

공극률에 따른 제주도 현무암의 역학적 특성

문경태* · 박상렬** · 김영찬*** · 양순보****

Moon, Kyoungtae* · Park, Sangyeol** · Kim, Youngchan*** · Yang, Soonbo****

Mechanical Characteristics of Basalt in Jeju Island with Relation to Porosity

ABSTRACT

Volcanic rocks formed from magma near the earth surface commonly show vesicular structures due to exsolution of gaseous phases in magma. The distinction and the amount of vesicles are greatly various, but there are few researches on the effect of volume percentage of vesicles on the mechanical properties. In this study, mechanical characteristics of volcanic rocks in relation to the porosity are investigated through experimental tests with Jeju basalt. Two methods (the buoyancy method and the caliper method) are adopted for measuring porosity. And unconfined compressive strength, elastic modulus, tensile strength, and elastic wave velocity are plotted against porosity in order to propose the empirical relations after the regression analysis. Also, unconfined compressive strength and the elastic modulus in relation to the elastic wave velocity are proposed with the analysis. In the case of vesicular rocks with more than 5% porosity, it is found that the buoyancy method provides more accurate estimation of porosity than the caliper method. The unconfined compressive strength, the elastic modulus, and the elastic wave velocity decrease curvilinearly with increasing in porosity. Also, the unconfined compressive strength and the elastic modulus increase linearly with increasing in elastic wave velocity.

Key words : Basalt, Porosity, Unconfined compressive strength, Elastic modulus, Elastic wave velocity

초 록

마그마에 의해 지표부근에서 형성된 화산암은 마그마 내부에 존재하던 휘발성분으로 인하여 기공이 많은 다공질 구조를 나타낸다. 이러한 기공은 다양한 크기와 양으로 분포되어 있으나 기공이 화산암의 역학적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 매우 미비하다. 따라서 본 연구에서는 화산암 기공의 공극률에 따른 역학적 특성을 시험을 통해 확인하였는데, 화산암의 한 종류인 제주도 현무암에 있어 공극률을 두가지 측정방법에 따라 측정하고, 공극률과 일축압축강도, 탄성계수, 인장강도, 탄성파속도와와의 관계 및 탄성과 속도와 일축압축강도, 탄성계수와와의 관계를 회귀분석에 의해 추정하여 그 관계식을 제시하였다. 그 결과, 공극률 측정방법에 있어서는 공극률이 5%이상인 다공질 현무암의 경우 부력 이용 방법이 캘리퍼 방법보다 정확한 공극률을 예측한다고 판단되며, 공극률이 증가함에 따라 일축압축강도와 탄성계수, 탄성과 속도는 곡선적으로 감소하였고, 탄성파속도가 증가할수록 일축압축강도와 탄성계수는 선형적으로 증가하였다.

검색어 : 현무암, 공극률, 일축압축강도, 탄성계수, 탄성파속도

* 정회원 · 제주대학교 풍력특성화협동과정 박사과정 (Jeju National University · ktmoon@jejunu.ac.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 제주대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Jeju National University · sympark@jejunu.ac.kr)

*** 한양종합건설주식회사 부장 (Hanyang General Construction Co., Ltd. · kyc1068@naver.com)

**** 제주대학교 토목공학과 강사 (Jeju National University · sbyang@jejunu.ac.kr)

Received October 7, 2013/ revised November 20, 2013/ accepted May 31, 2014

1. 서론

화산암은 지각 내부의 마그마가 지표까지 이르러 지표 위로 흘러되거나 분출된 후에 굳어진 암석을 말하는 것으로서 산상은 두 종류로 용암류와 화산쇄설물이다. 용암류는 마그마가 화구나 천부지각의 균열을 따라 흘러나온 것이며, 화산쇄설물은 화산활동 시 화도에서 뿜어 나온 수증기와 함께 화산재를 비롯하여 화산탄, 화산력들이 공중으로 솟아 올랐다가 지표나 강, 호수 혹은 바다에 떨어져 쌓인 것이다(KGS, 2012).

화산암은 SiO_2 의 함량에 따라 암석의 이름이 정해지고 암석의 특성이 나타난다. SiO_2 의 함량이 65%이상인 산성 용암은 점성이 매우 커서 유동성이 작아 먼 곳까지 흐르지 않고 분출하는 지표 부근에 모이게 되는 반면 SiO_2 의 함량이 50% 미만인 염기성 용암인 경우 점성이 작아 유동이 커서 용암이 멀리까지 흘러가는 특성을 나타낸다. 화산암은 마그마가 지표를 따라 흘러가면서 냉각되어 형성되므로 굳지 않은 용암이 흐르면서 유동구조(flow structure)가 발달한다(KGS, 2012). 또한 높은 압력에서 마그마 속에 존재하던 휘발성분이 화산이 분출되면서 압력이 낮아짐으로 마그마와 분리되고 용암에서 미처 빠져나오지 못하여 암석 속의 구멍을 형성하게 되는데 이것을 기공(vesicle)이라 한다(Park et al., 2006). 기공이 많은 암석의 구조를 다공상구조(vesicular structure)라고 하며, 이러한 기공은 마그마의 점성을 비롯한 여러 환경요소로 인해 그 크기와 분포가 다양하다.

우리나라의 화산활동은 중생대의 중생 내지 산성 화산암류의 분출과 신생대의 현무암의 분출로 크게 구분된다. 중생대의 화산암은 육천대 및 경상분지 내에 주로 분포하고, 제3기 후기와 제4기의 신생대 화산활동은 제주도, 울릉도, 철원-전곡 일대, 포항분지의 구룡포 일대 등에서 일어났다(KGS, 2012). 특히, 제주도는 약 200만년 전부터 역사시대까지 발생한 여러 차례의 화산활동으로 형성된 섬(Yoon and Ko, 2011)으로 화산암의 한 종류인 제주도의 현무암은 육지부의 암반과 달리 다양한 크기의 기공이 분포하고 있다. 현재 기공이 많이 분포한 암석에 대한 역학적 특성이 충분히 밝혀지지 않았을 뿐만 아니라 이런 기공의 양이 화산암의 역학적 특성에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구가 매우 미비하다.

제주도 현무암의 공학적 특성을 규명하기 위한 연구는 Eum (2002)을 시작으로 Nam et al. (2008a, b)에 의해 진행되었다. Nam et al. (2008a, b)은 육안 관측에 의해 기공이 거의 없는 조면암질 현무암과 기공이 많이 분포하고 있는 표선리 현무암 그리고 스크리아의 물리적 특성과 강도시험에 대한 결과를 비교하였다. 조면암질 현무암, 표선리 현무암과 스크리아의 물리적 성질과 강도에 대해 정량적인 값을 제시하고 있으나 물리적 특성들간의 상관성에 대한 평가는 이루어지지 않았다. Cho et al. (2009)은

한라산 조면암의 공극률과 공학적 성질과의 관계를 비교하였지만, 이 연구에서의 기공은 암석의 풍화에 의해 형성된 것으로서 화산활동 과정에서 형성된 기공과는 다른 개념에 의한 것이다.

본 연구에서는, 화산암의 한 종류인 제주도 현무암에 있어 기공의 양, 즉 공극률에 따라 현무암의 역학적 특성이 어떻게 달라지는지를 시험을 통해 확인하고 공극률에 따른 압축강도, 인장강도, 탄성계수 및 탄성파속도를 회귀분석에 의해 추정하였다.

2. 시험편 및 시험 방법

2.1 연구대상 암석

연구 대상 암석으로는 제주특별자치도 제주시 조천읍 북촌리 일대의 현무암을 채취하여 연구를 진행하였다. 본 지역은 한국지질자원연구원에서 제시하는 지질도(Fig. 1) 상에서 선흘리현무암질 안산암(Qsba)이 분포된 것으로 나타났다. 선흘리현무암질 안산암은 현무암질 용암류로 구성되어 있다. 이 암석은 흑회색 내지는 암회색의 암색에 미반상구조를 나타내며 반정을 이루는 광물은 3-4mm의 단황갈색의 감람석으로 약 5%의 함량을 보인다. 풍화면에서는 1~2mm 크기의 사장석이 침상으로 발달하는 특징을 보인다. 현미경 하에서 0.3~1.0mm 크기의 감람석이 반정으로 약 1% 함유되어 있다. 석기(groundmass)는 휘석 50%, 사장석 40%, 5%의 불투명광물과 감람석으로 구성되어 있고 소량의 인회석이 분포한다. 부위에 따라 석기를 이루고 있는 광물의 크기는 변화가 있어 미반정 크기로 석기를 이루고 있기도 한다. 선흘리현무암질 안산암에 대한 화학분석 결과는 다음과 같다. SiO_2 는 52.69~53.40 wt%,

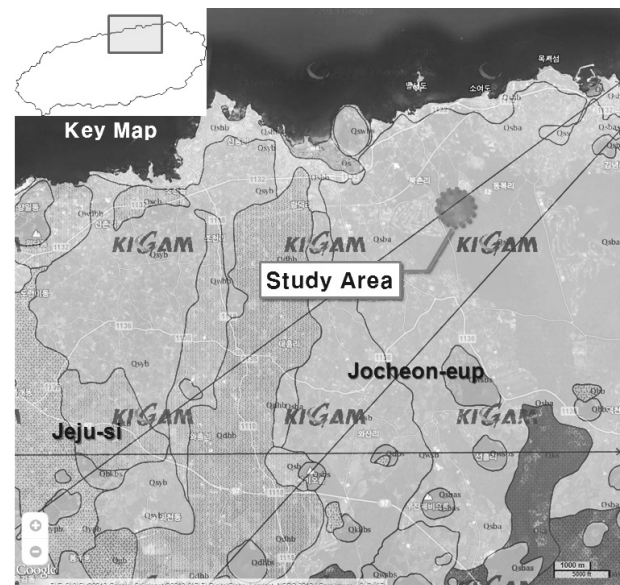


Fig. 1. Geologic Map of the Study Area (KIGAM)

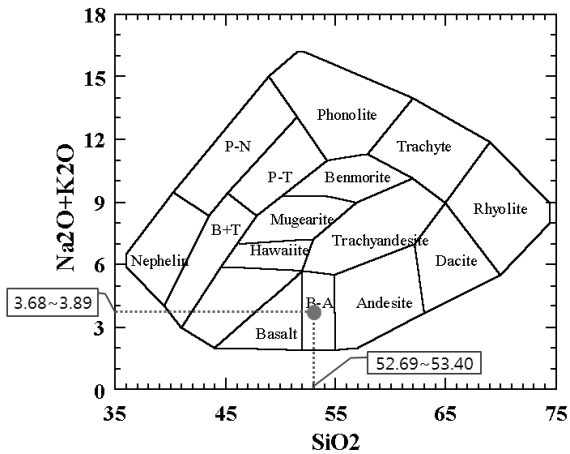


Fig. 2. Total Alkali-silica Diagram for Volcanic Rocks (Cox et al., 1979)

Na_2O 는 2.97~3.08 wt%, K_2O 는 0.71~0.81 wt%의 범위에 해당한다. $Na_2O + K_2O$ 는 3.68~3.89 wt%의 범위에 해당되며, SiO_2 와 $Na_2O + K_2O$ 의 비를 이용한 화산암류 분류법(Cox et al., 1979, Fig. 2)에 의하면 현무암질안산암에 해당된다(Park et al., 1998).

2.2 시험편 채취 및 제작

현무암의 기공이 공학적 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 조천읍 북촌리에 위치한 채석장에서 육안으로 보기에 기공의 분포가 상이한 3종류의 암석시료를 채취하였다. 석재사에서 암석시료의 상하단면을 절단하고 Coring machine을 이용하여 암석시험편을 제작하였으며, Coring machine의 Bit 크기는 BX구경으로 채취되는 암석시료의 직경은 43mm이다. 암석시료의 균질성을 최대한 확보하기 위하여 하나의 암반에서 동일한 방향에 대해 채취하였다. 암석의 압축강도시험(KS E 3033)에서 규정하는 바와 같이 시험편의 종횡비(h/d)가 2에 가깝도록 높이를 80mm로 제작하였고, 암석의 인장강도시험(KS E 3032)에는 원주형 시험편으로 길이 l 과 지름 d 의 비가 1/2~1의 값을 사용할 것을 규정하고 있으므로 종횡비를 1/2에 가깝게 제작하였다.

Fig. 3은 제작된 시험편을 나타내는 것으로 A 시험편은 육안으로 기공이 거의 보이지 않는 시험편이고 B 시험편은 A 시험편보다 기공이 크지만 C 시험편 보다는 작게 분포되어 있으며, C 시험편은 기공이 B 시험편보다 크고 전 영역에 걸쳐 비교적 균질하게 분포되어 있는 시험편이다.

2.3 시험방법

현무암 시료의 암석학적 특성을 확인하기 위하여 박편현미경분석을 수행하였고, 일반적인 물리적 특성을 확인하기 위하여 비중/흡수율시험(KS F 2518), 공극률 시험, 탄성파시험(ASTM D 2845)



(a) Specimens A



(b) Specimens B



(c) Specimens C

Fig. 3. Test Specimens

을 수행하였다. 또한 역학적 특성을 확인하기 위해 일축압축강도시험(KS E 3033), 인장강도시험(KS E 3032)을 수행하였으며, 압축강도시험시 측면형률과 횡변형률을 측정하여 포아송비와 탄성계수(ASTM D 7012)를 계산하였다. 공극률은 한국암반공학회 암석표준시험법(KSRM, 2010)의 ‘암석의 공극률 및 밀도 측정 표준시험법’을 따라 캘리퍼 방법과 부력 이용 방법을 사용하여 측정하였다. 그러나 표준시험법에서 제시하는 수침방법(1시간 이상 800Pa 이하의 진공상태에서 교란시키며 수침)은 시험환경여건상 수행하기 어려워서 비중/흡수율 시험법(KS F 2518)에서 제시하고 있는 수침방법(20±5°C로 유지되는 증류수나 여과수에 48시간 이상 수침)으로 대체하였다. 또한 수분이 암석의 물리적 및 역학적 성질에 미치는 영향을 확인하기 위하여 건조상태와 습윤상태로 구분하여 시험을 수행하였다. 임의의 5개 시험편은 건조상태로, 나머지 5개 시험편은 KS F 2518에서 규정한 표면건조포화상태로 시험을 수행하였다. 탄성파시험은 ASTM D 2845와 한국암반공학회에서 제시하는 암석표준시험법(KSRM, 2010)을 따라 송수신기의 이격

Table 1. Test Types and Parameters

| Type of test | Test method | Condition of specimen | Number of specimen | | | Total (ea) | Remarks |
|--|----------------------------|-----------------------|--------------------|----|----|------------|---|
| | | | A* | B* | C* | | |
| Uniaxial compressive strength test (C) | KS E 3033 | Dry (D) | 5 | 5 | 5 | 30 | Specimens for compressive strength test |
| | | Wet (W) | 5 | 5 | 5 | | |
| Tensile strength test (T) | KS E 3032 | Dry (D) | 5 | 5 | 5 | 30 | |
| | | Wet (W) | 5 | 5 | 5 | | |
| Elastic modulus (E_s) | ASTM D 7012 | Dry (D) | 5 | 5 | 5 | 30 | |
| | | Wet (W) | 5 | 5 | 5 | | |
| Poisson's ratio | ASTM D 7012 | Dry (D) | 5 | 5 | 5 | 30 | |
| | | Wet (W) | 5 | 5 | 5 | | |
| Elastic wave test | ASTM D 2845 | Dry (D) | 5 | 5 | 5 | 30 | |
| | | Wet (W) | 5 | 5 | 5 | | |
| Specific gravity / Absorption | KS F 2518 | Dry (D) | 20 | 20 | 20 | 60 | Specimens for compressive / tensile strength test |
| Porosity (Caliper / Buoyancy) | KSRM Standard Test Methods | Dry (D) | 20 | 20 | 20 | 60 | |
| Polarization microscopic analysis | - | Dry (D) | 2 | 2 | 2 | 6 | |

* A, B and C indicate specimen with smaller, intermediate and larger pore size, respectively



Fig. 4. Test Set-up for Determination of Pulse-travel Time

거리와 파동의 전파시간을 이용하여 계산하였다. 본 연구에서는 MKC사의 Ultracon-170 모델을 사용하여 파동의 전파시간을 측정하고, 버니어캘리퍼스를 이용하여 암석시편의 길이(송수신기의 이격거리)를 측정하여 탄성파속도를 결정하였다. Fig. 4는 Ultracon-170을 사용하여 파동의 전파시간을 측정하는 것을 나타내고 있다. Table 1은 수행한 시험들과 변수, 시험편 수를 정리한 것으로 기공의 크기와 각 시험에서의 변수에 따라 각각 5개씩 총 60개의 시험편을 시험하였다.

3. 시험 결과 및 분석

기공의 크기가 다른 3종류의 현무암에 대해 물리적, 역학적

시험을 수행한 결과 Tables 2 and 3과 같은 결과를 얻었다. Table 2는 일축압축강도시험과 함께 수행된 시험결과를 정리한 것이고, Table 3은 인장강도시험과 함께 수행된 시험결과를 정리한 것이다.

Tables 2 and 3에서 나타난 바와 같이 우선, 시험체 제작시 육안으로 기공이 거의 보이지 않은 A시험편의 공극률보다 일부 기공을 포함하고 있는 B시험편의 공극률이 더 작게 나타나고 있다. 따라서 육안으로 기공의 분포만을 가지고 공극률을 예측하거나 강도를 판단할 때에는 세심한 주의가 필요하며 정확한 예측을 필요로 하는 경우 정량적인 평가가 반드시 이루어져야 할 것이다.

3.1 편광현미경 관찰

Table 4는 각 시료에 대해 편광현미경을 통하여 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 관찰 결과 A 시험편의 현무암은 전반적으로 비반상 조직(aphyric texture)을 보이며, 구성광물은 사장석, 휘석, 감람석, 견운모, 석영, 불투명광물이 관찰된다. 사장석은 대부분 알바이트 쌍정(albite twin)이 나타나며, 주로 침상으로 불규칙하게 배열되어 있고, 크기는 평균 0.3mm이다. 또한 사장석의 일부분에 견운모가 변질되어 나타난다. 휘석은 강한 간섭색을 띠며 평균 0.2mm 크기로 나타난다. 휘석과 침상의 사장석 결정들은 오피틱(ophitic), 서브오피틱(subophitic) 조직을 보이기도 한다. 석영은 2차적으로 주로 석기(groundmass)에서 관찰되며, 세립의 결정으로 관찰되고 파동 소광과 함께 관찰된다.

B 시험편의 현무암은 일부 휘석이 반정(phenocryst)으로 나타나

Table 2. Summary of Results for Compressive Strength Test

| Sample No. | Bulk Specific Gravity | Bulk Specific Gravity (SSD*) | Absorption (%) | Porosity (%) | | Dried Unit Weight (g/cm ³) | UCS** (MPa) | Elastic Modulus (MPa) | Poisson's Ratio | ElasticWave Velocity(m/sec) | | |
|------------|-----------------------|------------------------------|----------------|--------------|---------|--|-------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--------|-------|
| | | | | Buoyancy | Caliper | | | | | P-wave | S-wave | |
| C-D-A | 1 | 2.591 | 2.641 | 1.94 | 5.01 | 5.01 | 2.587 | 61.41 | 11,372 | 0.15 | 3,451 | 1,803 |
| | 2 | 2.579 | 2.632 | 2.03 | 5.24 | 5.23 | 2.576 | 59.04 | 16,677 | 0.13 | 3,896 | 2,014 |
| | 3 | 2.600 | 2.651 | 1.96 | 5.11 | 5.10 | 2.594 | 77.45 | 11,410 | 0.14 | 3,547 | 1,818 |
| | 4 | 2.591 | 2.643 | 2.02 | 5.23 | 5.21 | 2.584 | 69.87 | 14,575 | 0.15 | 3,905 | 2,021 |
| | 5 | 2.584 | 2.635 | 1.97 | 5.10 | 5.09 | 2.580 | 59.20 | 16,130 | 0.14 | 3,455 | 1,825 |
| C-D-B | 1 | 2.627 | 2.672 | 1.72 | 4.52 | 4.48 | 2.603 | 96.09 | 15,625 | 0.15 | 4,253 | 2,225 |
| | 2 | 2.624 | 2.668 | 1.71 | 4.47 | 4.47 | 2.617 | 115.58 | 16,506 | 0.11 | 4,532 | 2,319 |
| | 3 | 2.617 | 2.665 | 1.81 | 4.73 | 4.68 | 2.592 | 83.02 | 21,916 | 0.12 | 4,427 | 2,307 |
| | 4 | 2.637 | 2.684 | 1.76 | 4.65 | 4.63 | 2.627 | 57.84 | 34,263 | 0.20 | 3,780 | 1,976 |
| | 5 | 2.623 | 2.671 | 1.85 | 4.85 | 4.80 | 2.594 | 60.60 | 22,921 | 0.16 | 4,324 | 2,211 |
| C-D-C | 1 | 2.321 | 2.391 | 3.04 | 7.06 | 6.70 | 2.200 | 28.89 | 8,270 | 0.22 | 3,258 | 1,703 |
| | 2 | 2.380 | 2.443 | 2.62 | 6.23 | 6.00 | 2.291 | 37.85 | 13,765 | 0.22 | 3,326 | 1,716 |
| | 3 | 2.381 | 2.442 | 2.56 | 6.09 | 5.90 | 2.306 | 38.10 | 19,741 | 0.24 | 3,284 | 1,690 |
| | 4 | 2.390 | 2.447 | 2.38 | 5.68 | 5.47 | 2.301 | 43.24 | 32,415 | 0.20 | 3,755 | 1,963 |
| | 5 | 2.448 | 2.504 | 2.31 | 5.64 | 5.46 | 2.367 | 73.17 | 25,693 | 0.18 | 4,258 | 2,206 |
| C-W-A | 1 | 2.598 | 2.651 | 2.04 | 5.31 | 5.27 | 2.631 | 61.92 | 11,296 | 0.12 | 3,215 | 1,662 |
| | 2 | 2.604 | 2.655 | 1.98 | 5.15 | 5.15 | 2.656 | 53.05 | 14,162 | 0.14 | 3,229 | 1,696 |
| | 3 | 2.580 | 2.635 | 2.12 | 5.48 | 5.45 | 2.620 | 50.81 | 19,755 | 0.16 | 3,144 | 1,637 |
| | 4 | 2.601 | 2.656 | 2.11 | 5.50 | 5.42 | 2.615 | 58.98 | 14,389 | 0.16 | 3,304 | 1,698 |
| | 5 | 2.606 | 2.661 | 2.12 | 5.51 | 5.38 | 2.594 | 45.51 | 10,437 | 0.18 | 3,014 | 1,593 |
| C-W-B | 1 | 2.630 | 2.683 | 2.01 | 5.30 | 5.24 | 2.654 | 53.98 | 11,444 | 0.15 | 3,684 | 2,014 |
| | 2 | 2.635 | 2.688 | 2.01 | 5.31 | 5.20 | 2.633 | 47.84 | 12,393 | 0.12 | 3,269 | 1,701 |
| | 3 | 2.619 | 2.669 | 1.92 | 5.03 | 4.99 | 2.649 | 46.70 | 9,999 | 0.15 | 3,176 | 1,625 |
| | 4 | 2.625 | 2.675 | 1.90 | 5.00 | 4.93 | 2.637 | 55.37 | 12,516 | 0.14 | 3,336 | 1,689 |
| | 5 | 2.631 | 2.683 | 1.98 | 5.21 | 5.15 | 2.650 | 30.17 | 9,609 | 0.11 | 3,205 | 1,632 |
| C-W-C | 1 | 2.385 | 2.452 | 2.82 | 6.72 | 6.47 | 2.361 | 35.47 | 9,011 | 0.19 | 3,089 | 1,612 |
| | 2 | 2.415 | 2.488 | 2.99 | 7.23 | 6.96 | 2.392 | 50.30 | 13,161 | 0.17 | 3,247 | 1,690 |
| | 3 | 2.403 | 2.468 | 2.70 | 6.48 | 5.62 | 2.141 | 34.38 | 12,657 | 0.21 | 3,011 | 1,574 |
| | 4 | 2.441 | 2.506 | 2.68 | 6.54 | 5.67 | 2.173 | 31.63 | 6,682 | 0.24 | 3,004 | 1,532 |
| | 5 | 2.361 | 2.435 | 3.11 | 7.35 | 6.29 | 2.083 | 31.82 | 13,192 | 0.18 | 3,103 | 1,613 |

* Saturated surface-dry ** Uniaxial compressive strength

Table 3. Summary of Results for Tensile Strength Test

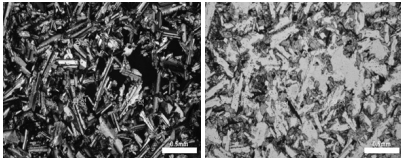
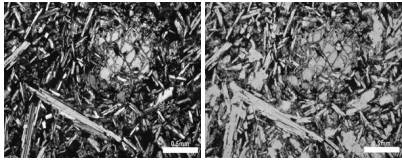
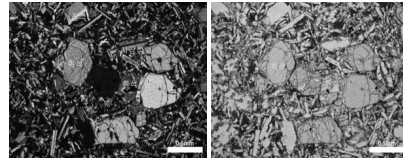
| Sample No. | Bulk Specific Gravity | Bulk Specific Gravity (SSD*) | Absorption (%) | Porosity (Buoyancy) (%) | Dried Unit Weight (g/cm ³) | Tensile Strength (MPa) | |
|------------|-----------------------|------------------------------|----------------|-------------------------|--|------------------------|------|
| T-D-A | 1 | 2.594 | 2.657 | 2.42 | 6.27 | 2.565 | 4.60 |
| | 2 | 2.586 | 2.646 | 2.34 | 6.06 | 2.569 | 2.80 |
| | 3 | 2.604 | 2.664 | 2.30 | 5.99 | 2.561 | 5.66 |
| | 4 | 2.609 | 2.673 | 2.43 | 6.33 | 2.545 | 6.88 |
| | 5 | 2.620 | 2.682 | 2.35 | 6.15 | 2.571 | 4.08 |

Table 3. Summary of Results for Tensile Strength Test (continue)

| Sample No. | Bulk Specific Gravity | Bulk Specific Gravity (SSD*) | Absorption (%) | Porosity (Buoyancy) (%) | Dried Unit Weight (g/cm ³) | Tensile Strength (MPa) | |
|------------|-----------------------|------------------------------|----------------|-------------------------|--|------------------------|------|
| T-D-B | 1 | 2.655 | 2.707 | 1.93 | 5.13 | 2.613 | 3.52 |
| | 2 | 2.650 | 2.708 | 2.20 | 5.83 | 2.627 | 3.73 |
| | 3 | 2.659 | 2.708 | 1.84 | 4.90 | 2.618 | 3.52 |
| | 4 | 2.650 | 2.700 | 1.89 | 5.00 | 2.552 | 4.44 |
| | 5 | 2.635 | 2.685 | 1.93 | 5.08 | 2.596 | 3.61 |
| T-D-C | 1 | 2.313 | 2.408 | 4.13 | 9.54 | 1.993 | 4.24 |
| | 2 | 2.504 | 2.567 | 2.52 | 6.30 | 2.359 | 4.07 |
| | 3 | 2.463 | 2.524 | 2.47 | 6.09 | 2.324 | 4.17 |
| | 4 | 2.439 | 2.497 | 2.41 | 5.88 | 2.282 | 4.28 |
| | 5 | 2.334 | 2.433 | 4.23 | 9.87 | 2.067 | 3.95 |
| T-W-A | 1 | 2.617 | 2.669 | 2.00 | 5.25 | 2.616 | 4.58 |
| | 2 | 2.610 | 2.666 | 2.12 | 5.53 | 2.624 | 3.18 |
| | 3 | 2.607 | 2.663 | 2.14 | 5.59 | 2.625 | 3.58 |
| | 4 | 2.592 | 2.646 | 2.10 | 5.43 | 2.587 | 5.50 |
| | 5 | 2.612 | 2.674 | 2.37 | 6.20 | 2.625 | 4.77 |
| T-W-B | 1 | 2.633 | 2.681 | 1.84 | 4.84 | 2.624 | 3.65 |
| | 2 | 2.621 | 2.673 | 1.97 | 5.16 | 2.642 | 3.56 |
| | 3 | 2.647 | 2.699 | 1.97 | 5.22 | 2.644 | 6.11 |
| | 4 | 2.620 | 2.663 | 1.66 | 4.36 | 2.675 | 3.61 |
| | 5 | 2.641 | 2.690 | 1.85 | 4.88 | 2.678 | 6.03 |
| T-W-C | 1 | 2.457 | 2.523 | 2.67 | 6.56 | 2.414 | 5.10 |
| | 2 | 2.402 | 2.469 | 2.79 | 6.71 | 2.324 | 3.24 |
| | 3 | 2.429 | 2.494 | 2.68 | 6.51 | 2.354 | 3.60 |
| | 4 | 2.473 | 2.533 | 2.45 | 6.05 | 2.419 | 5.84 |
| | 5 | 2.280 | 2.364 | 3.69 | 8.41 | 2.106 | 3.66 |

* Saturated surface-dry

Table 4. Photos and Microscopic Analysis of Rock Textures

| Specimens A | | | Specimens B | | | Specimens C | | |
|---|----------|----------------|---|----------|----------------|---|----------|----------------|
|  | | |  | | |  | | |
| (unit : vol %) | | | (unit : vol %) | | | (unit : vol %) | | |
| Plagioclase | Olivine | Pyroxene | Plagioclase | Olivine | Pyroxene | Plagioclase | Olivine | Pyroxene |
| 57.3 | 4.5 | 26.4 | 63.1 | 4.6 | 20.8 | 60.6 | 5.4 | 23.5 |
| Quartz | Sericite | Opaque mineral | Quartz | Sericite | Opaque mineral | Quartz | Sericite | Opaque mineral |
| 3.3 | 5.1 | 3.4 | 4.5 | 5.2 | 1.8 | 4.3 | 4.1 | 2.1 |

는 반상조적을 가지고, 구성광물은 사장석, 휘석, 감람석, 견운모, 석영, 불투명광물이 관찰된다. 휘석반정의 크기는 평균 0.4mm이다. 사장석 반정은 크기가 다양하게 나타난다. 기질은 사장석 침상과 미립의 휘석 등이 이루고 있다. 사장석 침상결정과 휘석은 입간충진조적을 보인다.

C 시험편의 현무암은 B 시험편과 매우 유사하다. 이를 종합해보면 A 시험편은 B, C 시험편과 암석기재학적으로 차이를 보이고 있으며, 기공의 크기에서도 A 시험편에 작은 기공이 다수 존재하고 B, C는 상대적으로 적게 분포하고 있다. 하지만 A~C 시험편의 현무암은 휘석이 우세한 휘석-감람석 현무암[합휘석감람석현무암(augite-olivine basalt)]으로 통칭하여 명명할 수 있다.

3.2 측정 방법에 따른 공극률의 영향

한국암반공학회 암석표준시험법(KSRM, 2010)에서는 공극률을 측정하는 방법으로 캘리퍼 방법과 부력 이용 방법을 제시하고 있다. 캘리퍼 방법은 버니어캘리퍼스로 암석시험편의 직경과 높이를 측정하고 이를 통해 부피를 결정하여 공극률을 결정하는 방법이고, 부력 이용 방법은 수중 중량을 이용하여 부력의 원리로 암석시험편의 부피를 결정하여 공극률을 결정하는 방법이다. 본 연구에서는 두 방법을 모두 사용하여 공극률을 측정하였으며, 측정된 공극률을 비교하여 제주도 현무암에 적합한 값을 결정하였다.

Fig. 5는 공극률 측정 방법에 따른 각 시험편의 공극률을 비교한 그래프로써 x축은 캘리퍼 방법, y축은 부력 이용 방법으로 결정된 공극률이다. 그림에서 나타난 바와 같이 공극률이 증가할수록 캘리

퍼 방법과 부력 이용 방법의 결과값의 차이가 커지고 있다. 이러한 차이는 시험편의 공극률을 결정할 때에 표면 기공의 고려 여부에 따른 차이로 볼 수 있다. 공극의 부피는 두 방법 모두 시험편의 표면건조포화중량과 입자중량의 차이로 결정되므로 표면의 기공을 제외하여 결정한다. 그러나 캘리퍼 방법의 경우 시험편의 부피는 상, 중, 하면의 직경을 측정하고 평균값으로 단면적을 결정한 뒤 높이를 곱하여 결정하므로 표면의 기공을 포함하여 계산되는 반면, 부력 이용 방법은 표면건조포화중량과 수중중량의 차를 통해서 결정하므로 표면의 기공을 시험편의 부피에서 제외하게 된다. 따라서 제주도 현무암과 같이 표면 기공이 발달하고, 불규칙적인 암석에 있어서 상대적으로 캘리퍼 방법이 부력 이용 방법보다 시험편의 부피를 크게 결정하여 공극률을 과소평가 하게 된다. 본 시험에서 캘리퍼 방법과 부력 이용 방법 사이의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$n_b = 1.043 n_c \quad R^2 = 0.94 \quad (1)$$

여기서, n_b : 부력 이용 방법으로 측정된 공극률(%)

n_c : 캘리퍼 방법으로 측정된 공극률(%)

따라서 현무암과 같이 표면의 기공이 크고 불규칙한 화산암의 공극률을 측정할 때에는 캘리퍼 방법보다 부력 이용 방법을 사용하는 것이 보다 타당하다고 판단된다. 따라서 부력 이용 방법으로 측정된 공극률을 사용하여 현무암의 역학적 특성을 분석하였다.

3.3 공극률과 역학적 특성과의 관계

본 절에서는 부력 이용 방법으로 측정된 공극률과 현무암의 역학적 특성과의 상관성을 분석하였다. 역학적 특성으로는 일축압축강도, 탄성계수, 인장강도, 탄성파속도를 사용하였으며, 건조와 습윤상태로 구분하여 상관성을 분석하였다. 건조시험에 대한 결과는 아래첨자에 ‘dry’로 표기하였으며, 습윤시험의 경우에는 ‘wet’을 표기하여 구분하였다.

3.3.1 공극률과 일축압축강도

Fig. 6은 공극률과 일축압축강도와의 관계를 나타낸 것으로, Nam et al. (2008a)이 수행한 시험 결과와 함께 나타내었다. Nam et al. (2008a)은 조면암질 현무암과 표선리 현무암, 스크리아에 대해 물리적, 역학적 시험들을 수행하였으나 스크리아는 암석으로 분류할 수 없으므로 본 논문에서는 조면암질 현무암과 표선리 현무암에 대한 결과만을 인용하였다. 또한 시험편 별로 데이터가 정리되어 있지 않으므로 암석별 평균값을 가지고 상관성 분석에 사용하였으며, Fig. 6에는 평균값과 표준편차를 나타내었다.

현무암의 일축압축강도는 공극률이 증가함에 따라 건조상태와

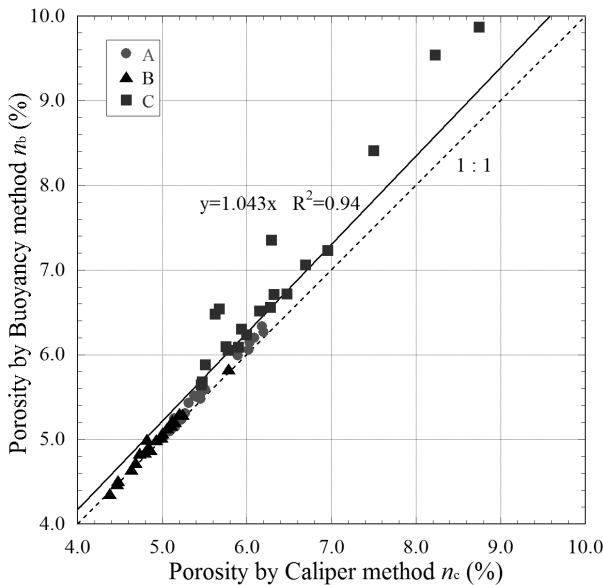


Fig. 5. Comparison of Two Different Methods for the Estimation of Porosity

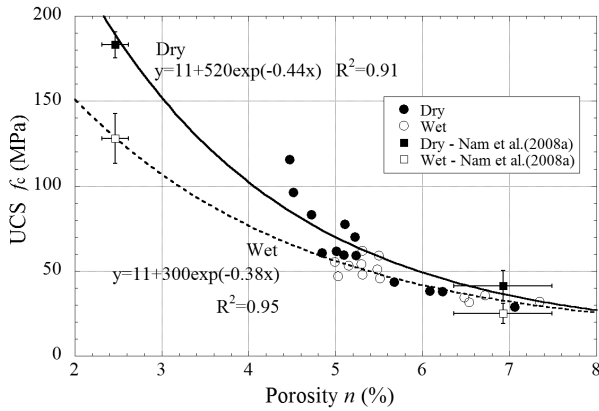


Fig. 6. Relationship of Porosity and UCS

습윤상태 모두 지속적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 Pola et al. (2010)의 공극률과 일축압축강도의 관계와 같은 경향을 나타내고 있다. Eqs. (2) and (3)은 건조시편과 습윤시편에 대한 회귀분석식을 나타낸 것이며, 건조시편의 경우 결정계수(R^2) 값이 0.91로 신뢰성이 높게 나타났으며, 습윤시편의 경우도 0.95로 매우 높은 신뢰성을 나타내었다. 공극률이 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 것은 공극률이 증가할수록 유효압축면적이 감소하기 때문으로 판단된다.

습윤여부에 따른 강도의 영향은 기존 연구결과(Kim, 2007; Nam et al., 2008(a); Nam et al., 2008(b))들과 같이 습윤시편의 강도가 건조시편의 강도보다 작게 나타나고 있다. 이는 콘크리트 공시체에서 수침시 외부와 내부의 팽창 정도가 달라 이로 인한 잔류응력이 발생하여 압축강도를 저하(Bartlett and MacGregor, 1994)시키는 것과 동일한 영향일 것으로 추측된다. 그러나 공극률이 증가함에 따라 건조시편과 습윤시편의 강도차이는 감소하게 되고 약 6.0% 이상에서는 강도차이가 크지 않다. 공극률이 증가함에 따라 습윤 여부에 따른 강도 차이가 감소하는 것은 암석이 흡수한 수분에 의해 강도가 감소하는 효과보다 기공에 의한 구조적인 강도 저하의 영향이 더 크게 나타나기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 제시하는 관계식은 2.5~7.5% 구간에 적용할 수 있으나 보다 일반적인 관계식을 위해서는 공극률이 4.5%이하, 7.5%이상에 속한 현무암에 대해 추가적인 시험이 더 필요할 것으로 판단된다.

$$f_{c(dry)} = 520 e^{-0.44n} + 11 \quad R^2 = 0.91 \quad (\text{for } 2.5 \leq n \leq 7.5) \quad (2)$$

$$f_{c(wet)} = 300 e^{-0.38n} + 11 \quad R^2 = 0.95 \quad (\text{for } 2.5 \leq n \leq 7.5) \quad (3)$$

여기서, f_c : 일축압축강도(MPa)
 n : 공극률(%)

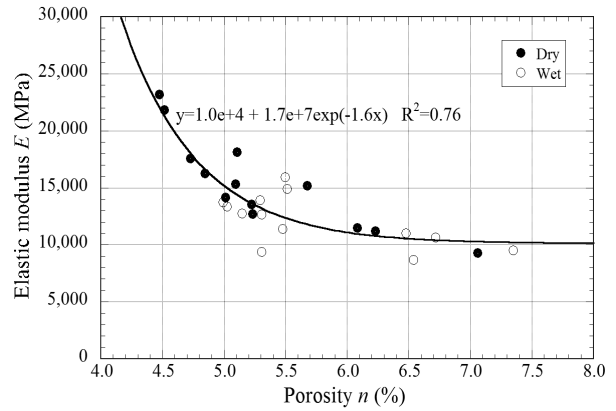


Fig. 7. Relationship of Porosity and Elastic Modulus

3.3.2 공극률과 탄성계수

Fig. 7은 공극률과 탄성계수와의 관계를 나타낸 것으로 공극률이 증가함에 따라 탄성계수는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 공극률과 탄성계수와의 관계의 경우 일축압축강도와 같이 지속적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으며 결정계수 R^2 이 0.76으로 비교적 신뢰성이 있는 관계를 보이고 있다. 습윤상태에 따라, 최대압축강도에 있어서는 그 영향이 있으나 탄성계수에 있어서는 그 영향이 별로 나타나지 않으며 그 이유도 별로 없다고 판단되어 하나의 데이터로 회귀분석하였다. 동일한 공극률에서 탄성계수의 편차가 크게 나타나는 것은 축변형률 측정시 스트레인게이지(strain gauge)의 부착 위치에 따른 국부적인 영향이 크다고 판단된다. 게이지를 시편의 중앙에 부착하기는 하나 시편에 형성된 기공의 배열과 형태에 따라 파괴양상이 현저하게 달라지므로 축변형률 값에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 기공이 분포한 현무암에 대해서는 축변형률 측정시 게이지가 아닌 익스텐소미터(extensometer)나 LVDTs를 사용하는 것이 보다 바람직 할 것으로 판단된다. 회귀분석에 의한 공극률과 탄성계수의 관계식은 다음과 같다.

$$E_s = 1.7 \times 10^7 e^{-1.6n} + 10,000 \quad R^2 = 0.76 \quad (4)$$

(for $4.5 \leq n \leq 7.5$)

여기서, E_s : 할선탄성계수(MPa)
 n : 공극률(%)

3.3.3 공극률과 인장강도

공극률에 따른 인장강도와의 관계를 Fig. 8에 나타내었으며, Nam et al. (2008a)의 연구결과를 추가로 나타내었다. Nam et al. (2008a)의 연구 결과만으로는 공극률과 인장강도 사이에 공극률

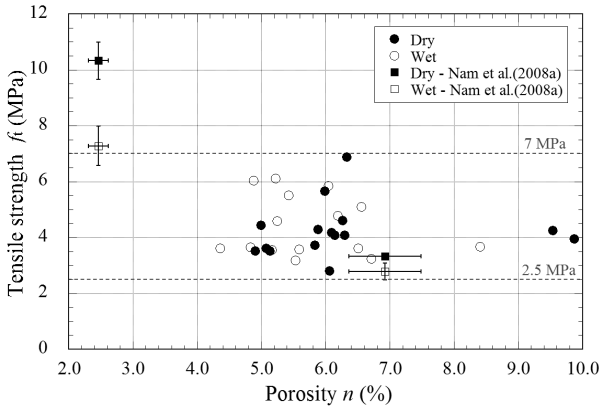


Fig. 8. Relationship of Porosity and Tensile Strength

과 압축강도와의 상관성과 유사하게 나타날 것으로 보이나 본 시험에서는 넓은 범위의 공극률과 골고루 분포된 많은 데이터 값의 부족으로 공극률과 인장강도와의 상관성을 단정하기 어려웠다. 이는 또한 화산암인 현무암의 인성(toughness)이 다른 암석에 비해 크기 때문에 기공의 형상과 암석의 구조에 따라 인장강도의 차이가 크게 나타나는 것으로 여겨진다. 인장강도는 공극률이나 습윤 여부에 상관없이 2.5~7MPa의 범위에 분포하고 있다.

3.3.4 공극률과 탄성파속도

Fig. 9는 공극률과 P-파 속도와의 관계, Fig. 10은 공극률과 S-파 속도와의 관계를 나타낸 것으로 건조시편의 경우 공극률이 증가함에 따라 탄성과 속도가 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 습윤시편의 경우 공극률의 변화에 따라 탄성과속도의 변화가 크지 않음을 나타내고 있다. 여기서 P-파의 속도는 시험체에 구속압 (confining pressure)이 작용하지 않는 상태의 종파(longitudinal wave or rod wave)의 속도이다. 일반적으로 구속압이 작용하는 경우의 P-파의 속도는 그렇지 않은 경우에 비하여 조금 높게 나타나며, 낮은 구속압에서 P-파의 속도는 빠르게 증가하고 그 후에는 느리게 증가하는데(Tsuji and Iturrino, 2008), 낮은 구속압에서의 빠른 증가는 주로 미세균열과 결함의 폐합에 의한 것이다(Kuster and Toksoz, 1974).

공극률과 탄성파속도와의 관계식을 Eqs. (5)-(6)에 나타내었다. 건조시편의 경우 R^2 값이 P-파 속도에서 0.72, S-파 속도에서 0.73으로 공극률과 탄성파속도 사이의 상관성이 있는 관계를 나타내고 있으나, 습윤시편의 경우에는 5%이하의 공극률 데이터가 없어 상관성을 평가할 수 없었다.

$$V_{p(dry)} = 3.9 \times 10^5 e^{-1.3n} + 3,200 \quad R^2 = 0.72$$

(for $4.5 \leq n \leq 7.5$) (5)

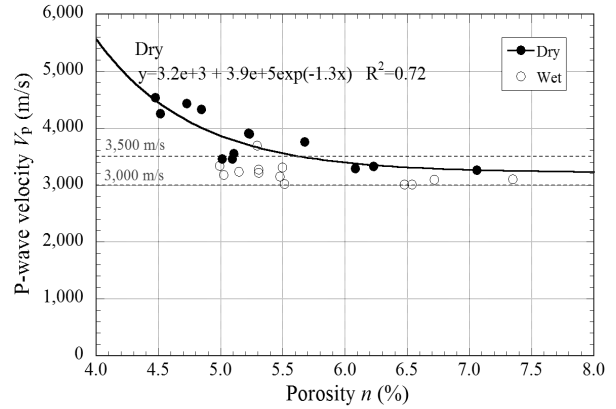


Fig. 9. Relationship of Porosity and P-wave Velocity

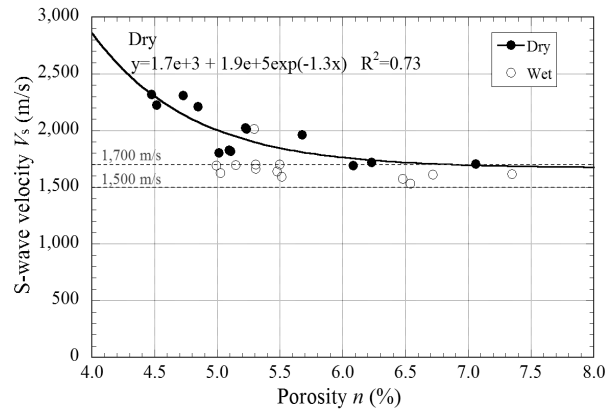


Fig. 10. Relationship of Porosity and S-wave Velocity

$$V_{s(dry)} = 1.9 \times 10^5 e^{-1.3n} + 1,700 \quad R^2 = 0.73$$

(for $4.5 \leq n \leq 7.5$) (6)

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

Figs. 9 and 10에 나타낸 것과 같이 건조시편의 경우 탄성파속도는 공극률이 증가함에 따라 공극률이 처음에는 급격히 감소하다가 나중에는 서서히 감소하는 오펜곡선적으로 감소하여 공극률이 약 6% 이상에서는 그 감소율이 매우 작았다. 그리고 습윤시편의 경우 공극률이 5.0% 이상에서 탄성파속도의 변화율이 매우 작았으며, P-파인 경우 3,000~3,500m/s 사이에, S-파인 경우 1,500~1,700m/s 사이에 분포하고 있으며, 습윤상태에 따른 탄성파속도는 건조상태가 약간 크나 거의 비슷하게 나타나고 있다. 이는 Knight and Nolen-Hoeksema (1990)의 연구에서 사암에 대하여 구속압이

없는 P파 속도(엄밀한 의미에서 longitudinal wave or rod wave 속도에 대한 흡수율의 영향에 관한 실험 결과 시편이 완전포화에 가까우면 습윤상태의 영향이 크게 증가하지만 보통의 습윤 상태인 경우 건조상태의 속도가 조금 빠른 정도로 거의 비슷한 결과와 유사하다.

3.4 탄성파속도와 역학적 특성과의 관계

탄성파속도는 종파인 P-파와 횡파인 S-파가 있는데 P-파와 S-파는 비례관계이므로 상관성 분석에는 P-파만을 사용하였다. Fig. 11은 탄성파속도와 일축압축강도의 관계를 나타낸 것으로, 탄성파속도가 증가함에 따라 일축압축강도가 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 각 데이터에 대한 회귀분석 결과, 건조시편인 경우 $R^2=0.62$ 로 신뢰성이 있는 관계를 보이고 있으며, 습윤시편인 경우 $R^2=0.40$ 로 상관성이 다소 낮은 관계를 나타내고 있다. 탄성파속도에 대한 탄성계수와의 관계는 Fig. 12에 나타내었다. 건조시편인 경우 $R^2=0.59$ 로 다소 상관성이 있는 비례 관계를 확인할 수 있었으나, 습윤시편인 경우 $R^2=0.18$ 로 상관성을 찾기

어려웠다. 습윤시편의 경우 일축압축강도나 탄성계수와의 상관성이 낮게 나타나는 이유는 탄성파속도의 범위가 좁고 이에 대한 일축압축강도와 탄성계수의 변화 범위가 좁기 때문이다. 탄성파속도와 일축압축강도, 탄성계수와의 관계식은 다음과 같다.

$$f_{c(dry)} = 0.043 V_{p(dry)} - 98 \quad R^2 = 0.62$$

(for $3,000 \leq V_{p(dry)} \leq 4,500$) (7)

$$f_{c(wet)} = 0.036 V_{p(wet)} - 68 \quad R^2 = 0.40$$

(for $3,000 \leq V_{p(wet)} \leq 3,800$) (8)

$$E_s = 6.8 V_{p(dry)} - 10,000 \quad R^2 = 0.59$$

(for $3,000 \leq V_{p(dry)} \leq 4,500$) (9)

$$E_s = 5.2 V_{p(wet)} - 4,600 \quad R^2 = 0.18$$

(for $3,000 \leq V_{p(wet)} \leq 3,800$) (10)

여기서, V_p : P-파 속도(m/s)

f_c : 일축압축강도(MPa)

E_s : 할선탄성계수(MPa)

4. 결론

화산암인 제주도 현무암의 공극률에 따른 역학적 특성과의 관계를 분석해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 제주도 현무암과 같이 표면 공극이 큰 화산암의 공극률을 결정할 때에는 표면 공극을 고려할 수 없는 켈리퍼 방법은 공극률을 과소평가하게 되므로 표면 공극을 제외하고 공극률을 결정하는 부력 이용 방법을 사용하는 것이 보다 합리적이다.
- (2) 현무암의 일축압축강도는 공극률이 증가함에 따라 지수적으로 감소하며, 매우 높은 상관성을 나타내고 있다.
- (3) 현무암의 탄성계수는 공극률과 일축압축강도와의 관계와 같이 공극률이 증가함에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 보였다.
- (4) 본 시험에서는 현무암의 공극률과 인장강도와의 관계를 찾기 어려웠으며, 인장강도는 공극률이나 습윤 여부에 관계없이 2.5~7MPa 범위에 분포하였다.
- (5) 현무암의 탄성파속도는 공극률의 증가에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 나타내었다.
- (6) 현무암의 일축압축강도와 탄성계수는 탄성파속도에 선형적으로 증가하는 비례관계를 나타내었다.
- (7) 일반적으로 현무암의 습윤상태의 일축압축강도가 건조상태보

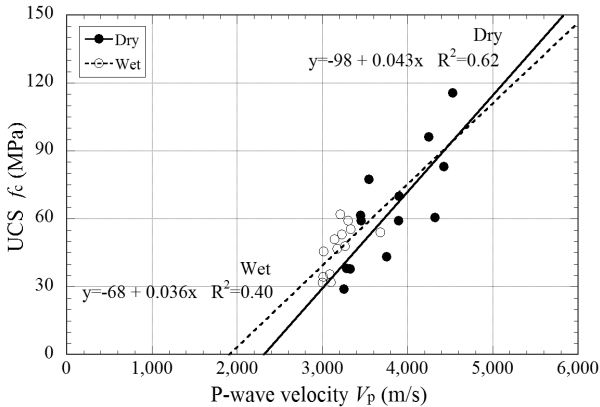


Fig. 11. Relationship of P-wave Velocity and UCS

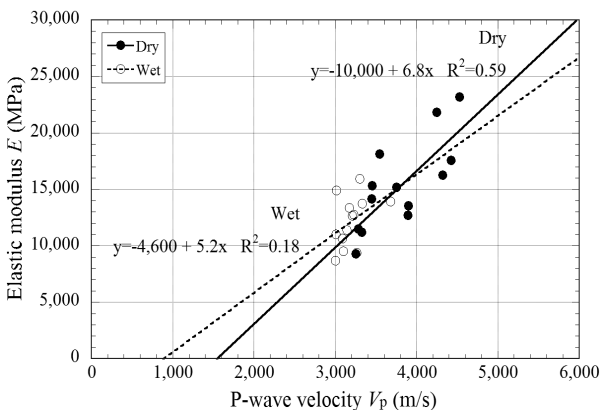


Fig. 12. Relationship of P-wave Velocity and Elastic Modulus

다 낮게 나타났으며, 공극률이 증가함에 따라 그 차이는 감소하였다.

- (8) 본 시험연구에서는 시료의 수가 제한적이어서 상관성을 분석하는데 한계가 있을 수 있고, 특히 습윤상태의 경우 보다 넓은 범위의 공극률에 대한 시험데이터가 필요하며, 또한 기공의 크기, 구조, 양이 다른 현무암에 대한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 산업통상자원부 한국산업기술진흥원 제주지역사업평가원의 광역경제권 선도산업 육성사업의 지원(R0001524)과 2012년도 산업통상자원부의 재원 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업(20094020200020)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

- Bartlett, F. M. and MacGregor, J. G. (1994). "Effect of moisture condition on concrete core strengths." *ACI Material Journal*, ACI, Vol. 91, No. 3, pp. 227-236.
- Cho, T. C., Lee, S. B., Hwang, T. J. and Won, K. S. (2009). "Variations of mechanical properties of hallasan trachyte with respect to the degree of weathering." *J. of Korean Society for Rock Mechanics*, KSRM, Vol. 19, No. 4, pp. 287-303 (in Korean).
- Cox, K. G., Bell, J. D. and Pankhurst R. J. (1979). *The interpretation of igneous rocks*, Allen and Unwin Ltd., London, p. 450.
- Eum, K. Y. (2002). *Study on the mechanical properties of volcanic rocks in Chejudo*, Ph.M. Dissertation, Yonsei University (in Korean).
- Kim, J. H. (2007). *A study on the mechanical characteristics and the strength in Pyoseonri Basalt*, Ph.M. Dissertation, Cheju National University (in Korean).
- Knight, R. and Nolen-Hoeksema, R. (1990). "A laboratory study of the dependence of elastic wave velocities on pore scale fluid distribution." *Geophysical Research Letters*, Vol. 17, No. 10, pp. 1529-1532.
- Korea Gas Safety Corporation (KGS) (2012). *Geology and rock mechanics II (for geotechnical engineer)*, CIR Publishing Company (in Korean).
- Korean Society for Rock Mechanics (KSRM) (2010). *Standard test method of rock*, CIR Publishing Company (in Korean).
- Kuster, G. T. and Toksoz, M. N. (1974). "Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media, Part I. Theoretical formulations." *Geophysics*, Vol. 39, pp. 587-606.
- Nam, J. M., Yun, J. M., Song, Y. S. and Kim, J. H. (2008a). "Analysis of engineering properties to basalt in Cheju Island." *J. of Korean Geosynthetic Society*, KGSS, Vol. 7, No. 1, pp. 13-21 (in Korean).
- Nam, J. M., Yun, J. M., Song, Y. S. and Kim, J. H. (2008b). "Analysis of influence factors to compressive and tensile strength of basalt in Cheju Island." *The Journal of Eng. Geology*, The Korean Society of Engineering Geology, Vol. 18, No. 2, pp. 205-215 (in Korean).
- Park, K. H., Ahn, J. S., Kee, W. S. and Park, W. B. (2006). *Guidebook for a geological tour of Jeju Island*, Report of KIGAM and JDI (in Korean).
- Park, K. H., Song, K. Y., Hwang, J. H., Lee, B. J., Cho, D. L., Kim, J. C., Cho, B. W., Kim, Y. B., Choi, P. Y., Lee, S. R. and Choi, H. I. (1998). *Geological report of the Cheju-Aewol sheet (1:50,000)*, Report of KIGAM (in Korean).
- Pola, A., Crosta, G. B., Castellanza, R., Agliardi, F., Fusi, N., Barberini, V., Norini, G. and Villa, A. (2010). "Relationships between porosity and physical mechanical properties in weathered volcanic rocks." *Volcanic rock mechanics*, Olalla, C., Luis, E. H., Rodriguez-Losada, J. A., Peruchó, A. and Gonzalez-Gallego, J., CRC Press, London, UK, pp. 73-78.
- Tsuji, T. and Iturrino G. J. (2008). "Velocity-Porosity relationships in oceanic basalt from eastern flank of the Juan de Fuca ridge: The Effect of Crack Closure on Seismic Velocity." *Exploration Geophysics*, ASEG, Vol. 39, No. 1, pp. 41-51.
- Yoon, S. H. and Ko, K. W. (2011). *Topography, geology, and underground water in Jeju Island*, Nae Ha Publishing Company (in Korean).