



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

제주 현무암의 공극률에 따른  
역학적 특성

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學專攻

金 英 瓚

2013年 8月

# 제주 현무암의 공극률에 따른 역학적 특성

指導教授 朴相烈

金英瓚

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2013年 8月

金英瓚의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_

委 員 \_\_\_\_\_

委 員 \_\_\_\_\_

濟州大學校 産業大學院

2013年 8月

# Mechanical Properties of Basalt in Jeju Island with respect to Porosity

Young-chan Kim

(Supervised by Professor Sang-Yeol Park)

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

2013. 8.

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, Ki-Young Kim, Ph.D. of JDC

*August 2013.*

Department of Construction and Environmental Engineering  
Graduate School of Industry  
Jeju National University

# 목 차

List of tables .....	iii
List of figures .....	iv
Summary .....	vi
<b>I. 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1. 연구 배경 및 목적 .....	1
2. 연구 내용 및 범위 .....	2
<b>II. 기존 문헌 연구 .....</b>	<b>3</b>
1. 제주도의 지형과 지질 .....	3
1) 제주도의 지형 .....	3
2) 제주도의 지질 (김일중, 2002) .....	4
2. 제주도 현무암의 물리적 및 역학적 특성 .....	9
1) 권병두 등(1993)의 연구 .....	9
2) 엄관용(2002)의 연구 .....	11
3) 남정만 등(2008a,b)의 연구 .....	13
4) 조태진 등(2009)의 연구 .....	15
<b>III. 시험 계획 및 방법 .....</b>	<b>18</b>
1. 시험계획 .....	18
1) 연구대상지역 및 시료 채취 .....	18
2) 시험 변수 .....	20
2. 시험방법 .....	21
1) 시험 종류 및 기준 .....	21
2) 시험 기구 .....	22

IV. 시험 결과 및 분석 .....	24
1. 시험결과 .....	24
1) C-공시체에 대한 시험결과 .....	24
2) T-공시체에 대한 시험결과 .....	26
2. 시험 결과 분석 .....	32
1) 공극률 측정 방법에 따른 영향 .....	32
2) 공극률과의 관계 .....	33
3) 탄성과속도와의 관계 .....	37
V. 결    론 .....	39
VI. 참고문헌 .....	41

## List of Tables

Table 2.1. Geological properties of intact rock in Jeju island (KIGAM, 1:25,000) .....	8
Table 2.2. Summary of test results (Eum, 2002) .....	12
Table 2.3. Summary of test results (Nam et al., 2008a) .....	13
Table 2.4. Physical properties of Hallasan trachyte (Cho et al., 2009) .....	15
Table 3.1. Specimen for compression strength test .....	20
Table 3.2. Specimen for tensile strength test .....	21
Table 3.3. Standard of test .....	22
Table 3.4. Specification of universal testing machines .....	23
Table 4.1. Summary of test results for C-specimens .....	28
Table 4.2. Summary of test results for T-specimens .....	31

## List of Figures

Fig. 2.1. Shaded relief image of Jeju island .....	3
Fig. 2.2. Geologic map of Jeju island(KIGAM, 1:250,000, 1973) .....	5
Fig. 2.3. Distribution of porosities and bulk densities (Kwon et al., 1993) .....	10
Fig. 2.4. P-wave velocities vs. densities and porosities for water -saturated samples (Kwon et al., 1993) .....	10
Fig. 2.5. Test results (Nam et al., 2008b) .....	14
Fig. 2.6. Variation of physical indices with respect to weathering (Cho et al., 2009) .....	16
Fig. 3.1. Location of the study area .....	18
Fig. 3.2. Dimension of C-specimen .....	19
Fig. 3.3. Coring machine .....	19
Fig. 3.4. Test specimen .....	20
Fig. 3.5. Notation for specimen .....	21
Fig. 3.6. Equipment for tests .....	23
Fig. 4.1. Test result (C-D-A-3) .....	24
Fig. 4.2. Test result (C-D-B-5) .....	24
Fig. 4.3. Test result (C-D-C-4) .....	25
Fig. 4.4. Test result (C-W-A-3) .....	25
Fig. 4.5. Test result (C-W-B-5) .....	25
Fig. 4.6. Test result (C-W-C-2) .....	26
Fig. 4.7. Test result (T-D-A-3) .....	26
Fig. 4.8. Test result (T-D-B-5) .....	29
Fig. 4.9. Test result (T-D-C-3) .....	29
Fig. 4.10. Test result (T-W-A-3) .....	29
Fig. 4.11. Test result (T-W-B-3) .....	30

Fig. 4.12. Test result (T-D-C-5) .....	30
Fig. 4.13. Comparison of methods for porosity determination .....	32
Fig. 4.14. Relation of porosity and UCS .....	35
Fig. 4.15. Relation of porosity and elastic modulus .....	35
Fig. 4.16. Relation of porosity and tensile strength .....	35
Fig. 4.17. Relation of porosity and P-wave velocity .....	36
Fig. 4.18. Relation of porosity and S-wave velocity .....	37
Fig. 4.19. Relation of P-wave velocity and UCS .....	38
Fig. 4.20. Relation of P-wave velocity and tensile strength .....	38

## 요 약 문

최근 국내외적으로 건설공사의 규모가 대형화되고 있으며, 제주도의 경우 또한 제주시로 인구가 집중되면서 고층 아파트 단지가 건설되고, 이에 맞게 기반시설들이 대형화되어 설치되고 있다. 이러한 구조물의 기초가 되는 제주도의 현무암은 육지부의 암반과 달리 다양한 크기의 기공이 분포하고 있다. 그러나 이러한 기공이 역학적으로 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 화산활동에 의해 생성된 기공이 현무암의 역학적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 다양한 시험을 통해 그 관계를 규명하였다.

제주시 조천읍 북촌리 일대에서 기공의 발달 유·무에 따라 채취한 시료에 대해서 기본적인 물성시험과 압축강도, 인장강도 시험을 수행하였고, 결과를 비교·분석하였다. 한국암반공학회에서는 공극률을 측정하는 방법으로 캘리퍼 방법과 부력 이용 방법을 제시하고 있으며, 공극이 비교적 작은 시료에서는 두 방법에 차이가 없었으나 공극이 큰 시료에서는 표면공극의 고려 여부에 따라 값의 차이가 나타났다. 표면에 공극이 큰 시료의 경우 표면공극을 고려하는 부력 이용 방법을 사용하는 것이 보다 합리적이라는 결론을 얻었으며, 시험결과를 비교·분석할 때 부력 이용 방법으로 결정된 공극률을 사용하였다.

공극률의 증가에 따라 일축압축강도는 지수적으로 감소하였으며, 상관성이 매우 높게 나타났고, 탄성파속도 또한 공극률의 증가에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 나타냈으나 일축압축강도에 비해서는 상관성이 낮았다. 본 연구에서 암석의 탄성계수와 인장강도는 공극률과의 상관성을 보이지 않았다. 탄성파속도와 일축압축강도는 선형적으로 증가하는 비례관계를 나타냈으나, 탄성계수와는 상관성을 찾을 수 없었다. 일반적으로 습윤상태의 일축압축강도가 건조상태보다 낮게 나타나지만, 본 연구의 경우 시료상태에 따른 강도변화는 찾을 수 없었으며, 시료의 상태보다는 시료의 공극률에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

# I. 서론

## 1. 연구 배경 및 목적

제주도는 오랜 기간 동안 여러 차례의 화산활동으로 인해 형성된 섬이다. 화산암은 화산의 활동시기와 활동양상에 따라 다양한 특성을 나타내기 때문에 제주도의 현무암은 지역마다 지질학적으로 다양하게 분포되어 있고 그 역학적 특성 또한 지역마다 차이를 나타내고 있다. 특히 화산이 분출될 때 마그마에 작용하던 압력이 낮아짐으로 인해 그 속에 존재하던 가스가 표면으로 올라오면서 형성된 기공들은 마그마의 점성을 비롯한 여러 환경요소로 인하여 그 크기와 분포가 다양하게 형성되었다.

최근 국내외적으로 건설공사의 규모가 대형화 되어 가고 있으며, 제주도의 경우 또한 제주시로 인구가 집중됨에 따라 고층 아파트 단지가 많이 형성되고 있고, 이에 따라 도로와 부대시설이 대형화 되어가고 있다. 제주도는 화산암이 전체적으로 분포되어 있어 대형 토목구조물이나 고층 건축물의 기초를 설치하기에 매우 안정적인 지반을 제공할 것으로 생각할 수 있으나 제주도의 현무암은 육지부의 암반과 달리 다양한 크기의 기공이 분포하고 있다. 현재 기공이 많은 암반에 대한 뚜렷한 기준이 제시되어 있지 않을 뿐만 아니라 이런 기공이 역학적으로 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구가 전무한 실정이다.

제주도 현무암의 공학적 특성을 규명하기 위한 연구가 엄광용(2002)을 시작으로 남정만 등(2003~2009)에 의해 진행되어 기공이 없는 현무암과 기공이 많이 분포한 현무암의 물리적 특성과 강도시험에 대한 결과를 비교 분석하였지만 기공이 현무암의 공학적 특성에 미치는 영향을 평가하지는 못하였다. 조태진 등(2009)의 연구에서 공극률과 역학적 성질과의 관계를 비교하기는 하였으나 여기서의 공극률은 심하게 풍화된 한라산조면암의 풍화정도를 반영한 수치로 생성과정에서 형성된 기공과는 다른 개념으로 접근한 것이다.

본 연구에서는, 기공이 다양하게 분포되어 있는 제주도 현무암의 경우 공극률에 따라 암석의 역학적 성질이 어떻게 달라지는지를 시험을 통해 확인하고 이에 따른 역학적 관계를 규명하고자 한다.

## 2. 연구 내용 및 범위

본 연구에서는 제주도 현무암의 공극에 따른 물리적, 역학적 특성 및 강도에 미치는 상관 관계를 살펴보기 위하여 연구대상지역을 제주도의 동북지역인 조천읍 북촌리 일대로 선정하여 겉보기로 기공의 분포가 다른 3종류의 시료를 동일한 지역에서 채취하였다. 시료의 조건을 동일하게 유지하기 위하여 종류별로 하나의 암반에서 동일한 방향에 대해서 코어를 채취하였다.

채취한 현무암에 대해서는 기본적인 물성시험인 비중 및 흡수율시험, 공극률시험, 탄성과속도 시험을 수행하였으며, 강도를 측정하기 위하여 일축압축강도시험을 수행하였고, 압열시험에 의한 간접인장강도를 측정하였다. 암석의 함수상태에 따른 영향을 확인하기 위하여 건조시료와 표면건조 습윤시료에 대해서 동일하게 시험을 수행하였다.

## II. 기존 문헌 연구

### 1. 제주도의 지형과 지질

#### 1) 제주도의 지형

제주도는 약 200만년 전부터 역사시대까지 발생한 화산활동에 의해 형성된 화산섬으로 형성시기가 비교적 젊고 개석(開析)의 정도가 얼마되지 않아 화산 원지형이 잘 보존되어 있다. 제주도는 한반도 서남단에서 남쪽으로 약 90km 떨어져 있는 대륙붕 위의 화산섬으로 본 섬을 포함한 8개의 유인도와 51개의 무인도로 구성된다. 평면상으로 제주도는 동서를 장축으로 한 타원 형태이며, 장축(동서)의 길이가 약 74km이고, 단축(남북)의 길이가 약 34km이다. 제주도의 면적은 1,849.2 km<sup>2</sup>이고, 섬 중앙에 해발고도 1,950m인 한라산이 위치하고 있다. 한라산을 중심으로 동서방향으로는 3~5°의 완만한 경사를, 남북방향으로는 5~7°의 다소 급한 경사를 이루고 있다.

제주도의 전체적인 지형은 중앙부의 한라산 순상화산체 및 그 위에 발달한 단



Fig. 2.1. Shaded relief image of Jeju island

성화산, 그리고 해안 저지대에 발달한 용암대지로 크게 구분된다(Fig. 2.1). 제주도 중앙에 위치한 한라산은 전형적인 순상화산체를 이루고 있으며, 한라산 정상 부에는 장경 550m, 단경 375m인 산정분화구(백록담)가 있고, 그 주변에는 주로 섬의 장축 방향을 따라 제주어로 ‘오름’이라고 하는 약 360여개의 단성화산이 산재하여 제주도의 전반적인 지형 및 경관특성을 지배하고 있다. 특히, 해안 주변에는 수성화산활동(Hydrovolcanic activity)이 일어나 응회구 및 응회환이 분포하며, 이들은 해수의 침식작용으로 독특한 해안 지형을 보이고 있다. 제주도 지형의 또 다른 특징 중의 하나는 지경이 발달한 대규모의 용암동굴이다. 한라산 주변에 위치한 단성화산으로부터 점성이 작고 유동성이 큰 현무암질 용암류(lave flow)가 해안 쪽으로 반복해서 유출되면서 그 내부에 세계적인 규모의 용암동굴 시스템이 형성되었다(제주도, 2006).

## 2) 제주도의 지질 (김일중, 2002)

제주도의 지질은 기반암과 화산 분출암인 현무암류, 조면암류, 조면암질 안산암류와 화산 분출물 및 화산 쇄설성 퇴적암, 사구로 구성되어 있다. 시추된 여러 자료에 따르면 0.5~10m 미만의 두께를 갖는 현무암질 용암류는 대체로 평균 해수면 아래 50m내외까지 분포하고 있다. 이들 용암류 사이에는 두께가 얇은 고토양층, 사력층, 역질사암 또는 사암층의 퇴적층의 협재 되기도 하며, 용암류의 상하부에는 클링커(clinker), 균열 및 절리대가 발달되어 있어 지하수 함양에 좋은 유로 역할을 해주고 있다. 현무암류 하부에는 20~50m두께를 갖는 치밀 견고한 조면질현무암류가 분포하고 있는데, 대체적으로 절리가 발달하고 있다. 조면질현무암류 하부에는 다량의 패류 화석과 함께 역질사암, 사암, 이암, 사질이암 등으로 이루어져 있는 서귀포층이 분포하고 있는데, 북촌-표선을 연결한 선의 동부지역에는 결층되어 있다. 본 층의 지하 분포심도는 지역별로 차이를 나타내어 북부와 서부 지역은 평균 해수면 아래 30~70m 정도에서 포착되는 반면, 안덕에서 남원에 이르는 남부지역에서는 평균해수면 상부에 분포하고 있다. 서귀포층 하부에는 세립질의 모래와 실트질로 이루어져 있는 U층이 평균 150m두께로 분포하는데 이층은 종달, 송당, 성산, 성읍, 신흥, 상호, 중문, 함덕, 금악 등의 온천 탐사심부 시추공에서 확인되고 있으며, 제주도 전역의 지하심부에 광범위하게 분포하

고 있는 것으로 해석되고 있다. U층 하부에는 한반도 남동부 해안의 백악기 응회암과 대비될 것으로 예측되는 역질응회암이 존재하고 있으며, 역질응회암층 하부에는 약 5,800만년 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 아래 312m, 평균 250m부터 시작되고 있으며, 남부지역은 기반암의 분포 심도가 해수면 아래 210m ~ 205m, 평균 259m로서 동부지역과 비슷한 심도에 위치하고 있음을 알 수 있다. 또한 북부지역의 경우는 해수면 아래 156m ~ 206m부터 기반암이 포착되고 있어 동부와 남부지역보다는 기반암이 얇은 심도에 위치하고 있다.

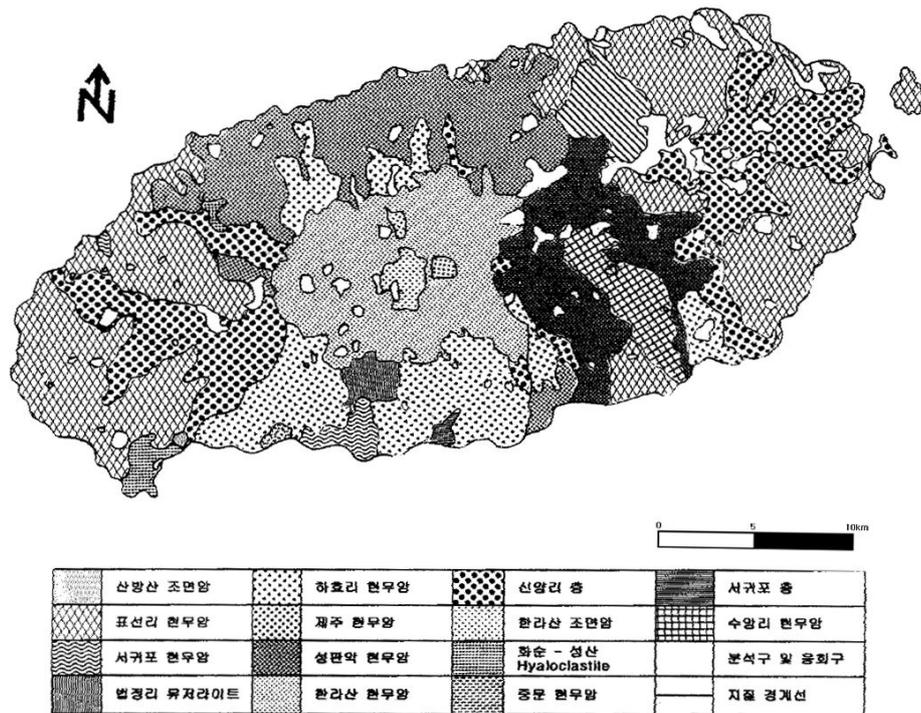


Fig. 2.2. Geologic map of Jeju island (KIGAM, 1:250,000, 1973)

## (2) 미고결 퇴적층(U층)

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

## (3) 화산 쇄설성 퇴적층

서귀포층은 지상에는 서귀포시 천지연폭포 남측 해안 절벽에 높이 약 30m 연장 약 11km 규모로 분포하고 있으나 지하에는 북촌-표선선의 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 직하위에 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 장식과 감람석 반정을 함유하고 있는 침상장식감람석현무암이 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 해안저지대에 분포하고 수평굴을 형성하고 있다.

따라서 서귀포층을 피복하며 대부분 지역의 지표지질을 구성하는 지질매체는 조면암질 내지 현무암질 용암류와 용암의 유동에 의해 형성된 크링커, 스코리아,

화산쇄설층과 수성화산쇄설층 그리고 화산활동 휴식기에 형성된 미고결 표생쇄설층이며, 이들 대부분은 투수성이 매우 양호하고 특히 숨골, 꽃자왈 등의 투수성 지질구조를 따라 강수의 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 수십m 이상으로 현무암질 용암류보다 훨씬 두껍고 치밀·견고한 편이며, 수직 절리가 발달되어 있어 지하수 함양과 유동에 좋은 역할을 해주고 있다. 또한 화산암괴·자갈·모래·화산재 등으로 이루어져 있는 응회구 퇴적층은 성산포, 서귀포, 화순~송악산, 수월봉~용수에 이르는 해안변 지역에 간헐적으로 분포하고 있는데, 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 장축 방향의 배열이 우세하고 고산리에서 사계리를 거쳐 서귀포에 이르는 해안을 따라서는 불연속적으로 분포하며 성산일출봉, 우도 등에도 분포하는데, 화구는 칼데라를 이루거나 한쪽이 무너져 있는 모습을 띈다. 해안에 모래가 바람에 의해 내륙 쪽으로 운반되어 형성된 사구층은 구좌 - 성산 지역과 표선, 협재, 화순 등지에 분포하고 있다. 이들 사구는 주로 패사로 구성되며 상부는 세립질이고 하부로 갈수록 자갈이 혼입되어 있다. 김녕·상도 및 표선 지역에서의 사구층은 내

록 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, 1:25,000)

岩	중구분	분포 및 특징
기 반 암	화강암류	현무암질 화산쇄설층 내의 중생대 주라기 화강암이 포획암으로 발견
	유문암질 응회암	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. (침식저항력강함)
	화순층	남북해안저지대에 분포, 조면암과 현무암의 큰 암편 다량 함유
	신양리층	제주도 동남단에서 굵은 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 중산간 지대에 분포, 다공질
	법정리조면암	서귀포와 중문사이 중산간 지대에 분포
	시흥리현무암	동서 해저 지대에 분포, 다공질
	성판악현무암	성판악화구에서 분출, 조밀하고 견고한 다공질 암석
	한라산현무암	고산지대와 산악지대에 분포, 흑색이 뚜렷
	한라산 조면암질안산암	백록담화구벽 형성
	백록담현무암	한라산 정상 서쪽 고산지대, 유상(流像)구조 발달
	기생화산분출물	분석구이며 상당량의 화산재 함유

## 2. 제주도 현무암의 물리적 및 역학적 특성

제주도의 현무암은 지질학적으로 매우 중요한 가치를 지니고 있어서 많은 연구자들이 이에 대해 관심을 가지고 연구를 진행하여 왔으나 현무암의 물성과 역학적 관계에 대한 연구는 많지 않다. 현무암의 물성과 역학적 관계에 대한 연구 중 대표적인 것은 제주도 화산암의 역학적 특성(엄관용, 2002), 제주도 표선리 현무암의 역학적 특성 및 강도(김준호, 2006), 제주도 현무암의 공학적 특성(남정만 등, 2008a), 제주도 현무암의 압축 및 인장강도에 대한 영향요인 분석(남정만 등 2008b), 풍화진행에 따른 한라산조면암의 역학적 특성 변화(조태진 등, 2009) 등이 있고, 권병두 등(1993)이 수행한 제주도에 분포하는 화산암류의 물리적 특성은 제주 전역에 분포하는 현무암의 물리적 성질에 대해 정리하고 있다. 이 장에서는 본 연구에 중요한 것으로 판단되는 연구성과를 정리 및 검토하였다.

### 1) 권병두 등(1993)의 연구

권병두 등(1993)은 제주도 전역에 분포하는 9종류의 현무암 샘플 73개를 채취하여 밀도, 공극률, 탄성과속도, 전기비저항, 투수율 시험 등의 물성시험을 수행하였고, 지역별 물성 측정치의 분포 양상, 암상에 따른 물성의 변화, 각 물성 측정값 간의 상관관계를 고찰하였다.

본 연구에서 주목할 만한 점은 제주도에 분포하고 있는 암석의 공극률과 체적 밀도의 분포가 매우 밀접한 관계가 있다는 것이다. 연구결과 공극률은 2~36%의 범위로 공극이 거의 없는 암석과 기공이 많이 분포한 다공질의 현무암이 제주도 전 지역에 분포되어 있으며, 지역별로 공극의 분포 경향이 뚜렷이 나타남을 확인할 수 있었다. 암석의 체적밀도는 건조상태에서  $1.69\sim 2.84\text{g/cm}^3$ , 물로 포화된 상태에서  $2.02\sim 2.86\text{g/cm}^3$ 의 범위를 보이며, 동부와 서부에서  $2.3\text{g/cm}^3$  이하의 값을 나타내고, 그 이외의 지역에서는  $2.5\text{g/cm}^3$ 이상의 값을 나타내었는데 Fig. 2.3에서 보는 바와 같이 체적밀도의 분포양상은 공극률의 분포양상과 밀접하게



과속도와 공극률 사이의 실험적인 관계식들은 대부분 입상(granular type) 퇴적 암들에서 얻어진 것으로, Fig. 2.4에 나타낸 것과 같이 제주도 현무암에는 적용하기가 힘들다는 결론을 내렸다. 이는 현무암의 경우 기공의 모양, 크기 등은 암석마다 서로 상이하게 달라지므로 탄성파속도의 변화는 매우 복잡하게 나타나게 되고 따라서 밀도나 공극률 보다는 공극의 모양, 크기, 암석의 조직 등이 탄성파속도에 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단하였기 때문이다.

권병두 등(1993)의 연구는 제주도 전역에서 채취한 암석의 물리적 성질을 시험하여 상관관계를 분석하였으나, 역학적 성질과의 관계에 대해서는 검토되지 않았다.

## 2) 엄관용(2002)의 연구

엄관용(2002)은 제주지역의 현무암에 대한 역학적, 물리적 특성을 연구하고 국내의 대표적 기반암인 화강암과 비교 검토하므로 지반공학적 기초자료를 제공하기 위하여 연구를 진행하였다. 시료는 서귀포시 중문동, 표선면 하천리, 조천읍 북촌리, 남원읍 한남리 일대의 지중 또는 채석장에서 코어로 채취하였으며, 공극의 유무에 따라 유공질 시료와 무공질 시료로 분류하였다. 현무암의 역학적 특성을 파악하기 위하여 일축압축강도, 압열인장강도, 휨강도 시험을 공극별로 각 10개의 시험체에 대해 수행하였고, 비중 및 흡수율 시험을 실시하여 국내의 화강암 및 제주도 타 지역의 시험결과와 비교 분석 하였다.

Table 2.2는 각 시험에 대한 결과를 정리한 것으로 일축압축강도의 경우 무공질 시료는  $524 \sim 1,119 \text{ kg/cm}^2$ , 유공질 시료는  $312 \sim 510 \text{ kg/cm}^2$ 의 값을 나타내어 무공질 시료가 유공질 시료에 비해 약 2배 정도의 강도를 나타내고 있다. 인장강도는 무공질 시료의 경우  $47 \sim 77 \text{ kg/cm}^2$ , 유공질 시료의 경우  $21 \sim 49 \text{ kg/cm}^2$ 의 값을 나타내어 압축강도와 동일하게 무공질 시료가 약 2배 정도 큰 강도를 나타내고 있으며, 압축강도의 7~10% 정도의 수준으로 나타났다. 휨강도의 경우 강도 분포 폭이 비교적 크고 인장강도에 대한 비율이 2배 정도로 일반 암석에 비하여

Table 2.2. Summary of test results (Eum, 2002)

구 분	유공질			무공질		
	평균값	표준편차	범 위	평균값	표준편차	범 위
압축강도 ( $kg/cm^2$ )	411	100.6	312~510	910	192.5	524~1,119
인장강도 ( $kg/cm^2$ )	32	6.7	21~49	66	10.1	47~77
휨강도 ( $kg/cm^2$ )	66	34.4	30~120	84	8.9	82~106
비 중	2.444	0.083	2.298 ~2.528	2.772	0.0561	2.619 ~2.823
흡수율(%)	2.0	0.34	1.4~2.6	1.1	0.019	0.8~1.5

상대적으로 작았다.

국내의 화강암에 비해 제주도 현무암의 강도는  $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{5}$ 로 비교적 작고, 비중은 5%정도 크며, 흡수율은 5~9배로 매우 높게 나타났다. 이것은 구성물질과 생성 과정에 의한 공극의 영향으로 강도는 저하되고 흡수율이 높은 것으로 판단하였으며, 비중이 화강암에 비해 큰 것으로 보아 화강암보다 조밀한 구조를 형성하는 것으로 판단하였다. 각종 보고서를 중심으로 기존의 현무암 시험 결과와 비교한 결과 압축강도는  $\frac{1}{2}$ , 인장강도는  $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$  정도로 작게 분석되고, 비중은 2.07~2.7로 시험결과와 거의 동일하나 흡수율은 1.76~3.94%로 시험결과와 크게 상이한 것으로 나타났다. 이는 현무암의 특징인 공극의 정도에 의하여 강도와 흡수율이 크게 차이가 나는 것으로 판단하였다.

엄관용(2002)은 국내의 화강암과 비교를 통해 기술자들이 제주도 현무암을 이해하고 접근하기 쉽게 제시하였으나, 지질학적 접근 없이 역학적으로만 접근하는 한계를 가지고 있어 시험결과에 대한 분석과 일반화에 한계를 가지고 있다.

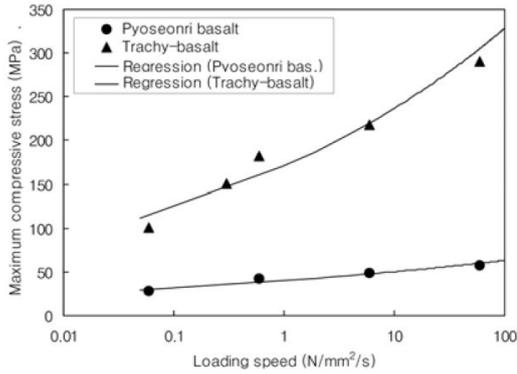
### 3) 남정만 등(2008a,b)의 연구

남정만 등(2008a,b)은 제주도에 주로 분포하고 있는 현무암에 대한 공학적 특성과 강도에 미치는 요인을 살펴보기 위하여 서귀포시 성산읍 일대에서 채취한 시료로 연구를 진행하였다. 시료는 동일한 지역에서 조직이 치밀한 조면암질 현무암과 다공질의 표선리현무암, 화산재로 형성된 스킨리아(scoria)를 채취하였으며, 이에 대해 비중/흡수율시험, 암반투수시험, 슈미트해머시험, 탄성파시험 및 일축압축시험, 압열인장강도시험을 수행하였고, 그 결과를 통해 제주도 현무암의 물리적 및 역학적 특성을 제시하였다. 강도에 영향을 미치는 요인을 확인하기 위해 일축압축시험과 압열인장강도시험시 가압속도와 방향, 습윤상태를 변화시키며 시험을 수행하였고, 그 결과로부터 강도에 영향을 미치는 요인을 분석하였다.

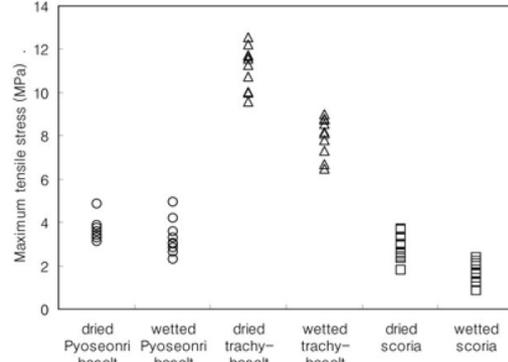
Table 2.3은 공학적 특성을 분석하기 위해 수행한 시험의 결과를 정리한 것으로 암석의 흡수율은 스킨리아가 가장 크게 나타났고, 조면암질 현무암이 가장 작은 값을 나타냈다. 비중의 경우는 조면암질 현무암이 가장 크고, 스킨리아가 가장 작은 값을 나타내어 암석의 종류에 상관없이 흡수율과 비중이 반비례관계에 있음을 확인하였다. 투수계수는 스킨리아가 가장 크고, 조면암질 현무암이 가장 작았으며, 탄성파속도는 조면암질 현무암이 가장 크고 스킨리아가 가장 작은 것으로 나타났다. 일축압축시험 및 슈미트해머를 이용한 일축압축강도 산정결과 조면암질 현무암이 가장 크고 스킨리아가 가장 작은 것으로 나타났다. 일축압축시험 결과와 슈미트해머를 이용한 일축압축강도를 비교한 결과 슈미트해머 반발값으로 추정된 일축압축강도가 과대하게 산정됨을 확인하였다. 슈미트해머의 압축

Table 2.3. Summary of test results (Nam et al., 2008a)

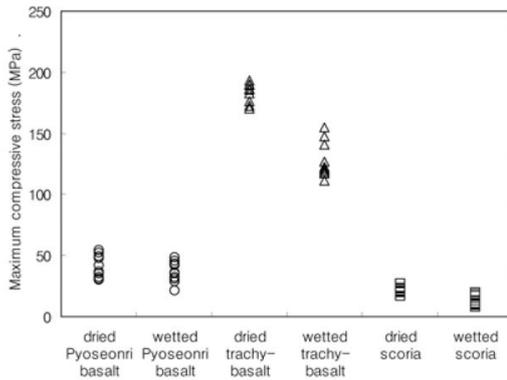
구분	흡수율 (%)	비중	투수계수 (cm/s)	탄성파 (km/s)	압축강도(MPa)	
					비파괴	파괴
조면암질	0.866	2.849	$5.47 \times 10^{-7}$	4.24	299	183.08
표선리	2.973	2.337	$1.21 \times 10^{-5}$	3.95	63	41.19
스킨리아	8.294	2.051	$3.04 \times 10^{-3}$	2.67	30	20.79



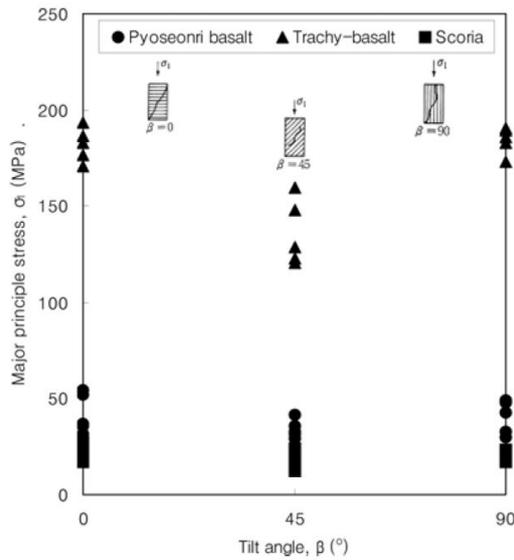
(a) Change of compressive strength by loading speed



(b) Influence of moisture content on tensile strength



(c) Influence of moisture content on compressive strength



(d) Relationship between tilt angle and compressive strength

Fig. 2.5. Test results (Nam et al., 2008b)

강도와 압축강도시험의 결과를 회귀분석하여 상관관계를 분석하였다. 신뢰도가 약 84~95%로 매우 높았으며, 상관식을 통하여 슈미트해머를 이용하여 간편하게 일축압축강도를 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.

일축압축강도와 인장강도에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위한 연구를 수행한 결과, 하중재하속도가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 나타내었으며 증가의 정도는 암석의 종류에 따라 차이가 있었다. 암석시료내 수분함량이 증가하게 되면 압축강도 혹은 인장강도가 감소하게 되는데 이는 공극내 물의

영향으로 인하여 암석의 입자간 결합력이 떨어지기 때문이라고 분석하였다. 암석의 이방성의 영향을 고려한 시험 결과 층리면과 평행하게 파괴가 발생하는  $\beta$ 가  $45^\circ$ 인 경우가 층리면과 일정한 경사( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ )를 가지고 파괴될 때보다 12~26% 감소하였다.

남정만 등(2008)은 표선리현무암과 조면암질 현무암에 대한 물리적 및 공학적 특성을 조사하고 비교함으로써 그 경향을 파악할 수 있었다. 그러나 물리적 및 공학적 특성간의 연관성이나 상호 영향에 대한 분석까지는 이뤄지지 못하였다.

#### 4) 조태진 등(2009)의 연구

조태진 등(2009)은 한라산 백록담 일대에 대한 전반적인 조사를 수행하고 한라산 조면암에 대해 광물암석학적, 화학적 특성분석을 수행하고, 역학적 특성실험을 통해 지질공학적 특성을 규명하였다. 시료는 한라산 백록담 일대 9군데에서 14개의 풍화가 진행된 시료를 채취하여 연구에 사용하였으며, 역학적 특성에 대한 분석은 심한풍화상태(Highly weathered, HW)시료 9개만을 사용하였다. 시료의 물

Table 2.4. Physical properties of Hallasan trachyte (Cho et al., 2009)

Sampling Site	Porosity (%)	Absorption rate (%)	P-wave velocity (m/sec)	S-wave velocity (m/sec)	Dry Density ( $g/cm^3$ )	Saturated Density ( $g/cm^3$ )	UCS (MPa)
HST-07	13.731	6.252	2,293	1,595	2.196	2.334	43.824
HST-10	15.385	7.137	2,117	1,405	2.156	2.310	41.231
HST-03	16.413	8.014	2,307	1,568	2.106	2.275	34.698
HST-04	18.956	9.086	1,902	1,308	2.086	2.276	20.601
HST-02	18.963	9.141	2,283	1,565	2.077	2.266	25.708
HST-13	19.525	9.369	1,981	1,351	2.042	2.233	15.662
HST-11	19.819	9.851	2,367	1,596	2.007	2.205	25.461
HST-12	20.218	9.856	1,858	1,305	2.051	2.254	18.996
HST-06	27.050	14.727	1,858	1,295	1.837	2.107	10.514

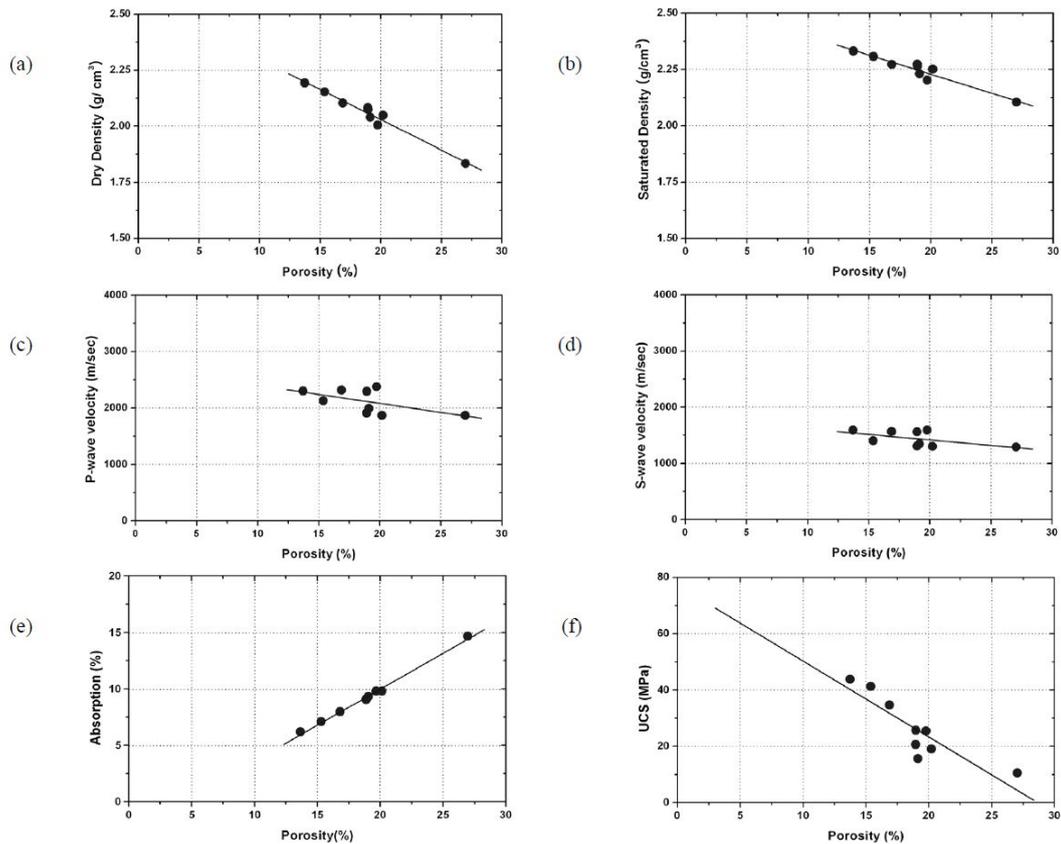


Fig. 2.6. Variation of physical indices with respect to weathering (Cho et al., 2009)

성치를 확인하기 위해 국제암반공학회(ISRM)의 규정을 따라 밀도, 흡수율, 공극률, 탄성과속도 및 일축압축강도시험을 수행하였다. 본 논문에서는 역학적 특성과 상호관계에 초점을 맞추고 있으므로 물성시험 결과와 공학적 특성 분석에 대한 부분만을 살펴보고자 한다.

Table 2.4는 시료에 대한 물성치와 일축압축강도시험 결과를 정리한 것으로 상대적인 풍화도를 반영하는 공극률을 지시인자로 사용하여 비교, 분석하였다. 한라산조면암의 공극률은 13.731~27.050%의 범위를 나타냈으며, 풍화가 진행됨에 따라 선형적으로 증가양상을 나타냈다. 건조밀도는  $1.837\sim 2.218g/cm^3$ 의 범위를, 포화밀도는  $2.107\sim 2.348g/cm^3$ 의 범위를 나타내며, Fig. 2.6 (a), (b)에 나타낸 것과 같이 풍화가 진행됨에 따라 선형적인 감소경향을 나타냈다. 탄성과속도는 암석내부의 결함이나 공학적 성질의 약화와 밀접하게 관련되어 암석의 공학적 풍화지수로서 사용되고 있는데, 시료의 P파 속도는  $1,858\sim 2,307m/sec$ 의 범위를, S

과 속도는  $1,291\sim 1,669\text{m/sec}$ 의 범위를 나타냈다. Fig. 2.6 (c), (d)에서 나타낸 것과 같이 공극률이 증가함에 따라 속도가 선형적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 흡수율은  $5.892\sim 14.727\%$ 의 범위로 풍화가 진행됨에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 2.6 (e)). 일축압축강도는  $10.514\sim 45.512\text{MPa}$ 의 범위를 나타내고, 풍화가 진행됨에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 2.6 (f)).

조태진 등(2009)의 연구는 한라산조면암에 대해 집중적으로 연구를 진행하여 풍화에 따른 공학적 특성의 변화를 자세하게 밝혀내었다. 이 연구에서의 공극률은 풍화의 정도를 나타내는 지시인자로 사용하여 공학적 특성과의 관계를 밝혀내었으나, 풍화로 인해 발생한 공극률과 생성과정에서 발생한 기공과는 암석의 결합력과 같은 물리적 성질에 차이가 있을 것으로 판단된다.

### III. 시험 계획 및 방법

#### 1. 시험계획

##### 1) 연구대상지역 및 시료 채취

본 연구의 대상지역은 제주특별자치도 제주시 조천읍 북촌리 일대(Fig. 3.1)로 선정하였으며, 지질도 상으로 선흘리현무암질안산암이 분포된 것으로 나타났다. 선흘리현무암질안산암은 현무암질 용암류로 구성되어 있다. 각 노출지에서 관찰되는 용암류의 두께는 대부분이 40cm 내외이며 용암류와 용암류 사이에는 크링커 발달이 거의 없는 것이 특징이다. 지표부분의 용암류는 두께가 5~20cm 내외로 복합 유동구조를 보이며 낮은 구릉들을 형성한다. 선흘리에서 덕천리, 송당리 사이에는 용암류의 내부 압력에 의해 용암류의 표면이 부분적 상승하여 형성된 3~5m 높이의 tumulus가 다수 분포한다. 이 용암류는 다공질이며 기공의 크기는 0.5~20mm인 원형으로 상부와 하부에 밀집되어 나타난다. 암석의 중심부로 가면서 유동방향에 따라 기공이 5cm 크기로 신장되어 S형으로 만곡되어 있기도 한

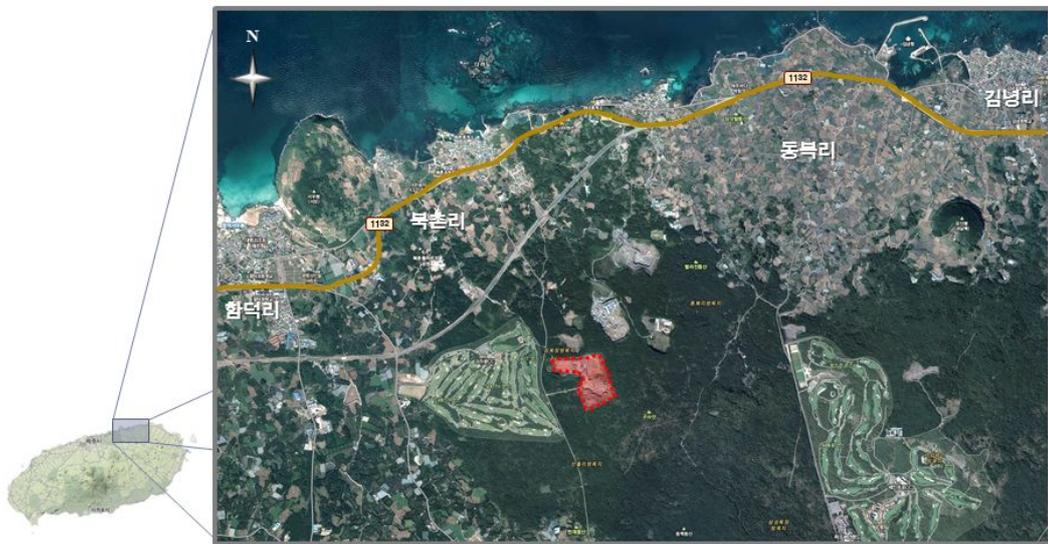


Fig. 3.1. Location of the study area



Fig. 3.3. Coring machine

다. 이 암석은 흑회색 내지는 암회색의 암석에 미반상구조를 보인다. 반정을 이루는 광물은 3~4mm의 담황갈색의 감람석으로 약 5%의 함량을 보인다. 풍화면에서는 1~2mm 크기의 사장석이 침상으로 발달하는 특징을 보인다(제주도, 1998).

현무암의 기공이 공학적 특성에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위하여 Fig. 3.1에 나타난 것과 같이 조천읍 북촌리에 위치한 S 채석장에서 겉으로 보기에 기공의 분포가 상이한 3종류의 암석을 채취하였다. 석재사에서 암석을 절단하고 Coring machine을 이용하여 공시체를 제작하였으며 시료의 균질성을 확보하기 위하여 하나의 암반에서 동일한 방향에 대해서 제작하였다.

Fig. 3.2는 본 시험에 사용된 Coring machine을 나타낸 것이며 Coring machine의 diamond thin-wall bit 크기는 BX 구경으로 채취되는 코어의 직경은 43mm이다. 압축강도시험에는 공시체의 종횡비( $h/d$ )가 2에 가까운 것을 사용하도록 규정하고 있으므로 Fig.3.3과 같이 공시체의 높이를 80mm로 제작하였다. 인장강도시험을 위한 시험체는 종횡비가 1/2~1의 값을 사용할 것을 KS규격에서 제시하고 있으므로 종횡비를 1로 제작하여 시험을 수행하였다.

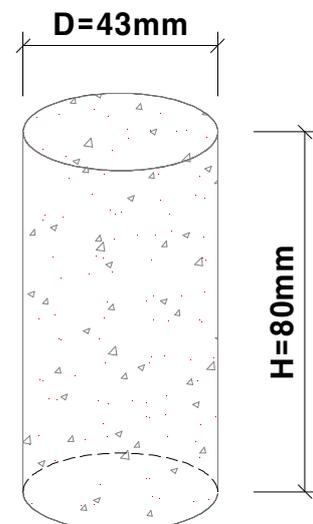


Fig. 3.2. Dimension of C-specimen

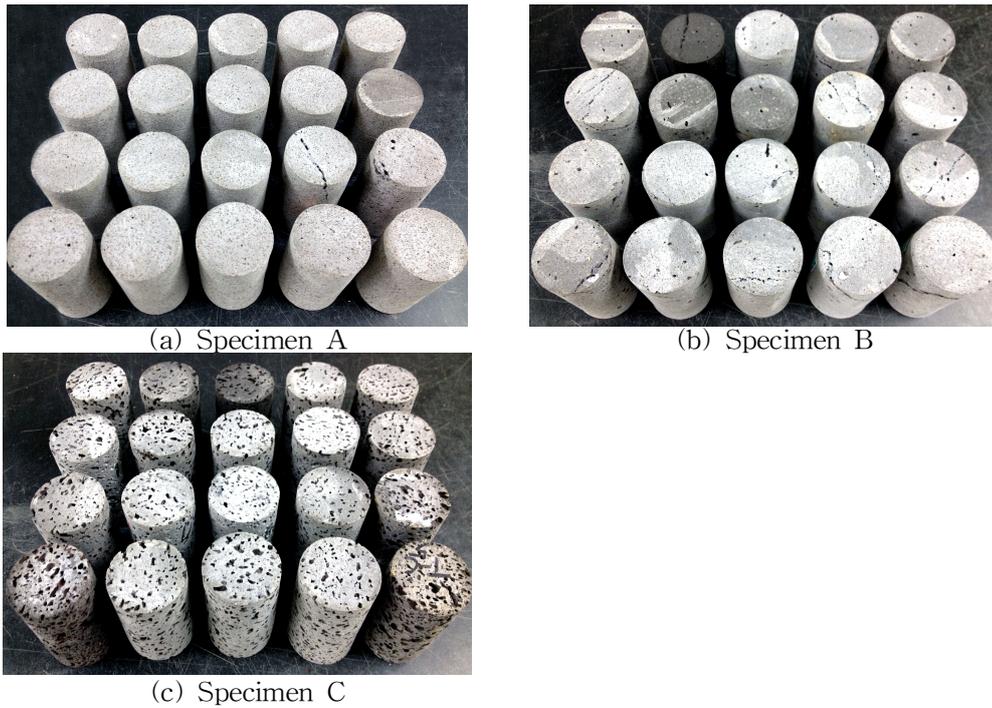


Fig. 3.4. Test specimen

Fig. 3.4는 제작된 공시체를 나타내는 것으로 (a)는 겉보기에 공극이 가장 작고, 거의 분포하지 않은 시료이고 (b)는 공극이 조금 분포되어 있으나 불규칙적으로 산재되어 있는 시료이며, (c)는 공극이 크고 비교적 균질하게 전 영역에 걸쳐 분포되어 있는 시료다.

## 2) 시험 변수

### (1) Compressive(C) 공시체

압축강도시험을 위해 제작한 공시체에 대해서는 비중/흡수율시험과 공극률시험, 탄성파시험과 탄성계수, 포아송비, 일축압축강도 시험을 수행하였다. 10개의 시험체 중 5개는 건조상태로, 5개는 습윤상태로 시험을 진행하였다(Table 3.1).

Table 3.1. Specimen for compression strength test

구 분	습윤상태	공극 크기			소계 (ea)	비 고
		소(A)	중(B)	대(C)		
압축강도 (C)	건조(D)	5	5	5	30	
	습윤(W)	5	5	5		

(2) Tensile(T) 공시체

인장강도시험을 위해 제작한 공시체에 대해서는 비중/흡수율 시험과 공극률 시험, 활렬인장강도시험만을 수행하였다. 인장강도시험도 압축강도시험과 동일하게 5개는 건조상태, 5개는 습윤상태로 시험을 진행하였다(Table 3.2).

Table 3.2. Specimen for tensile strength test

구 분	습윤상태	공극 크기			소계 (ea)	비 고
		소(A)	중(B)	대(C)		
인장강도 (T)	건조(D)	5	5	5	30	
	습윤(W)	5	5	5		

(3) 공시체 번호

공시체의 번호는 Fig. 3.5와 같이 정의하였다. 우선 압축강도시험(C)과 인장강도시험(T)에 따라 시험 형태를 분류하고, 건조상태(D)와 습윤상태(W)를 결정하는 시험 조건에 대해 분류하였다. 공극의 분포와 크기를 나타내는 공극의 영향을 세 번째에 A~C로 표현하였고, 마지막에는 시험체의 번호를 기재하였다. 예를 들어 T-W-A-4 인 시험체는 인장강도용 습윤상태의 공극이 작은 4번 시험체를 의미하는 것이다.

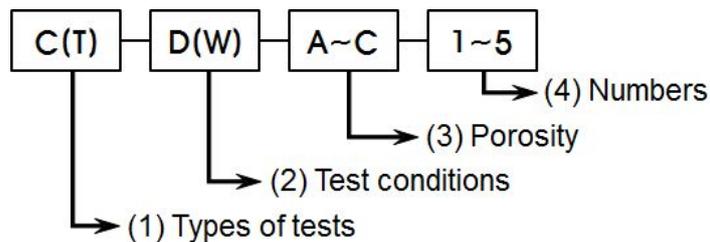


Fig. 3.5. Notation for specimen

1. 시험방법

1) 시험 종류 및 기준

Table. 3.3은 본 연구에서 수행한 시험을 정리한 것이며, 일축압축강도시험과

Table 3.3. Standard of test

구 분	시험기준	결 과	비 고
압축시험	KS E 3033	압축강도	
인장시험	KS E 3032	인장강도	
탄성파시험	ASTM D 2845	P파, S파 속도	
탄성계수	ASTM D 7012	압축강도, 축변형률	
포아송비	ASTM D 7012	축변형률, 횡방향 변형률	
공극률	ISRM	유효공극률	porosity
비중/흡수율 시험	KS F 2518	비중, 흡수율	

압열인장강도시험, 비중/흡수율 시험은 국내의 KS 표준 시험방법을 사용하였다. 탄성파시험, 탄성계수 및 포아송비는 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 ASTM 시험 기준을 따라 시험을 수행하였고, 공극률은 국제암반공학회(ISRM)에서 제안한 시험방법을 적용하였다. 본 연구에서 공극률 시험방법은 ISRM에서 제안하는 4가지 방법 중 한국암반공학회에서 채택하고 있는 캘리퍼 방법과 부력 이용 방법 2가지를 사용하였다.

## 2) 시험 기구

압축강도시험 및 압열인장강도시험에 사용된 장치는 Fig. 3.6(a)에 나타난 바와 같이 신강정밀에서 제작한 만능시험기(SGA-B-100PC)를 사용하였으며, 만능시험기에 대한 상세 제원을 Table 3.4에 나타내었다. 비중 및 흡수율 측정을 위해 사용된 저울은 Fig. 3.6(b)에 나타난 것과 같이 0.1g의 정밀도에 총중량 22kg인 CAS사의 CBX22KH 모델을 사용하였다. 그 외에도 시료를 수침시키기 위한 수조와 ISRM규정에서 제시하는 기준을 만족시키는 건조로 등을 사용하여 시험을 수행하였다.



(a) 만능시험기



(b) 디지털 저울

Fig. 3.6. Equipment for tests

Table 3.4. Specification of universal testing machines

모델명	SGA-B-100PC
모델 Type	Servo Motor, Auto Return
전원	380V, 60Hz, 3-Phase
최대하중	1MN(100 tonf)
하중전환 / 최소하중	10, 20, 50, 100tf (1, 2, 5, 10 kgf)
최소변위	0.001mm
제어방식	Stress, Strain Control
정밀도	±0.5%
하중분해능	1/10,000
시험속도	1~50 mm/min

## IV. 시험 결과 및 분석

### 1. 시험결과

#### 1) C-공시체에 대한 시험결과

선흘리안산암질현무암에 대해서 기본적인 물성 시험과 압축강도시험을 수행하였다. Fig. 4.1~6은 시료의 종류별로 건조상태와 습윤상태에서 일축압축강도시험을 수행한 결과를 나타내고 있으며, Table 4.1은 Compressive 공시체에 대한 시험 결과를 정리한 것이다.

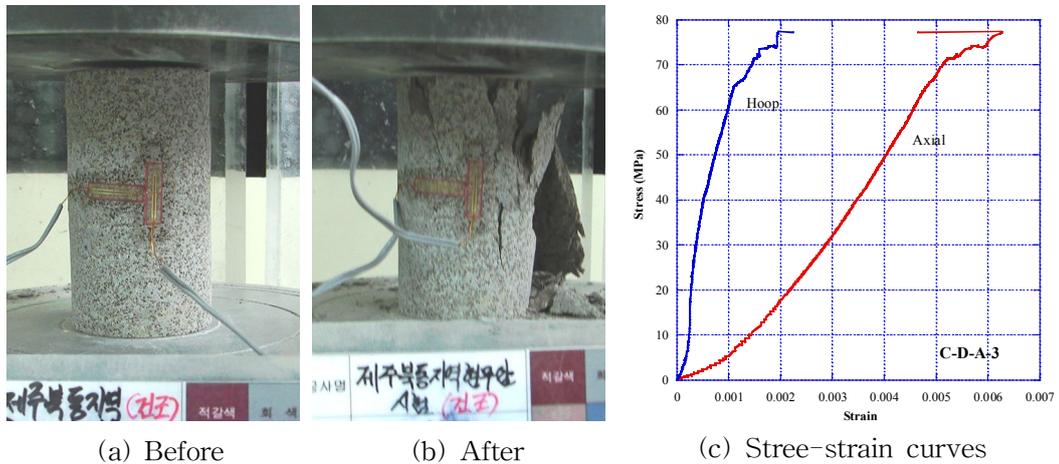


Fig. 4.1. Test result (C-D-A-3)

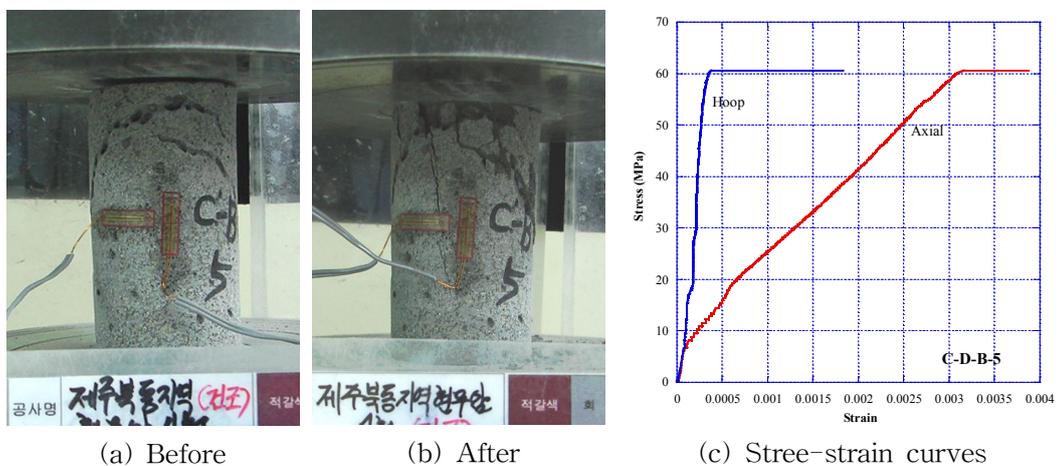


Fig. 4.2. Test result (C-D-B-5)

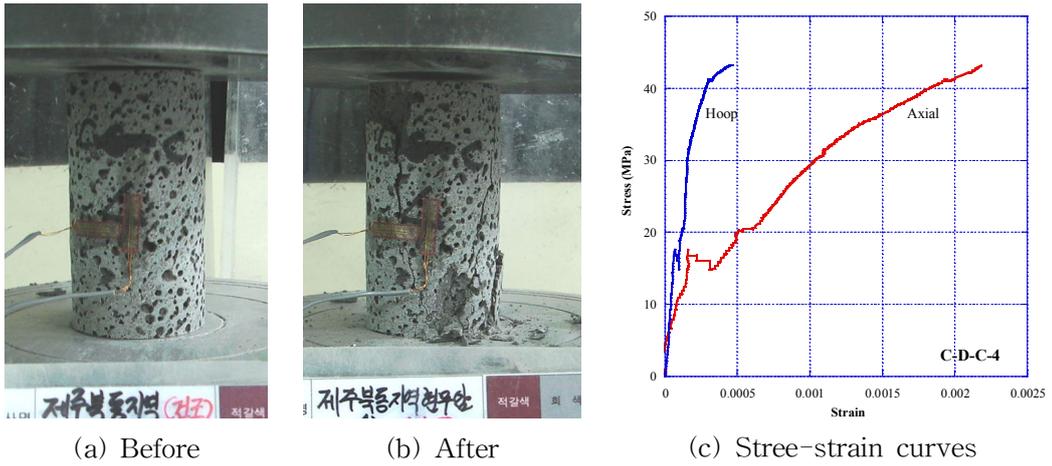


Fig. 4.3. Test result (C-D-C-4)

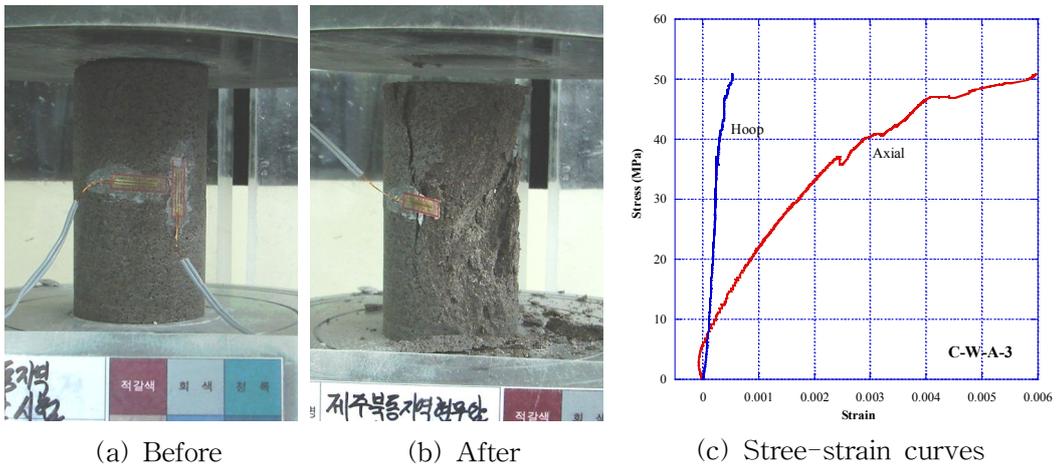


Fig. 4.4. Test result (C-W-A-3)

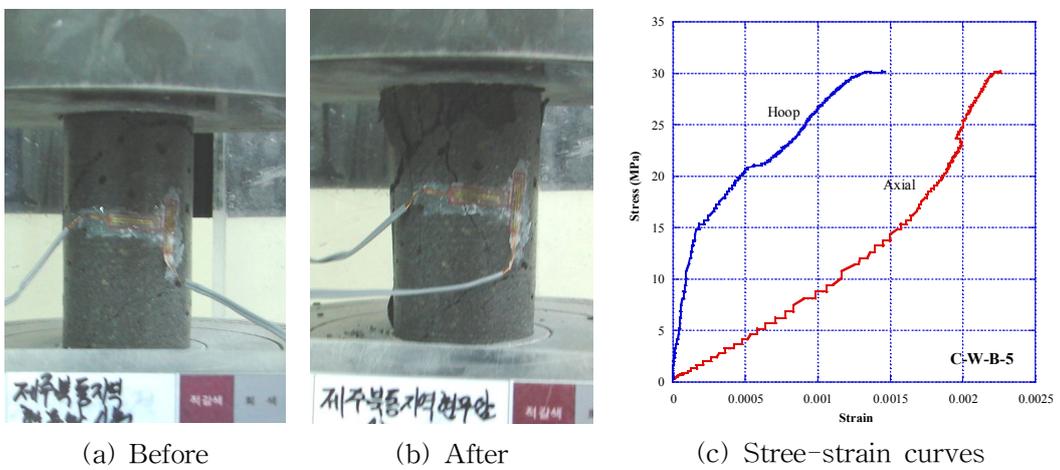


Fig. 4.5. Test result (C-W-B-5)

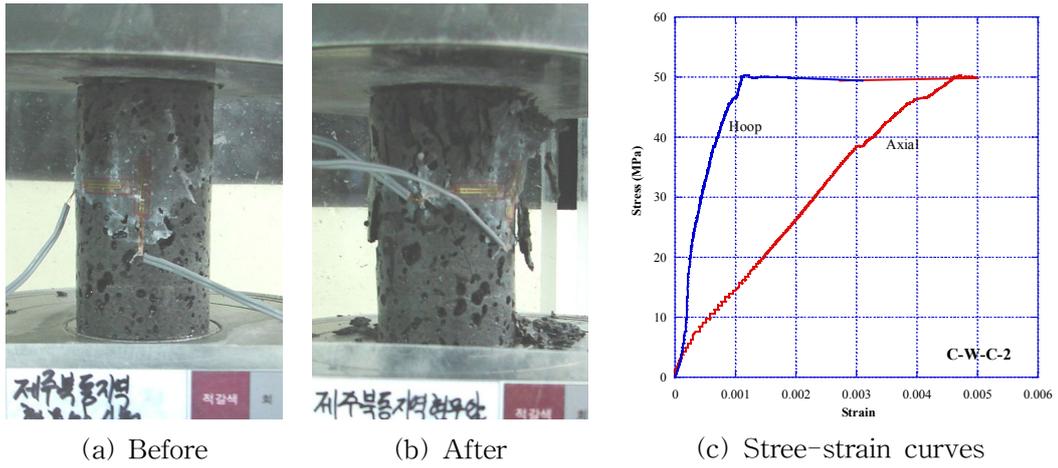


Fig. 4.6. Test result (C-W-C-2)

## 2) T-공시체에 대한 시험결과

인장강도시험은 시료의 종류에 따라 건조, 습윤상태에서 시험을 수행하였다. Fig. 4.7에서 4.12는 시험 조건에 따른 인장강도시험 결과를 나타낸 것이고, Table 4.2에 Tensile 공시체에 대한 시험 결과를 정리하였다.



Fig. 4.7. Test result (T-D-A-3)

Table 4.1. Summary of test results for C-specimens

Sample No.	Dried Specific Gravity	Surface Dried Specific Gravity	Absorption (%)	Porosity (Buoyancy) (%)	Dried Unit Weight	Specific Gravity	Unconfined Compression Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Elastic Wave Velocity (m/sec)		
										P-wave	S-wave	
C-D-A	1	2.591	2.641	1.94	5.01	2.587	2.979	61.41	11,372	0.15	3,451	1,803
	2	2.579	2.632	2.03	5.24	2.576	2.965	59.04	16,677	0.13	3,896	2,014
	3	2.600	2.651	1.96	5.11	2.594	2.907	77.45	11,410	0.14	3,547	1,818
	4	2.591	2.643	2.02	5.23	2.584	2.954	69.87	14,575	0.15	3,905	2,021
	5	2.584	2.635	1.97	5.10	2.580	2.994	59.20	16,130	0.14	3,455	1,825
C-D-B	1	2.627	2.672	1.72	4.52	2.603	3.018	96.090	15625	0.15	4253	2225
	2	2.624	2.668	1.71	4.47	2.617	3.040	115.580	16506	0.11	4532	2319
	3	2.617	2.665	1.81	4.73	2.592	3.009	83.020	21916	0.12	4427	2307
	4	2.637	2.684	1.76	4.65	2.627	2.999	57.840	34263	0.20	3780	1976
	5	2.623	2.671	1.85	4.85	2.594	3.011	60.600	22921	0.16	4324	2211
C-D-C	1	2.321	2.391	3.04	7.06	2.200	2.856	28.890	8270	0.22	3258	1703
	2	2.380	2.443	2.62	6.23	2.291	2.859	37.850	13765	0.22	3326	1716
	3	2.381	2.442	2.56	6.09	2.306	2.861	38.100	19741	0.24	3284	1690
	4	2.390	2.447	2.38	5.68	2.301	2.945	43.240	32415	0.20	3755	1963
	5	2.448	2.504	2.31	5.64	2.367	3.036	73.170	25693	0.18	4258	2206
C-W-A	1	2.598	2.651	2.04	5.31	2.631	2.959	61.92	11,296	0.12	3,215	1,662
	2	2.604	2.655	1.98	5.15	2.656	3.026	53.05	14,162	0.14	3,229	1,696
	3	2.580	2.635	2.12	5.48	2.620	3.016	50.81	19,755	0.16	3,144	1,637
	4	2.601	2.656	2.11	5.50	2.615	2.938	58.98	14,389	0.16	3,304	1,698
	5	2.606	2.661	2.12	5.51	2.594	2.995	45.51	10,437	0.18	3,014	1,593

Table 4.1. Summary of test results for C-specimens (Continued)

Sample No.	Dried Specific Gravity	Surface Dried Specific Gravity	Absorption (%)	Porosity (Buoyancy) (%)	Dried Unit Weight	Specific Gravity	Unconfined Compression Strength	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio
C-W-B	1	2.630	2.683	2.01	5.30	2.654	3.066	53.980	11444
	2	2.635	2.688	2.01	5.31	2.633	3.004	47.840	12393
	3	2.619	2.669	1.92	5.03	2.649	3.020	46.700	9999
	4	2.625	2.675	1.90	5.00	2.637	2.986	55.370	12516
	5	2.631	2.683	1.98	5.21	2.650	3.128	30.170	9609
C-W-C	1	2.385	2.452	2.82	6.72	2.361	2.987	35.470	9011
	2	2.415	2.488	2.99	7.23	2.392	2.939	50.300	13161
	3	2.403	2.468	2.70	6.48	2.141	2.935	34.380	12657
	4	2.441	2.506	2.68	6.54	2.173	2.858	31.630	6682
	5	2.361	2.435	3.11	7.35	2.083	2.919	31.820	13192

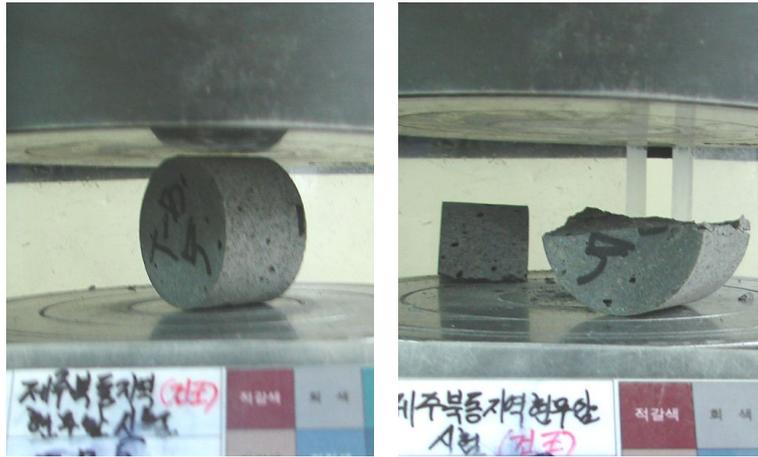


Fig. 4.8. Test result (T-D-B-5)



Fig. 4.9. Test result (T-D-C-3)

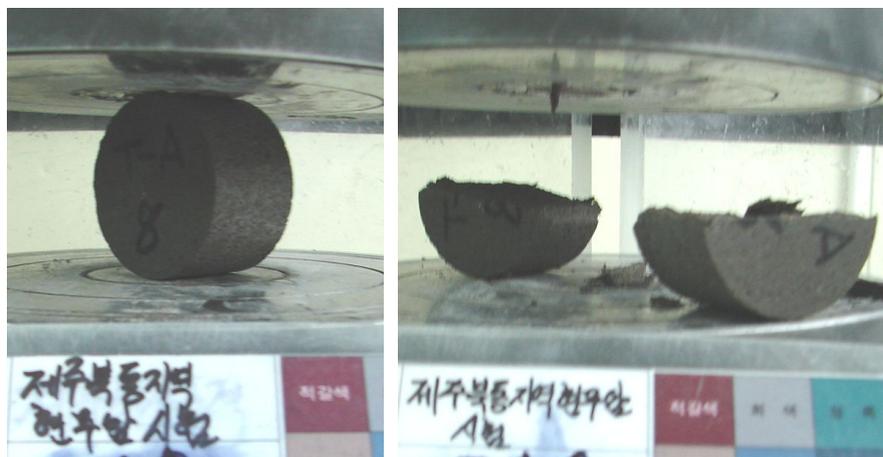


Fig. 4.10. Test result (T-W-A-3)

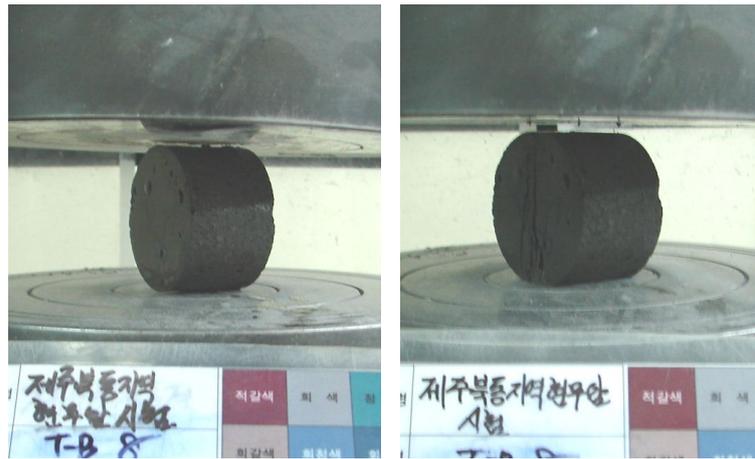


Fig. 4.11. Test result (T-W-B-3)

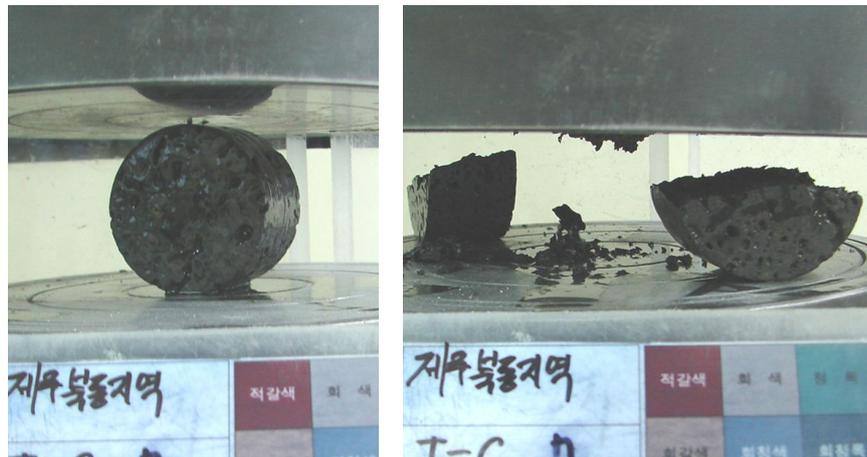


Fig. 4.12. Test result (T-D-C-5)

Table 4.2. Summary of test results for T-specimens

Sample No.	Dried Specific Gravity	Surface Dried Specific Gravity	Absorption (%)	Porosity (Buoyancy) (%)	Dried Unit Weight	Specific Gravity	Tensile Strength (MPa)	
T-D-A	1	2.594	2.657	2.42	6.27	2.565	3.020	4.60
	2	2.586	2.646	2.34	6.06	2.569	2.971	2.80
	3	2.604	2.664	2.30	5.99	2.561	2.986	5.66
	4	2.609	2.673	2.43	6.33	2.545	3.040	6.88
	5	2.620	2.682	2.35	6.15	2.571	2.971	4.08
T-D-B	1	2.655	2.707	1.93	5.13	2.613	3.054	3.52
	2	2.650	2.708	2.20	5.83	2.627	3.006	3.73
	3	2.659	2.708	1.84	4.90	2.618	2.982	3.52
	4	2.650	2.700	1.89	5.00	2.552	3.025	4.44
	5	2.635	2.685	1.93	5.08	2.596	3.010	3.61
T-D-C	1	2.313	2.408	4.13	9.54	1.993	2.789	4.24
	2	2.504	2.567	2.52	6.30	2.359	2.858	4.07
	3	2.463	2.524	2.47	6.09	2.324	2.855	4.17
	4	2.439	2.497	2.41	5.88	2.282	2.832	4.28
	5	2.334	2.433	4.23	9.87	2.067	2.905	3.95
T-W-A	1	2.617	2.669	2.00	5.25	2.616	2.966	4.58
	2	2.610	2.666	2.12	5.53	2.624	2.979	3.18
	3	2.607	2.663	2.14	5.59	2.625	2.913	3.58
	4	2.592	2.646	2.10	5.43	2.587	2.853	5.50
	5	2.612	2.674	2.37	6.20	2.625	2.949	4.77
T-W-B	1	2.633	2.681	1.84	4.84	2.624	3.049	3.65
	2	2.621	2.673	1.97	5.16	2.642	3.066	3.56
	3	2.647	2.699	1.97	5.22	2.644	3.036	6.11
	4	2.620	2.663	1.66	4.36	2.675	3.095	3.61
	5	2.641	2.690	1.85	4.88	2.678	3.082	6.03
T-W-C	1	2.457	2.523	2.67	6.56	2.414	2.895	5.10
	2	2.402	2.469	2.79	6.71	2.324	2.851	3.24
	3	2.429	2.494	2.68	6.51	2.354	2.854	3.60
	4	2.473	2.533	2.45	6.05	2.419	2.928	5.84
	5	2.280	2.364	3.69	8.41	2.106	2.995	3.66

## 2. 시험 결과 분석

### 1) 공극률 측정 방법에 따른 영향

국제암반공학회(ISRM)에서는 공극률을 측정하는 방법을 캘리퍼 방법, 부력 이용 방법, 2종류의 수은 이용법으로 총 4가지에 대해 제안하고 있고, 한국암반공학회에서는 캘리퍼 방법과 부력 이용 방법 2가지만 제시하고 있다. ISRM에서 제안하는 수은을 이용하는 방법 중 하나는 시료의 형태가 불균질하여 부피를 결정하는데 어려운 경우에 사용하는 방법으로 표면에 기공이 분포한 현무암에 적용하는데 적당할 것으로 판단되나, 수은을 이용하는 경우 수은의 취급에 대한 전문지식이 있어야 하며 시험자의 안전에 세심한 주의가 필요하기 때문에 본 연구에서는 한국암반공학회에서 제시하는 캘리퍼 방법과 부력 이용 방법을 사용하여 공극률을 결정하였다. 이 절에서는 캘리퍼 방법과 부력 이용 방법을 이용하여 결정된 공극률을 비교하고 다른 공학적 성질과의 관계를 규명할 때 사용할 방법을 결정하고자 한다.

Fig. 4.13은 각 공시체에 대하여 공극률의 결정 방법을 비교한 그래프이다. 결과적으로는 A시료의 공극이 B시료보다 작다고 예상하였으나 시험 결과 A시료의 공극률이 B시료보다 크게 나타났다. 따라서 앞으로 결과 분석시 B시료는 공극이

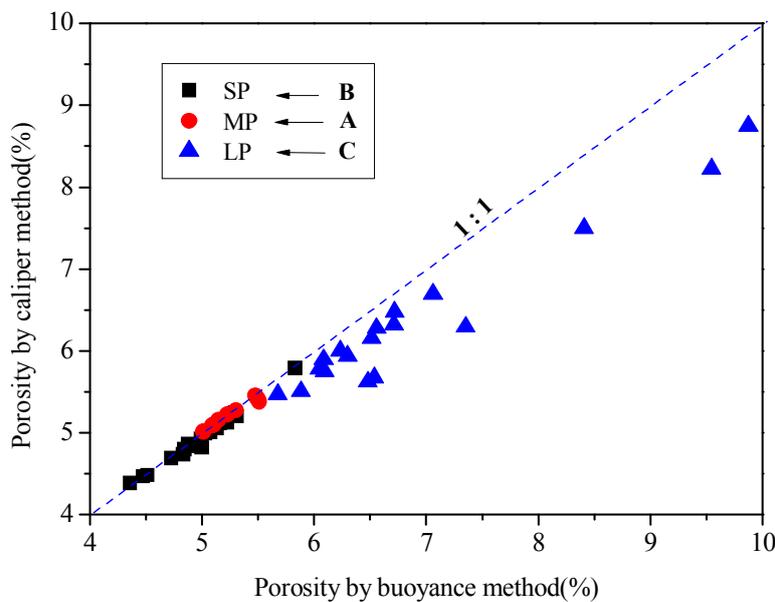


Fig. 4.13. Comparison of methods for porosity determination

가장 작으므로 SP(Small Porosity)로, A시료는 중간의 공극을 가지므로 MP(Medium Porosity)로, C시료는 공극이 가장 크므로 LP(Large Porosity)로 명명하였다. 그래프에 나타낸 것과 같이 SP(공극이 작은 시료)와 MP(공극이 중간인 시료) 공시체에서는 켈리퍼 방법과 부력 이용 방법의 결과값이 1:1로 비슷한 값을 나타내고 있어서 방법에 따른 공극률에는 큰 차이가 없다. 그러나 LP(공극이 큰 시료) 공시체의 경우에는 켈리퍼 방법이 부력 이용 방법보다 작은 값을 나타내고 있으며 공극률이 증가할수록 그 차이도 커지고 있다. 이는 공시체의 부피를 결정할 때 표면 공극의 고려 여부에 따른 차이로 볼 수 있다. 켈리퍼 방법의 경우 상, 중, 하면의 직경을 측정하고 평균값으로 단면적을 결정한 뒤 높이를 곱하여 공시체의 부피를 결정하므로 표면 공극을 무시하는 반면, 부력 이용 방법은 표면건조 습윤상태의 중량과 수중 중량의 차를 통해서 결정하므로 표면공극을 고려하여 공시체의 부피를 산출하게 된다. 따라서 상대적으로 켈리퍼 방법이 부력 이용 방법보다 부피가 크게 되고 공극률의 값을 과소평가 하게 된다. 따라서 제주 현무암과 같이 표면 공극이 큰 암석의 공극률을 결정할 때에는 켈리퍼 방법보다 부력 이용 방법을 사용하는 것이 보다 타당하다고 판단된다. 따라서 다른 시험 결과와 비교할 때에 부력 이용 방법으로 결정된 공극률을 사용하였다.

## 2) 공극률과의 관계

### (1) 공극률과 일축압축강도와의 관계

Fig. 4.14는 공극률과 일축압축강도와의 관계를 나타낸 그림으로, 공극률이 증가함에 따라 일축압축강도는 지수적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 건조시료와 습윤시료 모두 동일한 경향을 나타내고 있으며 건조상태와 습윤상태의 데이터에 대해 회귀분석한 결과  $R^2$ 값이 0.84로 상관성이 매우 높음을 알 수 있다. 공극률과 일축압축강도의 관계식은 다음과 같다.

$$f = 58,710.154e^{-1.495n} + 31.848$$

여기서,  $f$  : 일축압축강도(MPa),  $n$  : 공극률 (%)

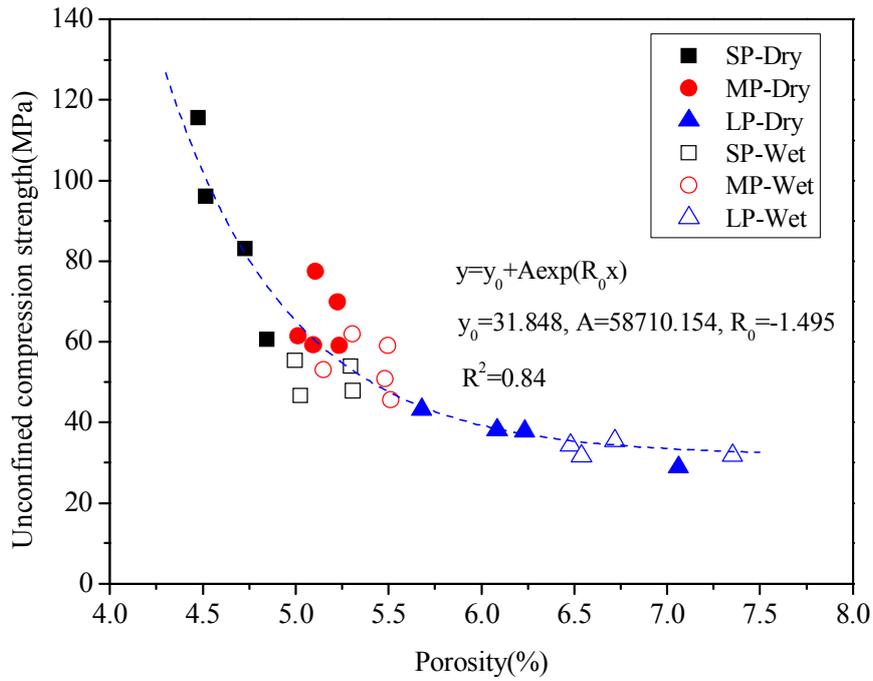


Fig. 4.14. Relation of porosity and UCS

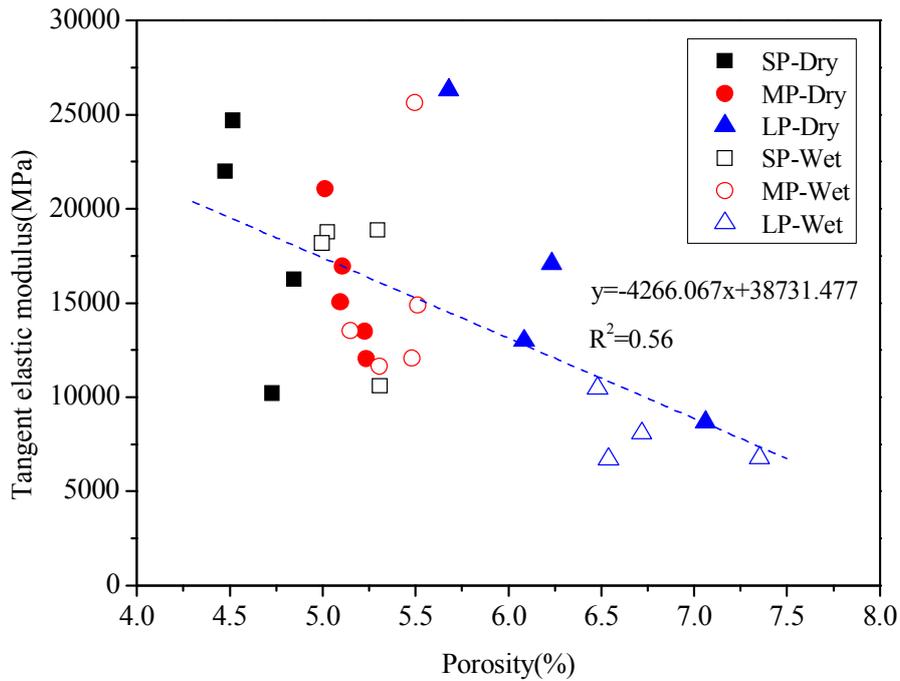


Fig. 4.15. Relation of porosity and elastic modulus

(2) 공극률과 탄성계수와의 관계

탄성계수의 결정방법은 활선법, 접선법, 평균법으로 3가지가 있는데 본 논문에서는 일축압축강도의 50%지점에서 접선의 기울기로 탄성계수를 결정하는 접선법을 사용하여 탄성계수를 결정하였다. Fig. 4.15는 공극률과 탄성계수의 관계를 나타낸 것으로 공극률이 증가함에 따라 탄성계수가 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 결정계수  $R^2$ 이 0.56으로 상관성이 매우 낮게 나타나고 있다.

(3) 공극률과 인장강도와의 관계

공극률과 인장강도와의 관계를 Fig. 4.16에 나타내었으며, 본 연구에서는 공극률과 인장강도와의 상관성을 찾아볼 수 없었다. 인장강도는 공극률에 상관없이 3~7MPa의 범위에 분포하고 있다.

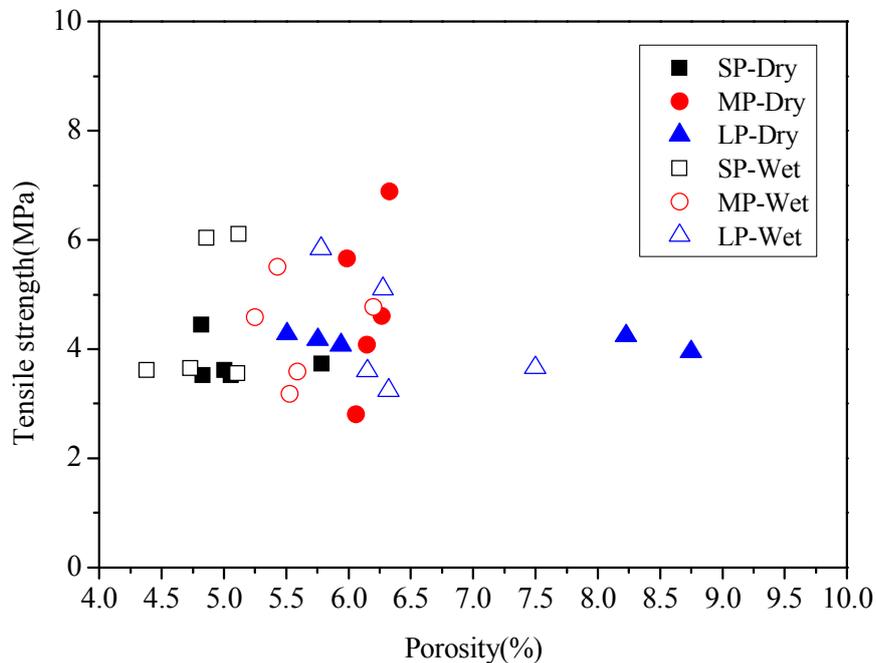


Fig. 4.16. Relation of porosity and tensile strength

(4) 공극률과 탄성파속도와의 관계

Fig. 4.17과 4.18은 공극률과 탄성파속도의 관계를 나타낸 것으로 공극률이 증가함에 따라 탄성파속도가 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 상관성은 공극률과 일축압축강도의 상관성에 비해 낮다. 회귀분석한 결과  $R^2$ 값이 P-파인 경우 0.62,

S-파인 경우 0.59인 상관성을 보이고 있다. 공극률과 탄성파속도와의 관계식은 다음과 같다.

$$V_p = 5.8905 \times 10^6 e^{-1.861n} + 3,120.868$$

$$V_s = 2.418 \times 10^6 e^{-1.813n} + 1,621.086$$

여기서,  $V_p$  : P-파 속도(m/s),  $V_s$  : S-파 속도(m/s),  $n$  : 공극률(%)

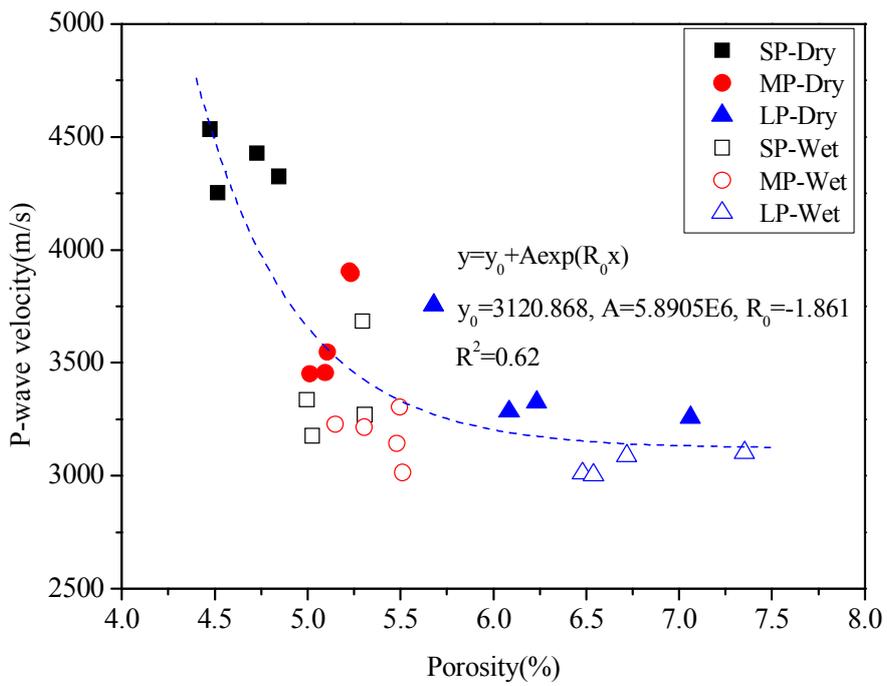


Fig. 4.17. Relation of porosity and P-wave velocity

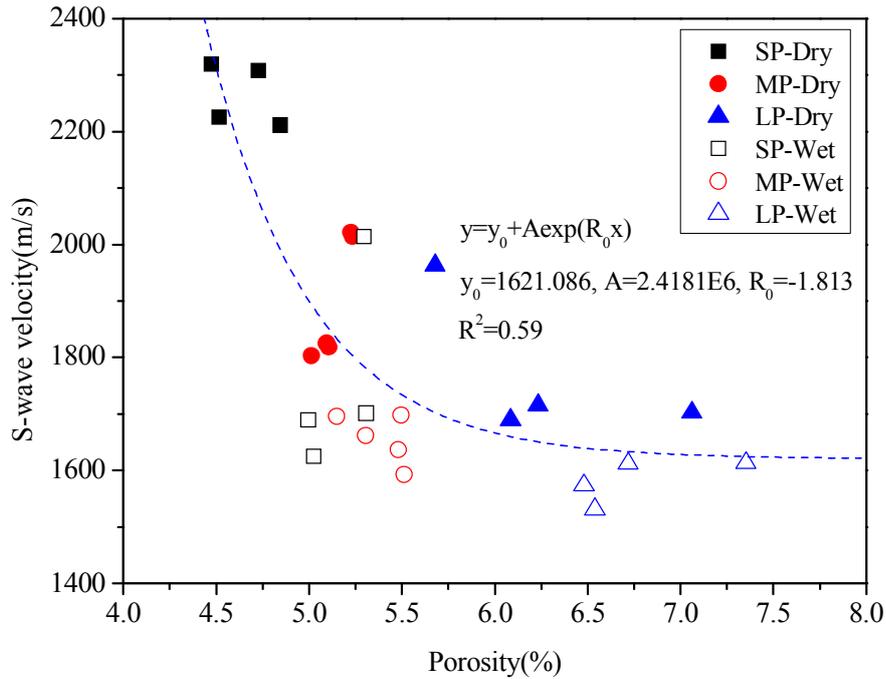


Fig. 4.18. Relation of porosity and S-wave velocity

### 3) 탄성파속도와와의 관계

탄성파속도는 종파인 P-파와 횡파인 S-파가 있는데 P-파와 S-파는 비례관계이므로 역학적 특성과의 관계 분석에 P-파를 사용하였다.

Fig. 4.19는 탄성파속도와 일축압축강도의 관계를 나타낸 것으로, 탄성파 속도가 증가함에 따라 일축압축강도가 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 각 데이터에 대해 회귀분석 한 결과  $R^2=0.63$ 인 상관성을 보이고 있으며 탄성파속도와 일축압축강도와의 관계식은 다음과 같다.

$$f = 0.036 V_p + 69.889$$

여기서,  $V_p$  : P-파 속도(m/s),  $f$  : 일축압축강도(MPa)

탄성파속도에 대한 탄성계수를 Fig.4.20에 나타내었으며, 탄성파속도와 탄성계수의 상관성은 찾을 수가 없었다.

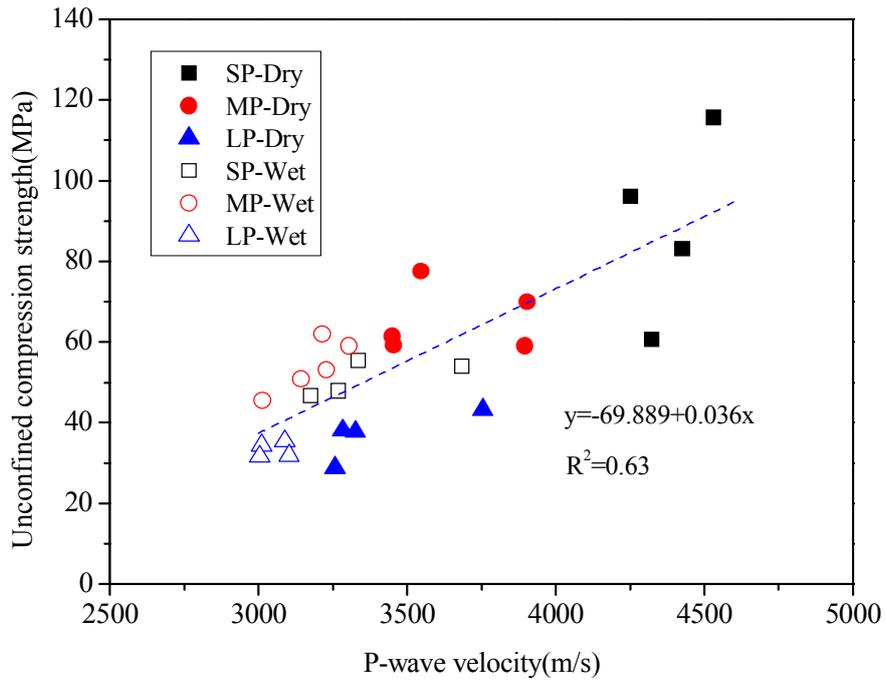


Fig. 4.19. Relation of P-wave velocity and UCS

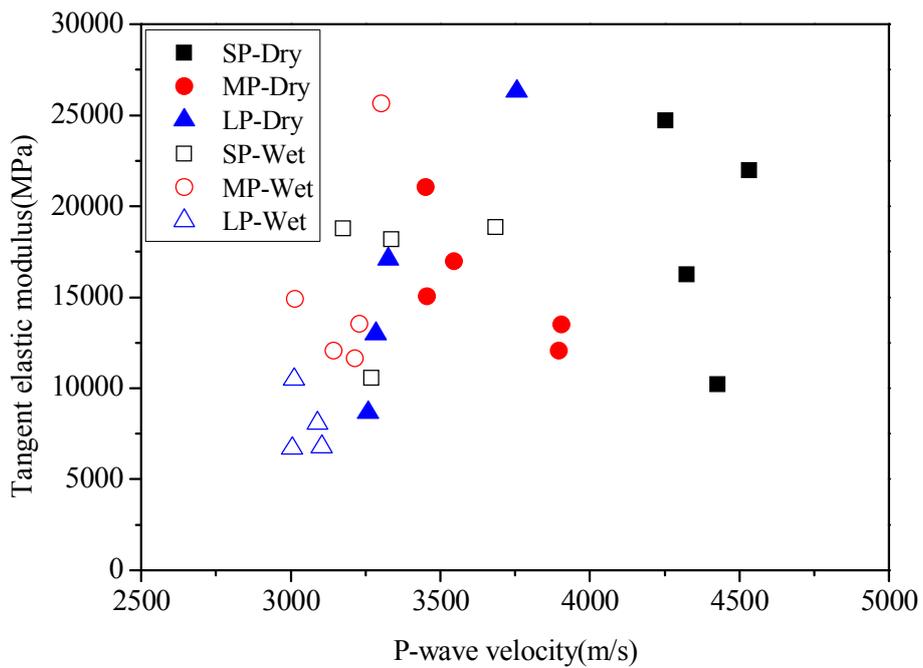


Fig. 4.20. Relation of P-wave velocity and tensile strength

## V. 결 론

제주 현무암의 공극률에 따른 역학적 특성의 관계를 비교 검토해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제주 현무암과 같이 표면 공극이 큰 암석의 공극률을 결정할 때 표면 공극을 무시하는 캘리퍼 방법은 공극률을 과소평가하게 되므로 표면 공극을 제외하고 공극률을 결정하는 부력 이용 방법을 사용하는 것이 보다 합리적이다.
2. 현무암의 공극률이 증가함에 따라 일축압축강도는 지수적으로 감소하며,  $R^2$ 값이 0.84로 매우 높은 상관성을 나타내고 있다. 공극률과 일축압축강도의 관계식은 다음과 같다.

$$f(MPa) = 58,710.154e^{-1.495n(\%)} + 31.848, R^2 = 0.95$$

3. 본 연구에서 암석의 탄성계수는 공극률과 탄성파속도에 상관성을 보이지 않았으며, 인장강도도 공극률과의 상관성을 찾을 수 없었다.
4. 공극률의 증가에 따라 탄성파속도가 지수적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 회귀분석한 결과 P-파의 경우  $R^2$ 값이 0.62, S-파인 경우 0.59인 상관성을 보였다.

$$V_p(m/s) = 5.8905 \times 10^6 e^{-1.861n(\%)} + 3,120.868, R^2 = 0.62$$

$$V_s(m/s) = 2.418 \times 10^6 e^{-1.813n(\%)} + 1,621.086, R^2 = 0.59$$

5. 탄성파속도와 일축압축강도는 선형적으로 증가하는 비례관계를 나타내고 있으며,  $R^2$  값이 0.63으로 잘 일치하고 있다. 관계식은 다음과 같다.

$$f(MPa) = 0.036 V_p(m/s) + 69.889, R^2 = 0.63$$

6. 암석에 따라 차이가 있지만 일반적으로 습윤상태의 일축압축강도가 건조상태보다 낮게 나타나지만 본 연구의 경우 시료상태에 따른 강도의 변화를 찾을 수 없었으며, 일축압축강도는 시료상태보다 시료의 공극률에 크게 영향을 받는다.
  
7. 본 연구에서는 시료의 수가 한정되어 있어서 상관성을 분석하는데 한계가 있었으며, 제주도 현무암에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 생각한다.

## VI. 참고문헌

- 국립지질광물연구소, 1973, 1:250,000 지질도
- 권병두 외, 1993, “제주도에 분포하는 화산암류의 물리적 특성”, 한국지구과학회지 Vol.14 No.3, pp.348~357
- 김일중, 2002, “단면도 분석을 통한 제주도의 지형 연구” pp.3~9
- 김준호, 2006, “제주도 표선리 현무암의 역학적 특성 및 강도에 관한 연구”
- 남정만 외, 2008a, “제주도 현무암의 공학적 특성 분석”, 한국토목섬유학회논문집 제7권 1호, pp.13~21
- 남정만 외, 2008b, “제주도 현무암의 압축 및 인장강도에 대한 영향요인 분석”, 한국지반공학회지 Vol.18 No.2, pp.205~215
- 제주도, 2006, “제주도지”
- 제주도, 1998, “제주·애월도폭 지질보고서(1:50,000)” pp.61~64
- 조태진 외, 2009, “풍화진행에 따른 한라산조면암의 역학적 특성변화”, 한국암반공학회지 제19권 제4호, pp.287~303
- 한국암반공학회, 2005, “암석의 시료채취와 시험편제작 표준법”
- 한국암반공학회, 2005, “암석의 탄성상수 측정 표준시험법”
- 한국지질자원연구원, 2002, “제주도 지질안내 및 관광화를 위한 연구”
- 한국표준협회, 2006, “KS E 3032 : 암석의 인장 강도 시험 방법”
- 한국표준협회, 2001, “KS E 3033 : 암석의 압축 강도 시험 방법”
- ASTM Standard D 2845, 2008, “Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock”
- ASTM Standard D 7012, 2004, “Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temp.”
- ISRM, “Suggest methods for determining water content” pp.143~151

## 감사의 글

이 논문을 마무리 할 때까지 긴 시간동안 학문적 기초가 많이 모자란 저를 포기하지 않고, 열정과 정성으로 이끌어 지도하여 주신 박상렬 교수님께 무한한 고마움과 감사를 드립니다.

산업대학원 학업생활 동안에 많은 가르침과 격려로 지도를 해주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님, 이동욱 교수님, 김기영 박사님께서도 감사의 말씀을 올립니다.

또한 연구실에서 바쁜 와중에도 많은 도움을 준 양순보 박사와 문경태 박사과정생, 김도한 조교에게도 너무 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

시간을 할애하여 학업을 마무리 할 수 있게 도와주신 김춘희 사장님 이하 직원 여러분들께도 고맙고 감사하다는 마음을 전합니다.

작년 여름에 땀 흘리고 고생하며 시험실에서 시험을 도와주었던 지형도, 김태경, 유창국, 김형준에게도 고마움을 전합니다.

늦게 시작한 대학원 생활동안 묵묵히 도와주었던 나의 아내 정향순, 상희, 상현, 은희에게도 사랑하는 마음을 전하며, 앞으로도 더욱 화목하고 건강한 가정을 만들어가는 부지런한 아빠의 모습을 보여 주겠노라고 전하고 싶습니다.

그리고 저를 낳아주시고 이만큼 성장하게 돌보아주셨던 아버님, 어머님 고맙습니다. 지금은 이 세상에 같이 하고 있지 않은 아버님, 이제야 마음의 죄를 조금이나마 갚아 드리는 것 같아 죄송합니다. 앞으로도 더욱 열심히 노력하는 아들이 모습을 보여 드리겠습니다.

이제 끝이 아니라 시작이라 생각하고, 조금만 더 부지런히 살아가노라면 그래도 남은 인생의 빈칸들 중 몇개의 칸은 더 의미 있는, 나만의 색깔들로 채울 수 있을 것이라는 작은 목표를 또다시 세워 봅니다.

모두들 건강하시고, 행복하시고, 바라시는 소원들 성취 하시기를 기원합니다.

2013년 6월 김 영 찬 드림