

# 제주도 화산암의 압열인장강도와 일축압축강도로부터 추정된 점착력과 내부마찰각

## Cohesion and Internal Friction Angle Estimated from Brazilian Tensile Strength and Unconfined Compressive Strength of Volcanic Rocks in Jeju Island

문 경 태<sup>1</sup> Moon, Kyoungtae

양 순 보<sup>2</sup> Yang, Soon-Bo

### Abstract

With respect to the tensile strength of volcanic rocks in Jeju Island, a comparative study was conducted using the existing research results and the test results performed in this study. In addition, the characteristics and effectiveness of the cohesion and internal friction angle estimated from the Brazilian tensile strength and unconfined compressive strength of Jeju volcanic rocks were investigated. As results, the Brazilian tensile strength of Jeju volcanic rocks was closely related to absorption, and decreased exponentially as the absorption increased. It was confirmed that the internal friction angle was closely related to the ratio of unconfined compressive strength to Brazilian tensile strength ( $\sigma_c / \sigma_t$ ), and increased logarithmically as the ratio of  $\sigma_c / \sigma_t$  increased. In addition, the ratios of  $\sigma_c / \sigma_t$  of Jeju volcanic rocks were in the range of 5~20 depending on the magnitude of internal friction angle. In the case of cohesion, it was closely related to the absorption and Brazilian tensile strength. The cohesion exponentially decreased as the absorption increased, such as the relation between the Brazilian tensile strength and absorption. It was confirmed that there was a linear relation between the cohesion and Brazilian tensile strength.

### 요 지

본 연구에서는, 제주도 화산암의 인장강도와 관련하여, 기존의 연구결과 및 본 연구에서 수행된 시험결과에 대한 종합적인 비교·분석을 수행하였으며, 제주도 화산암의 압열인장강도와 일축압축강도로부터 추정된 점착력과 내부 마찰각의 특성 및 그 유효성을 각각 살펴보았다. 제주도 화산암의 압열인장강도는 흡수율과 밀접한 관계에 있었으며, 흡수율이 증가함에 따라 지수 함수적으로 급격하게 감소하는 특성을 갖고 있었다. 내부 마찰각은 압열인장강도에 대한 일축압축강도의 비( $\sigma_c / \sigma_t$ )와 밀접한 관계에 있었으며, 강도비  $\sigma_c / \sigma_t$ 가 증가함에 따라 내부 마찰각은 로그 함수적으로 증가하는 특성을 갖고 있었다. 그리고 제주도 화산암의 강도비  $\sigma_c / \sigma_t$ 는 내부 마찰각의 크기에 따라 약 5~20 사이의 값을 나타내고 있었다. 한편, 점착력( $c$ )의 경우, 흡수율 및 압열인장강도와 밀접한 관계에 있음을 확인할 수 있었다. 점착력과 흡수율 사이에는 압열인장강도와 흡수율의 관계와 같이 지수 함수적인 관계에 있으며, 점착력과

1 비회원, 제주대학교 토목공학과 박사후 연구원 (Postdoctoral Researcher, Dept. of Civil Eng., Jeju National Univ.)

2 정회원, 일본 국립연구개발법인 해상·항만·항공기술연구소 항만공항기술연구소 연구관 (Member, Researcher, Port and Airport Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, Japan, Tel: +81-46-844-5054, Fax: +81-46-844-4577, yan-s2@p.mpat.go.jp, beeo17@hotmail.com, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

압열인장강도 사이에는 선형관계에 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 일축압축강도와 압열인장강도로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력은 각각 삼축압축강도로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력에 비해 약 13% 과소평가 그리고 약 24% 정도 과대평가되는 경향을 보였다.

**Keywords :** Absorption, Brazilian tensile strength, Bulk specific gravity, Cohesion, Internal friction angle, Jeju Island, Unconfined compressive strength, Volcanic rocks

## 1. 서론

제주도는 약 200만 년 전부터 역사시대까지 발생한 여러 차례의 화산활동에 의해 형성된 섬으로(Yoon and Ko, 2011), 제주도의 지반은 얇은 토사층 아래 용암류 암반과 화산쇄설층 및 공동이 불규칙하게 발달된 층상구조로 이루어져 있으며, 지역마다 다양한 지질특성을 보이고 있다. 특히 제주도의 암반은, 육지부에 존재하는 심성암 또는 퇴적암과 달리, 용암 속에 존재하던 휘발성분이 미쳐 빠져나가지 못하고 굳으면서 형성된 기공(Vesicle)이 불규칙적으로 발달한 다공성 구조를 갖고 있는 것이 특징이라고 할 수 있다. 그리고 제주도에서는 이전부터 대규모 토목공사 및 지하수 개발에 있어서 수많은 시행착오를 경험하고 있으며(Kim, 2006), 최근에는 카본프리아일랜드라는 슬로건 아래 육·해상 풍력발전단지의 건설 및 공항인프라 확충을 위한 토목공사 등 대규모 건설공사가 계획되어 있다. 이러한 대규모 공사에 대비하여 제주도 화산암석 및 암반에 대한 공학적 관점에서의 물리적, 역학적 특성 및 설계에 반영할 지반강도정수에 대한 심도 깊은 연구가 요구되고 있는 실정이다. 이러한 요구에 부응하여, 제주도 화산암에 대한 물리적 및 역학적 특성과 관련하여 제주도의 여러 지역에서 채취된 암석에 대하여 연구가 이루어져 왔지만(Kim and Choi, 1991; Eum, 2002; Kim, 2006; Nam et al., 2008a, 2008b, 2009; Cho et al., 2009; Moon et al., 2014; Yang, 2016; Yang and Boo, 2019), 대부분의 연구는 암종에 따른 특성을 기술하는데 그치고 있으며, 종합적인 비교 분석은 수행되지 않았다.

기존의 연구결과를 포함한 제주도 화산암의 물리·역학적 특성에 대한 종합적인 비교 분석을 통하여(Yang, 2014, 2015a, 2015b; Yang and Sassa, 2016, 2017), 제주도 화산암은 다공성 구조의 특성을 나타내는 파라미터인 흡수율 및 유효공극률과 겉보기비중의 관계에 따라 크게 두 개의 타입으로 구분할 수 있다. 그리고 제주도 화산암의 일축압축강도와 점착력은 위의 관계에 따라

두 개의 타입으로 구분할 수 있으며, 흡수율 또는 유효공극률이 증가함에 따라 제주도 화산암의 일축압축강도와 점착력은 지수 함수적으로 급격히 감소하는 경향을 보였다. 내부 마찰각은 흡수율 또는 유효공극률이 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하는 경향이 있음이 밝혀졌다.

제주도 화산암의 인장강도(tensile strength)와 관련하여, 직접인장강도(direct tensile strength) 시험을 수행한 연구는 없었으며, 간접인장강도(Indirect tensile strength) 시험법의 하나인 암석 공시체의 성형 및 시험이 비교적 간편한 압열인장강도(Brazilian tensile strength) 시험이 몇몇의 연구자에 의해 수행되었지만(Eum, 2002; Kim, 2006; Nam et al., 2008b; Moon et al., 2014), 그 특성에 대한 종합적인 비교 분석은 아직까지 수행되지 않았다.

한편, Piratheepan et al.(2012)은 압열인장강도와 일축압축강도로부터 Mohr-Coulomb 파괴기준의 강도정수인 점착력과 내부 마찰각을 추정할 수 있는 방법을 제안하였으며, 플라야애쉬 또는 슬래그에 의해 고결된 입상체에 대하여 그 유효성을 검증하였다. 그 후, Sivakugan et al.(2014)은 Piratheepan et al.(2012)에 의해 제안된 방법을 이용하여, 다양한 성인의 암석의 압열인장강도와 일축압축강도로부터 추정된 점착력과 내부 마찰각을 검토하였다. 그러나 위의 두 연구는 삼축압축시험 결과로부터 도출된 점착력과 내부 마찰각과의 비교 분석은 수행하고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 제주도 화산암의 압열인장강도와 관련하여, 기존의 연구결과 및 새롭게 수행된 시험결과에 대하여 종합적인 비교 분석을 수행하였으며, 제주도 화산암의 압열인장강도와 일축압축강도로부터 Piratheepan et al.(2012)의 방법에 의해 추정된 점착력과 내부 마찰각의 특성을 각각 살펴보고자 한다. 또한 압열인장강도 및 일축압축강도로부터 추정된 점착력과 내부 마찰각을 삼축압축시험 결과로부터 도출된 점착력 및 내부 마찰각과 비교하여 그 유효성을 검증하고자 한다.

## 2. Mohr-Coulomb 파괴기준

이 장에서는 Mohr-Coulomb 파괴기준에 대해서 간단히 설명하고, Piratheepan et al.(2012)에 의해 제안된 압열인장강도와 일축압축강도로부터 점착력과 내부 마찰각을 추정하는 방법에 대해서 기술하고자 한다.

암반역학에서 사용되는 파괴기준들 중의 하나인 Mohr-Coulomb 파괴기준은 수식이 단순하고, 이해하기 쉽고, 간단하게 사용할 수 있기 때문에 자주 사용되고 있다. 적어도 3개 이상의 서로 다른 구속압력 아래에서 이루어진 삼축압축시험 결과를 수직응력과 전단응력 평면상에 Mohr원을 나타냄으로써, Mohr-Coulomb 파괴 포락선과 인장강도를 나타내는 최대인장기준선을 결정할 수 있다. 여기서 Mohr-Coulomb 파괴 포락선은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

여기서,  $\tau_f$ 는 전단 파괴면을 따라 발생하는 전단응력 또는 전단강도,  $c$ 는 점착력,  $\sigma_n$ 은 전단면에 작용하는 수직응력, 그리고  $\phi$ 는 내부 마찰각을 의미한다.

Fig. 1에 압열인장강도시험과 일축압축강도시험의 수행 시, 공시체의 중심에 작용하는 각각의 응력상태를 나타내는 Mohr원을 수직응력과 전단응력 평면상 나타내

었다.

압열인장강도시험과 일축압축강도시험에 있어서, 등방성 암석 공시체의 중심에 작용하는 최소주응력  $\sigma_3$ 과 최대주응력  $\sigma_1$ 을 식 (2)와 (3)과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{3(t)} = -\frac{2P}{\pi Dt} = -\sigma_t = -Y, \quad \sigma_{1(t)} = -\frac{6P}{\pi Dt} = 3Y$$

: Brazilian tensile test (2)

$$\sigma_{3(c)} = 0, \quad \sigma_{1(c)} = \sigma_c: \text{Unconfined compressive test (3)}$$

여기서,  $\sigma_t$ 는 인장강도,  $P$ 는 파괴하중,  $D$ 는 암석 공시체의 직경,  $t$ 는 암석 공시체의 길이,  $\sigma_c$ 는 일축압축강도를 나타낸다.

압열인장강도시험과 일축압축강도시험의 암석 공시체에 작용하는 응력상태를 나타낸 Fig. 1의 Mohr 원으로부터 식 (4)와 (5)와 같은 삼각함수를 각각 얻을 수 있으며, 식 (4)와 (5)로부터 내부 마찰각과 점착력의 관계식을 식 (6)과 (7)과 같이 각각 얻을 수 있다.

$$\sin \phi = \frac{2Y}{c \cot \phi + Y} \quad (4)$$

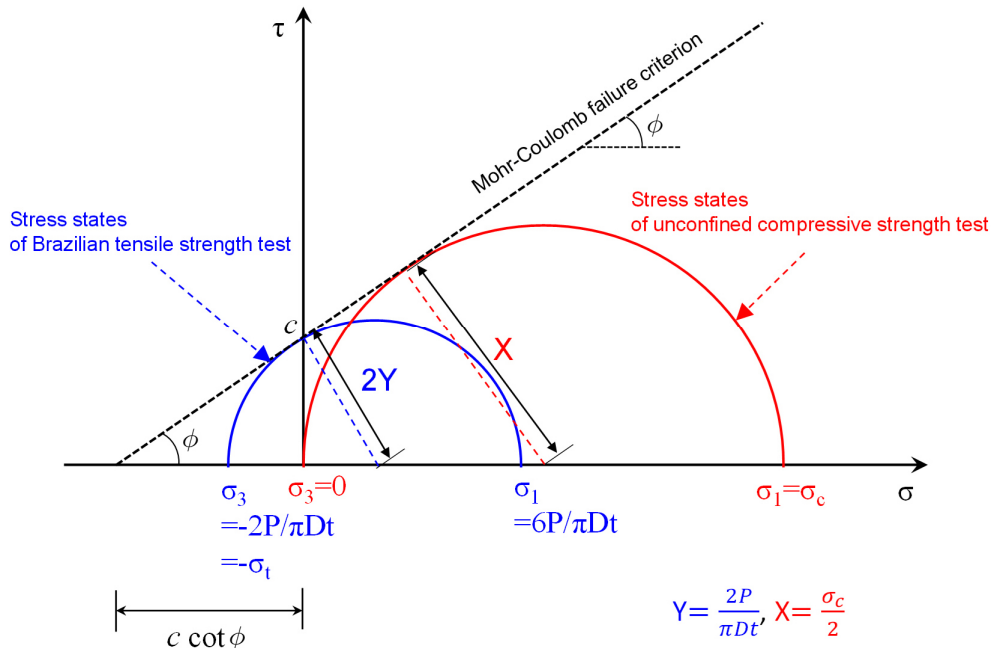


Fig. 1. Mohr circles for the stress states of Brazilian tensile strength test and unconfined compressive strength test

$$\sin\phi = \frac{X}{c \cot\phi + X} \quad (5)$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{X-2Y}{X-Y}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\sigma_c - 4\sigma_t}{\sigma_c - 2\sigma_t}\right) \quad (6)$$

$$c = \frac{XY}{\sqrt{Y(2X-3Y)}} = \frac{0.5\sigma_c\sigma_t}{\sqrt{\sigma_t(\sigma_c - 3\sigma_t)}} \quad (7)$$

뿐만 아니라, 식 (4)와 (5)로부터 일축압축강도와 압열인장강도를 식 (8)과 (9)와 같이 점착력과 내부 마찰각의 함수로 표현할 수 있다. 그리고 식 (8)과 (9)로부터 압열인장강도에 대한 일축압축강도의 비( $\sigma_c/\sigma_t$ )를 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (10)으로부터 강도비( $\sigma_c/\sigma_t$ )는 내부 마찰각의 함수임을 알 수 있다.

$$\sigma_c = 2X = \frac{2c \cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad (8)$$

$$\sigma_t = Y = \frac{c \cos\phi}{2 - \sin\phi} \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_t} = \frac{2(2 - \sin\phi)}{1 - \sin\phi} \quad (10)$$

### 3. 제주도 화산암의 압열인장강도를 다룬 기존의 연구

이 장에서는 제주도 화산암석에 대한 압열인장강도를 다룬 기존의 연구를 간단히 서술하고, 그 연구결과를 표로 정리하였다. 일축압축강도와 압열인장강도의 경우 공시체의 직경 및 형상의 영향을 받고 있음은 기존의 연구를 통하여 알려져 있으며(ASTM D7012-04; Hoek and Brown, 1997; Thuro et al., 2001; Yu et al., 2006), 내부 마찰각과 점착력을 추정하기에 앞서 암석 공시체의 크기 및 형상의 영향을 고려하여 일축압축강도 및 압열인장강도를 교정하는 것은 중요하다. 그러나 현재까지 현무암 암석의 공시체의 직경 및 형상의 영향을 조사한 연구가 없기 때문에, 본 연구에서는 아래에 서술한 방법과 같이 일축압축강도와 압열인장강도를 각각 교정하고, 기존에 발표된 연구결과와 본 연구에서 수행한 실험결과를 종합적으로 비교 분석하고자 한다.

일축압축강도와 관련하여, ASTM D7012-04에서는 암석 공시체의 종횡비( $D/H$ ;  $D$ : 암석 시편의 직경,  $H$ : 암석

시편의 높이)의 영향을 고려하여 식 (11)과 같은 교정식을 제안하고 있으며, Hoek and Brown(1997)은 암석 공시체의 직경( $D$ )에 대한 영향을 고려하여 식 (12)와 같은 교정식을 제안하고 있다. 한편, 압열인장강도는 암석 공시체의 직경( $D$ )의 크기에 대한 영향 보다는 암석 공시체의 형상( $t/D$ ;  $t$ : 암석 시편의 두께,  $D$ : 암석 시편의 직경)의 영향을 크게 받으며(Thuro et al., 2001), Yu et al.(2006)는 암석 공시체의 형상의 영향을 고려한 압열인장강도의 교정식을 식 (13)과 같이 제시하고 있다. Tables 1, 2, 4와 5에 각각 나타낸 교정일축압축강도는 식 (11)과 식 (12)를 고려한 종횡비( $D/H$ )가 0.5이고, 직경( $D$ )이 50mm인 암석 공시체에 대한 일축압축강도 값이며, 교정압열인장강도는 식 (13)에 의해 교정된 값을 나타내고 있다.

$$\sigma_c = \frac{\sigma'_c}{0.88 + 0.222(D/H)} \quad (11)$$

여기서,  $\sigma_c$ 는 교정된 일축압축강도,  $\sigma'_c$ 는 측정된 일축압축강도를 나타낸다.

$$\sigma_{c50} = \frac{\sigma_c}{(50/D)^{0.18}} \quad (12)$$

여기서,  $\sigma_{c50}$ 은 암석 공시체의 직경이 50mm인 암석에 대한 일축압축강도를 나타낸다.

$$\sigma_t = (0.262(t/D) + 1)\sigma'_t \quad (13)$$

여기서,  $\sigma_t$ 는 암석 공시체 형상의 영향을 고려한 압열인장강도,  $\sigma'_t$ 는 측정된 압열인장강도를 나타낸다.

Eum(2002)은 제주도 조천읍 북촌리, 서귀포시 중문동, 서귀포시 남원읍 한남리, 서귀포시 표선면 한천리 등 4개 지역 일대의 지중 또는 채석장에서 채취한 현무암 시료를 유공질 또는 무공질 암석으로 각각 분류하고, 각각의 분류된 암석 공시체( $D$ : 50mm,  $H$ : 100mm)에 대하여 다양한 물성시험 및 강도시험을 수행하였다. 그는 암석의 기공의 유무에 따른 대표적인 물성 값과 강도 값을 나타내고 있으며, 국내의 화강암 및 현무암의 특성값과 비교하고 있다. Table 1에 Eum(2002)에 의해 수행된 각각의 유공질 암석 및 무공질 암석에 대한 겉보기비중( $G$ ), 함수율( $w$ ), 유효공극률( $n_e$ ), 일축압축강

도, 압열인장강도의 값을 정리하였으며, 교정일축압축강도와 교정압열인장강도의 평균값을 이용하여, 식 (6)과 (7)로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력을 함께 나타내었다.

Kim(2006)과 Nam et al.(2008b)은 서귀포시 성산읍 삼달리 일대에서의 시추를 통하여 채취된 각각의 표선리 현무암, 조면암질 현무암, 스크리아에 대한 암석 공시체 ( $D: 43\text{mm}, H: 86\text{mm}$ )를 제작하여, 다양한 물성시험 및 강도시험을 수행하였으며, 각각의 암석에 대한 대표적인 물성 값과 강도 값을 나타내고 있다. 각각의 암석에 대한 물성 및 강도의 평균값을 Table 2와 같이 정리하였으며, 각각의 암석의 교정일축압축강도와 교정압열인장강도의 평균값을 이용하여 식 (6)과 (7)로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력을 함께 나타내었다. 그리고 교정일축압축강도와 교정압열인장강도로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력의 유효성을 검증하기 위해, Table 3에 Kim(2006)의 일축·삼축압축시험 결과로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력을 나타내었다.

Moon et al.(2014)은 제주시 조천읍 북촌리 일대에서 채취한 현무암에 대하여 육안으로 보기에 기공의 분포가 상이한 3종류의 암석으로 분류하고, 다양한 물성시험 및 일축압축강도시험(공시체 직경( $D$ ): 43mm, 종횡비( $D/H$ ): 0.5), 압열인장강도시험(공시체 직경( $D$ ): 43mm, 형상비( $t/D$ ): 0.5) 등을 수행하였으며, 위의 연구(Eum, 2002; Kim, 2006; Nam et al., 2008b)와 달리, 암석의 유효공극률과 일축압축강도 및 압열인장강도의 상관관계를 살펴보고 있다. 그 결과를 Table 4에 정리하였으며, 각각의 암석의 교정일축압축강도와 교정압열인장강도의 평균값을 이용하여, 식 (6)과 (7)로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력을 함께 나타내었다.

또한 본 연구에서 참고로 한 제주도 00항 지반조사 보고서의 제주도 화산암에 대한 KS 및 ASTM 시험규정에 입각한 물성시험, 일축강도시험 및 압열인장강도시험 결과를 Table 5에 정리하였으며, Table 3과 같이 교정일축압축강도와 교정압열인장강도로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력의 유효성을 검증하기 위해, 일축·

Table 1. Summary of the physical and mechanical characteristics for high-porous and low-porous basaltic intact rocks (Eum, 2002)

	$G$	$w$ (%)	$n_e$ (%)	$\sigma'_c$ (MPa)	$\sigma'_t$ (MPa)	$\sigma_{c50}$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\phi$ (degree)	$c$ (MPa)
	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD		
High-porosity (n = 10)	2.444 $\pm$ 0.083	1.98 $\pm$ 0.35	4.82 $\pm$ 0.76	40.29 $\pm$ 9.86	3.17 $\pm$ 0.66	40.29 $\pm$ 9.86	4.83 $\pm$ 1.01	43.24	8.71
Low-porosity (n = 10)	2.772 $\pm$ 0.057	1.06 $\pm$ 0.2	2.93 $\pm$ 0.48	89.23 $\pm$ 18.87	6.48 $\pm$ 0.99	89.23 $\pm$ 18.87	9.87 $\pm$ 1.51	45.71	18.16

$G$ : bulk specific gravity,  $w$ : absorption,  $n_e$ : effective porosity,  $\sigma'_c$ : unconfined compressive strength,  $\sigma'_t$ : Brazilian tensile strength,  $\sigma_{c50}$ : corrected unconfined compressive strength,  $\sigma_t$ : corrected Brazilian tensile strength,  $\phi$ : internal friction angle,  $c$ : cohesion,  $n$ : the number of tested specimens.

Internal friction angle and cohesion were estimated respectively from Eq. (6) and Eq. (7), using the corrected Brazilian tensile strength and corrected unconfined compressive strength.

Table 2. Summary of the physical and mechanical characteristics for Pyoseonri basalt, Trachy basalt and Scoria (Kim, 2006; Nam et al., 2008b)

	$G$ (n = 5)	$W$ (%) (n = 5)	$n_e$ (%) (n = 5)	$\sigma'_c$ (MPa) (n = 10)	$\sigma'_t$ (MPa) (n = 5)	$\sigma_{c50}$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\phi$ (degree)	$c$ (MPa)
	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD		
Pyoseonri basalt	2.337 $\pm$ 0.082	2.973 $\pm$ 0.347	6.927 $\pm$ 0.564	41.19 $\pm$ 9.18	3.32 $\pm$ 0.12	40.09 $\pm$ 8.93	5.07 $\pm$ 0.18	41.43	9.04
Trachy basalt	2.849 $\pm$ 0.015	0.866 $\pm$ 0.057	2.467 $\pm$ 0.153	183.08 $\pm$ 7.64	10.33 $\pm$ 0.66	178.17 $\pm$ 7.44	15.74 $\pm$ 1.01	51.76	30.88
Scoria	2.051 $\pm$ 0.046	8.284 $\pm$ 0.681	16.965 $\pm$ 1.055	20.79 $\pm$ 3.29	2.37 $\pm$ 0.33	20.23 $\pm$ 3.20	3.61 $\pm$ 0.51	26.49	6.26

Table 3. Summary of the results obtained from the unconfined and triaxial compression tests for Pyoseonri basalt, Trachy basalt and Scoria (Kim, 2006)

	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_1 = \sigma_c + k\sigma_3$ ( $R^2$ )	$\phi_{\text{triaxial}}$ (degree)	$C_{\text{triaxial}}$ (MPa)
Pyoseonri basalt	0	41.19	$\sigma_1 = 25.539 + 7.598\sigma_3$ (0.947)	50.12	4.63
	5	42.53			
	10	101.72			
	20	182.65			
Trachy basalt	0	183.08	$\sigma_1 = 154.63 + 14.963\sigma_3$ (0.913)	61.01	19.99
	5	173.64			
	10	331.1			
	20	454.44			
Scoria	0	20.79	$\sigma_1 = 17.324 + 3.6435\sigma_3$ (0.972)	34.70	4.54
	5	28.14			
	10	57.93			
	20	89.96			

$\sigma_3$ : Confining pressure,  $\sigma_1$ : Maximum stress

$\phi_{\text{triaxial}}$  and  $C_{\text{triaxial}}$  were estimated from  $\sin\phi = k-1/k+1$  and  $c = \sigma_c(1-\sin\phi)/2\cos\phi$ , respectively.

Table 4. Summary of the physical and mechanical characteristics for Bukchon-ri basaltic intact rocks (Moon et al., 2014)

	$G$	$W$ (%)	$n_e$ (%)	$\sigma'_c$ (MPa)	$\sigma'_t$ (MPa)	$\sigma_{c50}$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\phi$ (degree)	$c$ (MPa)
	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD	Avg. $\pm$ SD		
A (n = 5)	2.589 $\pm$ 0.008	1.98 $\pm$ 0.04	5.14 $\pm$ 0.1	65.39 $\pm$ 8.06		63.40 $\pm$ 7.82			
	2.603 $\pm$ 0.013	2.39 $\pm$ 0.06	6.16 $\pm$ 0.14		4.80 $\pm$ 1.55		5.43 $\pm$ 1.75		
	2.596 $\pm$ 0.012	2.18 $\pm$ 0.2	5.65 $\pm$ 0.53					52.48	10.77
B (n = 5)	2.626 $\pm$ 0.007	1.77 $\pm$ 0.06	4.64 $\pm$ 0.16	82.63 $\pm$ 24.33		80.01 $\pm$ 23.49			
	2.650 $\pm$ 0.009	1.96 $\pm$ 0.14	5.19 $\pm$ 0.37		3.76 $\pm$ 0.39		4.26 $\pm$ 0.44		
	2.638 $\pm$ 0.014	1.86 $\pm$ 0.14	4.92 $\pm$ 0.37					61.75	10.07
C (n = 5)	2.384 $\pm$ 0.045	2.58 $\pm$ 0.29	6.14 $\pm$ 0.57	44.25 $\pm$ 16.97		42.93 $\pm$ 16.46			
	2.411 $\pm$ 0.083	3.15 $\pm$ 0.94	7.54 $\pm$ 1.99		4.14 $\pm$ 0.13		4.68 $\pm$ 0.15		
	2.397 $\pm$ 0.061	2.87 $\pm$ 0.68	6.84 $\pm$ 1.48					46.12	8.65

Table 5. Summary of the physical and mechanical characteristics for the intact rock specimens sampled at ○○ port in Jeju Island

	$G$	$W$ (%)	$n_e$ (%)	$\sigma'_c$ (MPa)	$\sigma'_t$ (MPa)	$\sigma_{c50}$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\phi$ (degree)	$c$ (MPa)
NB-08 (n = 1)	2.91	0.47	1.37	128.58	12.71	130.37	14.35	45.87	26.42
NH-11 (n = 1)	2.7	1.14	3.08	78.31	7.65	79.34	8.65	46.14	15.97

Diameter of the intact rock specimens used in the unconfined compressive strength and Brazilian tensile strength tests: 52mm, the ratio of  $D/H$  of the intact rock specimens used in unconfined compressive strength tests (Avg. $\pm$ SD):  $0.512 \pm 0.002$ , and the ratio of  $t/D$  of the intact rock specimens used in Brazilian tensile strength tests (Avg. $\pm$ SD):  $0.496 \pm 0.005$ .

Table 6. Summary of the results obtained from the unconfined and triaxial compression tests for the intact rock specimens sampled at ○○ port in Jeju Island

	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_1 = \sigma_c + k\sigma_3$ ( $R^2$ )	$\phi_{\text{triaxial}}$ (degree)	$C_{\text{triaxial}}$ (MPa)
NB-8	0	128.58	$\sigma_1 = 126.93 + 7.444\sigma_3$ (0.999)	49.74	23.26
	5	162.12			
	10	200.51			
	15	239.86			
NH-11	0	78.31	$\sigma_1 = 78.122 + 6.2124\sigma_3$ (0.999)	46.28	15.67
	5	109.24			
	10	139.57			
	15	171.74			

$\sigma_3$ : Confining pressure,  $\sigma_1$ : Maximum stress

$\phi_{\text{triaxial}}$  and  $C_{\text{triaxial}}$  were estimated from  $\sin\phi = k - 1/k + 1$  and  $c = \sigma_c(1 - \sin\phi)/2\cos\phi$ , respectively.

Diameter of the intact rock specimens used in the unconfined and triaxial compressive strength tests: 52mm, and the ratio of  $D/H$  of the intact rock specimens used in the unconfined and triaxial compressive strength tests (Avg.±SD): 0.514±0.003.

삼축압축시험 결과로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력을 Table 6에 나타내었다.

#### 4. 암석의 채취, 시편의 제작, 시험방법 및 결과

본 연구에서는 제주시 애월읍 상가리와 어음리의 화산암석을 대상으로 기본적인 물성 및 강도시험을 수행하였다. 한국지질자원연구원 지질도(MGEO, KIGAM)에 의하면, 상가리에는 금덕리현무암(Qkdb)이, 어음리에는 부면동조면현무암(Qbmtb)이 분포하는 것으로 나타났다.

암석의 이방성을 고려하여 시편의 방향성 유지를 위해 지하수 관정 굴착시 채취된 동일심도의 화산암석을 사용하였으며, 비트의 크기가 BX구경인 코어 시추기를 이용하여 직경( $D = \text{Avg.} \pm \text{SD}$ )이 43.34±0.05mm인 원주형 시편을 제작하였다. 암석의 압축강도시험 규정(KS E

3033, ASTM D7012)에 따라, 암석의 종횡비( $D/H$ ;  $D$ : 암석 시편의 직경,  $H$ : 암석 시편의 높이)가 약 0.5가 되도록 일축압축강도용 시편을 제작하였으며, 압열인장강도시험용 암석 시편은 암석의 인장강도시험 규정(KS E 3032)에 따라 시편의 형상비( $t/D$ )가 약 0.5가 되도록 제작하였다. 지역별로 일축압축강도시험용과 인장강도시험용 암석 시편을 각각 5개씩 제작하여 총 20개에 대해 시험을 진행하였다. Fig. 2는 시험에 사용된 암석 시편을 나타낸 것으로, (a)는 상가리, (b)는 어음리의 것이다.

그리고 제작된 암석 시편의 물리적 및 역학적 특성을 파악하기 위해, 비중/흡수율 시험(KS F2518), 일축압축강도시험(KS E 3033, ASTM D 7012) 및 압열인장강도시험(KS E 3032)을 KS규격에 따라 수행하였다. 비중/흡수율 시험에는 전자저울(CBX-22KH, CAS)을 사용하여 시편의 무게를 측정하였고, 강도시험에는 만능재료시험기(SGA-B-100PC, Shingang Precisionind Co. LTD)



(a) Sangga-ri basalts



(b) Eoem-ri basalts

Fig. 2. Test specimens

Table 7. Summary of the physical and mechanical characteristics for Sangga-ri and Eoeum-ri basaltic intact rocks

Specimen No.	$G$	$w$ (%)	$n_e$ (%)	$\sigma'_c$ (MPa)	$\sigma'_t$ (MPa)	$\sigma_{c50}$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\phi$ (degree)	$c$ (MPa)	
Sangga-ri basalts	1	2.744	1.11	3.054	94.7		93.27			
	2	2.729	1.23	3.354	91.5		89.97			
	3	2.770	1.07	2.951	95.7		94.26			
	4	2.730	1.23	3.364	89.8		88.49			
	5	2.693	1.40	3.781	74.6		73.48			
	Avg. ±SD	2.733 ±0.028	1.208 ±0.129	3.298 ±0.324	89.26 ±8.53		87.90 ±8.40			
	1	2.705	1.20	3.26		8.10		9.16		
	2	2.752	0.91	2.51		5.62		6.36		
	3	2.763	1.00	2.77		6.99		7.91		
	4	2.729	1.13	3.08		4.89		5.53		
	5	2.663	1.24	3.31		5.24		5.93		
	Avg. ±SD	2.722 ±0.04	1.096 ±0.138	2.986 ±0.34		6.168 ±1.342		6.98 ±1.52		
	Avg. ±SD	2.728 ±0.033	1.152 ±0.139	3.14 ±0.35					54.22	14.18
Eoeum-ri basalts	1	2.379	2.58	6.148	23.0		22.65			
	2	2.295	2.73	6.262	39.2		38.61			
	3	2.222	2.56	5.692	29.7		29.24			
	4	2.263	2.19	4.956	29.7		29.24			
	5	2.282	2.49	5.683	26.5		26.10			
	Avg. ±SD	2.288 ±0.058	2.51 ±0.199	5.754 ±0.521	29.62 ±6.03		29.17 ±5.94			
	1	2.406	2.45	5.89		5.71		6.46		
	2	2.331	2.25	5.24		5.27		5.96		
	3	2.321	2.27	5.27		7.11		8.04		
	4	2.490	1.87	4.65		4.53		5.12		
	5	2.505	1.79	4.49		3.85		4.35		
	Avg. ±SD	2.411 ±0.086	2.126 ±0.283	5.108 ±0.558		5.294 ±1.239		5.99 ±1.40		
	Avg. ±SD	2.349 ±0.095	2.318 ±0.307	5.43 ±0.608					17.67	10.66

$G$ : bulk specific gravity,  $w$ : absorption,  $n_e$ : effective porosity,  $\sigma'_c$ : unconfined compressive strength,  $\sigma'_t$ : Brazilian tensile strength,  $\sigma_{c50}$ : corrected unconfined compressive strength,  $\sigma_t$ : corrected Brazilian tensile strength,  $\phi$ : internal friction angle,  $c$ : cohesion.

Internal friction angle and cohesion were estimated respectively from Eq. (6) and Eq. (7), using the mean values of the corrected Brazilian tensile strength and unconfined compressive strength.

를 사용하였다. Table 7에 암석시편의 물성 및 강도시험 결과를 정리하였으며, 상가리 현무암과 어음리 현무암의 교정압열인장강도와 교정일축압축강도의 평균값을 이용하여 식 (6)과 (7)로부터 추정된 내부마찰각과 점착력을 나타내었다.

### 5. 결과 및 분석

이 장에서는 Table 1, 2, 4 및 5에 나타난 제주도 화산암에 대한 기존의 연구결과와 Table 7에 나타난 본 연구

에서 수행한 화산암에 대한 흡수율과 겉보기비중의 관계를 살펴보고, 제주도 화산암의 교정일축압축강도(이하 일축압축강도)와 교정압열인장강도(이하 압열인장강도)의 특성, 일축압축강도와 압열인장강도로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력의 특성 및 그 유효성을 각각 살펴보고자 한다.

Fig. 3은 제주도 화산암의 흡수율과 겉보기비중의 관계와 Yang(2015a)에 의해 확인된 흡수율과 겉보기비중의 관계에 대한 2개의 선형회귀선을 각각 나타내고 있다. Fig. 3을 통하여, 흡수율과 겉보기비중의 사이에는



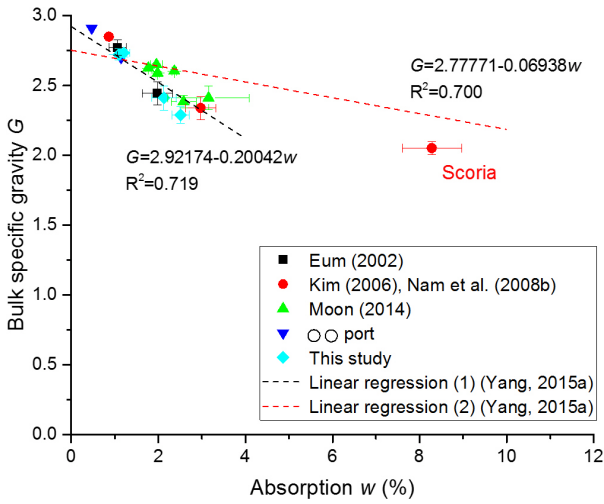


Fig. 3. Relation between absorption and bulk specific gravity

부(-)의 선형관계에 있으며, 흡수율이 증가함에 따라 겉보기비중은 선형으로 감소하고 있다. 그리고 본 연구에서 다룰 화산암은 우연하게도 Kim(2006)과 Nam et al. (2008b)의 스코리아를 제외하면, 선형회귀 (1) 주위에 분포하고 있음을 알 수 있으며, 본 연구에서는 선형회귀 (1)에 해당하는 제주도 화산암을 중심으로 그 특성을 각각 살펴보고자 한다.

### 5.1 제주도 화산암의 일축압축강도 및 압열인장강도

제주도 화산암의 흡수율과 일축압축강도 및 압열인장강도의 관계를 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 흡수율과 일축압축강도 및 압열인장강도 사이에는 밀접한 관계가 있으며, 흡수율이 증가함에 따라 일축압축강

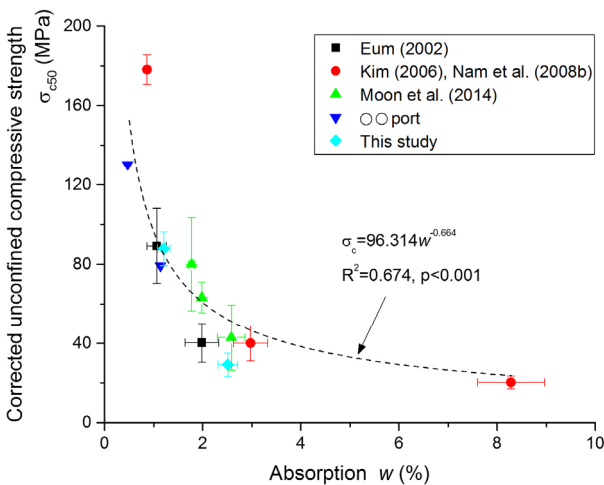


Fig. 4. Relation between absorption and unconfined compressive strength

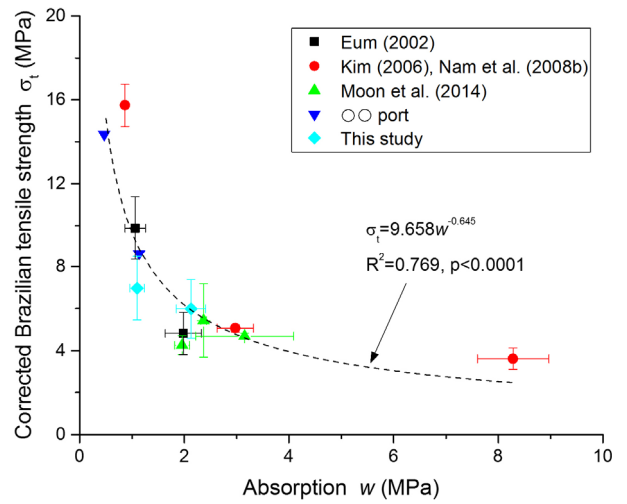


Fig. 5. Relation between absorption and Brazilian tensile strength

도와 압열인장강도는 지수 함수적으로 유의하게 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다( $p < 0.001$ ). 그리고 흡수율과 일축압축강도와와의 관계는 Yang(2014, 2015a)의 결과와 정합된 결과를 나타내고 있다.

### 5.2 제주도 화산암의 내부 마찰각 특성

제주도 화산암의 흡수율과 식 (6)으로부터 산정된 내부 마찰각의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 제주도의 화산암의 내부 마찰각은 약 18~62도 사이의 넓은 범위에 분포하고 있으며, 내부 마찰각의 값이 약 18도인 어음리에서 채취한 현무암의 결과를 제외하면, 전체적으로 Yang (2015b)에 의해 확인된 바와 같이 흡수율이 증가함에 따라 선형적으로 감소하고 있다. 그러나 본 연구결과 및 기존의 연구결과를 자세히 살펴보면, 흡수율의 증가에

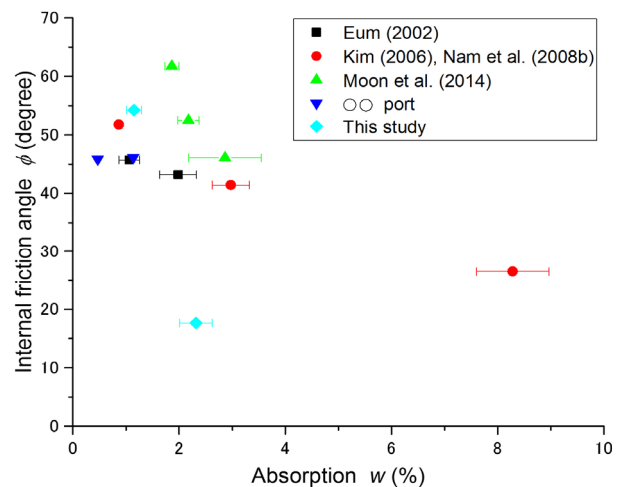


Fig. 6. Relation between absorption and internal friction angle

다른 내부 마찰각의 감소 경향은 크게 두 개의 타입으로 구분할 수 있음을 알 수 있다. 구체적으로, 첫 번째는 흡수율의 증가에 따라 내부 마찰각이 서서히 선형으로 감소하는 경우(Eum, 2002; Kim, 2006; Nam et al., 2008b)와 두 번째는 흡수율의 증가에 따라 내부 마찰각이 급격히 선형으로 감소하는 경우(Moon et al., 2014; This study)이다. 흡수율을 이용한 내부 마찰각의 추정에는 경우에 따라 실제의 내부 마찰각 보다 과대하게 추정될 가능성을 배제할 수 없으며, 다양한 흡수율의 화산암에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

식 (10)에서 언급한 바와 같이 압열인장강도에 대한 일축압축강도 비( $\sigma_c/\sigma_t$ )는 내부 마찰각의 함수이며, 기존의 연구결과 및 본 연구에서 수행한 시험결과를 통해 추정된 내부마찰각과 강도비( $\sigma_c/\sigma_t$ )의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 이로부터 강도비( $\sigma_c/\sigma_t$ )가 증가함에 따라 내부마찰각은 로그 함수적으로 증가하는 특성을 갖고 있으며, 제주도 화산암의 강도비( $\sigma_c/\sigma_t$ )는 내부 마찰각의 크기에 따라 약 5~20 사이에 분포하고 있음을 알 수 있다. 한편, 암석의 파괴기준의 하나인 Griffith 파괴기준에서는 구속압력이 없을 경우, 직접인장강도에 대한 일축압축강도의 비가 8이라고 시사하고 있다(Griffith, 1924).

압열인장강도와 일축압축강도로부터 추정된 내부 마찰각  $\phi$ 의 유효성을 검증하기 위해, Kim(2006)과 제주도 oo항의 지반조사 결과로부터 취득한 압열인장강도와 일축압축강도로부터 추정된 내부 마찰각  $\phi$ 와 일축압축강도와 삼축압축강도로부터 추정된 내부 마찰각  $\phi_{\text{triaxial}}$  (Table 3 and 6)의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.  $\phi$ 와  $\phi_{\text{triaxial}}$

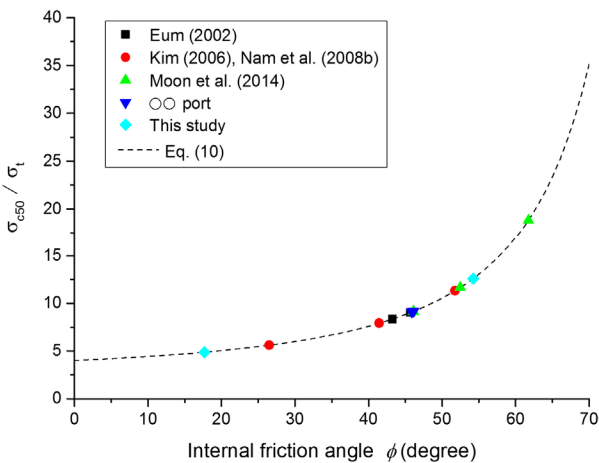


Fig. 7. Relation between internal friction angle and the ratio of UCS to BTS

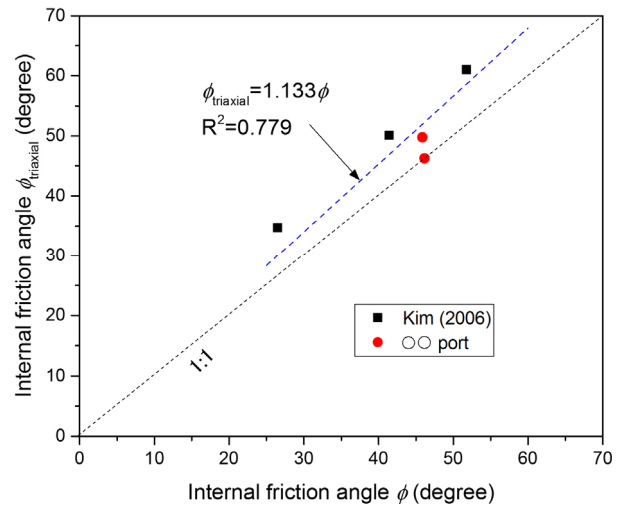


Fig. 8. Comparison between the internal friction angle estimated from Brazilian tensile strength and unconfined compressive strength and the internal friction angle estimated from the unconfined and triaxial compressive strengths

사이에는 높은 상관성이 보이며,  $\phi$ 는  $\phi_{\text{triaxial}}$ 에 비해 약 13%정도 과소평가되고 있음을 알 수 있다.

### 5.3 제주도 화산암의 점착력 특성

Fig. 9는 제주도 화산암의 흡수율과 식 (7)에 의해 산정된 점착력의 관계를 나타내고 있다. Yang(2015b)에서 확인된 바와 같이, 흡수율과 점착력 사이에는 밀접한 관계가 있으며, 흡수율이 증가함에 따라 점착력은 유의하게 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다( $p < 0.0001$ ).

한편, Piratheepan et al.(2012)와 Sivakugan et al.(2014)에 의하면, 점착력은 압열인장강도와 밀접한 관계가 있으며, 점착력과 압열인장강도 사이에는  $c = 1.82\sigma_t$ 와 같

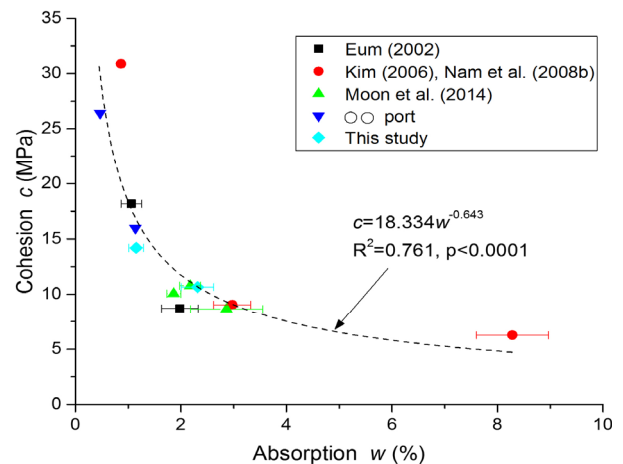


Fig. 9. Relation between absorption and cohesion

은 선형관계에 있다고 언급하고 있다. 이에 따라 Fig. 10에 압열인장강도와 식 (7)에 의해 산정된 점착력의 관계를 나타내었다. Fig. 10을 통하여 알 수 있듯이, 제주도 화산암 또한 압열인장강도와 점착력 사이에는 선형 관계에 있으며, Piratheepan et al.(2012)와 Sivakugan et al.(2014)이 나타낸 기울기 값에 비해 1.04배정도 큰 기울기 값을 나타내고 있으며, 그 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

압열인장강도와 일축압축강도로부터 추정된 점착력  $c$ 의 유효성을 검증하기 위해, Kim(2006)과 제주도 00항의 지반조사 결과로부터 취득한 압열인장강도와 일축압축강도로부터 추정된 점착력  $c$ 과 일축압축강도와 삼

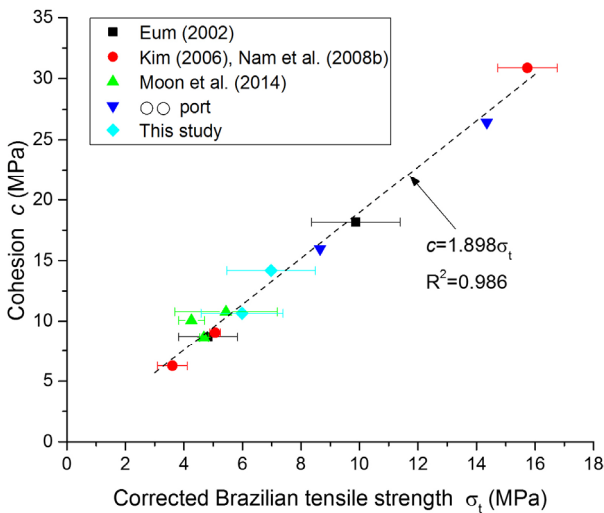


Fig. 10. Relation between Brazilian tensile strength and cohesion

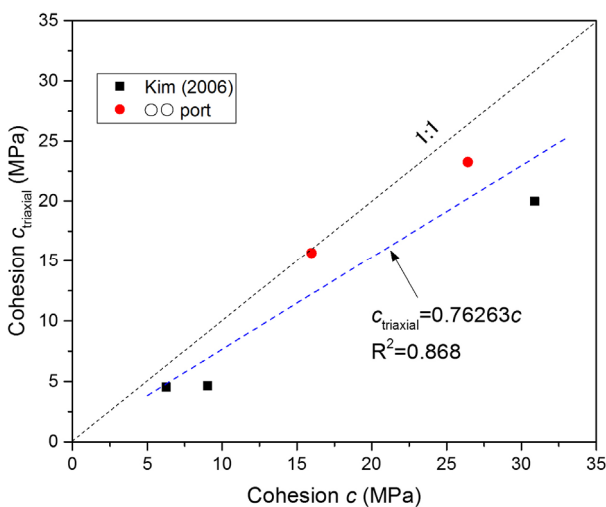


Fig. 11. Comparison between the cohesion estimated from Brazilian tensile strength and unconfined compressive strength and the cohesion estimated from the unconfined and triaxial compressive strengths

축압축강도로부터 추정된 내부 마찰각  $c_{triaxial}$  (Table 3 and 6)의 관계를 Fig. 11에 나타내었다.  $c$ 와  $c_{triaxial}$  사이에는 높은 상관성을 보이고 있으며,  $c$ 는  $c_{triaxial}$ 에 비해 약 24 %정도 과대평가되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8과 11을 통하여,  $c$ 와  $c_{triaxial}$  사이의 관계는,  $\phi$ 와  $\phi_{triaxial}$  사이의 관계에 비하여 그 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 여기서, Kim(2006)의  $c_{triaxial}$ 는 공시체의 직경이 BX코어드릴 구경인 약 43mm에 대한 일축압축강도와 삼축압축강도로부터 추정된 값을 주지할 필요가 있다. Hoek and Brown(1997)에 의하면, 일축압축강도는 공시체 직경의 영향을 받으며, 공시체의 직경이 증가할수록 일축압축강도는 감소한다. 이로부터 Kim(2006)의  $c_{triaxial}$ 를 추정하기 위해 사용된 일축압축강도와 삼축압축강도는 공시체 직경이 NX 코어드릴 구경의 결과에 비해 일축압축강도와 각각의 구속압력에 대한 압축강도가 과대하게 평가되고 있을 가능성이 크며, 이에 따라  $c_{triaxial}$  또한 과대하게 추정되었다고 사료된다. 그리고 비교 데이터의 수가 충분하지 않기 때문에, 앞으로 제주도 화산암에 대한 추가적인 실험을 수행하여 위의 관계에 대해 심도있게 분석할 필요가 있다고 사료된다.

## 6. 결론

본 연구에서는, Yang(2014, 2015a)에서 제안된 선형 회귀 (1)에 해당하는 제주도 화산암을 대상으로 다양한 물성시험 및 강도시험을 수행하였으며, 일축압축강도 ( $\sigma_c$ )와 압열인장강도( $\sigma_t$ )의 특성, 일축압축강도와 압열인장강도를 이용하여 식 (6)과 (7)로부터 추정된 내부 마찰각( $\phi$ )과 점착력( $c$ )의 특성 및 그 유효성을 각각 살펴 보았다.

제주도 화산암의 일축압축강도와 압열인장강도는 흡수율과 밀접한 관계에 있었으며, 흡수율이 증가함에 따라 지수함수적으로 급격하게 감소하는 특성을 갖고 있었다. 내부 마찰각은 압열인장강도에 대한 일축압축강도의 비( $\sigma_c/\sigma_t$ )와 밀접한 관계에 있었으며, 강도비( $\sigma_c/\sigma_t$ )가 증가함에 따라 내부 마찰각은 로그 함수적으로 증가하는 특성을 갖고 있었다. 그리고 제주도 화산암의 강도비( $\sigma_c/\sigma_t$ )는 내부 마찰각의 크기에 따라 약 5~20 사이의 값을 나타내고 있었다. 한편, 점착력의 경우, 흡수율 및 압열인장강도와 밀접한 관계에 있었으며, 점착력과 흡수율 사이에는 일축압축강도 및 압열인장강도와 흡수율의 관계와 같이 지수 함수적으로 감소하는 관계에 있

었다. 그리고 점착력과 압열인장강도 사이에는 선형관계에 있음을 확인할 수 있었다.

일축압축강도와 압열인장강도로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력은 삼축압축강도로부터 추정된 내부 마찰각과 점착력에 비해 각각 약 13% 과소평가 그리고 약 24% 정도 과대평가되는 경향을 보였다.

본 연구를 통하여, 제주도 화산암석의 다공성 구조를 나타내는 파라미터의 하나인 흡수율 이용하여 다양한 강도정수를 추정할 수 있음을 알 수 있었으며, 삼축압축 시험에 비해 비교적 간단하게 수행할 수 있는 일축압축 시험과 압열인장강도 시험을 통하여, Mohr-Coulomb 파괴기준의 강도정수인 점착력과 내부 마찰각을 손쉽게 추정할 수 있으리라 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업(20094020200020)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌 (References)

1. ASTM D7012-04, Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, ASTM International.
2. 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", *Tunnel and Underground Space*, Vol.19, No.4, pp.287-303 (in Korean).
3. Eum, K.Y. (2002), *Study on the Mechanical Properties of Volcanic Rocks in Chejudo*, Master thesis, Yonsei University, p.63 (in Korean).
4. Griffith, A.A. (1924), "The theory of rupture", *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Congress on Applied Mechanics*, pp.54-63.
5. Hoek, E. and Brown, E.T. (1997), "Practical Estimates of Rock Mass Strength", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.34, No.8, pp.1165-1186.
6. Kim, J.H. (2006), *A Study on the Mechanical Characteristics and the Strength in Pyoseonri Basalt*, Master thesis, Jeju National University, p.93 (in Korean).
7. Kim, Y.K. and Choi, O.G. (1991), "Engineering Geological Characteristics of Volcanic Rocks of the Northwestern Cheju Island, Korea", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.1, No.1, pp. 19-37 (in Korean).
8. Moon, K., Park, S., Kim, Y., and Yang, S. (2014), "Mechanical Properties of Basalt in Jeju Island with respect to Porosity", *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol.34, No.4, pp.1215-1225 (in Korean).
9. Multiplatform GEOscience Information System (MGEO), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), mgeo.kigam.re.kr

10. Nam, J.M., Yun, J.M., Song, Y.S., and Kim, J.H. (2008a), "Analysis of Engineering Properties to Basalt in Cheju Island", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.7, No.1, pp.12-21 (in Korean).
11. 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 Engineering Geology*, Vol.18, No.2, pp.215-225 (in Korean).
12. Nam, J.M., Yun, J.M., and Song, Y.S. (2009), "Estimation to the Strength of Basalt in Jeju Island according to Rock Failure Criteria", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.19, No.2, pp.153-163 (in Korean).
13. Piratheepan, J., Gnanendran, C.T., and Arulrajah, A. (2012), "Determination of  $c$  and  $\phi$  from an IDT and Unconfined Compression Testing and Numerical Analysis", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.24, No.9, pp.1153-1163.
14. Sivakugan, N., Das, B.M., Lovisa, J., and Patra, C.R. (2014), "Determination of  $c$  and  $\phi$  of rocks from indirect tensile strength and uniaxial compression tests", *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.8, No.1, pp.59-65.
15. Thuro, K., Plinninger, R.J., Zäh, S., and Schütz, S. (2001), "Scale effects in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test", *ISRM Regional Symposium EUROCK 2001*, pp.169-174.
16. Yang, S.B. (2014), "Comparative Study on Physical and Mechanical Characteristics of Volcanic Rocks in Jeju Island", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.11, pp.39-49 (in Korean).
17. Yang, S.B. (2015a), "Physical and Mechanical Characteristics of Basalts in Northwestern and Southeastern Jeju Island", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.7, pp.41-52 (in Korean).
18. Yang, S.B. (2015b), "Cohesion and Internal Friction Angle of Basalts in Jeju Island", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.11, pp.33-40 (in Korean).
19. Yang, S.B. (2016), "Strength Parameters of Basalts in Jeju Island according to Rock Failure Criteria", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.3, pp.15-27 (in Korean).
20. Yang, S. and Sassa, S. (2016), "Mechanical Characteristics and Design Strength Parameters due to Vesicular Property of Basalts", *Journal of Japan Society Civil Engineers*, Ser. B3, Vol.72, No.2, pp.437-442 (in Japanese).
21. Yang, S. and Sassa, S. (2017), "Effects of Porosity on Mechanical Characteristics of Vesicular Basalts", *Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp.705-711.
22. Yang, S.B. and Boo, S.P. (2019), "Estimation of Deformation Modulus of Basaltic Rock Masses in Northeastern and Northwestern Jeju Island", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.1, pp.5-15 (in Korean).
23. Yoon, S.H. and Ko, K.W. (2011), *Topography, Geology and Underground Water in Jeju Island*, Nae Ha Publishing Company, p.130 (in Korean).
24. Yu, Y., Yin, J., and Zhang, Z. (2006), "Shape effects in the Brazilian tensile strength test and a 3D FEM correction", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 43, pp. 623-627.

Received : December 7<sup>th</sup>, 2019

Revised : February 15<sup>th</sup>, 2020

Accepted : February 24<sup>th</sup>, 2020