 있다.

제주도는 소위 “오름”이라는 기생화산체가 도 전역에 368개가 분포하고 있으며, 장축방향의 배열이 우세하고 고산에서 사계리를 거쳐 서귀포에 이르는 해안을 따라서는 불연속적으로 분포하며 신양리, 성산일출봉, 두산봉, 우도 등에도 분포하는데 이들 대부분은 화산력 또는 화산재로서 준고결 내지 미고결 상태이다. 북동해안과 협재리, 사계리 및 표선리 해안 일대에서는 사구(sand dune)가 발달되어 있다.

제주도는 토양의 대부분이 전형적인 화산회토의 특성을 지니고 있으며, 토양의 주된 모재는 현무암이며, 일부는 조면암 및 조면암질 안산암에서 유래된 것이다. 제주도 토양을 토색에 따라 분류하면 암갈색토, 농암갈색토, 흑색토, 갈색산림토로 구분할 수가 있다. 이 중에서 암갈색토는 비화산회토이며, 나머지 농암갈색토, 흑색토, 갈색산림토의 3개 유형은 화산회토이다. 해발 200m이하의 해안지역에 분포하는 토양은 비화산회토인 암갈색토가 311.6km<sup>2</sup>로서 암갈색토의 대부분이 해안지역에 분포하고 있다. 제주도의 평균 유효토심은 60cm로서, 유효토심 50~75

cm 지역이 가장 넓은 610.2km<sup>2</sup>가 분포하고 있으며, 제주도 총 면적의 33%에 이른다.

제주도 토양의 물리적 특성은 다른 지역의 토양에 비해 토양의 전용적밀도가 낮다. 특히 흑색토와 갈색산림토의 밀도가 매우 낮는데 이 때문에 공극률이 높고, 풍식에 대한 저항이 낮으며, 투수성이 높아 강수의 하향침투가 빠르다. 화학적 특성은 모재인 현무암질 및 안산암질의 화산회토의 화학적인 특성과 제주지역의 높은 강우량에 기인하여 토양의 수소이온농도가 5.0이상으로 비교적 높고, 염기포화도가 매우 낮으며, 자연비옥도가 낮고 또한 유효인산량이 매우 낮다. 따라서 토양의 배수능력이 좋아 오염물질이 용탈하기 쉬우며, 인산을 흡착·고정시키는 능력이 크므로 인산보다는 질소에 의한 오염가능성이 높은 특성을 지니고 있다.



## 2.2 제주도의 지질학적 특성

제주도의 지질은 기반암과 화산분출암인 현무암류, 조면암류, 조면암질 안산암류와 화산분출물 및 화산쇄설성 퇴적암, 사구 등으로 구성되어 있다. 시추코아를 조사한 결과에 의하면, 0.5m~10m 미만의 두께를 갖는 현무암질 용암류는 대체로 평균 해수면 하 50m내외의 깊이까지 분포하고 있다. 이들 용암류 사이에는 두께가 얇은 고토양층, 사력층, 역질사암 내지 사암층의 퇴적층이 협재 되기도 하며, 용암류의 상·하부에는 클링커(clinker), 균열 및 절리대가 발달되어 있어 지하수 유동에 좋은 유로 역할을 해주고 있다. 현무암류 하부에는 20~50m 두께를 갖는 치밀·건고한 조면질현무암류가 분포하고 있는데, 대체적으로 절리가 발달하고 있다. 조면질현무암류 하부에는 다량의 패류화석과 함께 역질사암, 사암, 이암, 사질이암 등으로 이루어져 있는 서귀포층이 분포하고 있는데, 북촌-표선을 연결한 선의 동부지역에는 결층되어 있다. 본 층의 지하분포 심도는 지역별로 차이를 나타내어 북부와 서부지역은 평균해수면 하 30m~70m 정도에서 포착되는 반면, 안덕에서 남원에 이르는 남부지역에서는 평균 해수면 상부에 분포하고 있다. 서귀포층 하부에는 세립질의 모래와 실트질로 이루어져 있는 U층이 평균 150m 두께로 분포하고 있는데 이 층은 종달, 송당, 성산, 성읍, 신흥, 상호, 중문, 함덕, 금악 등의 온천탐사 심부 시추공에서 확인되고 있어 도 전역의 지하심부에 광범위하게 분포하고 있는 것으로 해석되고 있다. U층 하부에는 한반도 남동부 해안의 백악기 응회암과 대비될 것으로 예측되는 역질응회암이 존재하고 있으며, 역질응회암층 하부에는 약 5800만 년 전의 화강암이 기반을 이루고 있다.

### 1) 기반암

제주도의 기반암은 화산쇄설암류와 화강암으로 구성되어 있는데, 화산쇄설암류는 화산성 사암 및 이암, 석영조면암질 용결응회암, 화산력응회암 등으로 이루어져 있다. 암질만으로 볼 때는 백악기의 유천층군에 대비되는 것으로 추정되며, 화강암의 연령은 팔레오세 말기에 해당되며 화산쇄설암류를 관입한 것으로 추정된다. 기반암은 최대 해수면 하 312m, 평균 250m부터 시작되고 있으며, 남부지

역은 기반암의 분포 심도가 해수면 하 210m~305m, 평균 259m로서 동부지역과 비슷한 심도에 위치하고 있음을 알 수 있다. 또한 북부지역의 경우는 해수면 하 156m~206m부터 기반암이 포착되고 있어 동부와 남부지역보다는 기반암이 얇은 심도에 위치하고 있다.

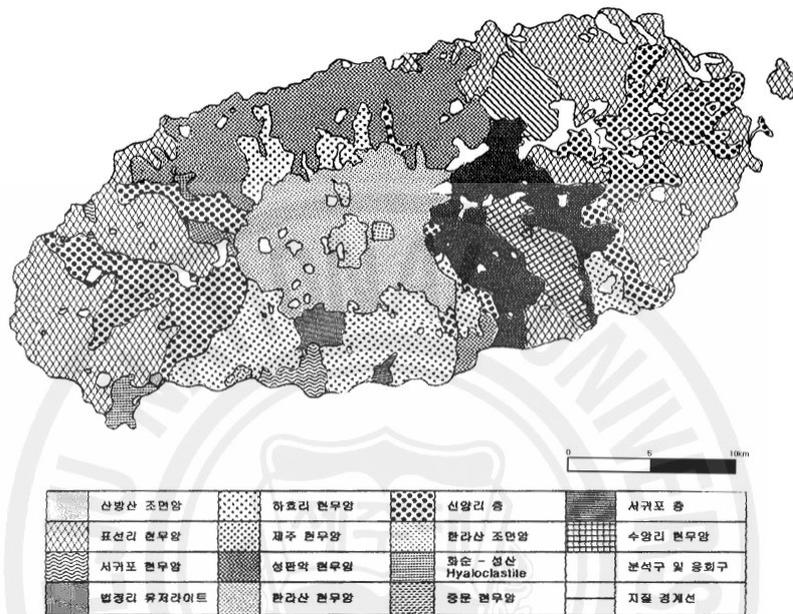


Fig. 2.1 Geologic map of Jeju Island(KIGAM, 1:250,000, 1973)

### 2) 미고결퇴적층(U층)

본 층은 지표에는 분포하고 있지 않아 지명을 사용하여 명명할 수 없으므로 기호 U를 사용하여 U층이라고 한다. U층은 해수면 하 82m~145m(평균 115.3m)부터 존재하고 있으며, 그 두께는 평균 134.7m(최소 111m, 최대 180m)에 이르고 있다. 남부지역의 경우는 해수면 하 15m~205m(평균 72.6m)부터 U층이 분포되어 있고, 두께는 동부지역보다 두꺼운 171.4m(최소 90m, 최대 228m)를 보이고 있다. 북부지역에서는 분포심도가 해수면 하 136m~165m이고 두께는 70m~250m이며, 서부지역은 해수면 하 86m부터 이 층이 포착되고 있다.

### 3) 화산쇄설성 퇴적층(서귀포층)

서귀포층은 지상에는 서귀포시 천지연폭포 남측 해안 절벽에 높이 약 30m 연

장 약11km 규모로 분포하고 있으나 지하에는 북촌-표선 선의 서쪽지역의 표고 400m 이하의 지하에 광범위하게 분포하고 있음이 확인되고 있으며 그 두께는 평균 100m 정도이다. 서귀포층은 서귀포시 천지연 서쪽 해안가의 노출지를 표식지로 하는 지층으로서 제주도 화산체를 이루고 있는 용암류 중 중문조면현무암군, 표선리현무암군의 직하 위에 분포하는 고결 내지 준고결된 화산성 역질사암, 사암, 사질이암, 이암 및 유리질 쇄설암으로 구성되어 있는 해성층이다.

서귀포층 퇴적 이후, 원종관(1976)에 의해 표선리 현무암으로 명명된 회색 내지 암회색으로 침상의 장석과 감람석 반정을 함유하고 있는 침상장석감람석현무암이 서귀포지역을 제외한 제주도 전 지역에 광범위하게 분출되었는데 서귀포 지역은 용기되어 피복되지 못하고 이후 조면암에 의해 피복되었다. 본 암은 점성이 낮아 이들의 유로를 따라 큰 규모의 용암동굴을 형성하게 하였으며, 대표적인 것이 빌레못굴, 만장굴, 수산굴, 소천굴, 협재굴 등이 있으며 이들은 대부분 해안 저지대에 분포하고 수평굴을 형성하고 있다.

따라서 서귀포층을 피복하며 대부분 지역의 지표지질을 구성하는 지질매체는 조면암질 내지 현무암질 용암류와 용암의 유동에 의해 형성된 클링커(clinker), 스크리아(scoria), 화산쇄설층과 수성화산쇄설층 그리고 화산활동 휴식기에 형성된 미고결 표생쇄설층이며, 이들 대부분은 투수성이 매우 양호하고 특히 숯골, 꽃자왈 등의 투수성 지질구조를 따라 감수의 40% 이상을 지하로 침투시킨다.

#### 4) 화산암류

제주도는 조면암류에서 현무암류에 이르는 비교적 다양한 화산암류로 이루어져 있는데, 현무암류는 서귀포~사계에 이르는 지역과 북제주군 애월읍 하귀리 및 한라산 정상부근을 제외한 넓은 지역에 분포하고 있다.

서귀포에서 사계리에 이르는 지역과 애월읍 하귀리 및 한라산정 부근에 한정되어 분포하고 있는 조면암 및 조면질현무암류는 용암류의 두께가 수십 m 이상으로 현무암질 용암류보다 훨씬 두껍고 치밀·견고한 편이며, 수직 절리가 발달되어 있어 지하수 함량과 유동에 좋은 역할을 해주고 있다. 또한 화산암괴·자갈·모래·화산재 등으로 이루어져 있는 응회구 퇴적층은 성산포, 서귀포, 화순~송악산, 수월봉~용수에 이르는 해안변 지역에 간헐적(間歇的)으로 분포하고 있

는데, 고결 내지 준고결의 퇴적암층인 관계로 투수성이 낮아 지하수의 유출을 억제시켜주는 복개암(cap rock) 역할을 하고 있다.

#### 5) 분석구와 사구

제주도 전역에 분포하는 분석구(cinder cone)와 응회구(tuff cone)는 360여 개의 오름이라고 불리는 기생화산으로서, 각 용암들이 분출될 때와 중앙 화구에 의한 화산활동에 뒤이은 후 화산활동에 의해 제주도 전역에 몇 회에 걸쳐 시기를 달리하여 형성되었을 것이며, 주로 화성쇄설물로 구성되어 있다. 이들 오름은 장축방향의 배열이 우세하고 고산리에서 사계리를 거쳐 서귀포에 이르는 해안을 따라서는 불연속적으로 분포하며 성산일출봉, 우도 등에도 분포하는데, 화구는 칼데라(caldera)를 이루거나 한쪽이 무너져 있는 모습을 띤다. 해안에 모래가 바람에 의해 내륙 쪽으로 운반되어 형성된 사구층은 구좌-성산 지역과 표선, 협재, 화순 등지에 분포하고 있다. 이들 사구는 주로 패사로 구성되며 상부는 세립질이 고 하부로 갈수록 자갈이 혼입되어 있다. 김녕·상도 및 표선 지역에서의 사구층은 내륙 깊숙한 곳까지 분포를 하고 있으나 그 이외의 지역은 비교적 해안에 가까운 지역에 한정된 분포를 보인다.

Table 2.1 Geological properties of intact rock in Jeju Island (KIGAM, 1:250,000)

암	중구분	분포 및 특징
기 반 암	화강암류	현무암질 화산쇄설층 내의 중생대 주라기 화강암이 포획암으로 발견
	유문암질응회암	심부 시추공 및 우도 동해안 절벽에 응회암의 포획암으로 발견
	변성암류	송악산 절벽과 수월봉 해안 절벽에서 편마암류의 포획암 발견
퇴 적 암	세화리층	기반암인 응회암을 피복하고 있는 미고결 퇴적암
	서귀포층	다량의 화석을 포함하고 있는 저투수성의 퇴적암 기저현무암과 함께 제주도의 기반을 이룸
	성산층	퇴적기에 있었던 국지적 화산활동에 의하여 형성(침식저항력 강함)
	화순층	남북해안저지대에 분포, 조면암과 현무암의 큰 암편 다량 함유
	신양리층	제주도 동남단에서 굽은 모래와 잔자갈로 이루어진 반고결퇴적층
현 무 암	기저현무암	서귀포층 분포지대에서 간조시 노출, 매우 조밀, 플라이오세에 속함
	표선리현무암	동·서해안지대에서 분지상으로 분포, 다공질이며 기공의 크기가 큼
	서귀포조면암	서귀포층을 부정합으로 피복, 매우 조밀
	중문조면암	서귀포조면암과 거의 같은 분포, 조밀
	제주현무암	남북 해안 저지대와 중산간지대에 분포, 기공이 적은 것이 특징
	하양리현무암	남북 해저 저지대와 중산간지대에 분포, 다공질
	범정리조면암	서귀포와 중문 사이 중산간지대에 분포
	시흥리현무암	동서 해저 지대에 분포, 다공질
	성관악현무암	성관악화구에서 분출, 조밀하고 견고한 다공질 암석
	한라산현무암	고산지대와 산악지대에 분포, 흑색이 뚜렷
	한라산 조면암질안산암	백록담화구벽 형성
	백록담현무암	한라산정상 서쪽 고산지대, 유상(流像)구조 발달
	기생화산분출물	분석구이며 상당량의 화산재 함유

### 2.3 시료채취지역의 현황

본 연구지역은 제주특별자치도 서귀포시 성산읍 일원에 위치하고 있으며 해발 표고는 90.21m이다. 해안과의 직선거리는 약 3.4km 정도이며, 북동쪽에 독자봉(E l. 159.3m)과 통오름이 말 발굽형 형태로 발달되어 있다. 특히 연구지역 바로 북쪽에 미천굴이 용암동굴 형태로 분포하고 있다.

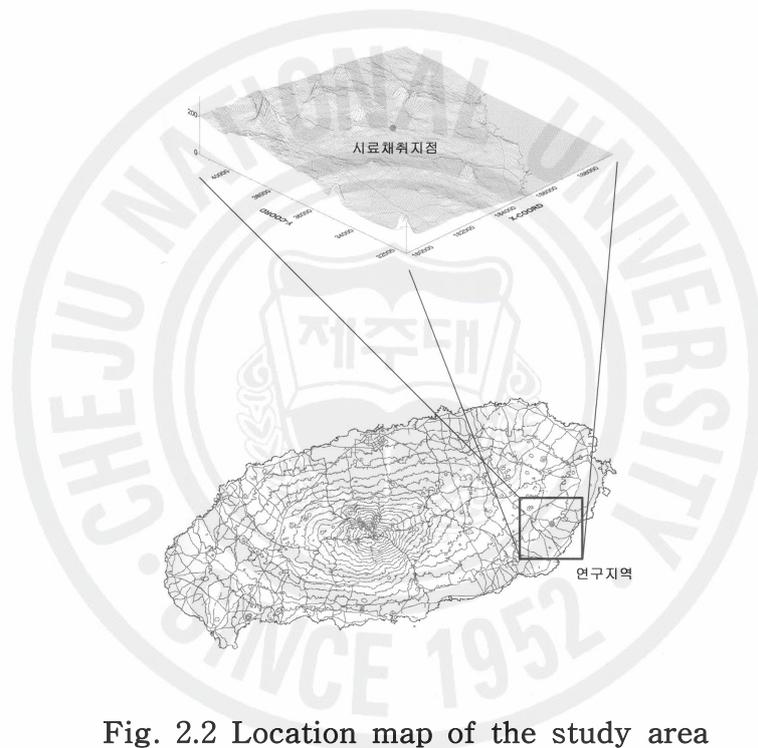


Fig. 2.2 Location map of the study area

연구지역의 지표지질은 침상장석감람석현무암이 대부분 피복되어있는 것으로 나타나고 있으며, 밑으로 반상휘석현무암과 장석현무암류가 분포하는 것으로 나타났다.

대부분을 피복하고 있는 침상장석감람석현무암(Acicular Feldspar Olivine Basalt ; FOB)은 서해길(1965)에 의해 표선리 현무암으로 명명되었으며 회색 내지 암회색의 다공질 또는 치밀질의 평탄한 대지상의 용암대지를 형성하고 있다. 이

암석은 감람석을 반정으로 함유하고 침상의 장석이 특징적이며 제주도 동부 및 서부지역에 광범위하게 분포하나 남부지역과 북부지역 그리고 중산간 이상의 지역에서는 후기에 분출한 암석에 피복되어 지표노출이 확인되지 않는다. 또한 본 암은 분출 및 고화될 시 점성이 낮아 파호이호이 용암류의 산상을 보이며 이들 용암류의 유로를 따라 다수의 용암동굴이 형성되었다. 침상장석감람석현무암은 방사성동위원소(K/Ar) 연대측정 결과, 서귀포층의 퇴적시기부터 퇴적이 완료된 이후까지의 시기에 걸쳐 나타나며 대부분 서귀포층 퇴적 이후에 분출된 것으로 해석하고 있다.



Fig. 2.3 Geologic map of the study area

시료채취지점에는 지표에서부터 24m까지 치밀한 암회색의 침상장석감람석현무암이 분포하고 있다. 24~81m 구간은 매우 치밀한 조면암질 현무암이 분포하고 있으며 홍갈색의 스크리아층이 2~3매 협재되어 있다. 81~91m 구간은 홍갈색의 다공질 화산쇄설층이 분포하는데 화산쇄설물 중 소립자를 많이 포함한 채 용암이 굳은 상태이다. 91~157m 구간은 다공질의 침상장석감람석현무암이 분포하는데 하부로 갈수록 치밀해지는 경향을 보인다(Fig. 2.4).

심도 (m)	두께 (m)	주 상 도		암 석 명		
		$\left  \begin{array}{c} \leftarrow \phi 12' \rightarrow \\ \leftarrow \phi 10' \rightarrow \\ \leftarrow \phi 6'' \rightarrow \end{array} \right $		토목학명	지질학명	
1.0	1.0	////	P	////	토 사	표 토
	2.0	vvvvvv		vvvvvv	연 암	FOB
3.0	3.5	vvvvvv		vvvvvv	연 암	
6.5	4.5	vvvvvv		vvvvvv	연 암	
11.0	3.5	vvvvvv vvvvvv		vvvvvv vvvvvv	연 암	
14.5	9.5	vvvvvv vvvvvv vvvvvv		vvvvvv vvvvvv vvvvvv	연 암	
24.0	3.0	vvvvvv		vvvvvv	연 암	조면암질 현무암
27.0	6.0	000000		000000	사력층	scoria
33.0	9.0	vvvvvv vvvvvv		vvvvvv vvvvvv	연 암	조면암질 현무암
42.0	11.0	000000 000000		000000 000000	사력층	scoria
53.0	2.5	~~~~	~~~~	풍화암	scoria	
55.5		vvvvvv vvvvvv	vvvvvv vvvvvv	연 암	조면암질 현무암	
70.0	25.5	vvvvvvvv	vvvvvvvv			
81.0	1.0	~~~~	~~~~	풍화암	Pyroclastic basalt	
82.0	6.0	00000000	00000000	사력층	scoria	
88.0	1.0	~~~~	~~~~	풍화암	Pyroclastic basalt	
89.0	2.0	00000000	00000000	사력층	scoria	
91.0	4.3	vvvvvvvv	vvvvvvvv	연 암	FOB	
95.3	2.7	////	////	토 사	점 토	
98.0	6.0	vvvvvvvv	vvvvvvvv	연 암	FOB	
104.0						

Fig. 2.4 Geologic columnar section of sampling site

### 2.3.1 표선리 현무암

표선리 현무암은 침상장석감람석현무암(FOB)으로 이루어져 있으며, 약간 어두운 회색을 띠고 다공질이며, 반정으로 감람석과 침상 사장석이 나타는데, 반정은 감람석반정과 소량의 사장석 반정 및 극소량의 단사휘석반정이 나타난다. 석기는 사장석 래쓰와 감람석, 단사휘석, 불투명 광물로 구성되어 있다. 그리고 이것들이 조립의 침상 사장석 사이를 충전하고 있는 입간조직을 보인다.

유동성이 큰 현무암질 용암으로 형성된 제주도에는 용암동굴의 발달이 현저하다. 세계 최장 동굴로 인정받는 만장굴을 비롯하여 빌레못굴 등 60여개의 용암동굴이 확인되고 있다. 용암동굴은 용암류의 유동 시 공기와의 접촉으로 표면이 냉각 고결된 후에도 용융상태에 있는 내부의 용암이 하류로 흘러 내려감으로써 형성된다. 따라서 현무암질의 과호이호이 용암이 잘 나타나며, 제주도에서도 제2분출기의 표선리 현무암으로 구성된 해안저지대에 집중적으로 분포한다.

또한 제주도의 서부와 남부지역의 시추조사에 의하며, 현 해수면 하부의 60~70m 부근에서 패류화석을 다량 함유하고 있는 두께 약 20m의 해성층이 제1기의 현무암을 부정합으로 덮고 있다. 이 퇴적암류 상부로부터 적어도 10여회 이상의 화산분출로 현재의 해수면 상부까지 표선리 현무암이 형성하고 있다. 제주도에서의 제4기 화산활동은 플라이오세 말에서부터 시작된 것으로 믿어진다. 지표면상에서 서귀포층(플라이오세)을 부정합으로 피복하고 있는 표선리 현무암의 분출시기를 플라이스토세에 속하는 것으로 생각할 수 있으나, 시추결과에 의하면 이와 유사한 현무암층이 서귀포층의 하부에서도 발견되고 있으며, 서귀포층 자체가 응회암질이고 현무암질 화산암괴를 함유하고 있는 것으로 보아 제주도에서의 화산활동은 제3기 말에서부터 시작되었던 것으로 생각된다. 제주도 화산분출에서 마그마 분화작용이 처음에는 현무암에서 차차 조면암질로 옮겨가고 있다.

분출순서에 의해 구분된 현무암류는 광물조성과 화학성분으로 보아 철강석, 감람석현무암, 반상휘석현무암, 비현정질현무암 등이다. 이들 암석은 전면적의 90% 이상을 차지한다. 화산활동에 있어서의 각 분출기는 대체로 다량의 현무암의 유출로부터 시작하여 안산암질 또는 조면암질로 이화되며 용암의 유출은 양적으로

감소되는 것과 동시에 다량의 화산쇄설물을 방출하였다.

본 실험에 사용한 시료는 침상장석감람석현무암(일명 표선리 현무암)으로서 제주도의 지형을 해안저지대, 한라산체, 기생화산으로 구분할 때 해안저지대에 해당하는 성산읍 지역에서 채취한 시료를 사용하였다. 해안저지대를 형성하는 제주도 화산암의 일반적인 화학조성은 Table 2.2와 같으며, 제주도의 해안저지대를 형성하는 지역의 화산암 구성광물로는 olivine(감람석)과 pyroxene(휘석)이 주성분을 이루며, 불투명광물 ilmenite(티탄철광)가 포함되어 있다. olivine은 중요한 조암규산염 광물로서 화학조성은  $(Mg, Fe)_2SiO_4$ 이고 Mg가 많은 것은 forsterite(고토감람석)라 하며, Fe가 많이 포함되어 있는 것을 fayalite(철감람석)라 부른다.

Table 2.2 Mineral data of Alkali basalt from Jeju Island

조성	포함비
SiO <sub>2</sub>	46.29~62.18%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.90~19.65%
Total Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.25~13.59%
Na <sub>2</sub> O	2.70~6.54%
CaO	1.02~10.32%
TiO <sub>2</sub>	0.26~3.51%
MgO	0.10~8.69%
MNO	0.09~0.23%

### 2.3.2 조면암질 현무암

조면암질 현무암은 알칼리감람석현무암보다 이산화규소와 알칼리를 많이 함유한 알칼리계열의 현무암으로 조면암과 비슷한 조면조직을 가진 경우가 많다. 육안으로 보면 치밀하고 담회색을 나타낸다. 구성광물은 알칼리감람석현무암과 거의 같고, 반정(斑晶)에 감람석·보통휘석·사장석·티탄자철석·티탄철석이 보인다. 석기에 사장석·감람석·보통휘석·알칼리장석(아노소클레이스)·티탄자철석·티탄철석·인회석·유리 등을 함유한다. 소량의 하석(霞石)을 포함하고 있을 때도 있다. 알칼리감람석현무암과의 화학조성 차이는 석기의 알칼리장석의 양이 많다는 점이다. 본래는 사장석과 준장석을 포함한 현무암질암석에 대해 사용되어 온 암석명이다.



### 2.3.3 Scoria

화산분출물 중 다공질이며 암색(검정색·적갈색·황갈색·암회색 등)인 암괴(岩塊)로 암재라 한다. 마그마가 대기 중으로 방출되어 그 속의 휘발성 성분이 빠져나가 많은 기공(氣孔)이 생긴 것으로 부석(浮石)보다 다소 무겁고, 염기성 또는 중성의 마그마에서 유래된 것을 스킨리아(scoria)라 한다. 이러한 암재를 제주도 방언으로 “송이”라 한다.

한라산 화산체의 국부적인 지형의 특징은 중심 화산의 활동이 정지된 후 그 주변의 틈을 이용하여 분출 생성된 360여개의 기생화산과 깊은 관련이 있다. 제주도에는 기생화산이 널리 분포되어 있으며 특히 장축과 일치하는 방향으로 집중적으로 배열되어 있고 제주도에서는 이를 “오름”이라 한다. 이러한 기생화산은 현무암추(basalt cone)와 분석구(cinder cone)의 두 종류로 크게 분류할 수 있으며, 전자는 성산층 및 화순리층 퇴적기에 형성된 화산구(volcanic cone)로서 10여 개에 불과하고 대부분은 후기 화산활동 후에 형성된 분석구이다.

화산의 화구로부터 분출되는 암편과 화산회를 총칭하여 화산쇄설물이라고 하는데, 그 중 직경이 32mm 이상인 것이 화산암괴(volcanic block)라 하며, 이 중 어느 정도 둥글거나 방추형으로 생긴 것을 화산탄(volcanic bomb)이라고 하며 이는 용암이 공중에서 회전하면서 냉각되어 만들어진 것이다. 모양이 불규칙하고 직경이 4~32mm 사이에 있는 것을 화산력(lapilli) 또는 분석(cinder)이라고 하고, 4mm 이하의 세편을 화산회(volcanic ash), 0.25mm 이하의 가루를 화산진(volcanic dust)이라 하며 이러한 화산쇄설물이 낙하하여 퇴적되어 있는 지층을 스킨리아층이라 한다. 스킨리아로 구성된 분석구는 분출 퇴적 범위는 수 km이며, 분화구에서 3km 지점에는 1cm 크기의 스킨리아가 10cm 두께로 층을 이룬다고 한다. 스킨리아로 구성된 분석구 분포지역은 스킨리아의 물성에 좌우된다. 스킨리아는 기공의 함량이 높고 각력상으로 산출된다. 이러한 조립질층 상위에는 미립질 스킨리아가 협재되어 층리를 형성하고 있다. 분석구 가까이 개설되어 있는 구조물(도로, 건물 등)은 지하에 분포해 있는 스킨리아층의 물성으로 인하여 지반이 불안정하게 되기 쉬우며 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

### Ⅲ. 실험내용 및 결과

#### 3.1 시료채취 및 준비

본 연구에서는 방향성을 잃지 않고 훼손이 최소로한 시료를 얻고자 최근에 시추조사한 제주특별자치도 서귀포시 성산읍 일대의 시추공에서 시료를 채취하였다. 그리고 오차를 최소로 하고자 시료의 깊이를 표시하여 동일시험에는 1m 내의 동일깊이의 시료를 사용하였다.

시료를 채취한 지역에는 침상장석감람석현무암, 조면암질 현무암, 비현정질 현무암, 감람석 현무암, 서귀포층, U층 등이 분포하고 있다.

이에 본 연구에서는 다양한 실험을 위한 시료의 재고를 생각하여 가장 많이 분포하고 있는 침상장석감람석현무암과 조면암질 현무암을 선택하였으며 비록 암은 아니지만은 중간 중간에 협재되어 있는 스코리아층도 채취하여 총 3개의 시료에 대해 실험을 하였다.



Fig. 3.1 Photograph of collected cores

현장 시추로부터 채취된 시료는 공시체 제작과정과 시험 종류에 따라 함수상태를 달리함으로 현장에서의 함수상태를 유지하지 않고 시험 전에 시험 조건에 따라 함수상태를 조절하였다.

채취된 시료는 diamond thin-wall bit의 착탈이 가능한 coring machine을 이용하여 BX크기(직경 43mm)로 제작하였다. 공시체 제작에 사용되는 모터의 마력(horse power)은 충분한 것을 이용하였으며 냉각제로서 물을 사용하였다.



Fig. 3.2 Coring machine

그리고 공시체 제작에 적당한 크기로 자르는데 diamond cut-off saw를 사용하였으며, 공시체의 표면을 매끈하게 만들기 위하여 surface grinder를 사용하였다.

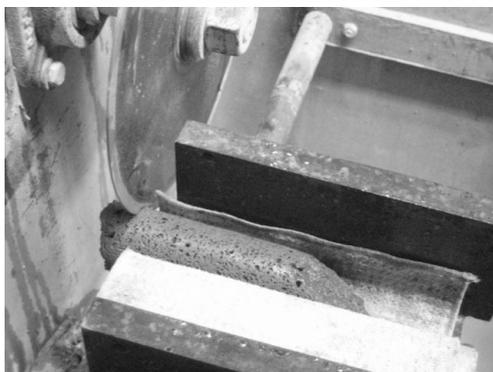


Fig. 3.3 Diamond cut-off saw



Fig. 3.4 Surface grinder



Fig. 3.5 Photograph of specimens for this study (43mm×86mm)

### 3.2 흡수율 및 비중시험

흡수율이란 암석 시료의 공극 중에 물의 흡수능력을 말한다.

흡수율시험에 앞서 공시체는 통기 장치가 된 건조기 속에서  $105\pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 24시간 동안 건조시켜야 한다. 그런 다음 공시체를 실내에서 30분 동안 식힌 후 질량을 단다. 만약, 공시체를 식힌 후 즉시 달 수 없을 때는 데시케이터 속에 보관해야 한다. 질량을 단 후, 공시체를  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 증류수나 여과수 속에 48시간 동안 침수시킨다. 이 시간이 지난 후 공시체를 수조에서 동시에 꺼내어 표면을 젖은 헝겊으로 닦아 내고 질량을 단다.

각 공시체의 흡수율은 다음 식에 따라 계산한다. 기호는  $w'$ 로 표시한다.

$$w' = \frac{W_w}{W_s} \times 100(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \quad (3.1)$$

여기서,  $W_1$  : 침수 후의 공시체의 질량(g)

$W_2$  : 건조 공시체의 질량(g)



Fig. 3.6 Photograph of Absorption test

비중이란 시료의 질량과 시료의 동일체적인 물의 질량과의 비이다. 비중의 종류로는 진비중과 가비중, 부피비중, 표면건조포화상태의 비중 등이 있다.

### 1) 진비중

진비중이란 참된비중, 참비중, 또는 절대비중이라고도 한다. 기호는  $G_s$  또는  $\rho_{true}$ 로 표시한다. 암석을 구성하는 실질 광물 부분의 비중, 즉 광물입자만의 중량에 대한 비중이다.

$$G_s = \frac{W_s}{W_w} \quad (3.2)$$

여기서,  $W_s$  : 암석 중 광물입자만의 중량

$W_w$  : 시료와 동일한 체적의 물의 중량

### 2) 가비중

가비중이란 겉보기비중, 외견비중이라고도 한다. 기호는  $G_b$  또는  $\rho_{app}$ 로 표시한다. 공극의 체적을 포함한 암석전체의 체적과 같은 물의 중량과 암석의 중량과의 비이다.

$$G_b = \frac{W}{V\gamma_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad (3.3)$$

### 3) 부피비중

부피비중이란 체적비중, 총체비중, 용적비중이라고도 하는데 시료를 성형하여, 시료의 체적을 측정하여 구한 비중이다.

4) 표면건조포화상태의 비중

한국산업규격(KS F 2518)에서는 천연산 슬레이트를 제외한 모든 천연산 석재의 비중시험 방법은 표면건조포화상태의 비중시험법을 사용하고 있다. 여기서 표면건조포화상태의 비중은 다음 식에 따라 계산되어진다.

$$\text{표면 건조 포화 상태의 비중} = \frac{A}{B-C} \quad (3.4)$$

여기서, A : 공시체의 건조 질량(g)

B : 공시체의 침수 후 표면 건조 포화 상태의 공시체의 질량(g)

C : 공시체의 물 속 질량(g)

흡수율시험에 사용하였던 공시체를 비중시험에 사용할 경우에는 흡수율시험을 끝낸 직후 포화된 공시체를 온도 20±5°C의 여과수나 증류수 속에 매달고 질량을 달아야 한다. 물속에서 공시체를 달아야 할 경우 바스켓이나 Fig. 3.7과 같은 기구가 좋다.

바스켓의 질량은 공시체의 질량을 측정하였을 때의 값으로 넣어 달아야 한다. 이 때 공시체나 바스켓에 붙은 기포는 달기 전에 제거해야 한다. 공시체의 물 속 질량은 공시체와 바스켓이 합쳐진 질량에서 바스켓의 질량을 빼서 구한다.



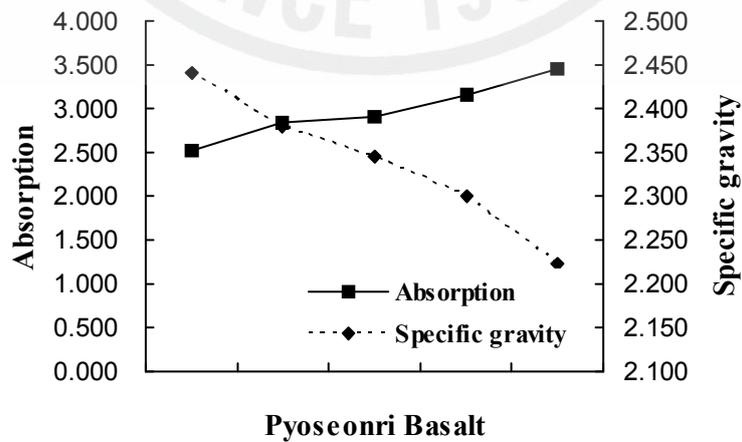
Fig. 3.7 Apparatus for Specific gravity test

일반적으로 암석은 흡수율이 증가하면 암석의 강도는 저하되는데 이는 풍화가 진행될수록 공극대가 많아져서 흡수율은 증가하나 풍화로 인한 강도는 저하되기 때문이다. 또한 비중과 흡수율의 관계는 비중이 클수록 흡수율은 작아지는 경향을 나타낸다.

시험횟수는 각 시료별로 5회 측정하여 평균 및 범위를 측정하였다. 결과 값은 Table 3.1과 같고 Fig. 3.8~10과 같이 그래프로 나타내 보았다.

**Table 3.1 Result of Absorption and Specific gravity test**

구 분	표선리 현무암		조면암질 현무암		Scoria	
	흡수율(%)	비 중	흡수율(%)	비 중	흡수율(%)	비 중
1	2.523	2.440	0.917	2.829	7.428	2.123
2	2.833	2.380	0.891	2.846	8.825	2.025
3	2.911	2.346	0.908	2.849	8.540	2.030
4	3.446	2.222	0.833	2.851	7.697	2.067
5	3.153	2.299	0.782	2.870	8.930	2.009
범 위	2.523~ 3.446	2.222~ 2.440	0.782~ 0.917	2.829~ 2.870	7.428~ 8.930	2.009~ 2.123
평 균	2.973	2.337	0.866	2.849	8.284	2.051



**Fig. 3.8 Absorption and Specific gravity of the Pyoseonri Basalt**

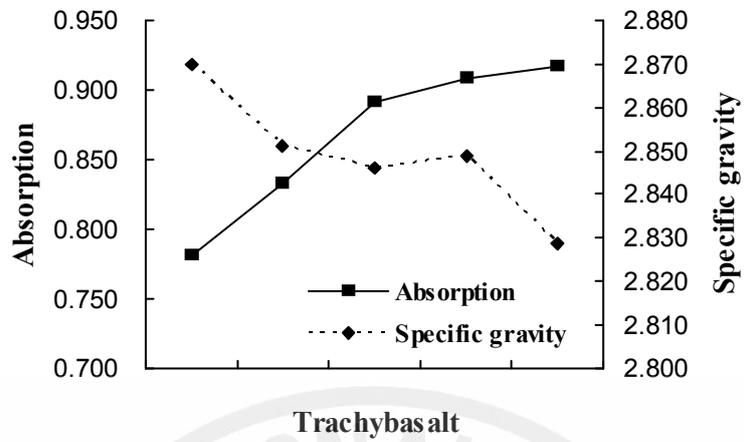


Fig. 3.9 Absorption and Specific gravity of the Trachybasalt

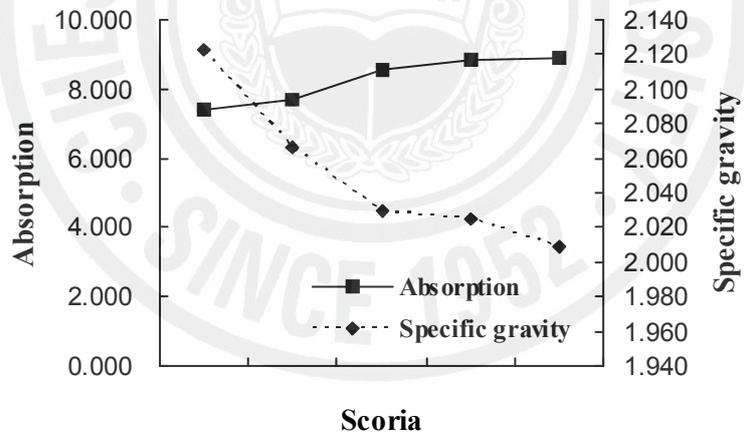


Fig. 3.10 Absorption and Specific gravity of the Scoria

### 3.3 암반투수시험

암반투수시험은 투수계수가 아주 낮아 강제 투수를 시키는 외압식 암반 투수 시험기를 이용한다. Fig. 3.11은 암반투수시험기를 나타낸 그림이다. 시험기는 가압펌프, 투수시험용기, 측정부분 이렇게 3개 주요 부위로 나눌 수 있다. Fig. 3.12는 투수시험기의 모식도를 나타낸다.

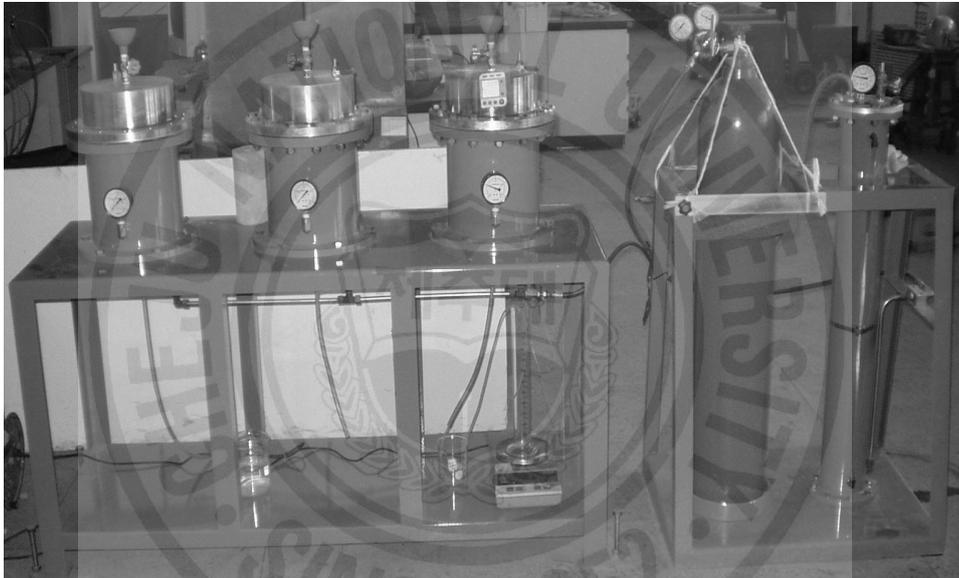


Fig. 3.11 Apparatus for Permeability test of rock

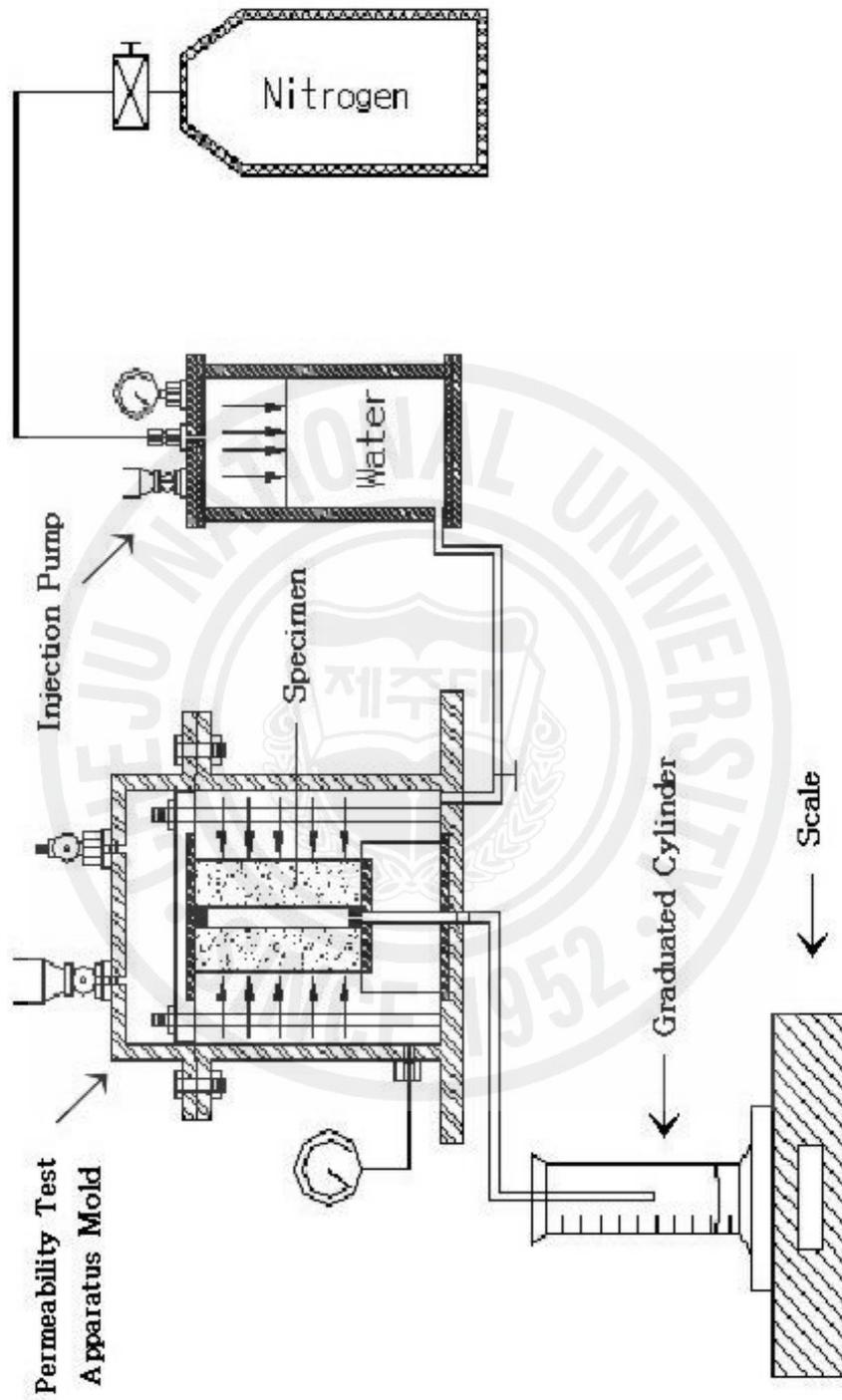


Fig. 3.12 Schematic diagram of Permeability test setup

Fig. 3.12에 제시된 바와 같이 가압펌프는 축압수조와 액화질소 가스통으로 이루어져 일정한 수압을 가해주는 역할을 한다. 질소가스는 레귤레이터와 밸브를 통하여 일정한 압력으로 축압수조 상단에 주입되고 이 압력을 이용하여 축압수조에 있는 물을 일정한 수압으로 밀어 준다. 수압을 시험편으로 그대로 전달시키기 위한 연결부분은 가해지는 수압을 충분히 견딜 수 있는 파이프로 연결되었다.

투수용기의 내부는 하부에 공시체 받침 몰드(Fig. 3.13)를 Fig. 3.14와 같이 놓고 상부에는 Fig. 3.16과 같이 공시체를 고정할 수 있는 접촉면에 고무판으로 되어 있는 캡(Fig. 3.15)을 볼트로 고정시키게 되어있다. 투수용기 외부에는 용기덮개(Fig. 3.17)가 수압을 충분히 견뎌 내도록 Fig. 3.18과 같이 볼트에 의하여 단단히 조여져 있다. 접촉면에는 용기가 충분히 밀봉되도록 O-ring을 사용하여 물의 유출을 막을 수 있다.

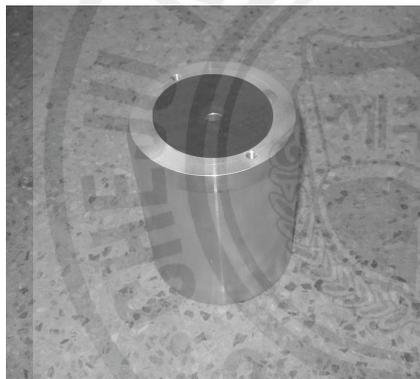


Fig. 3.13 Support mold

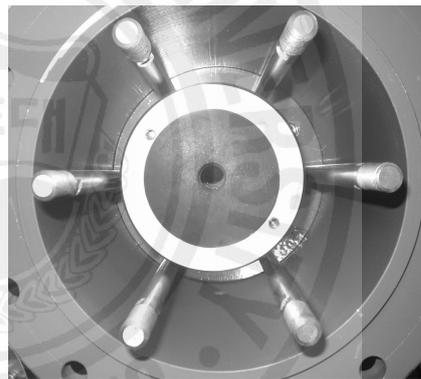


Fig. 3.14 Setting feature



Fig. 3.15 Fixing cap

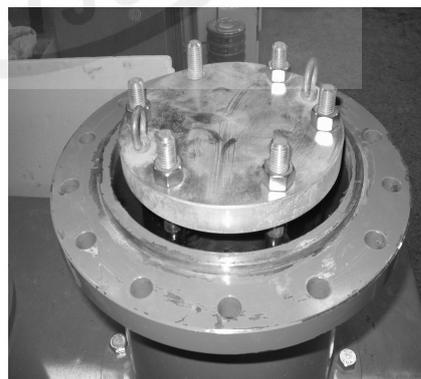


Fig. 3.16 Setting feature



Fig. 3.17 Container lid



Fig. 3.18 Setting feature

유량을 측정하기 위하여 Fig. 3.19와 같이 시험편 하단에 비커 혹은 메스실린더를 놓아 시험편을 통과하여 나오는 유출수를 모아 최소 눈금이 0.5mℓ인 메스실린더와 정밀도가 0.01g인 전자저울을 동시에 사용하여 유량을 측정하였다.

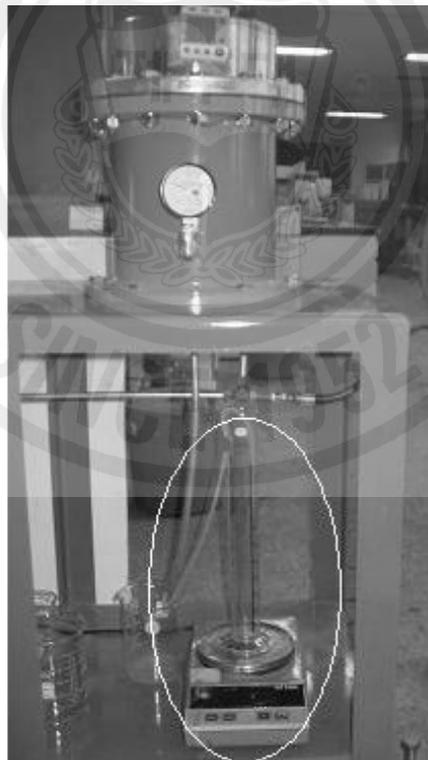


Fig. 3.19 Measurement equipment

투수시험을 위한 시험편의 성형은 coring machine(Fig. 3.2)을 이용하여 직경이 33mm와 127mm인 드릴 비트를 이용하여 Fig. 3.21에 제시된 것과 같이 시험체 중심에 작은 것 먼저 천공을 하고 나중에 큰 것을 천공하여 Fig. 3.22와 같이 완성하였다.



Fig. 3.20 Diamond thin-wall bit (33mm, 127mm)



Fig. 3.21 Photograph of the making specimen procedure



Fig. 3.22 Prepared specimens for this study

본 연구에서는 다공질 시험편 내 유체 유동을 설명하는 기본 유동식인 Darcy 방정식을 이용하였다. 일반적인 Darcy 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{Q}{A} = u = \frac{dl}{dt} = -\frac{k}{\mu} \left[ \frac{dp}{dl} \right] \quad (3.5)$$

일반적인 Darcy 방정식 (3.5)을 이용하여 비압축성유체의 정상 방사상 유동식을 유도할 수 있다. 수평 방사상 유동의 정의로부터

$$dl = dr \quad (3.6)$$

이므로, 식 (3.5)을 다시 쓰면

$$\frac{Q}{A} = u = -\frac{k}{\mu} \left[ \frac{dp}{dr} \right] \quad (3.7)$$

따라서

$$\frac{Q}{2\pi r h} = -\frac{k}{\mu} \left[ \frac{dp}{dr} \right] \quad (3.8)$$

식 (3.8)를 변수 분리하여 적분하면

$$\frac{Q}{2\pi h} \int_r^R \frac{dr}{r} = -\frac{k}{\mu} \left[ \int_{p_0}^p dp \right] \quad (3.9a)$$

$$Q = \frac{2\pi k h (p_w - p)}{\mu \ln(r/r_w)} \quad (3.9b)$$

$p_0$ 는 내부 압력,  $p$ 는 외부압력,  $R$ 은 시료의 외부반경,  $r$ 은 시료의 내부반경이다.

이식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{2\pi k h \Delta p}{\mu \ln(R/r)} \quad (3.10)$$

식 (3.10)을 투수계수에 대한 식으로 다시 정리 하면

$$k = \frac{Q \mu \ln(R/r)}{2\pi h \Delta p} \quad (3.11)$$

여기서  $R$ 은 외부반경,  $r$ 은 내부반경,  $\Delta p = p_i - p_0$ ,  $p_i$ 는 내부 압력,  $p_0$ 는 외부 압력으로 대기압과 같다.

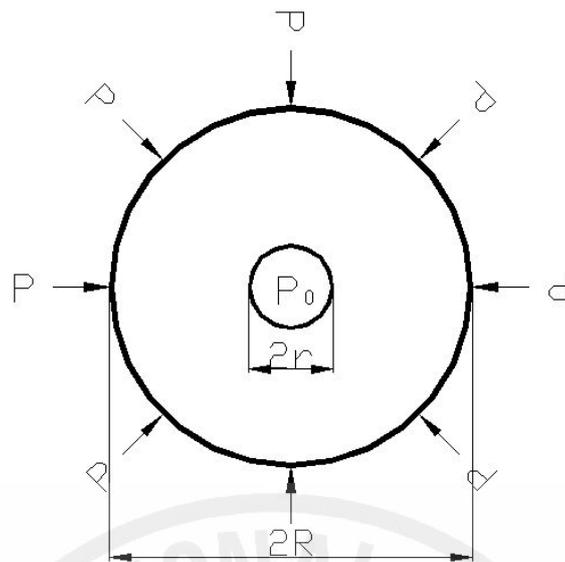


Fig. 3.23 Plane schematic diagram of radial flow

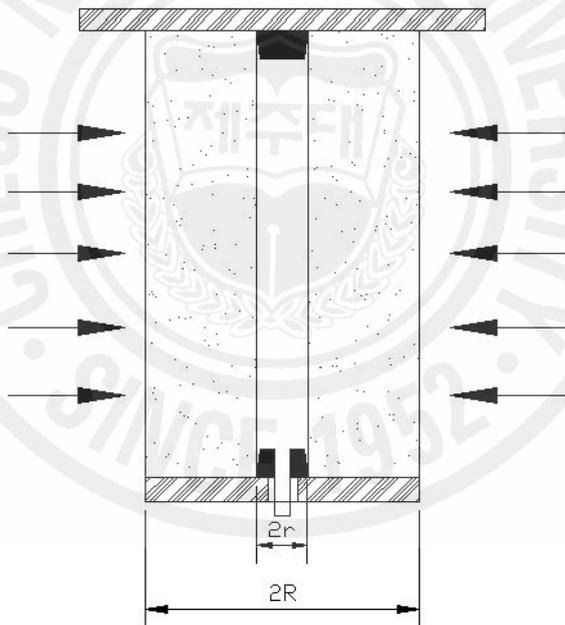


Fig. 3.24 Sectional view of specimen

Table 3.2 Result of Permeability test

구 분	표선리 현무암	조면암질 현무암	Scoria
투수계수 (cm/sec)	$1.21 \times 10^{-5}$	$5.47 \times 10^{-7}$	$3.04 \times 10^{-3}$

### 3.4 Schmidt hammer test

Schmidt hammer는 원래 콘크리트의 압축강도나 탄성계수를 현장에서 간단히 측정하기 위하여 고안된 비파괴 시험기이다. 현지 암반의 강도를 가장 손쉽게 추정할 수 있는 방법으로 암반의 절리상태, 암벽의 거칠기, 습윤 정도 등에 따라 측정치의 분산이 다소 심하며 암중에 따라 일축압축강도의 환산에 많은 편차를 나타내는 결점이 있으나 일반적으로 국내외에서 널리 사용되고 있는 시험이다.

Schmidt hammer는 해머를 스프링의 힘 즉, 미리 압축한 스프링에 축적된 힘을 방출함으로써 해머가 암반의 표면에 부딪칠 때 그 반발력을 측정함으로써 구하는 일종의 경도인데 신선하고 단단한 암반일수록 해머의 반발되는 거리는 크게 된다. 반발되는 해머가 충격을 가하기 전에 스프링의 힘에 의하여 움직인 거리에 대한 백분율을 나타내며 이것을 Schmidt hammer의 반발치라고 한다.

본 실험은 암반에 대한 Schmidt hammer의 반발치를 측정하기 위해 동일 장소에서  $-90^{\circ}$  방향으로 측정하였으며 각각의 암석에 대해서 20회의 Schmidt hammer를 타격하였다. 그리고 최대 및 최소 반발계수를 제외한 평균값을 산정하여 강도를 추정하였다. 그 추정값은 Table 3.3과 같다.

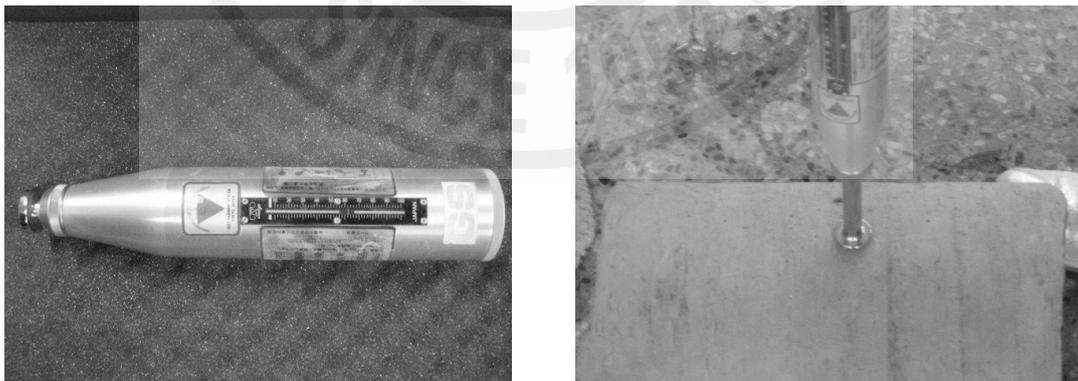


Fig. 3.25 Photograph of Schmidt hammer test

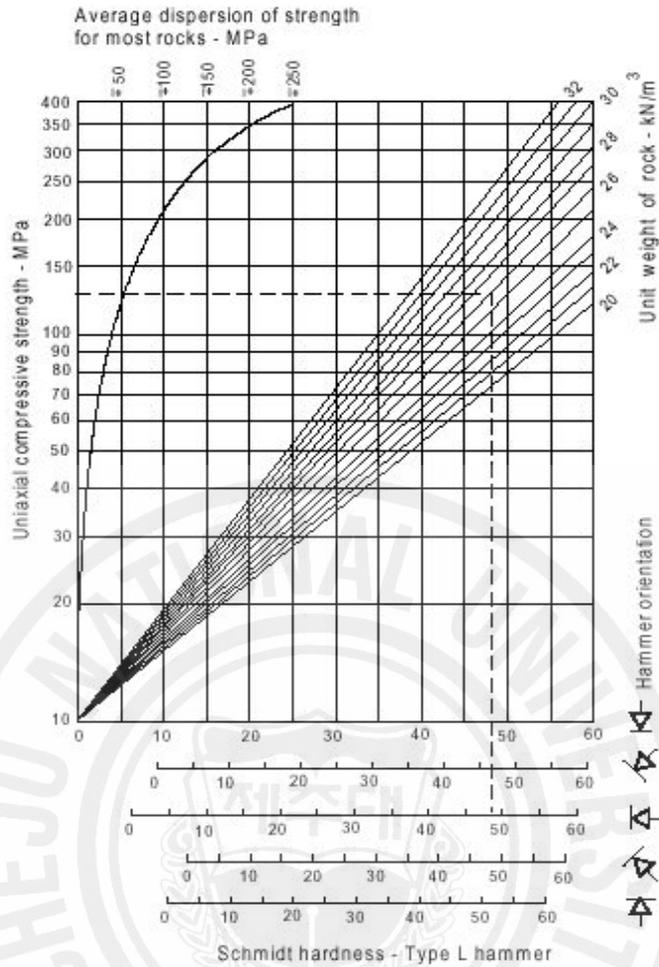


Fig. 3.26 Conversion diagram of Uniaxial compressive strength

Table 3.3 Result of Schmidt hammer test

구분	타격횟수별반발치										평균	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	환산강도 (MPa)
표선리 현무암	44	<del>54</del>	50	45	42	38	46	40	34	42	42.3	21.5	63
	42	44	38	34	43	48	45	<del>32</del>	37	50			
조면암질 현무암	59	63	60	56	56	58	<del>55</del>	<del>64</del>	60	60	60	27.8	299
	59	63	60	61	63	58	60	62	58	64			
Scoria	24	36	37	18	30	22	30	30	32	16	27.7	18.6	30
	<del>14</del>	37	33	18	24	16	30	36	30	<del>38</del>			

### 3.5 탄성파시험

탄성파시험은 시험편을 탄성파가 통과하는데 소요된 시간을 측정하여 탄성파인 압축파(P파, 종파)와 전단파(S파, 횡파)의 전파속도를 구하는 비파괴시험이다. 시험편은 일축압축강도, 삼축압축강도 등에 사용되는 시험편을 사용하는 것이 바람직하다.

강도시험을 하지 않고 탄성파전파속도만을 측정하고자 할 때는 시험편의 길이는 5.0~10.0cm, 최소 단면적을 0.5cm<sup>2</sup> 이상으로 하고 시험편 양쪽 끝면은 서로 평행하며 측정 축과 직각으로 되도록 제작하여야 하며 시험편의 형태는 원주형이 아니라도 된다. 본 연구에서는 5.0×5.0×15.0cm의 각주형 모양의 시험편을 사용하였다.

실내 탄성파전파속도 측정장치의 모식도는 Fig. 3.27과 같다. 측정원리는, 그림에서와 같이 시험편의 상하부에 발진기 및 수신기를 설치하고 발진기에서 발생된 파가 시험편을 통과하여 수신기에 도달하면 이 파형이 측정기의 창에 나타난다. 이 파형으로부터 파가 시험편을 통과하는 시간을 측정한다. 이 통과시간과 암석 시험편의 길이로부터 탄성파속도를 측정한다. 탄성파에는 압축파(P파, 종파)와 전단파(S파, 횡파)가 있는데 P파는 파의 진동방향과 진행방향이 같은 경우이며, S파는 파의 진동방향과 직각을 이루는 경우이다. 측정장비에는 P파 및 S파를 발생하는 발진기가 따로 있어서 각각의 파에 대한 탄성파전파속도를 측정할 수가 있다. P파 전파속도,  $V_P$  및 S파 전파속도,  $V_S$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$V_P \text{ 또는 } V_S = \frac{\text{시험편의 길이 (m)}}{P\text{파 또는 } S\text{파의 도달시간 (sec)}} \text{ (m/sec)} \quad (3.12)$$

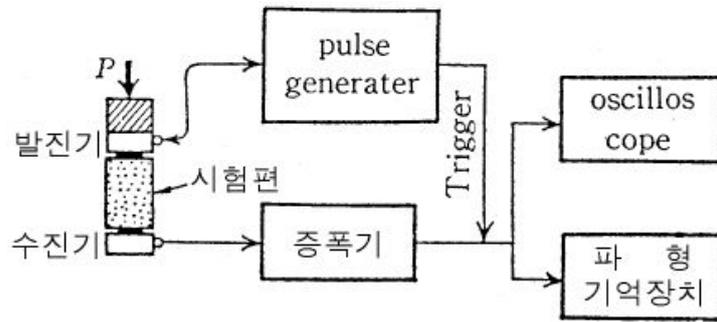


Fig. 3.27 Schematic diagram of Ultrasonic velocity test



Fig. 3.28 Photograph of Ultrasonic velocity test

시료별로 3회 측정하여 평균을 나타내었다. 결과 값은 Table 3.4와 같다. 그리고 Table 3.5와 Table 3.6을 이용하여 암분류를 하였다. 그 결과, 침상장석암류 현무암과 조면암질 현무암은 보통암, Scoria는 풍화암에 속하였다.

Table 3.4 Result of Ultrasonic velocity test

구 분	표선리 현무암			조면암질 현무암			Scoria		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
탄성파속도 (km/sec)	3.91	4.02	3.93	4.21	4.32	4.18	2.70	2.62	2.68
	3.95			4.24			2.67		

Table 3.5 Classification of rock masses : <A, B Group>

구 분	A	B
대표적인 암종명	편마암, 사질편암, 녹색편암, 각암, 석회암, 사암, 휘록응회암, 역암, 화강암, 섬록암, 감람암, 사교암, 유교암, 세일, 안산암, 현무암	흑색편암, 녹색편암, 휘록응회암, 세일, 니암, 응회암, 집괴암
함유물 등에 의한 육안 판정	사질분, 석영분을 다량 함유하고 암질이 단단한 것, 결정도가 높은 것	사질분, 석영분이 거의 없고 응회분이 거의 없는 것, 천매상의 것
500~1,000 gr 해머의 타격에 의한 판정	타격점의 암은 작은 평평한 암편으로 되어 비산되거나 거의 암분을 남기지 않는 것	타격점의 암자신이 부서지지 않고 분상이 되어 남으며 암편이 별도 비산되지 않는 것

Table 3.6 Relationship between Ultrasonic velocity and Uniaxial compressive strength

암 종 그 룩		자연상태의 탄성과 속도 (km/sec)	암편 탄성과 속도 (km/sec)	암편 내압강도 (kg/cm <sup>2</sup> )
풍 화 암	A	0.7~1.2	2.0 ~ 2.7	300 ~ 700
	B	1.0 ~ 1.8	2.5 ~ 3.0	100 ~ 200
연 암	A	1.2 ~ 1.9	2.7 ~ 3.7	700 ~ 1,000
	B	1.8 ~ 2.8	3.0 ~ 4.3	200 ~ 500
보 통 암	A	1.9 ~ 2.9	3.7 ~ 4.7	1,000 ~ 1,300
	B	2.8 ~ 4.1	4.3 ~ 5.7	500 ~ 800
경 암	A	2.9 ~ 4.2	4.7 ~ 5.8	1,300 ~ 1,600
	B	4.1 이상	5.7 이상	800 이상
극 경 암	A	4.2 이상	5.8 이상	1,600 이상

### 3.6 일축압축시험

일축압축시험은 가장 간단한 시험이며 암석강도의 지표로서 널리 사용되고 있다. 암석 시험편의 축방향으로 압축력을 가한 후 파괴 될 때의 하중을 측정하여 일축압축강도를 구하며 또한 시험편의 변형률을 측정하여 응력-변형률 곡선을 얻어 탄성계수나 포아송비를 구할 수 있다.

일축압축시험에서 파괴하중을 P kg, 압축력을 받는 시험편의 단면적을 A라 할 때, 일축압축강도  $\sigma_c$ 는 다음식으로 계산된다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (3.13)$$

시험횟수는 각 시료별로 10회 측정하여 범위 및 평균을 측정하였다. 결과 값은 각각 Table 3.7~9와 같다.

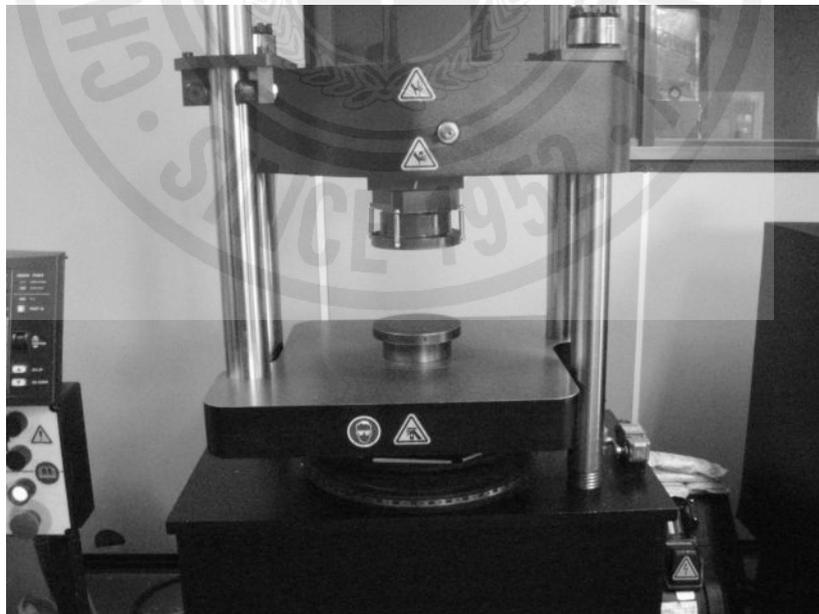


Fig. 3.29 Photograph of system for Compression test

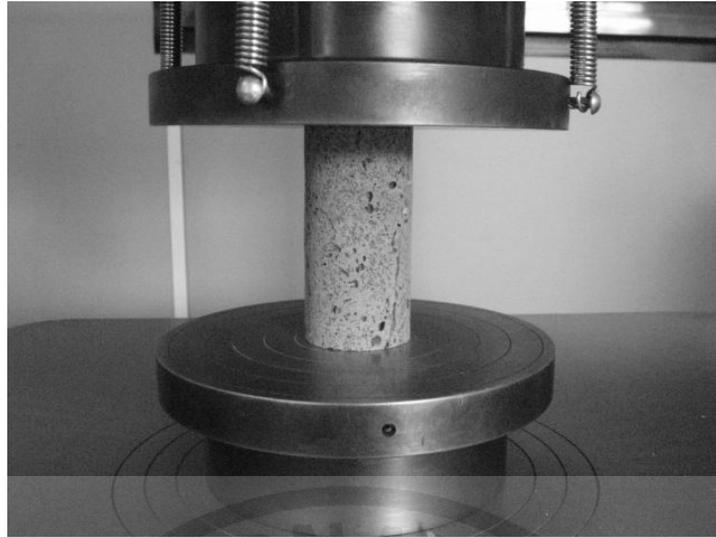


Fig. 3.30 Photograph of Uniaxial compression test

Table 3.7 Result of Uniaxial compression test in the Pyoseonri Basalt

No.	표선리 현무암의 최대압축강도			
	건조상태		습윤상태	
	최대하중 kN	최대응력 MPa	최대하중 kN	최대응력 MPa
1	79.25	54.57	32.38	22.30
2	45.44	31.29	43.55	29.99
3	51.62	35.55	45.52	31.35
4	53.03	36.52	41.85	28.82
5	75.59	52.05	31.16	21.46
6	71.30	49.10	35.21	24.25
7	43.56	30.00	21.03	14.48
8	61.55	42.38	48.84	33.63
9	69.59	47.92	28.42	19.57
10	47.21	32.51	35.99	24.78
범 위	30.00 ~ 54.57 MPa		14.48 ~ 33.63 MPa	
평 균	41.19 MPa		25.06 MPa	

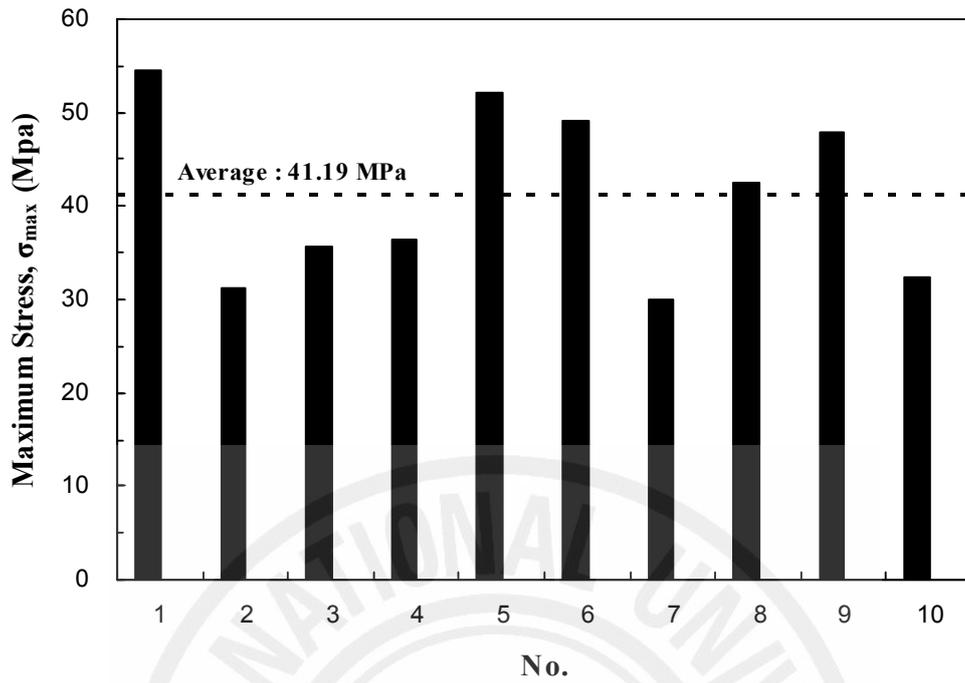


Fig. 3.31 Compressive strength of the Pyoseonri Basalt in the dry state

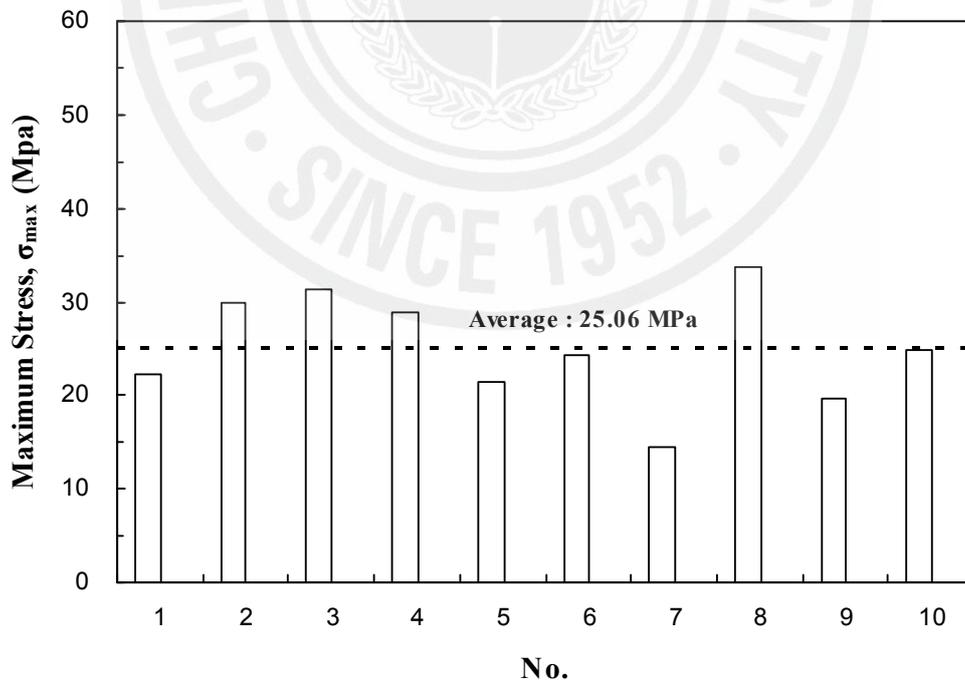


Fig. 3.32 Compressive strength of the Pyoseonri Basalt in the wet state

Table 3.8 Result of Uniaxial compression test in the Trachybasalt

No.	조면암질 현무암의 최대압축강도			
	건조상태		습윤상태	
	최대하중 kN	최대응력 MPa	최대하중 kN	최대응력 MPa
1	247.50	170.43	170.90	117.68
2	256.30	176.49	204.60	140.89
3	265.60	182.89	170.20	117.20
4	280.60	193.22	225.40	155.21
5	270.50	186.27	184.00	126.70
6	250.88	172.76	214.30	147.57
7	265.59	182.89	177.50	122.23
8	270.09	185.99	175.90	121.13
9	276.77	190.59	161.40	111.14
10	274.80	189.23	174.00	119.82
범 위	170.43 ~ 193.22 MPa		111.14 ~ 155.21 MPa	
평 균	183.08 MPa		127.96 MPa	

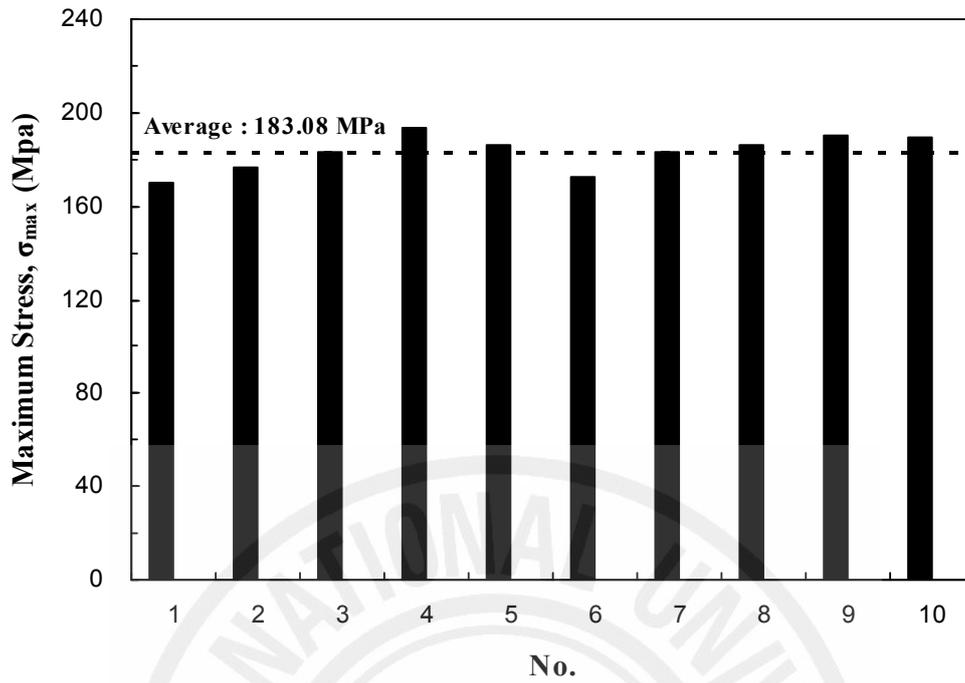


Fig. 3.33 Compressive strength of the Trachybasalt in the dry state

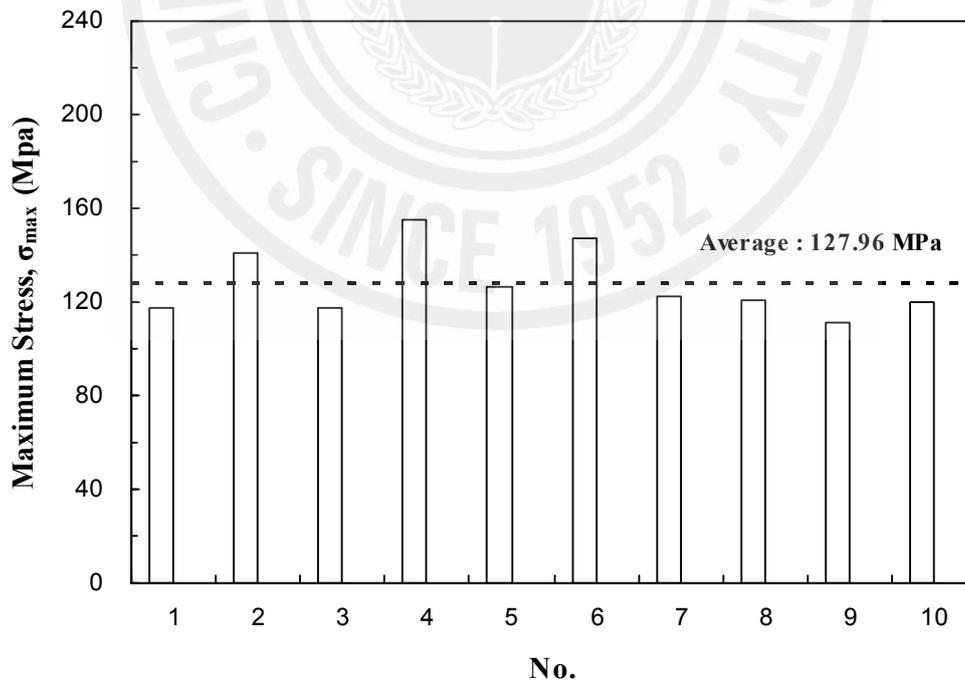


Fig. 3.34 Compressive strength of the Trachybasalt in the wet state

Table 3.9 Result of Uniaxial compression test in the Scoria

No.	Scoria의 최대압축강도			
	건조상태		습윤상태	
	최대하중 kN	최대응력 MPa	최대하중 kN	최대응력 MPa
1	25.25	17.32	19.44	13.39
2	39.71	27.34	27.09	18.65
3	24.89	17.14	18.93	13.04
4	33.31	22.94	18.88	13.00
5	31.21	21.49	14.62	10.07
6	34.23	23.57	28.66	19.74
7	29.05	20.00	24.37	16.78
8	29.71	20.46	16.10	11.09
9	30.20	20.80	12.26	8.44
10	24.45	16.84	13.83	9.52
범 위	16.84 ~ 27.34 MPa		8.44 ~ 19.74 MPa	
평 균	20.79 MPa		13.37 MPa	

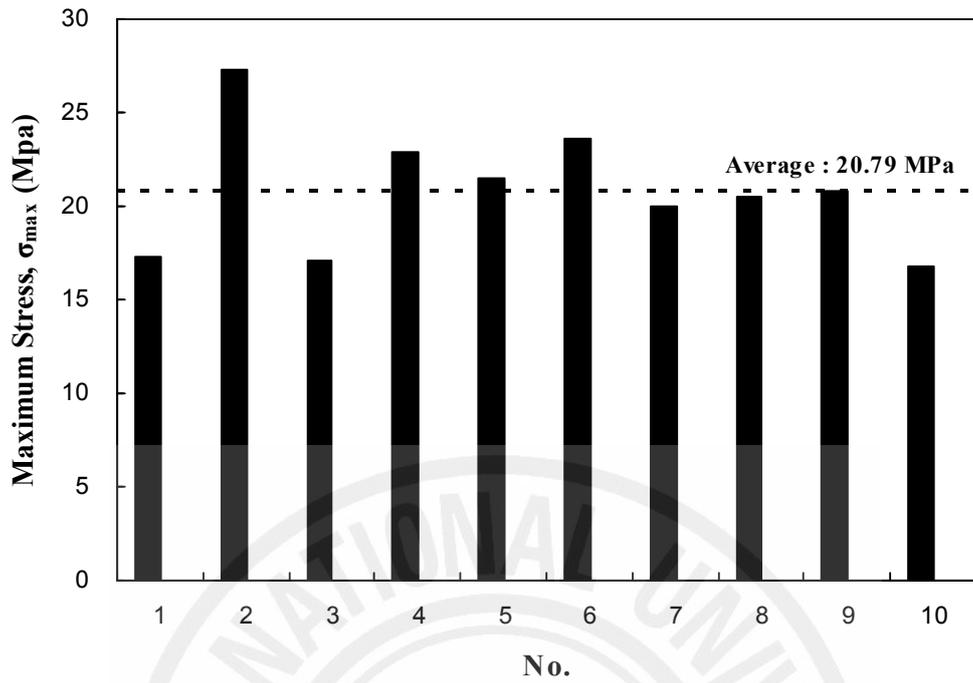


Fig. 3.35 Compressive strength of the Scoria in the dry state

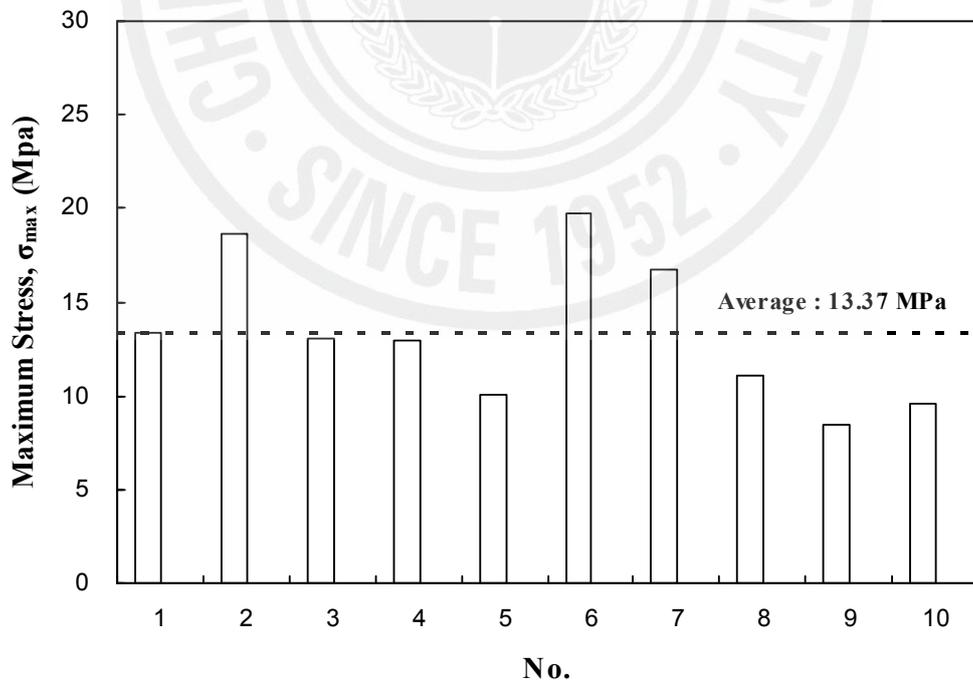


Fig. 3.36 Compressive strength of the Scoria in the wet state

### 3.7 압열인장시험(Brazilian test)

인장강도는 암석과 같은 취성재료에 있어 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 주요한 요소이다. 암석의 인장강도시험법에는 직접인장시험, 간접인장시험법인 압열인장시험(Brazilian tension test), 압인시험(Indentation test)의 세가지 방법이 있으나 시험편의 성형이나 시험장치 및 방법이 비교적 간단한 간접인장시험법인 압열인장시험이 주로 사용되고 있다. Fig. 3.27은 직접인장시험과 압열인장시험의 모식도이다.

표준시험규정에 의하면 압열인장시험편의 형태는 원주형이고 직경에 대한 높이의 비는 0.5~1.0이고, 직경은 20~100mm이다. Fig. 3.28은 시험편의 상하 직경 방향으로 선하중, F가 가해질 때 시험편 중앙부에 발생하는 응력분포를 나타낸 것이다. F의 압축하중에 의해 중앙 수직축상에는 수평방향으로 인장응력이 발생하고 이 중앙 수직축선상으로 인장파괴가 일어난다.

압열인장시험에서 인장파괴가 발생할 때의 하중을 P라 하면 인장강도는 다음 식에 의하여 구한다.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (3.14)$$

여기서,  $\sigma_t$  = 인장강도

$P$  = 파괴하중

$D$  = 시험편의 직경

$L$  = 시험편의 길이

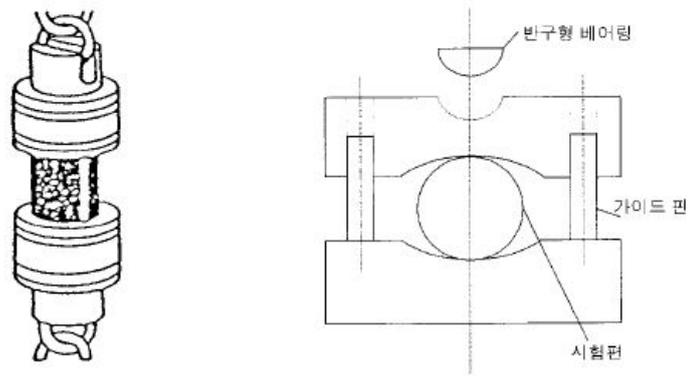


Fig. 3.37 Apparatus for Brazilian test

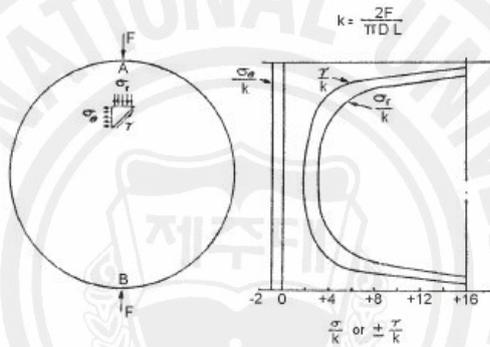


Fig. 3.38 Stress distribution of Brazilian test

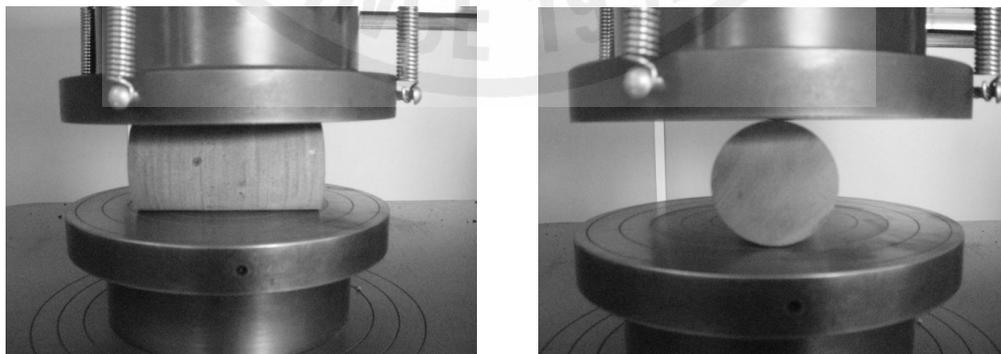


Fig. 3.39 Photograph of Brazilian test

Table 3.10 Result of Brazilian test in the Pyoseonri Basalt

No.	표선리 현무암의 최대인장강도			
	건조상태		습윤상태	
	최대하중 kN	최대응력 MPa	최대하중 kN	최대응력 MPa
1	19.97	3.44	13.41	2.31
2	19.16	3.30	16.65	2.87
3	19.16	3.30	17.40	3.00
4	19.92	3.43	17.82	3.07
5	18.28	3.15	15.45	2.66
범 위	3.15 ~ 3.44 MPa		2.31 ~ 3.07 MPa	
평 균	3.32 MPa		2.78 MPa	

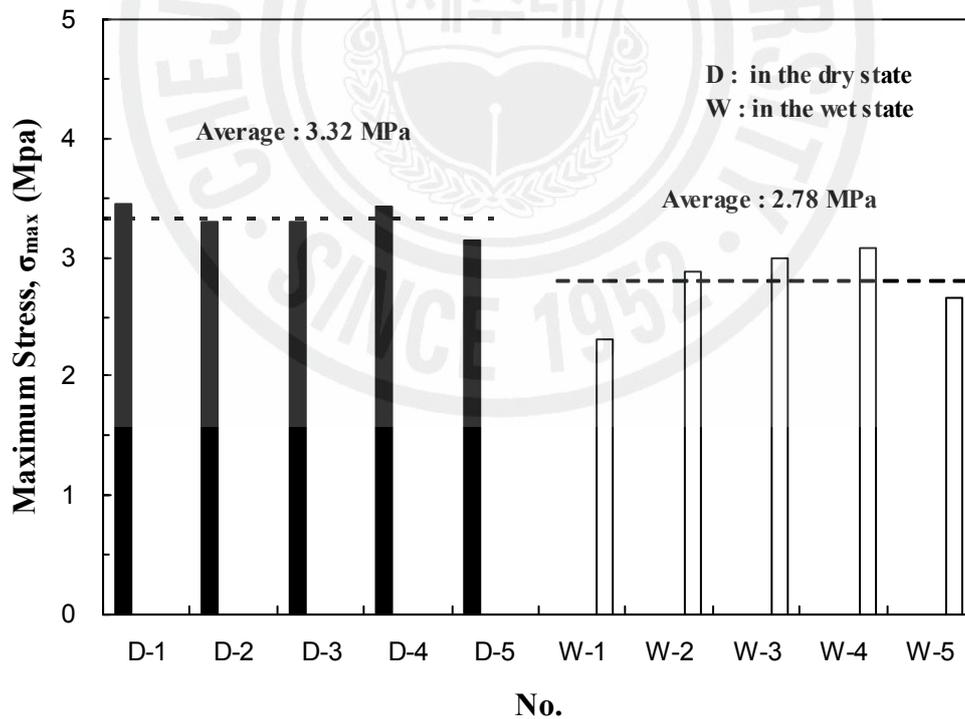


Fig. 3.40 Tensile strength of the Pyoseonri Basalt

Table 3.11 Result of Brazilian test in the Trachybasalt

No.	조면암질 현무암의 최대인장강도			
	건조상태		습윤상태	
	최대하중 kN	최대응력 MPa	최대하중 kN	최대응력 MPa
1	62.41	10.74	47.06	8.10
2	65.40	11.26	42.55	7.33
3	58.02	9.99	37.57	6.47
4	58.34	10.04	45.40	7.82
5	55.75	9.60	38.73	6.67
범 위	9.60 ~ 11.26 MPa		6.47 ~ 8.10 MPa	
평 균	10.33 MPa		7.28 MPa	

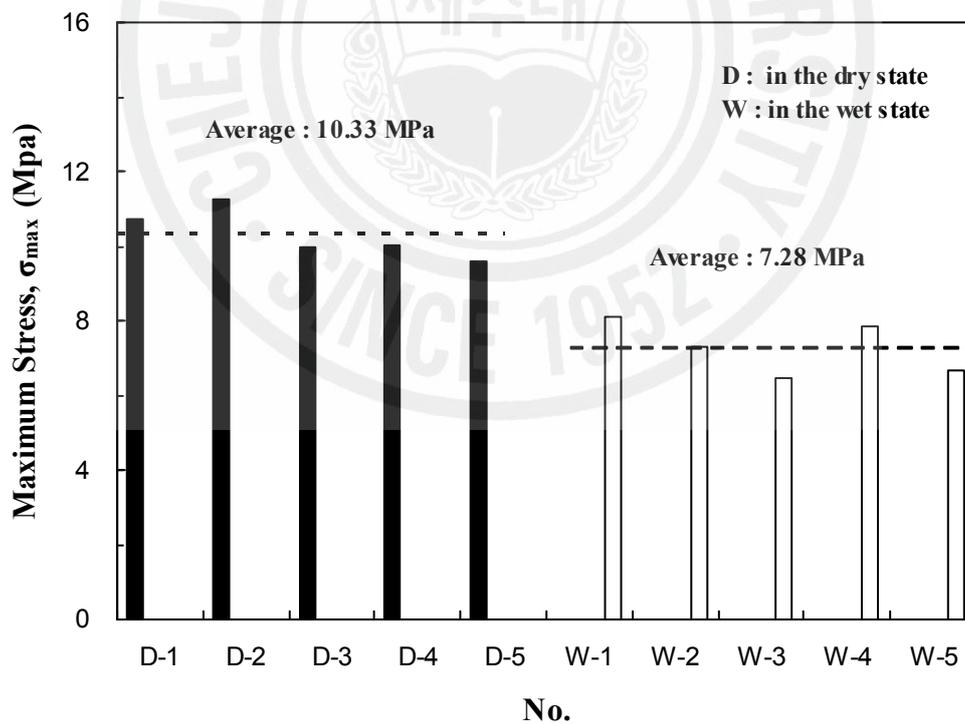


Fig. 3.41 Tensile strength of the Trachybasalt

Table 3.12 Result of Brazilian test in the Scoria

No.	Scoria의 최대인장강도			
	건조상태		습윤상태	
	최대하중 kN	최대응력 MPa	최대하중 kN	최대응력 MPa
1	14.20	2.44	5.14	0.88
2	13.76	2.37	7.20	1.24
3	10.48	1.80	9.48	1.63
4	15.36	2.64	8.43	1.45
5	15.00	2.58	8.45	1.45
범 위	1.80 ~ 2.64 MPa		0.88 ~ 1.63 MPa	
평 균	2.37 MPa		1.33 MPa	

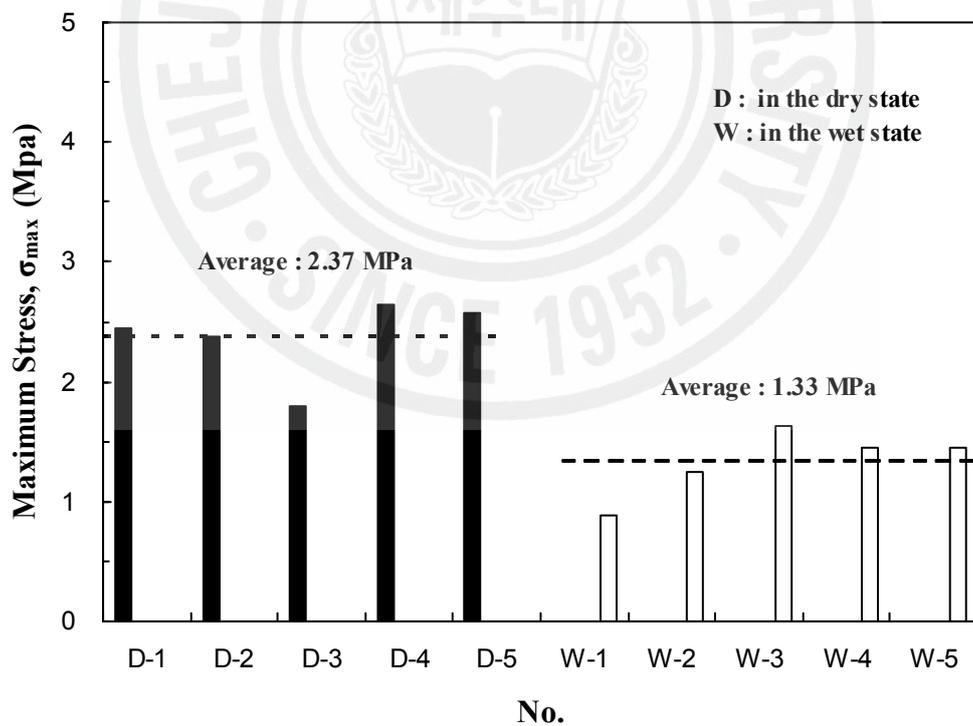


Fig. 3.42 Tensile strength of the Scoria

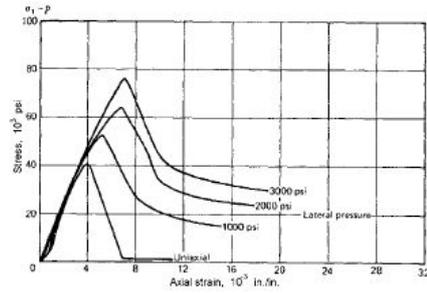
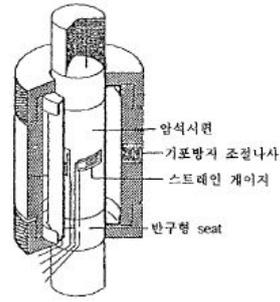
### 3.8 삼축압축시험

암반의 안정성을 논의할 경우, 암반이 나타내는 역학적 특성을 파악하는 것은 필수적이다. 기본적으로 중요한 것은 암반 내 응력-변형률 상태와 유사한 시험조건을 설정하고 평가하는 것이다. 높은 응력환경 하에 있는 암석의 거동이나 그에 따른 지압현상 또는 단층이나 습곡 등의 지질구조에 관계되는 각종 현상을 해명하기 위해서는 삼축압축시험이 유력한 수단이 된다. 암반 내에는 일반적으로 세계의 주응력이 모두 압축응력인 것이 보통이다. 삼축압축시험은 이와 같은 응력상태를 인공적으로 만들어서 그때의 암석의 거동을 관측하는 시험이다.

특히 삼축압축시험은 완전한 파괴 포락선에 대한 해석이 요구될 경우 실시된다. 정수압이 구속압(또는 봉압, confining pressure)으로서 원통형의 암석시편의 표면에 작용하는 상태에서 암석의 파괴가 일어날 때까지 시험편에 축방향의 하중을 가함으로써 암석의 강도를 측정한다. 각각 다른 구속압 상태에서의 일련의 시험을 실시함으로써 모어 응력원과 파괴포락선을 구하고 점착력과 마찰각을 얻을 수 있다(Fig. 3.44 참조).

삼축압축시험을 통한 암석강도의 결정과정은 Vogler and Kovari(1978)와 ASTM(1967)에 의해 제시된 바 있다. 시험편에 대한 시험은 지하암반 내 응력상태와 같이 원주형 시험편을 삼축압축챔버(Tri-axial chamber)내에 넣고 유압으로 주위에 일정한 하중 즉, 측압(confining pressure)을 가한 후 일축압축에서와 같이 수직으로 하중을 가하여 파괴강도를 얻는다. 점착력(cohesive strength)과 내부마찰각(internal friction angle)은 이와 같이 구한 삼축압축시험결과와 일축압축시험, 인장시험결과로부터 Mohr diagram에 의하여 구할 수 있다.

Fig. 3.43은 삼축압축챔버의 내부 모식도 및 몇가지 측압에 대한 응력-변형률 곡선이다. 암석은 취성재료이어서 측압이 없는 상태 즉, 일축압축상태에서는 최대파괴하중 직후 급격히 응력이 떨어지는데, 측압이 점차 증가함에 따라 최대파괴하중 이후의 응력저하 정도가 점차 줄어들고 따라서 잔류응력이 증가하며 취성에서 연성으로 전이해 가는 특성을 보이는 것이 일반적이다.



(a) Tri-axial chamber (b) Stress-strain curve

Fig. 3.43 Tri-axial chamber and Stress-strain curve

삼축압축시험으로 얻어지는 측압조건과 이에 대한 삼축압축강도 결과는 일축 압축강도 및 인장강도 측정결과 함께 암석의 중요한 역학적 특성인 점착력과 내부마찰각을 구하는데 이용된다. Fig. 3.44와 같이 이들 강도치를 이용해 Mohr 응력원을 작도하고 파괴포락선을 결정하면 법선응력이 0인 상태 즉, 전단응력축과 파괴포락선의 교점이 점착력이 되고 파괴포락선의 기울기가 내부마찰각이 된다. 파괴포락선은 Fig. 3.44의 왼쪽과 같은 직선이나 오른쪽과 같은 포물선으로 결정하는 방법이 있다. Mohr-Coulomb 파괴조건에 의한 직선식이 실제적인 면에서 다루기가 쉽고 적용성이 높아서 통상적으로 많이 이용된다. 이 경우에는 Fig. 3.44의 왼쪽에서 보는 바와 같이 점착력이 약간 높게 평가되는 경향이 있으며, 따라서 인장강도 및 일축압축강도로 표시되는 상대적으로 낮은 Mohr 응력원 범위에서는 곡선식으로 표현하고 그 이후는 직선식으로 표현하는 복합적 파괴포락선이 이용되기도 한다.

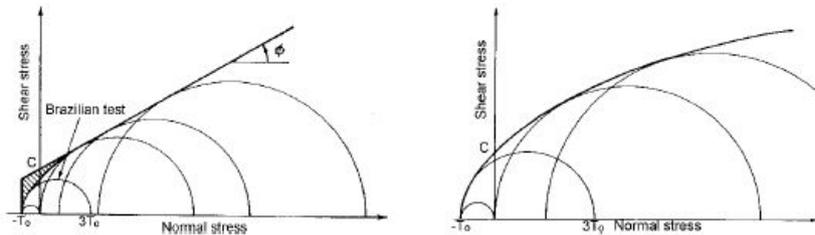


Fig. 3.44 Mohr stress circle and Failure line

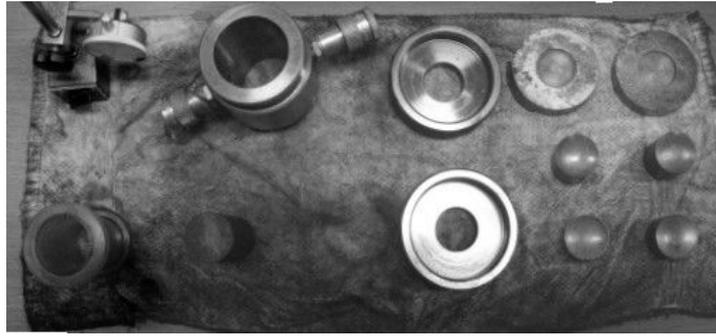


Fig. 3.45 Apparatus for Triaxial compression test

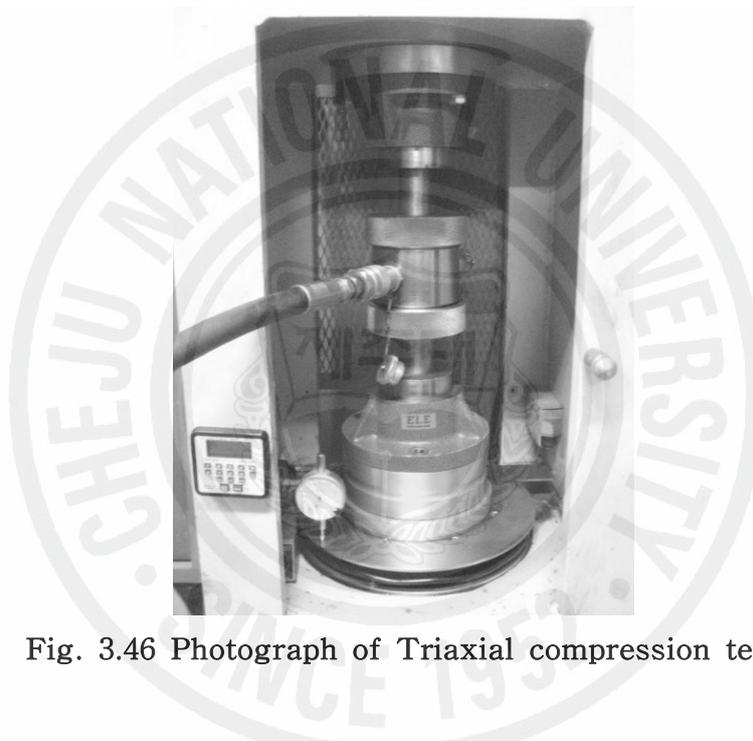


Fig. 3.46 Photograph of Triaxial compression test

공시체는 일축압축시험에서 사용한 것과 같은 크기인 BX CORE를 사용하였으며, 직경에 대한 높이의 비는 대략 2.0을 사용하였다. 삼축압축시의 변형거동은 축변형은 측정하지 않았고 chamber 내의 봉압력은 5, 10, 20 MPa를 사용하였으며, 기타조건은 ISRM 기준에 준하였다. 실험결과는 Table 3.13에 제시하였으며, 각 응력 상태를 분석, 취합하여 diagram상에 전시하였다.

점착력과 내부마찰각을 산정하는 방법은 4.4장에 자세히 설명하겠다.

Table 3.13 Result of Triaxial compression test

	Confining Pressure (5MPa)	Confining Pressure (10MPa)	Confining Pressure (20MPa)	Cohesion (MPa)	Internal fric. angle (°)
표선리 현무암	42.53	101.72	182.65	5.35	50.25
조면암질 현무암	173.64	331.10	454.44	16.99	60.66
Scoria	28.14	57.93	89.96	2.33	37.05

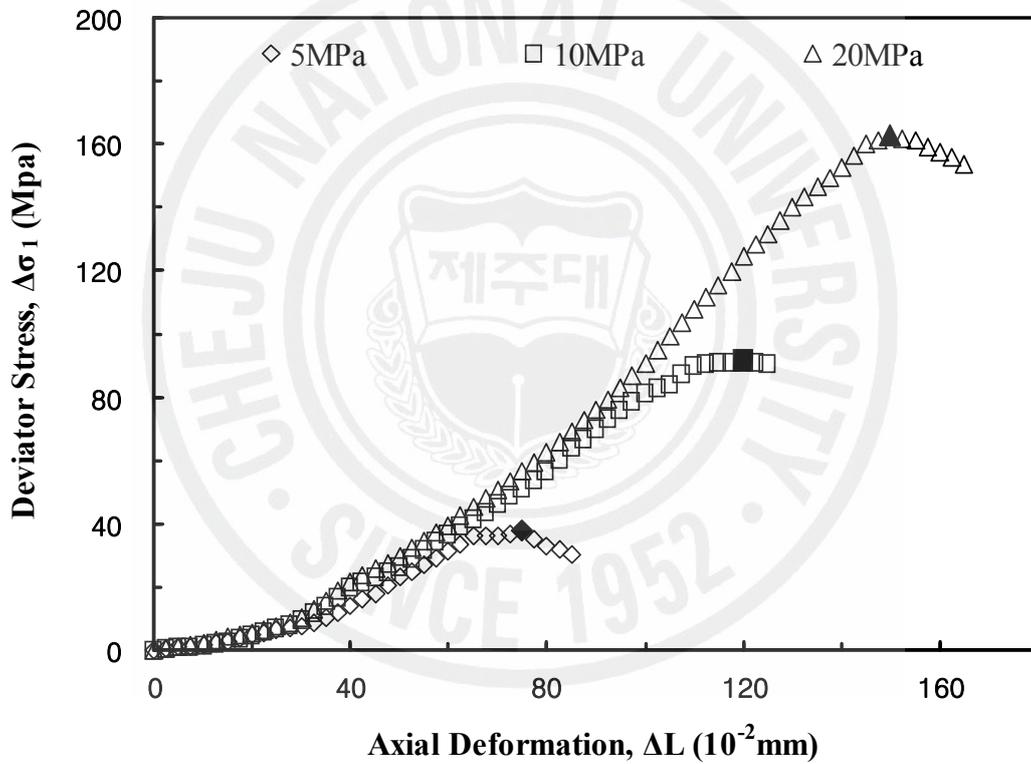


Fig. 3.47 Stress-strain behavior of the Pyoseonri Basalt

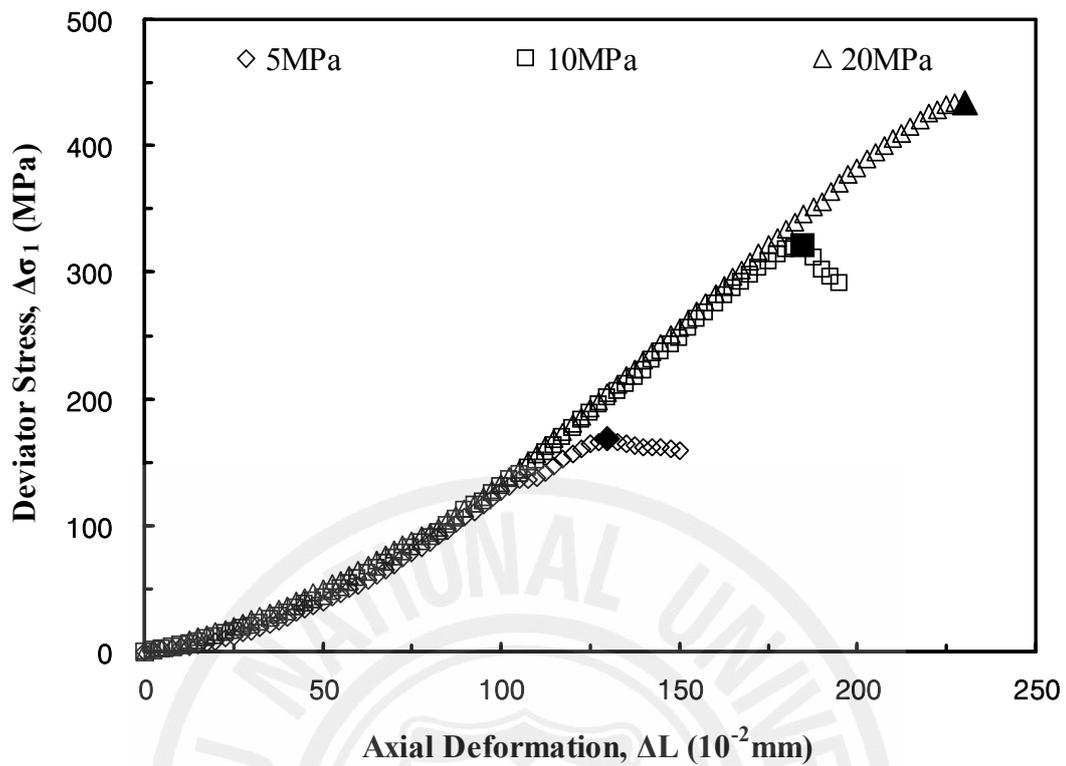


Fig. 3.48 Stress-strain behavior of the Trachybasalt

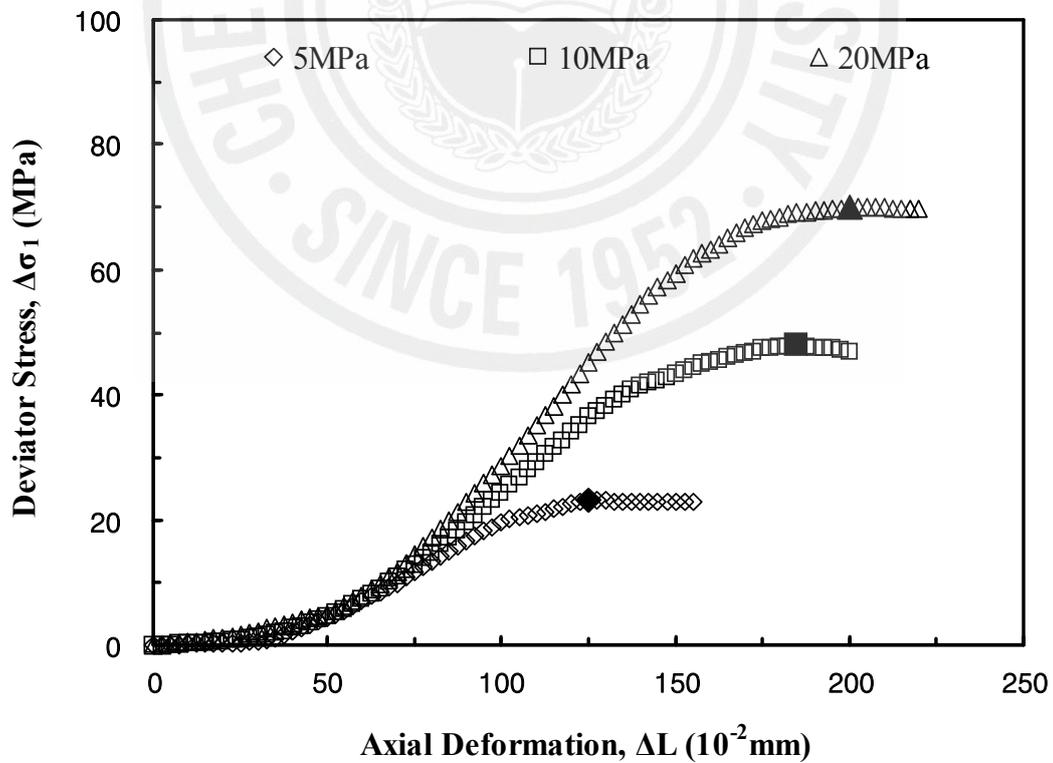


Fig. 3.49 Stress-strain behavior of the Scoria

## IV. 실험결과의 분석

### 4.1 각 암석별 역학적 특성

#### 4.1.1 표선리 현무암

표선리 현무암은 침상장석감람석현무암을 일컫는 암석으로서 Fig. 4.1에서 보는바와 같이 회색 내지 암회색의 다공질이며, 감람석을 반정으로 함유하고 침상의 장석이 특징적이다. 유공질의 현무암(엄관용, 2002)으로서 이전에 조사한 결과와 흡사한 역학적 특성을 갖고 철원지역의 현무암(민경원, 1999)보다 강도가 약한 것으로 판단된다. 하지만 일반적인 현무암(이인모, 2005)의 특징과는 조금 거리가 멀다.

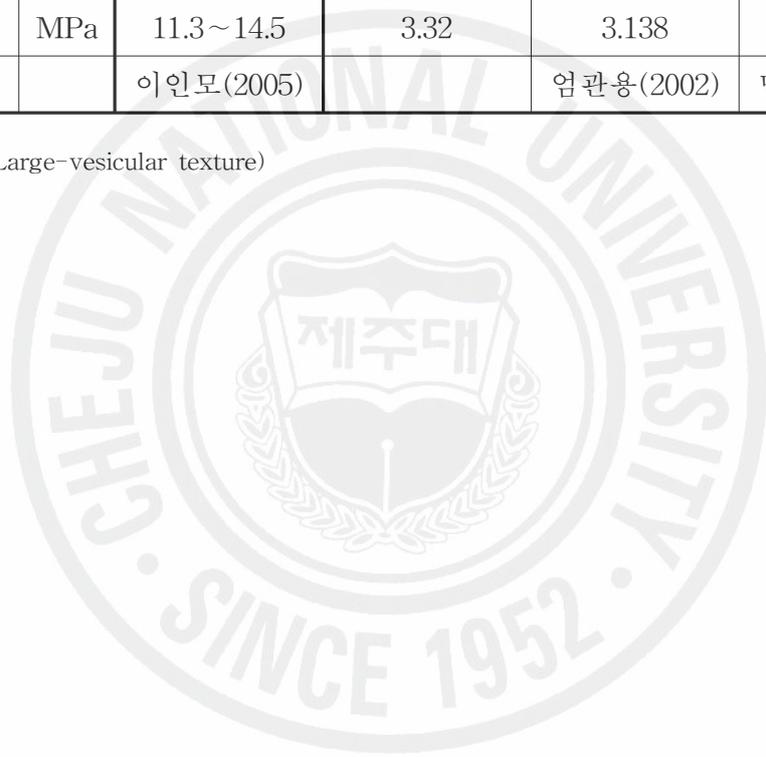


Fig. 4.1 Photograph of the Pyoseonri Basalt

Table 4.1 Comparison with each Basalt ( I )

	단위	현무암	표선리 현무암	유공질 현무암	철원 현무암 (V)
단위중량	kN/m <sup>3</sup>	27.1	21.5	-	-
흡수율	%	-	2.973	2.0	6.53
비중		2.896	2.337	2.444	2.89
투수계수	cm/s	1.0×10 <sup>-12</sup>	1.21×10 <sup>-5</sup>	-	-
탄성파속도	km/s	-	3.95	-	-
압축강도	MPa	148.0~355.0	41.19	40.305	52.563
인장강도	MPa	11.3~14.5	3.32	3.138	5.266
비고		이인모(2005)		엄관용(2002)	민경원(1999)

V 대다공상(Large-vesicular texture)



#### 4.1.2 조면암질 현무암

조면암질 현무암은 매우 치밀·견고하며 회색을 띤다. 불규칙한 파쇄가 보이며 다른 현무암보다는 강도가 매우 크다. 유공질의 표선리 현무암과는 달리 일반적인 현무암(이인모, 2005)의 특징을 보이고 있으며 제주도의 현무암도 국내 화강암의 압축강도 1,510~2,070 kgf/cm<sup>2</sup> 와 인장강도 73~146 kgf/cm<sup>2</sup> 의 범위 내에 드는 것으로 분석되었다.



Fig. 4.2 Photograph of the Trachybasalt

Table 4.2 Comparison with each Basalt (Ⅱ)

	단위	현무암	조면암질 현무암	무공질 현무암	철원 현무암 (NV)
단위중량	kN/m <sup>3</sup>	27.1	27.8	-	-
흡수율	%	-	0.866	1.1	4.01
비중		2.896	2.849	2.772	2.94
투수계수	cm/s	1.0×10 <sup>-12</sup>	5.47×10 <sup>-7</sup>	-	-
탄성파속도	km/s	-	4.24	-	-
압축강도	MPa	148.0~355.0	183.08	89.240	85.808
인장강도	MPa	11.3~14.5	10.33	6.472	6.776
비고		이인모(2005)		엄관용(2002)	민경원(1999)

NV 소다공상(Small-vesicular texture)

#### 4.1.3 Scoria

Scoria는 용암의 폭발 분출시 압력의 급격한 감소로 인하여 부피가 갑자기 늘어나면서 gas가 일출하여 생성된 다공질 화산쇄설물로서, 원 지반이 크고 많은 기공을 가지고 있는 연속체인 덩어리로 되어있다. 그래서 채취 시 다양한 입도로 분해되므로 흙으로 분류되기에는 다소 문제를 내포하고 있으나 흙으로 간주하여 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

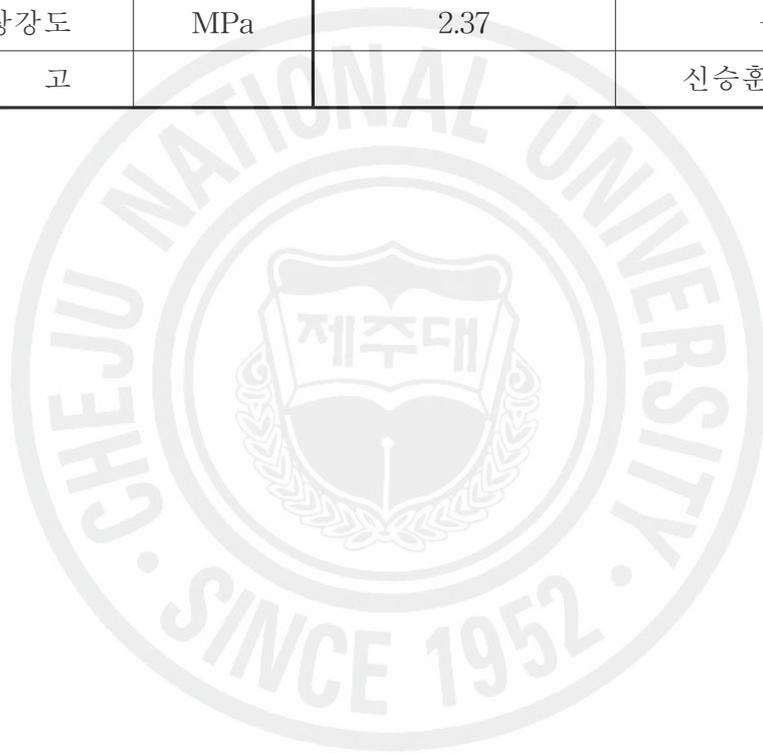
그러나, 본 연구에서는 일부 집괴암형태로 산출된 Scoria에 대하여 암석시험을 실시하여 Table 4.3과 같은 결과를 얻었다. 그러나 이것은 일반적인 사질토와는 공학적인 특성이 현저하게 다르므로 이를 이용하기 위해서는 보다 더 많은 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.



Fig. 4.3 Photograph of the Scoria

Table 4.3 Comparison with each Scoria

	단위	Scoria	송 이
단위중량	kN/m <sup>3</sup>	18.6	-
흡 수 율	%	8.284	6.28
비 중		2.051	2.54
투수계수	cm/s	$3.04 \times 10^{-3}$	$5.26 \times 10^{-4}$
탄성과속도	km/s	2.67	-
압축강도	MPa	20.79	-
인장강도	MPa	2.37	-
비 고			신승훈(2002)



#### 4.2 Schmidt hammer 반발계수와 일축압축강도의 상관관계

Schmidt hammer 시험한 결과와 일축압축시험한 결과와 비교해 보았다. Schmidt hammer 시험에 의한 강도가 다소 높은 것으로 판단되고 특히나 강도가 높은 조면암질 현무암인 경우는 그 정도가 심하였다. 그래서 식 (4.1)과 같이 Schmidt hammer 반발계수와 일축압축강도의 관계를 지수함수로 표현하였다.

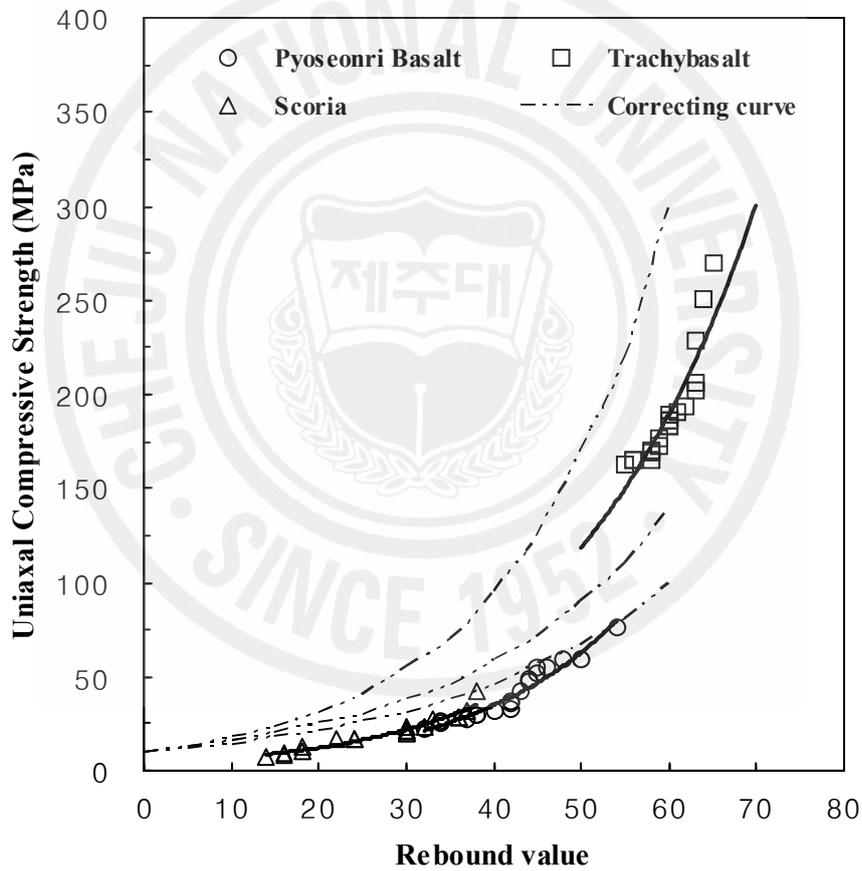


Fig. 4.4 Diagram showing relationship between Schmidt hammer rebound value and Uniaxial compressive strength

추정치를  $\sigma_{pre}$  라고 한다면,

$$\sigma_{pre} = a \cdot e^{b \cdot R} \quad (4.1)$$

여기서,  $R$  : Schmidt hammer 반발계수

$a, b$  : 암종에 따른 변수

**Table 4.4 Parameter of each samples**

	$a$	$b$	신뢰도
표선리 현무암	3.24	0.059	93.6%
조면암질 현무암	11.67	0.046	83.7%
Scoria	3.79	0.058	94.9%



### 4.3 암석 강도에 미치는 영향요소

#### 4.3.1 가압속도

암석의 압축강도는 하중속도가 증가함에 따라 커진다. 그리고 파괴양상도 하중속도가 빨라지면 파괴하중에 이르러 갑작스럽고 격렬하게 일어난다. 본 연구에서는 표선리 현무암과 조면암질 현무암에 대하여 하중속도 변화에 따른 파괴강도를 측정하였는데 그 결과는 Fig. 4.5와 같다. 여기서 높은 하중속도는 60MPa이고, 낮은 하중속도는 0.06MPa이다. 전체적으로 하중속도가 증가하면 강도도 증가하지만, 그 증가 정도는 암종에 따라 차이가 있음을 볼 수 있다.

이에 국제암반역학회(ISRM) 규정에서는 0.5~1.0MPa(5~10kgf/cm<sup>2</sup>)를 제안하고 있다.

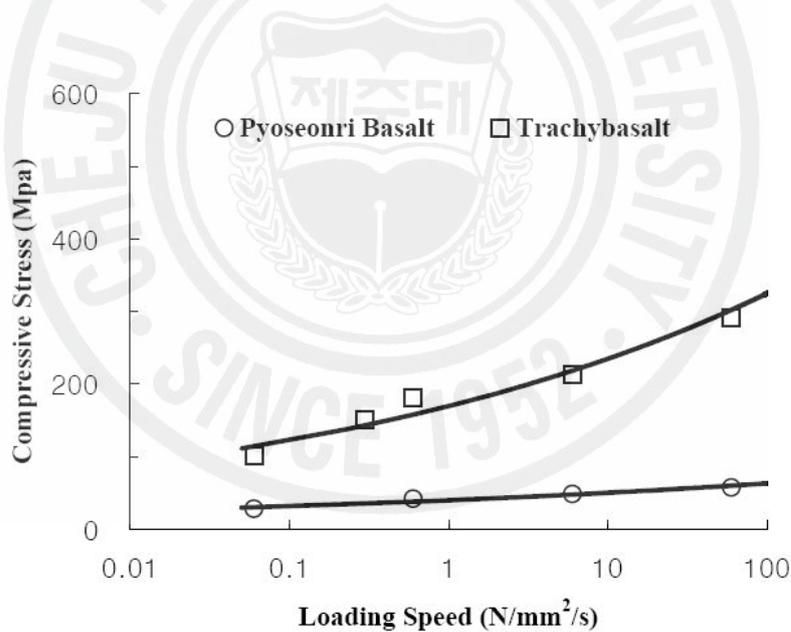


Fig. 4.5 Change of compressive strength by loading speed

### 4.3.2 암석의 이방성

암석이나 암반은 대부분 이방성의 특성을 보이기 때문에 강도시험을 실시할 경우 가압방향과 층리방향과의 각도에 따라 특이한 변형과 강도특성을 보인다. Fig. 4.6은 세 종류의 시료에 대하여 수평면과 하중방향과의 관계에 따른 강도 변화 양상을 나타낸 것이다. 그림에서 수평면의 경사각은 최소주응력 방향 즉, 가압방향과 직각인 방향과 이루는 각으로 표시된 것인데, 이 경사각이 0°와 90° 일 때는 거의 비슷하여 수평방향과 연직방향에 대해서는 등방성을 보이는 반면, 45°인 경우에는 최소로서 다른 강도에 비해 12~26%까지 저하되는 것을 볼 수 있다.

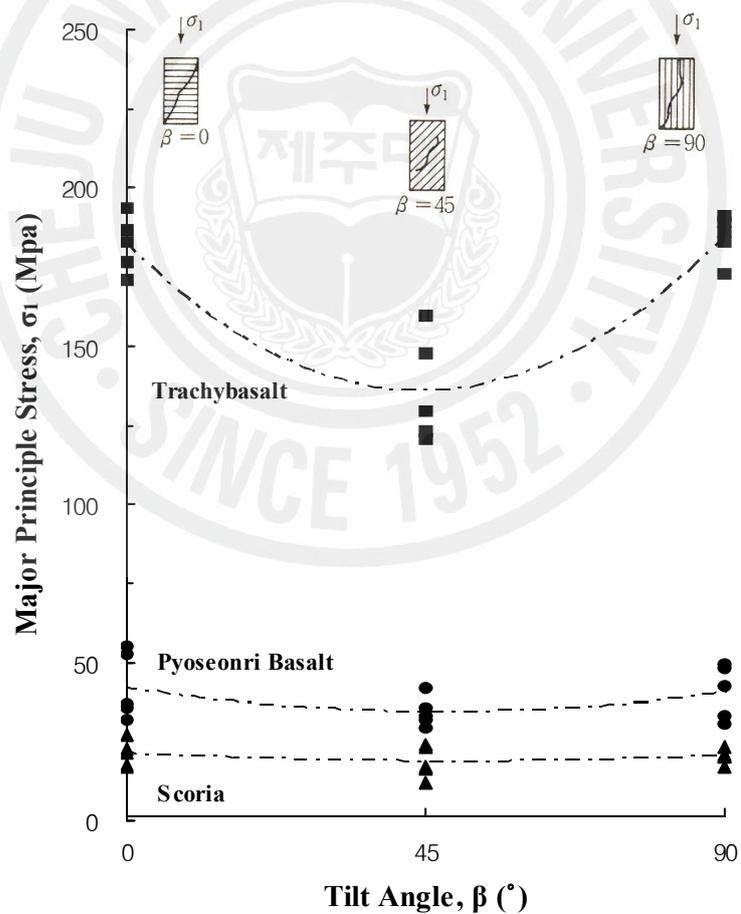


Fig. 4.6 Relationship between Tilt angle and Compressive strength

### 4.3.3 수분의 함유량

암석에 수분이 많아지면 강도는 저하된다. 공극 중에 포함된 물은 압축에 의하여 공극이 축소되면 썰기와 같은 작용을 해 입자의 틈이나 공극을 넓히며 입자 표면에 부착된 물은 입자의 표면에너지에 영향을 미쳐서 입자의 결합력을 작게 한다.

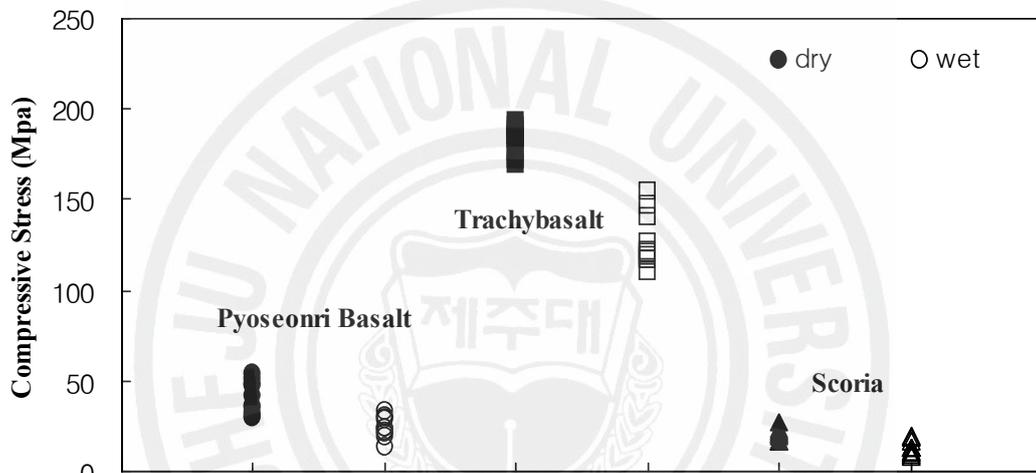


Fig. 4.7 Influence of moisture on compressive strength

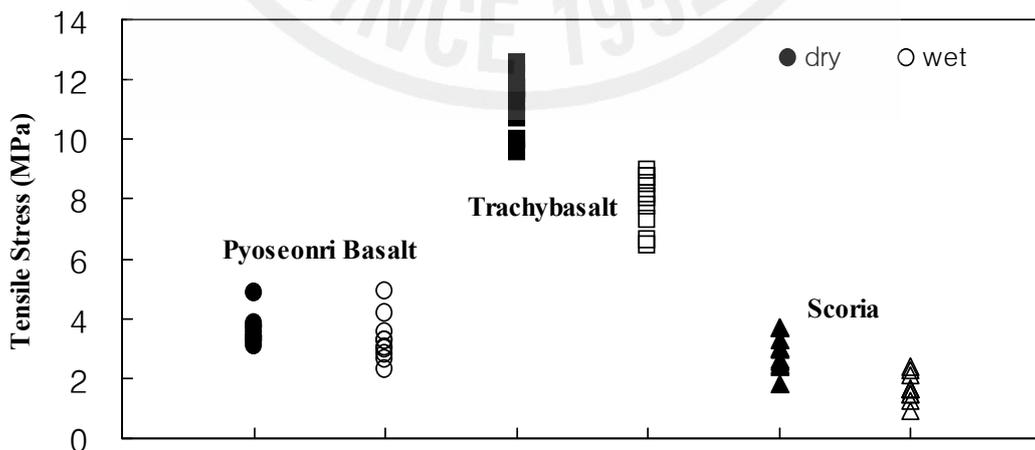


Fig. 4.8 Influence of moisture on tensile strength

## 4.4 암반의 파괴규준

### 4.4.1 Mohr-Coulomb의 파괴규준

암의 파괴상태를 표현하기 위하여 파괴규준이 사용되고 있다. 이 파괴규준으로 여기서는 Mohr-Coulomb 파괴규준, Hoek-Brown 파괴규준 및 Lade 파괴규준에 대하여 설명하고자 한다.

Fig. 4.9(a)는 Mohr-Coulomb의 암 파괴규준을 도시한 그림이다. 즉 파괴포락선은 전단응력과 수직응력의 관계를 나타내는 Mohr-Coulomb 파괴선과 인장강도를 표시하는 최대인장규준선의 두선으로부터 구성되어있다. 이중 전단응력과 수직응력의 Mohr-Coulomb 관계선은 다음식과 같다.

$$\tau_p = S_i + \sigma \tan \phi \quad (4.2)$$

여기서,  $\tau_p$  = 침투전단응력 혹은 전단강도

$\phi$  = 내부마찰각(잔류강도의 경우  $\phi_r$ 로 표시)

$S_i$  = 전단강도 절편

한편 최대인장규준 -  $T_0$ 는 일축인장강도를 의미하며 어떤 경우의 시험에서도 최소주응력  $\sigma_3$ 가 이 값보다 적을 수 없다.

실제 파괴포락선은 Fig. 4.9(b)에서와 같이 Mohr-Coulomb 규준선 및 최대인장규준선에 의한 선보다 아래에 존재하게 된다. 따라서 실제 적용시는  $T_0$ 와  $S_i$ 를 감소시킬 필요가 있다.

침투하중상태에서의 주응력으로 Mohr-Coulomb 파괴규준을 나타내면 다음식과 같다.

$$\sigma_{1,P} = q_u + \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2) \quad (4.3)$$

여기서,  $\sigma_{1,P} = \sigma - \epsilon$  곡선에서의 최대주응력

$q_u =$  일축압축강도

따라서,  $q_u$ 와  $S_i$ 는 다음과 같은 관계가 된다.

$$q_u = 2 S_i \tan(45^\circ + \pi/2) \quad (4.4)$$

식 (4.3)에 최대인장규준이 중첩되어야 한다. 즉 최소주응력  $\sigma_3$ 가 인장강도  $-T_0$ 로 될 때는 최대주응력  $\sigma_1$ 의 값에 관계없이 인장응력 때문에 파괴된다.

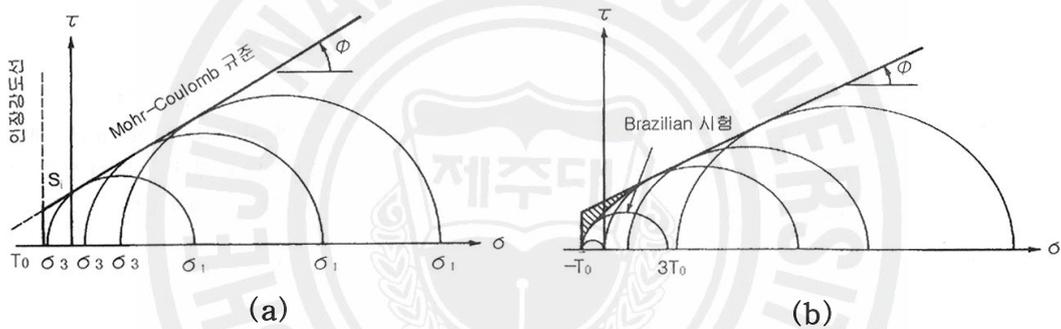


Fig. 4.9 Mohr-Coulomb failure criterion

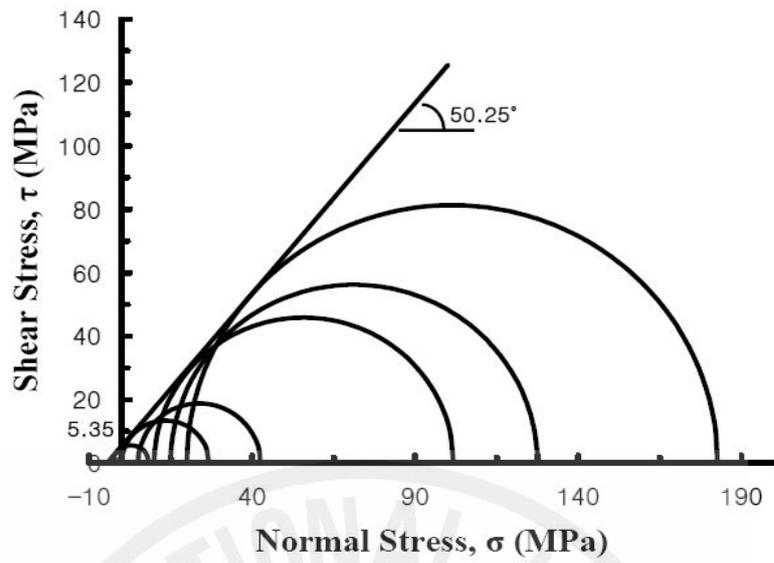


Fig. 4.10 Mohr's circles and Failure envelope for the Pyoseonri Basalt

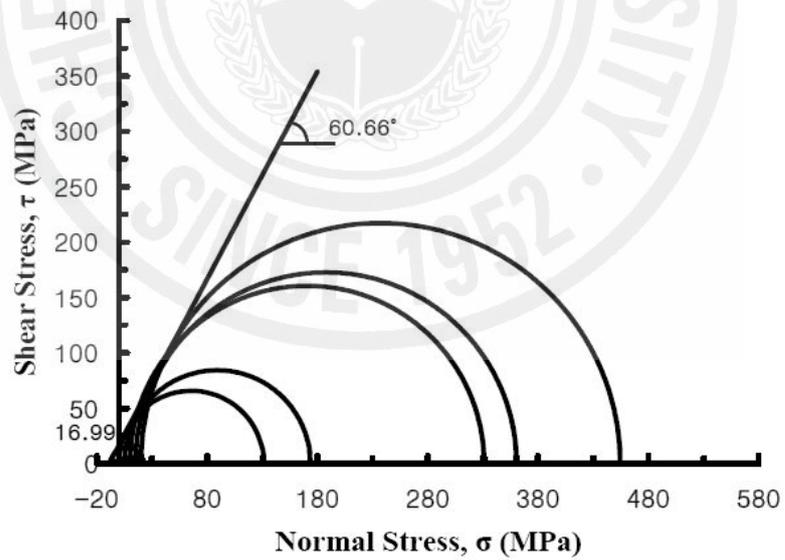


Fig. 4.11 Mohr's circles and Failure envelope for the Trachybasalt

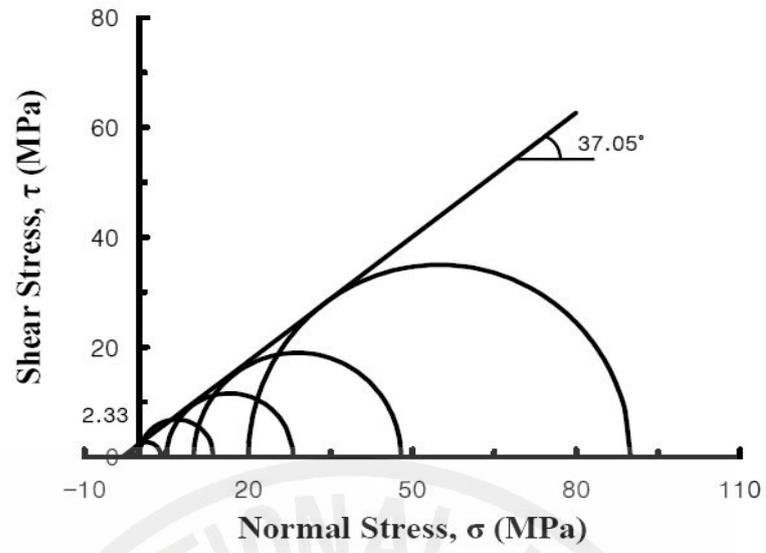
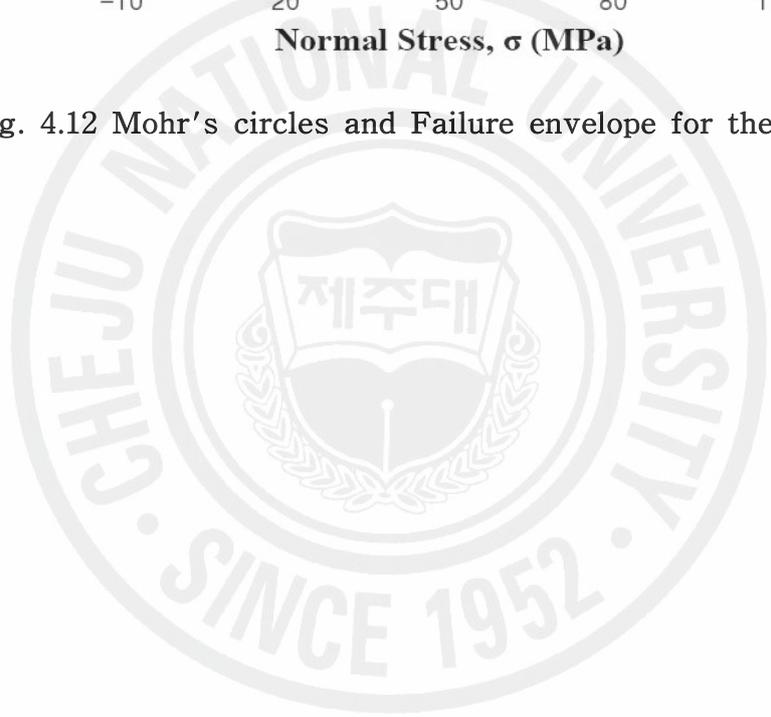


Fig. 4.12 Mohr's circles and Failure envelope for the Scoria



#### 4.4.2 Hoek-Brown의 파괴규준

Hoek와 Brown(1980, 1988)은 절리군을 포함하는 암반의 경험적 파괴규준에 대한 평가식을 제안한 바 있다. Hoek-Brown의 파괴이론(1980, 1988)은 Griffith (1921, 1924)가 제안하고 McClintock and Walsh(1962)가 수정한 이론을 토대로 암석의 거동에 관한 이론적 및 실험적 측면에서의 많은 시행착오를 통해 도출한 경험식으로서 암석파괴와 주응력들 사이에 관한 실험적 관계를 식 (4.5)와 같이 제시하였다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (4.5)$$

여기서,  $\sigma_{1f}$  : 파괴시의 최대주응력     $\sigma_3$  : 공시체에 작용하는 최소주응력  
 $\sigma_c$  : 공시체의 일축압축강도     $m_b, s, a$  : 암석의 성질과 응력을 가하기 전 암석의 파쇄정도에 관련된 상수

이때,  $GSI > 25$ 이면

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right)$$

$$a = 0.5$$

이다.

##### 1) 표선리 현무암

암반의 파괴규준으로는 식 (4.5)를 이용한다. 단,  $m_b$  및  $s$  값을 구하기 위하여 GSI(Geological Strength Index; 지질강도지수)를 새로이 도입하였다. 암반의 상태에 따른 GSI값들이 Table 4.8에 제시되어 있다.

식 (4.5)는

$$\left(\frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_c}\right)^2 = m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \quad (4.6)$$

로 표시할 수 있다. 여기서  $GSI > 25$ 이므로  $a = 0.5$ 로 놓고,  $\sigma_3 \approx 0 \sim 20\text{MPa}$ 를 취하여  $\sigma_3/\sigma_c$  와  $((\sigma_{1f} - \sigma_3)/\sigma_c)^2$  값들을 구한다.

Table 4.5 Calculation of  $\sigma_3/\sigma_c$  and  $((\sigma_{1f} - \sigma_3)/\sigma_c)^2$  in the Pyoseonri Basalt

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{1f}$ (MPa)	$\sigma_3/\sigma_c$	$((\sigma_{1f} - \sigma_3)/\sigma_c)^2$
0	25.06	0.000	1.000
5	42.53	0.200	2.243
10	101.72	0.399	13.396
15	127.45	0.599	20.135
20	182.65	0.798	42.126

Table 4.5를 이용하여 (4.6) 관계식을 그림으로 그리면 Fig. 4.13과 같다.

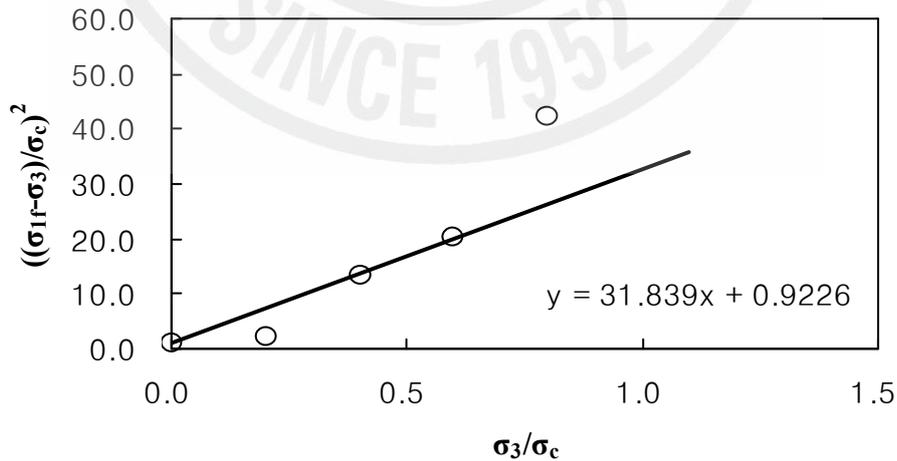


Fig. 4.13 Relationship between  $\frac{\sigma_3}{\sigma_c}$  and  $\left(\frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_c}\right)^2$  in the Pyoseonri Basalt

Fig. 4.13으로부터  $m_b=31.839$ (기울기),  $s=0.9226$ (절편)이다.

따라서, 위의 값들을 식 (4.5)에 대입하여 Hoek-Brown 파괴규준을 완성시킨다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + 25.06 \times \left( 31.839 \times \frac{\sigma_3}{25.06} + 0.9226 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

Hoek-Brown의 파괴규준이 구해지면  $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_c$  범위 안에 있는 임의의  $\sigma_3$  값들에 대하여  $\sigma_{1f}$  값을 구하고 식 (4.7)를 이용하여 이를  $\sigma_{1f} - \sigma_3$  그래프 상에 Fig. 4.14와 같이 그린다. Fig. 4.14에 표시된  $(\sigma_3, \sigma_{1f})$  값들에 대하여 선형회귀 분석법으로 직선식을 구한다. 이 직선식의 기울기가  $k$ , 절편이  $\sigma_{cm}$  이 된다. 여기서 구한  $k, \sigma_{cm}$  값을 식 (4.8)과 (4.9)에 대입하여  $\phi, c$  값을 구한다.

$$\sin \phi = \frac{k-1}{k+1} \quad (4.8)$$

$$c = \frac{\sigma_{cm}}{2\sqrt{k}} \quad (4.9)$$

위의 Hoek-Brown 파괴규준으로부터 예측한 점착력( $c$ )은 4.77MPa이고, 내부마찰각( $\phi$ )은 52.47°이다. 이는 Mohr-Coulomb 파괴규준의 점착력  $c=5.35$ MPa보다는 작은 값이고 내부마찰각  $\phi=50.25$ 보다는 큰 값을 보이고 있다(Fig. 4.15 참조).

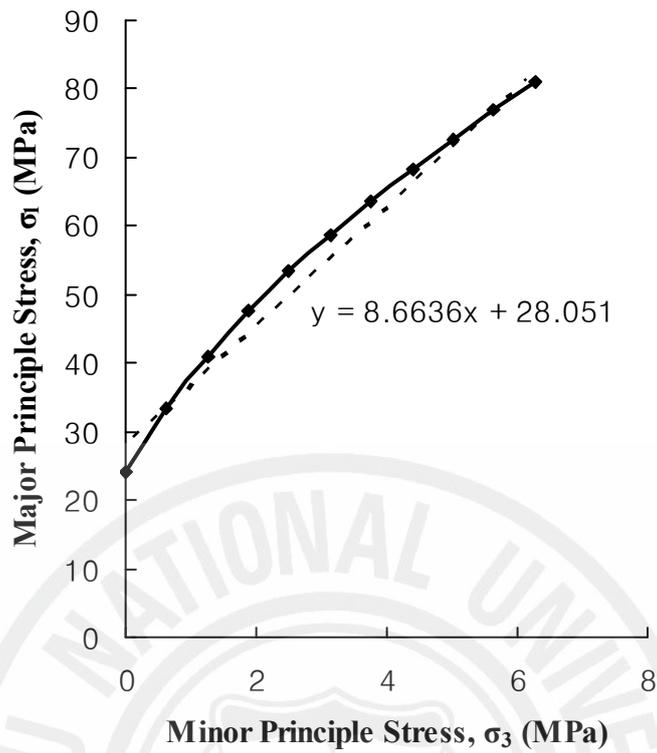


Fig. 4.14 Estimation of failure criterion in the Pyoseonri Basalt by liner regression method

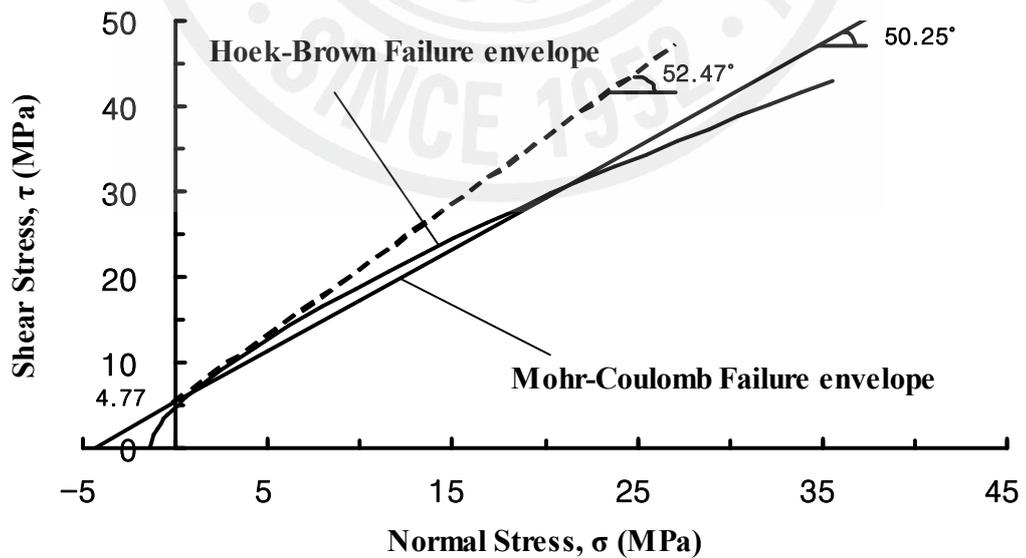


Fig. 4.15 Hoek-Brown failure envelope of the Pyoseonri Basalt

2) 조면암질 현무암

조면암질 현무암의 경우도 마찬가지로, 앞서 설명한 방법대로 (4.6) 관계식을 이용하여 구한 값(Table 4.6)을 Fig. 4.16과 같이 그래프 상에 그려서, 그때의 기울기( $m_b$ )와 절편( $s$ )을 구한다. 그리고는 식 (4.10)과 같이 Hoek-Brown의 파괴규준식을 완성시킨다. 그런 다음,  $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_c$  범위 안에 있는 임의의  $\sigma_3$ 값들에 대하여  $\sigma_{1f}$ 값을 구하여 Fig. 4.17과 같이 선형회귀 분석법으로부터  $\phi$ ,  $c$ 값을 구한다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + 127.96 \times \left( 68.083 \times \frac{\sigma_3}{127.96} + 0.2488 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

Table 4.6 Calculation of  $\sigma_3/\sigma_c$  and  $((\sigma_{1f} - \sigma_3)/\sigma_c)^2$  in the Trachybasalt

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{1f}$ (MPa)	$\sigma_3/\sigma_c$	$((\sigma_{1f} - \sigma_3)/\sigma_c)^2$
0	127.96	0.000	1.000
5	173.64	0.039	1.737
10	331.10	0.078	6.297
15	360.41	0.117	7.287
20	454.44	0.156	11.527

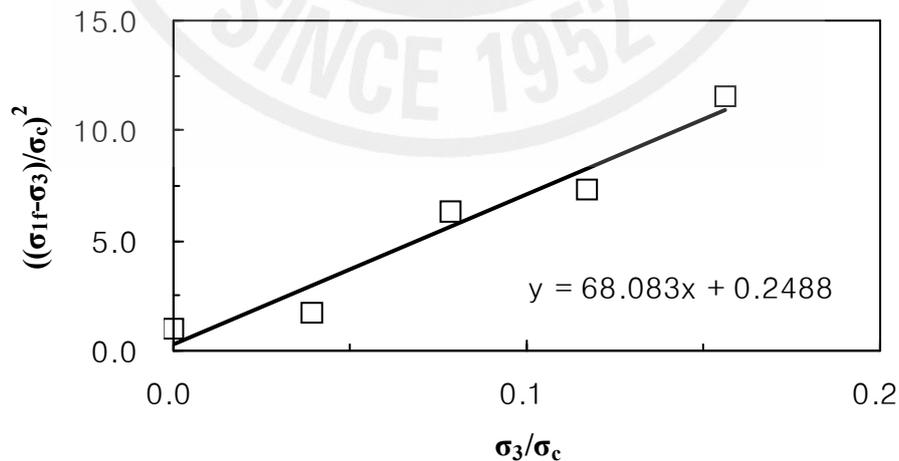


Fig. 4.16 Relationship between  $\frac{\sigma_3}{\sigma_c}$  and  $\left(\frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_c}\right)^2$  in the Trachybasalt

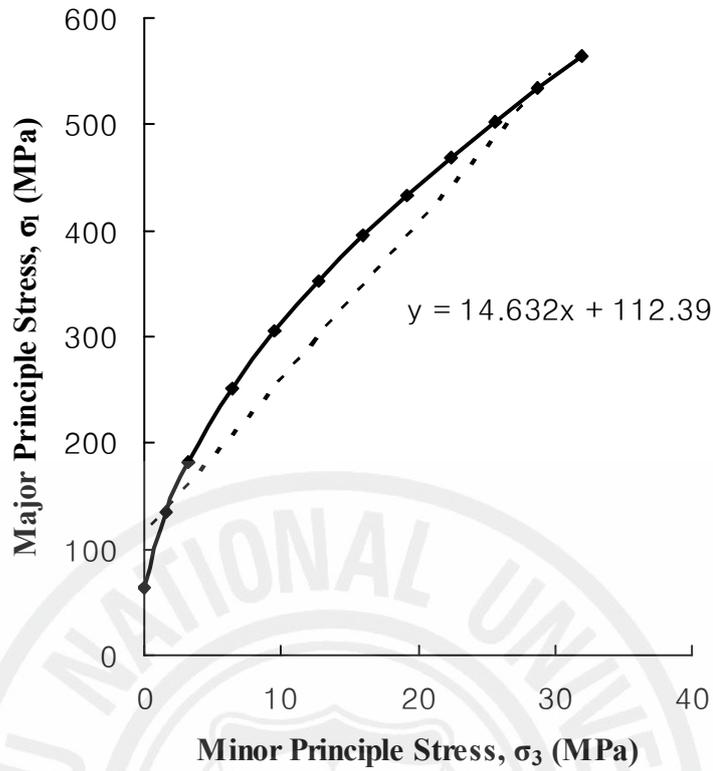


Fig. 4.17 Estimation of failure criterion in the Trachybasalt by liner regression method

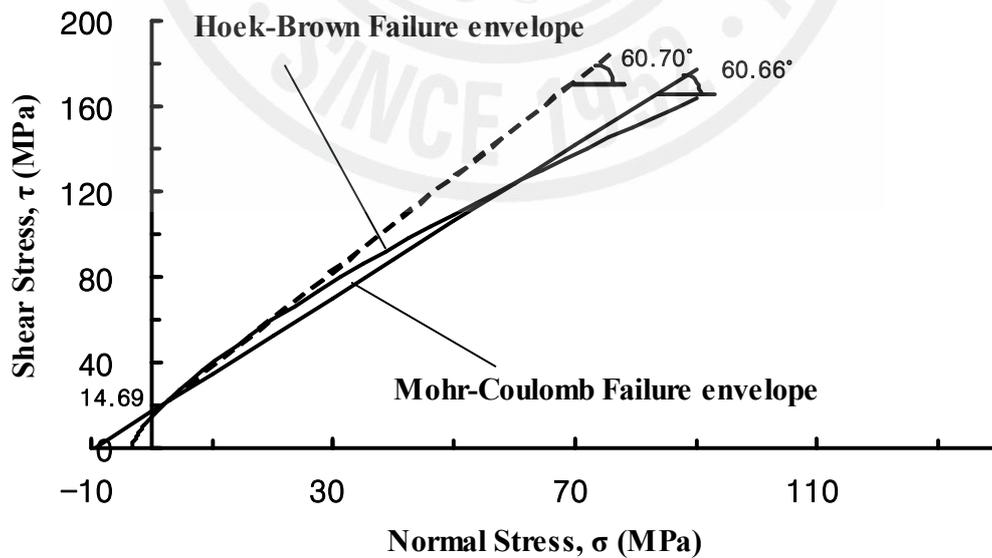


Fig. 4.18 Hoek-Brown failure envelope of the Trachybasalt

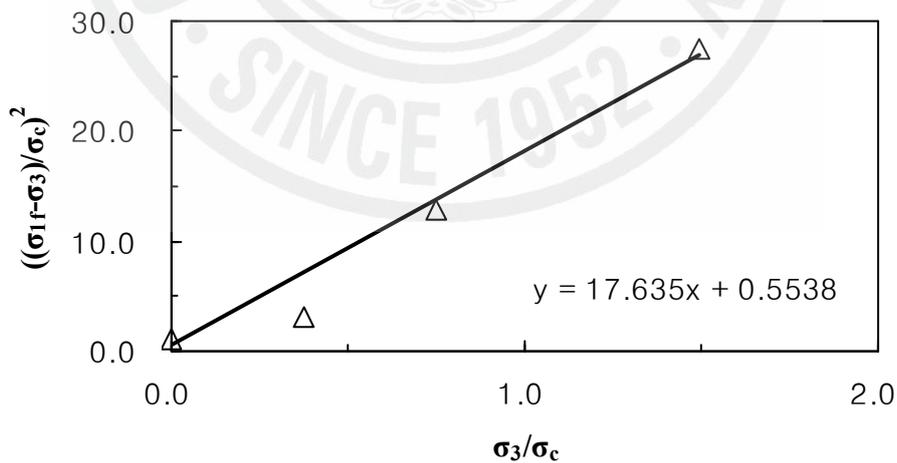
### 3) Scoria

Scoria 역시 앞서 설명한 두 경우와 같이, 우선 식 (4.6)으로부터 Table 4.7과 Fig. 4.19를 구하여 식 (4.11)과 같이 Hoek-Brown 파괴규준식을 완성하고 임의의  $\sigma_3$ 값들에 대하여  $\sigma_{1f}$ 값을 구하여 Fig. 4.20과 같이 선형회귀 분석법으로부터  $\phi$ ,  $c$ 값을 구한다. Fig. 4.21은 Mohr-Coulomb 파괴규준과 비교해본 것이다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + 13.37 \times \left( 17.635 \times \frac{\sigma_3}{13.37} + 0.5538 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

**Table 4.7** Calculation of  $\sigma_3/\sigma_c$  and  $((\sigma_{1f} - \sigma_3)/\sigma_c)^2$  in the Scoria

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{1f}$ (MPa)	$\sigma_3/\sigma_c$	$((\sigma_{1f} - \sigma_3)/\sigma_c)^2$
0	13.37	0.000	1.000
5	28.14	0.374	2.995
10	57.93	0.748	12.851
20	89.96	1.496	27.380



**Fig. 4.19** Relationship between  $\frac{\sigma_3}{\sigma_c}$  and  $\left(\frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_c}\right)^2$  in the Scoria

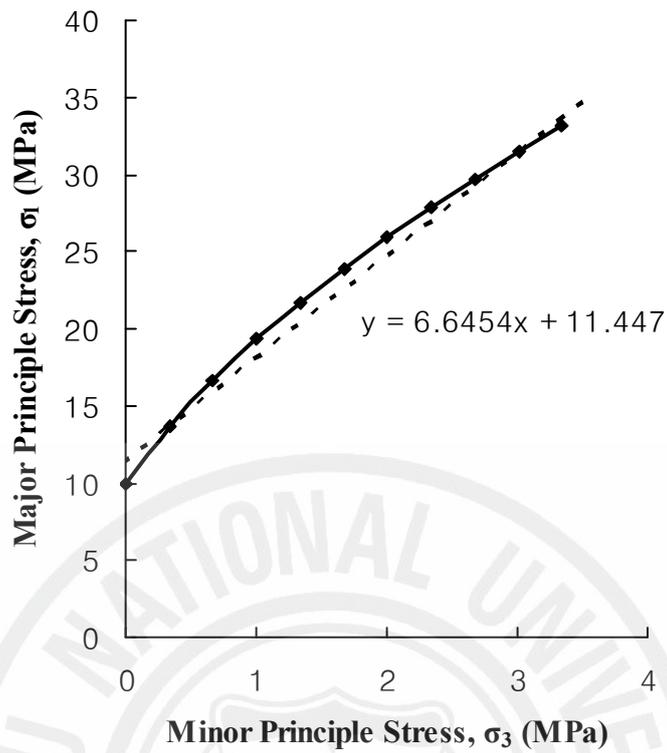


Fig. 4.20 Estimation of failure criterion in the Scoria by liner regression method

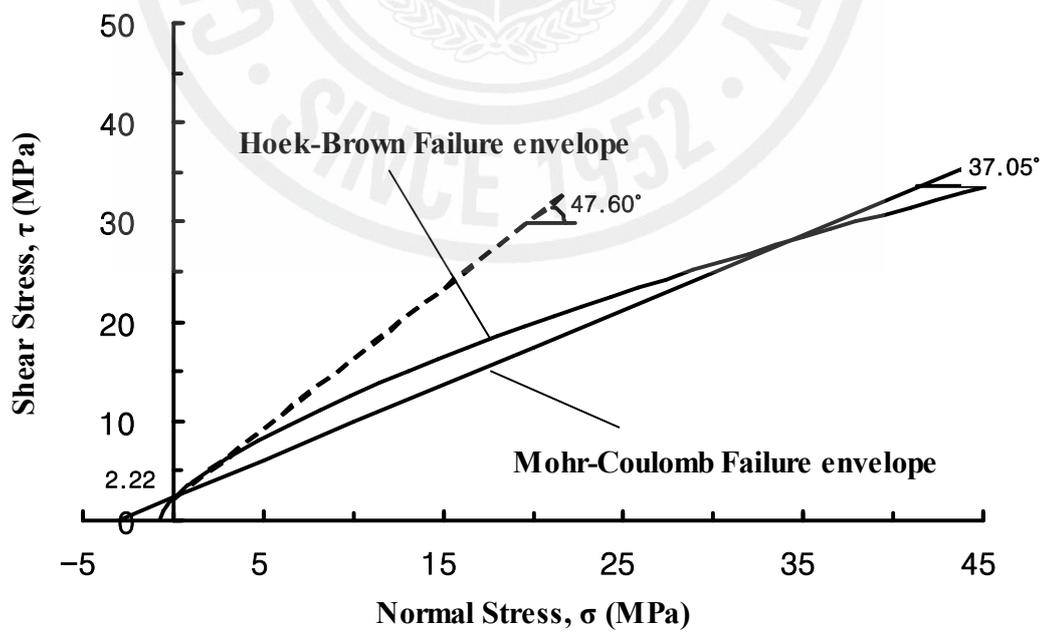
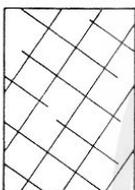
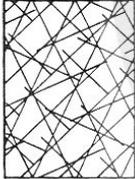
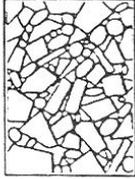


Fig. 4.21 Hoek-Brown failure envelope of the Scoria

Table 4.8 Geological Strength Index

<p><b>GSI 값</b> (지질강도지수, Geological Strength Index)</p>		<p>표면의 상태</p>	<p>중음 매우 거친 표면으로 표면신선</p>	<p>중음 거친 표면으로 약간풍화</p>	<p>보통 더운 표면으로 풍화도 중간, 표면변질</p>	<p>불량 반달함경면으로 완전 풍화된 표면, 각 충진됨</p>	<p>매우 불량 경면으로 완전 풍화된 표면, 반달함경면으로 충진됨</p>
<p>구조</p>		<p>표면상태 불량해짐 →</p>					
	<p><b>BLOCKY</b> 3개 정도의 불연속면 으로 형성, 블록은 신선함</p>	<p>↓ 압축의 불록간에 작용력 저하 ↑</p>	80	70	60	50	40
	<p><b>VERY BLOCKY</b> 4개 이상의 불연속면 으로 형성, 블록은 부분적으로 교란됨</p>		60	50	40	30	20
	<p><b>BLOCKY/ DISTURBED</b> 많은 불연속면으로 형성, 교란된 상태</p>		40	30	20	10	
	<p><b>DISINTEGRATED</b> 완전히 깨진 상태</p>		20	10			

#### 4.4.3 Lade의 파괴규준

Lade(1977)는 흙의 파괴규준으로 곡선파괴포락선에 대한 3차원 파괴규준을 제안한 바 있다. 이 파괴규준을 콘크리트나 암의 파괴규준으로 활용시킬 수 있도록 확장시킨바 있다(Lade, 1982 ; Kim & Lade, 1984).

흙의 파괴규준은 응력 제1불변량과 제3불변량의 항으로 다음과 같이 제안하였다.

$$(I_1^3/I_3 - 27)(I_1/P_a)^m = \eta_1 \quad (4.12)$$

여기서,  $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$

$$\begin{aligned} I_3 &= \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 \\ &= \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} + \tau_{yx} \cdot \tau_{zy} \cdot \tau_{xz} \\ &\quad - (\sigma_x \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} + \sigma_y \cdot \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} + \sigma_z \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yx}) \end{aligned}$$

$P_a$  = 응력의 단위와 동일단위로 표현된 대기압

암의 경우도 흙과 같이 마찰재료이기 때문에 위 식과 유사한 파괴규준의 형태로 표현할 수 있을 것이다. 다만 암의 경우는 점착력과 인장강도를 가질 수 있기 때문에 이 부분에 고려가 필요하다. 따라서, 주응력 공간을 Fig. 4.22에 도시된 바와 같이 정수압축을 따라 음의 방향으로 이동시켜 조정하여야 한다. 이때 수직 응력  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 에 Fig. 4.22의 일정응력  $aP_a$ 만큼을 더하여 파괴규준식에 대입하여야 한다.

$$\bar{\sigma}_x = \sigma_x + aP_a \quad (4.13a)$$

$$\bar{\sigma}_y = \sigma_y + aP_a \quad (4.13b)$$

$$\bar{\sigma}_z = \sigma_z + aP_a \quad (4.13c)$$

여기서  $a$ 는 무차원 정수이며  $aP_a$ 는 암의 인장강도효과를 반영하게 된다.

세 정수  $m$ ,  $\eta_1$  및  $a$ 의 크기에 따라 파괴면의 형상이 달라지나 이들은 서로 상호작용을 한다. 예를 들면 암의 일축압축강도 계산시에 서로 상호영향을 미친다. 따라서 몇몇 경위의  $m$ ,  $\eta_1$  및  $a$ 의 조합은 동일한 일축압축강도로 구하여 질 수 있다.

파괴시의  $(I_1^3/I_3 - 27)$ 과  $(P_a/I_1)$ 관계를 양면대수지에 그려 얻은 상관선의 기울기로  $m$ 을 구하고  $(P_a/I_1)=1$ 일 때의  $(I_1^3/I_3 - 27)$ 값을  $\eta_1$ 으로 한다.

실험 데이터로 이들 세 정수를 구하기 위하여는 먼저  $a$ 값을 설정한 후  $aP_a$ 를 수직응력에 더한 후 식( 4.12)에 대입한다. 그런 후  $\eta_1$ 과  $m$ 을  $(I_1^3/I_3 - 27)$ 과  $(P_a/I_1)$ 관계를 양면대수지상에서 구한다.  $a$ 를 다시 변경하여 동일 작업을 반복 실시하여 다른 조합의  $\eta_1$ 과  $m$ 을 구한다. 이때  $a$ 값의 설정을 원활히 하기 위하여  $aP_a$ 를 Fig. 4.22에서 보는 바와 같이 암의 일축압축강도보다 약간 크다는 사실을 참조할 필요가 있다.

Fig. 4.23, 25, 27은  $m$ ,  $\eta_1$ 값의 실험결과를 정리한 결과이다.

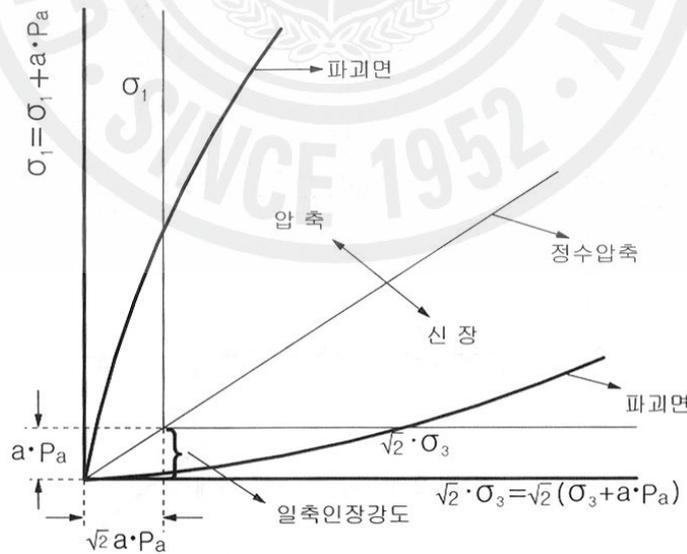


Fig. 4.22 Lade failure criterion

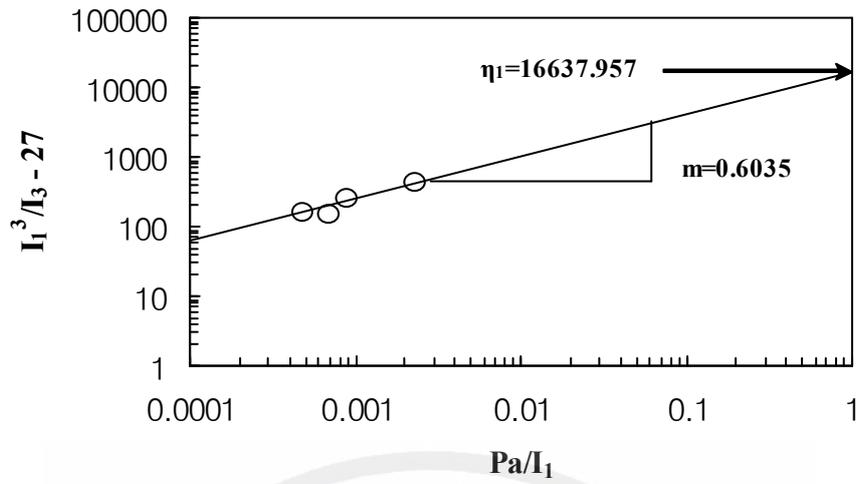


Fig. 4.23 Estimation of  $m$  and  $\eta_1$  in the Pyoseonri Basalt

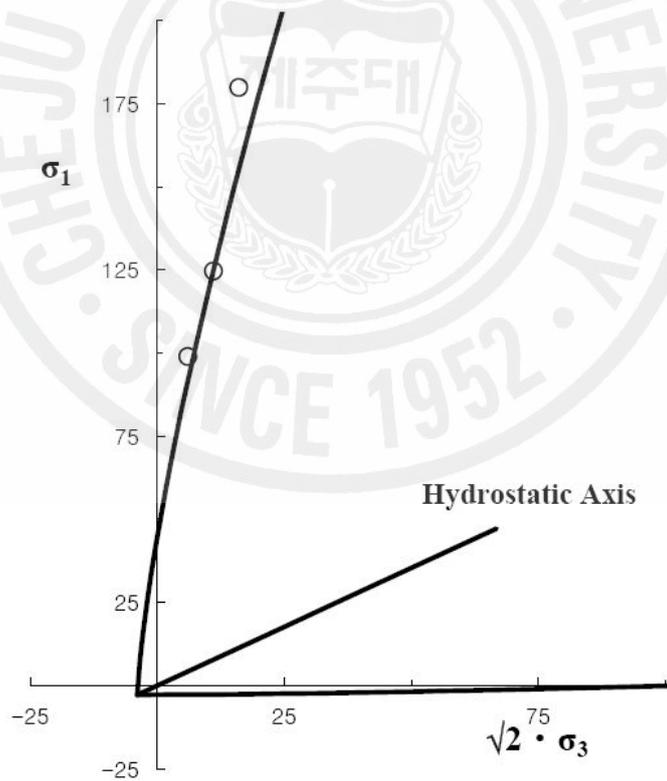


Fig. 4.24 Lade failure criterion of the Pyoseonri Basalt

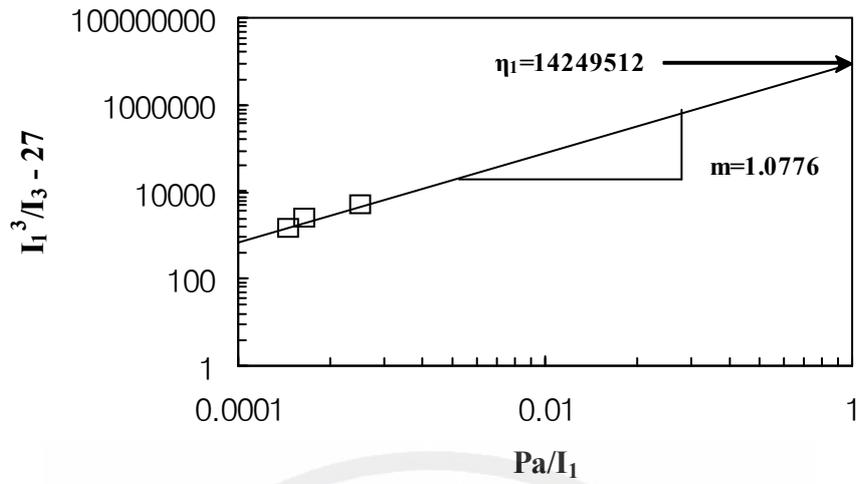


Fig. 4.25 Estimation of  $m$  and  $\eta_1$  in the Trachybasalt

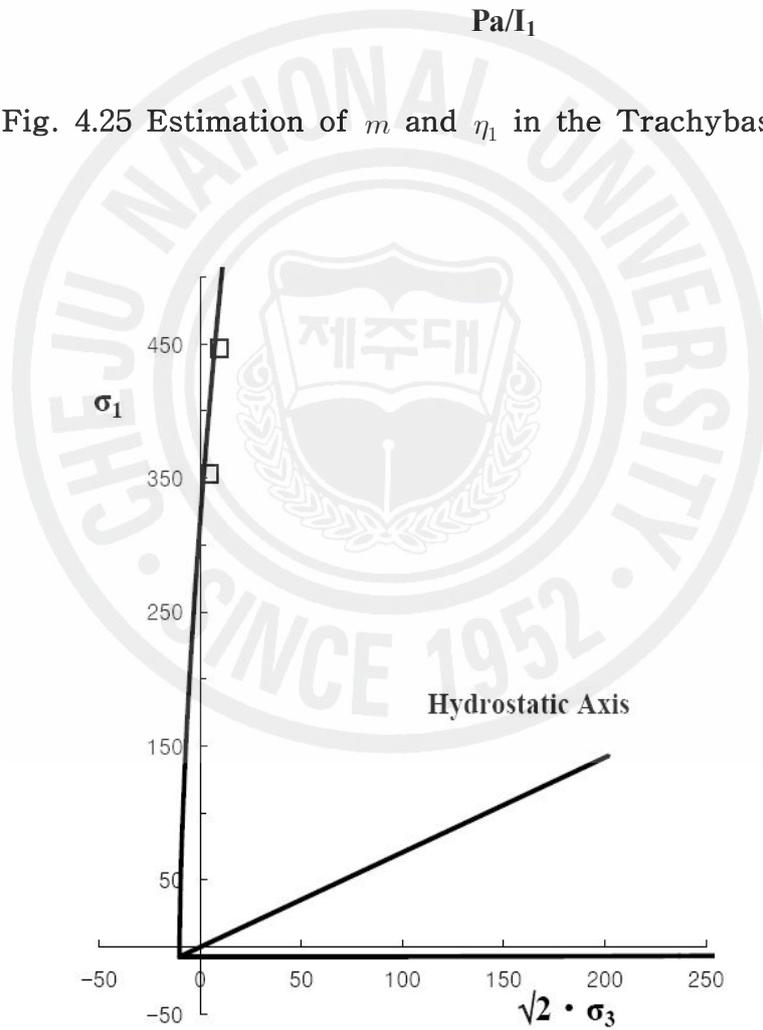


Fig. 4.26 Lade failure criterion of the Trachybasalt

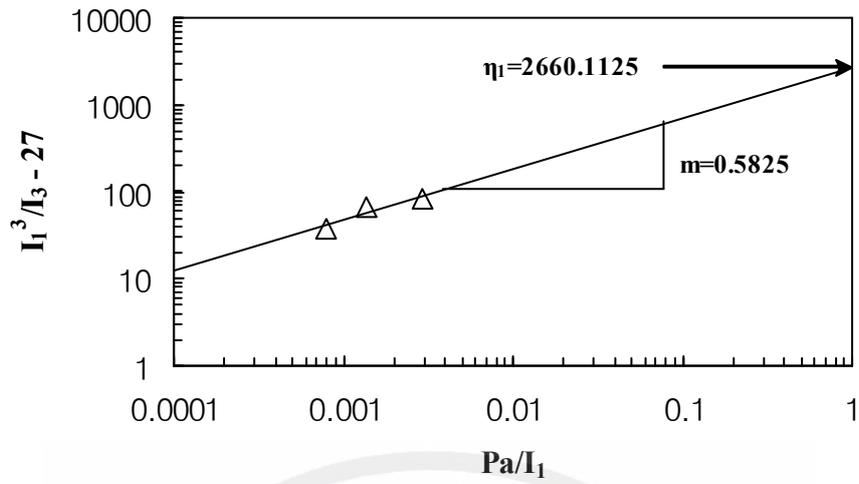


Fig. 4.27 Estimation of  $m$  and  $\eta_1$  in the Scoria

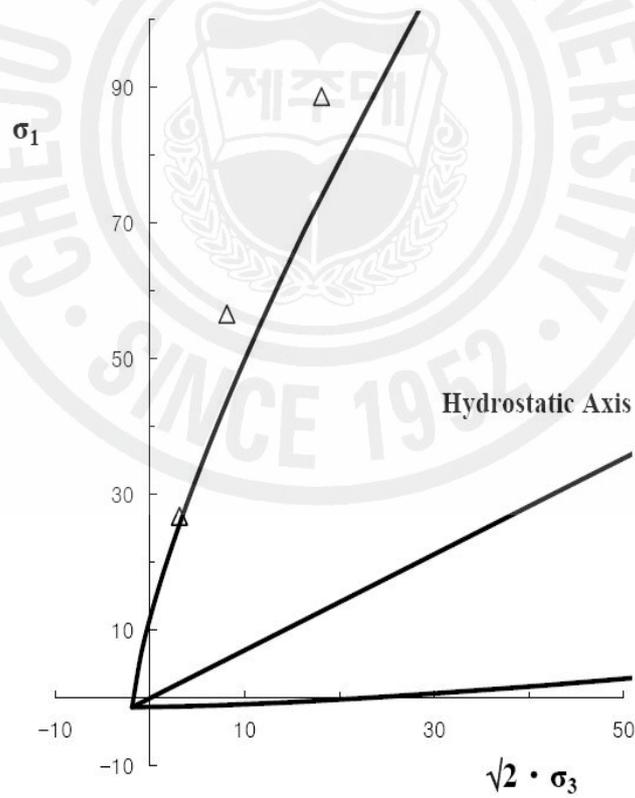


Fig. 4.28 Lade failure criterion of the Scoria

식 (4.12)로 얻어지는 파괴면은 주응력공간상에서 Fig. 4.24, 26, .28에서 보는 바와 같이 응력축의 원점에서 정수압축을 따라 음의 방향으로 이동된 정점을 가지는 비대칭 총알모양이다. 정점에서의 각도는  $\eta_1$ 의 값에 따라 증가한다. 또한, 이 파괴면은 정수압축에 대하여 볼록한 형태를 가지며 곡률은  $m$ 값에 따라 증가한다.

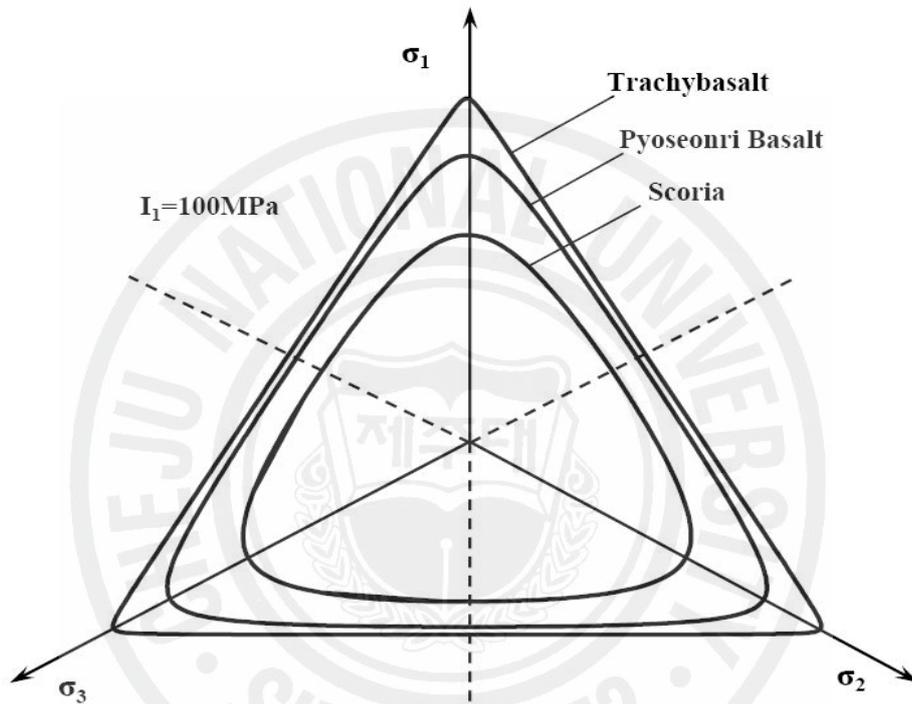


Fig. 4.29 Traces of failure surfaces shown in Octahedral plane

$\eta_1$ 이 증가할수록 파괴면 단면형상은 원형에서 부드럽고 매끄러운 모서리를 가지는 삼각형으로 변하고 있다.  $m > 0$ 인 경우에는 파괴면의 단면형상은  $I_1$ 의 값이 증가함에 따라 삼각형에서 보다 원형쪽으로 변한다.

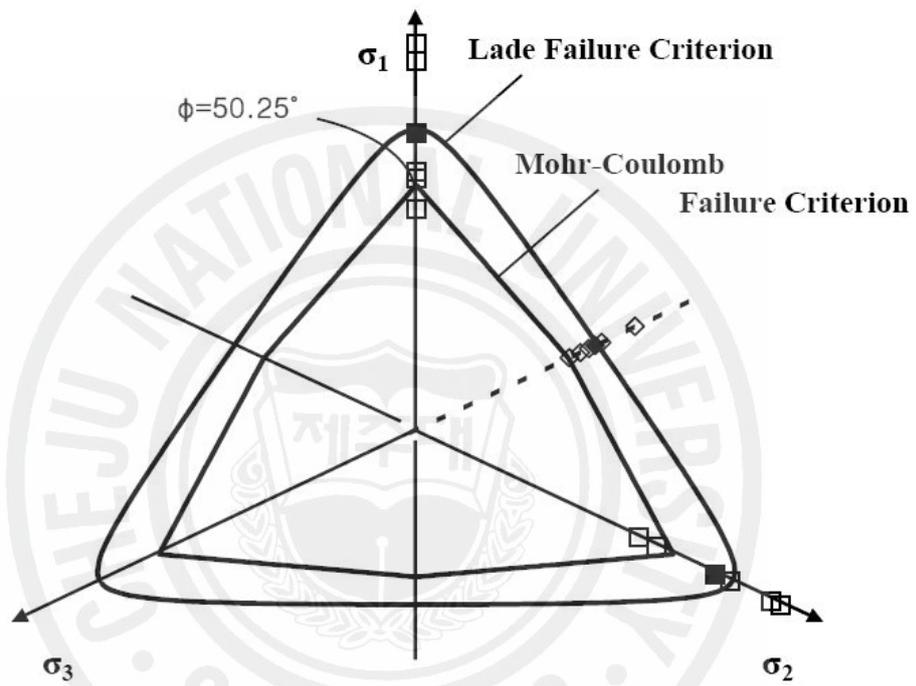


Fig. 4.30 Failure surfaces for the Pyoseonri Basalt shown in Octahedral plane. Mohr-Coulomb failure surfaces shown for comparison

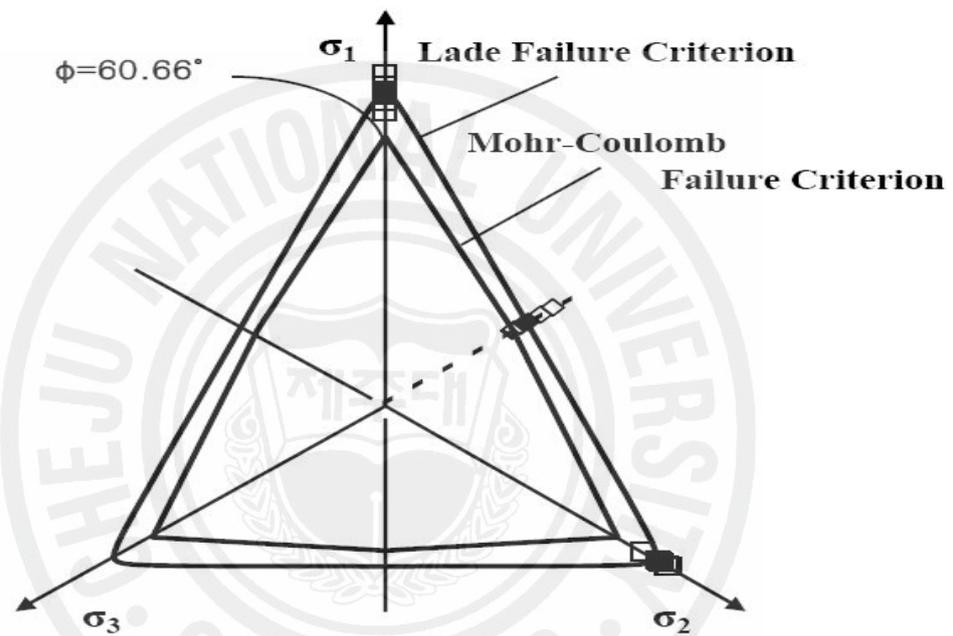


Fig. 4.31 Failure surfaces for the Trachybasalt shown in Octahedral plane. Mohr-Coulomb failure surfaces shown for comparison

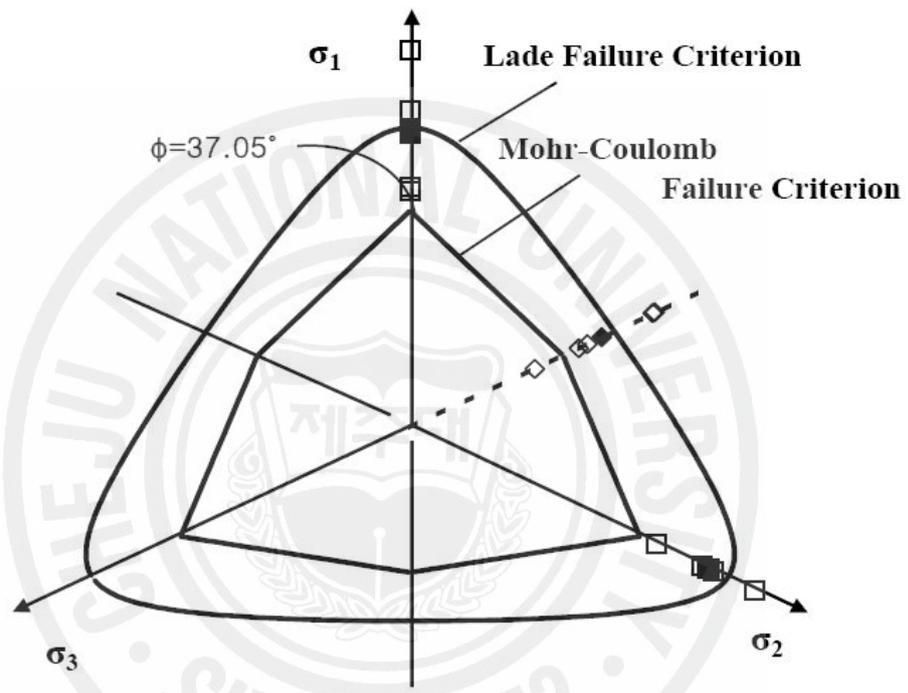


Fig. 4.32 Failure surfaces for the Scoria shown in Octahedral plane. Mohr-Coulomb failure surfaces shown for comparison

#### 4.4.4 각 파괴기준의 비교

세 시료에 대하여 Mohr-Coulomb의 파괴기준, Hoek-Brown의 파괴기준 및 Lade의 파괴기준을 각각 적용하여 점착력과 내부마찰각을 산출하여 보았다. 그 결과, Table 4.9와 같다. 그리고 Fig. 4.33~35에서 보듯이 암반 실험치들을  $\sigma_1 - \sigma_3$  그래프 상에 나타내었을 때 작은 압력하에서는 Hoek-Brown 파괴기준이, 높은 압력하에서는 Mohr-Coulomb 파괴기준이 더 잘 들어맞는 결과를 보여줌을 알 수 있다.

**Table 4.9 Comparison with failure criterion estimated by each method**

	Mohr-Coulomb 파괴기준		Hoek-Brown 파괴기준		Lade 파괴기준	
	점착력 c	내부마찰각 $\Phi$	점착력 c	내부마찰각 $\Phi$	점착력 c	내부마찰각 $\Phi$
표선리 현무암	5.35MPa	50.25°	4.77MPa	52.47°	5.57MPa	53.14°
조면암질 현무암	16.99MPa	60.66°	14.69MPa	60.70°	28.11MPa	65.88°
Scoria	2.33MPa	37.05°	2.22MPa	47.60°	2.82MPa	39.40°

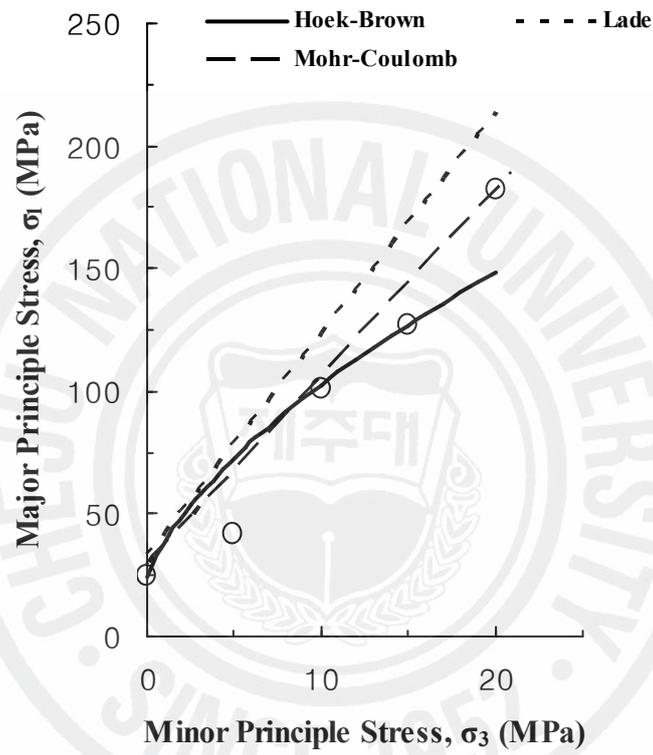


Fig. 4.33 Plot of failure criterion estimated by each method in the Pyoseonri Basalt

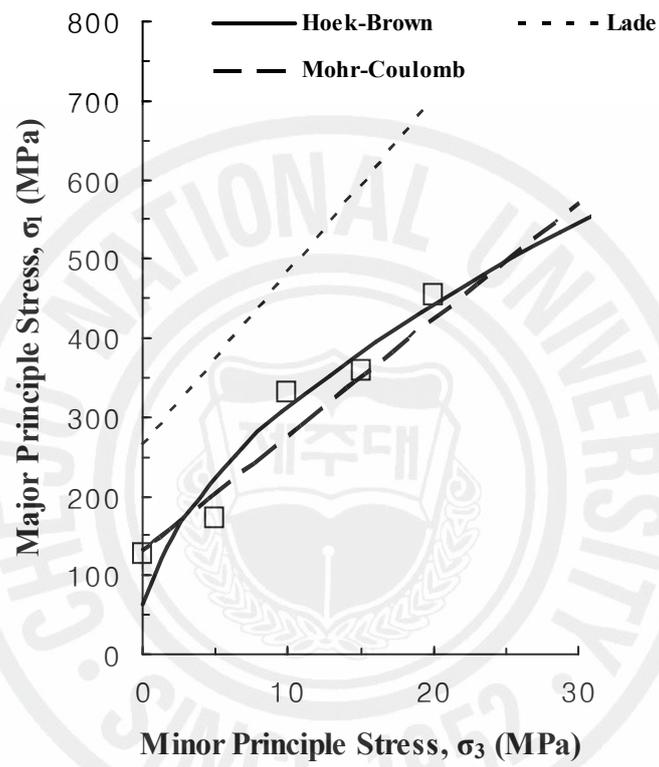


Fig. 4.34 Plot of failure criterion estimated by each method in the Trachybasalt

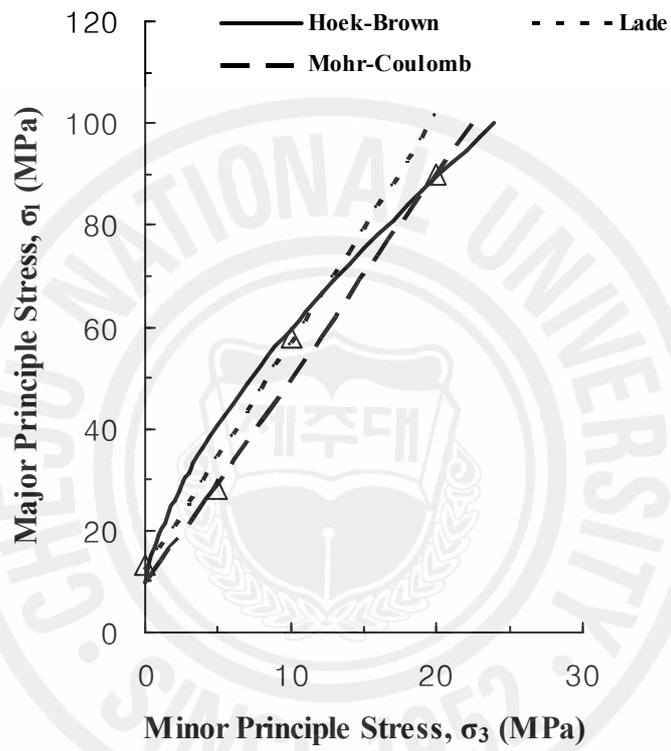


Fig. 4.35 Plot of failure criterion estimated by each method in the Scoria

## V. 결론

본 연구에서는 제주특별자치도 서귀포시 성산읍 지역의 한 시추공으로부터 얻은 시료에 대하여 물리적·역학적 특성에 알아보려고 다양한 시험을 하였다. 그리고 암석의 강도에 영향을 미치는 가압속도, 암석의 이방성, 수분의 함유량에 대하여 각각 강도시험을 하였고 암반의 파괴규준에 대하여 분석해 보았다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 표선리 현무암은 일명 침상장석감람석현무암으로 회색 내지 암회색의 다공질이며, 감람석을 반정으로 함유하고 침상의 장석이 특징적이다. 흡수율은 2.973%이고, 비중은 2.337, 투수계수는  $1.21 \times 10^{-5}$  cm/s, 압축강도와 인장강도는 각각 41.19MPa, 3.32MPa 이다.
2. 조면암질 현무암은 회색을 띠며 매우 치밀하고 견고하다. 흡수율은 0.86%, 비중은 2.849, 투수계수는  $5.47 \times 10^{-7}$  cm/s, 압축강도는 183.08MPa, 인장강도는 10.33MPa로서 인장강도는 압축강도의  $\frac{1}{18}$  정도의 강도를 보이고 있다. 반면, Soria는 흡수율은 8.284%, 비중은 2.051, 투수계수는  $3.04 \times 10^{-3}$  cm/s, 압축강도는 20.79MPa, 인장강도는 2.37MPa로서 압축강도의  $\frac{1}{9}$  정도의 강도를 보이고 있다. 그리고 비중이 클수록 흡수율과 투수계수가 작아지는 경향을 나타나고 있다.
3. Schmidt hammer test에서 얻은 추정강도와 일축압축시험에서 얻은 강도는 다소 차이를 보이고 있으며 강도가 높은 시료일수록 그 오차는 심하다. 그래서  $\sigma_{pre} = a \cdot e^{b \cdot R}$  와 같은 지수함수로서 표현하였다. 여기서 a와 b는 암종에 따른 변수이다.

4. 암석의 이방성 시험결과, 수평면의 경사각이  $0^\circ$ 와  $90^\circ$ 일 때는 강도가 거의 비슷하여 수평방향과 연직방향에 대해서는 등방성을 보이는 반면,  $45^\circ$ 인 경우에는 최소로서 다른 강도에 비해 12~26%까지 저하되는 것을 알 수 있다.
5. 암석의 강도에는 여러 가지 요인에 의해서 강도가 좌우되는데, 본 연구에서는 가압속도, 암석의 이방성, 수분의 함유량에 따른 강도시험을 한 결과, 가압속도가 빠를수록, 수평방향 혹은 연직방향에 가까울수록, 수분의 함유량이 적을수록 강도는 높아지는 경향을 보이고 있다.
6. 각 암반의 파괴규준에 대하여 적용한 결과, Hoek-Brown의 파괴규준은 Mohr-Coulomb의 파괴규준보다 점착력은 대체로 낮게 평가되는 반면, 내부마찰각은 크게 평가되고 있고 Lade의 파괴규준은 Mohr-Coulomb의 파괴규준보다 점착력과 내부마찰각이 크게 나오고 있다. 이 처럼 암반의 파괴규준이 서로 다른 결과를 나오기 때문에 암반의 파괴규준을 선정시에는 신중한 결정이 필요하겠다.

## VI. 참고문헌

- 강병남, 2000, 제주도 지하수의 고도별·지역별 수질특성, 제주대학교 석사학위논문, pp.4-5.
- 김광일, 2005, 현무암 석분 슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp.12-13, pp.37-40.
- 김만일, 1999, 암반손상에 따른 투수성 변화에 대한 연구, 안동대학교 석사학위논문, pp.15-27.
- 김용필, 1997, 지반공학 시험법 및 응용, 세진사, pp.515-539.
- 김일중, 2003, 단면도 분석을 통한 제주도의 지형 연구, 동국대학교 석사학위논문, pp.3-9.
- 남정만, 1993, 대응력반전시 모래의 거동에 관한 연구, 중앙대학교 박사학위논문, pp.8-45.
- 마상준, 1992, Schmidt Hammer에 의한 岩石의 壓縮強度 比較 研究, 인하대학교 석사학위논문, pp.7-11.
- 민경원, 진호일, 1999, 철원지역 현무암의 암석학적 및 물리적·화학적 특성, 강원대학교 부설 석재복합신소재 제품연구센터, 석재연 논문집, Vol. 4, pp. 258-259.
- 박기화, 2002, 제주도 지질 안내 및 관광화를 위한 연구, 한국지질자원연구원, 제주발전연구원, pp.10-20.
- 박 현, 2004, 층서에 따른 표선리 현무암 내의 철이온에 관한 연구, 동국대학교 석사학위논문, pp.17-19.
- 소재관, 2002, 송이(Scoria)의 거동특성 및 예측에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp.3-28.
- 손인석, 1997, 濟州火山島의 岩石層序 및 年代層序, 제주대학교 박사학위논문, p.19.

- 송시태, 2000, 제주도 암괴상 아아용암류의 분포 및 암질에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문, pp.6-14.
- 신승훈, 2002, 제주도 송이의 공학적 특성과 건설재료로서 활용에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문, pp.14-35.
- 엄관용, 2002, 제주도 화산암의 역학적 특성에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문, pp.22-23, p.53.
- 윤지선, 1990, 岩石破壞力學과 그 應用, 구미서관, pp.1-60.
- 윤지선, 박종관, 2003, 토목기술자를 위한 암반역학, 구미서관, pp.169-242.
- 이상득, 2003, 점하중시험에 의한 암반강도 추정, 충북대학교 석사학위논문, pp.16-17.
- 이 송, 이수근, 1995, 슈미트해머 수치를 이용한 한국 화강암의 일축압축강도 추정방법, 대한토목학회 논문집, Vol. 15, No. 1, pp.199-210.
- 이인모, 2005, 암반역학의 원리, 도서출판 새론, pp.89-122.
- 이창원, 2000, 암반의 점착력과 마찰각의 산정방법에 따른 적용성에 관한 연구, 조선대학교 석사학위논문, pp.5-17.
- 최한규, 2004, 마천석재의 물리적 특성에 관한 연구, 조선대학교 석사학위논문, p.11-16.
- 홍원표, 1999, 기초공학특론( I ), 얇은 기초, 중앙대학교 출판부, pp.129-134.
- Alfreds R. Jumikis, 1983, Rock Mechanics, 2nd. ed., Trans Tech Publications, pp.191-206.
- Hoek, E and Brown, E.T., 1997, Practical Estimates of Rock Mass Strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34, No. 8, pp.1165-1186.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W, 1969, Fundamentals of Rock Mechanics, Chapman & Hall, London
- Moonkyum Kim, Poul V. Lade, 1985, A Study of Constitutive Models for Frictional Materials, Report to the National Science Foundation Grant No. CEE 8211159, UCLA, pp.38-75.
- Richard E. Goodman, 1980, Introduction to Rock Mechanics, John Wiley & Sons, pp.50-90.

## 감사의 글

본 논문이 완성되기까지 학부와 대학원과정을 거쳐 오면서 많은 가르침을 주신 남정만 교수님께 제일 먼저 머리 숙여 감사드립니다. 아울러, 저의 미숙한 부분을 일깨워 배움으로 인도해주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님, 박상렬 교수님, 김상진 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 그리고 제게 좀 더 많은 것을 볼 수 있도록 아낌없는 조언을 해주신 탐라대학교 정광옥 교수님께도 감사드리며, 현재의 만족보다는 더 큰 미래를 볼 수 있도록 도와주신 중앙대학교 홍원표 교수님께도 감사드립니다.

그 동안 연구실 선배님들과 함께 배움을 익히고 수많은 실험을 통하여 서로에게 격려와 배려를 해줌으로써 제게 소중한 것을 얻게 해주었습니다. 조영웅 선배님, 소재관 선배님, 강충훈 선배님, 오동일 선배님, 강보규 선배님, 김승범 선배님, 김광일 선배님 고맙습니다. 그리고 많은 실험을 도와주고 잘 따라주던 아끼는 연구실 후배들 김영근, 류정완, 김태건, 양창세, 강영민, 홍승룡에게도 고맙습니다.

배움 이외에도 앞으로의 사회생활과 인생에 대해서도 많은 가르침과 조언을 해주신 고찬현님, 장기원님, 김한중님, 고영실님께도 진심으로 감사합니다.

대학원생활을 해 오면서 많은 도움을 주고 정을 쌓아온 양철영, 양태혁, 조성환, 박강일, 승현이형, 김도형, 고행식, 이정환 그리고 이제 막 들어온 홍종완에게 감사합니다. 특히나 대학원을 처음 입문하게 도와주고 졸업할 때까지 늘 곁에서 항상 지켜봐주고 도와준 조성환. 언제나 웃는 모습으로 함께 해주어서 늘 감사히 여겼습니다. 감사합니다.

제가 대학원 생활을 하면서 많은 정보와 도움을 주신 김기영 선배님, 허용 선배님, 그리고 한국기술개발의 유기종 이사님, 장선중 대리님, 농업기반공사의 박병준님께도 감사드립니다.

현재의 제가 여기까지 올 수 있도록 어렵고 힘들때 여러 말보다 소주 한잔을 채워주는 나의 친구들 김영진, 조대철, 김기남, 신영섭, 고희주, 김대안, 김시찬,

김철운, 박경준, 윤희석과 서로의 생활에 최선을 다해 살아가는 친구들 고규연, 강민관, 김자후, 이영록, 박성룡, 송봉주, 문승건, 양제영, 김수철, 김경완, 비록 가까이서는 함께하지 못하지만 멀리서나마 서로를 위하는 김영봉, 차승훈. 우정만큼은 변치 않는 나의 친구들 고맙다.

그리고 늘 미안한 마음과 고마운 마음이 드는 사랑하는 강안숙. 일에 지친 나에게 언제나 오아시스 같은 편안한 휴식을 주어 대학원 2년이란 시간동안 힘들음을 모르고 지내왔던 것 같습니다. 일에 바빠 늘 약속시간이 늦는 나에게 짜증 한번 안내고 오히려 지친 나에게 조그만한 어깨를 내밀며 잠시 쉬라는 여자친구. 그래서 늘 미안하면서도 고맙고 사랑합니다.

그리고 무엇보다도 소중한 나의 가족. 논문쓰는 데 사용된 시료를 손수 잘라주시던 아버지와 밥은 꼬박꼬박 챙겨 먹는 지 늘 걱정하시는 어머니, 자신의 일이 있기에 함께 있지는 않지만 항상 가족을 챙기는 누나, 내가 바빠서 챙기지 못하는 부분을 항상 먼저 챙기고 자신의 꿈을 위해 열심히 살아가는 사랑하는 동생 경애까지 모두 고맙고 사랑하며 앞으로 열심히 잘 해나가도록 노력하겠습니다. 감사합니다.

2006년 마지막 밤을 지새우며...

김 준 호 올림