

## 제주도 현무암의 점착력과 내부 마찰각

### Cohesion and Internal Friction Angle of Basalts in Jeju Island

양 순 보<sup>1</sup> Yang, Soon-Bo

#### Abstract

Volcanic rocks in Jeju Island indicate the differences in geological and mechanical characteristics from region to region, and have vesicular structure caused by various environmental factors. In this study, triaxial compressive strength tests were conducted for intact rocks sampled in northeastern onshore and offshore, southeastern offshore and northwestern offshore of Jeju Island. The estimated cohesion and internal friction angle from the results of triaxial compression tests were compared and analyzed with absorption, a parameter representing the vesicular properties of basalts in Jeju Island. As a result, it was found that the relationship between cohesion and absorption could be classified clearly, considering two different linear relationships in bulk specific gravity and absorption. As the absorption increases, the cohesion decreases exponentially. In addition, the internal friction angle decreases almost linearly with increasing in the absorption, regardless of the relationships in bulk specific gravity and absorption.

#### 요 지

제주도 화산암은 지질학적 그리고 역학적 특성이 지역마다 큰 차이를 보일 뿐만 아니라, 특히 여러 환경적인 요인으로 인하여 크기와 분포가 다양한 기공이 많은 다공성 구조를 보이고 있다. 본 연구에서는 제주도 북동부 육해상, 남동부 해상 및 북서부 해상에서 채취한 현무암 암석에 대하여 삼축압축시험을 수행하였으며, 그 결과로부터 추정된 점착력과 내부 마찰각을 제주도 현무암의 다공성 구조를 나타내는 파라미터인 흡수율과 비교·분석하였다. 그 결과 제주도 현무암의 흡수율과 점착력의 관계는 흡수율과 비중의 상관관계에 따라 그 관계를 명확하게 구분할 수 있었으며, 흡수율이 증가함에 따라 점착력은 급격하게 감소하였다. 반면 제주도 현무암의 내부 마찰각은 흡수율과 비중의 상관관계와 관계없이 흡수율이 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하였다.

**Keywords :** Basalts in Jeju Island, Absorption, Bulk specific gravity, Mohr-Coulomb failure criterion, Cohesion, Internal friction angle

#### 1. 서 론

우리나라의 화산활동은 중생대의 중성 내지 산성 화산암류의 분출과 신생대의 현무암의 분출로 크게 구분

된다. 중생대의 화산암은 옥천대 및 경상분지 내에 주로 분포하고, 제3기 후기와 제4기의 신생대 화산활동은 제주도, 울릉도, 철원~전곡 일대, 포항분지의 구룡포 일대에서 일어났다(KGS, 2012). 이 중에서 제주도는 약

<sup>1</sup> 정회원, 일본 국립연구개발법인 항공공학기술연구소 연구관 (Member, Researcher, Port and Airport Research Institute, National Research and Development Agency, Japan, Tel: +81-46-844-5054, Fax: +81-46-844-4577, [yan-s2@pari.go.jp](mailto:yan-s2@pari.go.jp))

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

200만 년 전부터 역사시대까지 발생한 여러 차례의 화산활동에 의해 형성된 섬으로(Yoon and Ko, 2011), 제주도의 화산암은 지역마다 지질특성이 다양하며, 그 역학적 특성 또한 지역마다 차이를 나타내고 있다. 특히 용암이 분출할 때 마그마에 작용하던 압력이 낮아짐에 따라 그 속에 존재하던 가스가 표면으로 올라오면서 형성된 기공들은 마그마의 점성을 비롯한 여러 환경요소로 인하여 그 크기와 분포가 다양하게 형성되어 있다.

제주도 화산암은 다공성 구조인 현무암과 같은 특수한 지질학적 조건을 갖고 있으며, 기반암은 육지부와 달리 현무암층 사이에 연약층인 화산쇄설물 및 공동이 불규칙하게 발달된 층상구조로 이루어져 있기 때문에, 이로부터 대규모 토목공사 및 지하수 개발에 있어서 수많은 시행착오를 경험하고 있다(Kim, 2006). 뿐만 아니라 최근에 건설되고 있는 육상 및 해상 풍력발전시스템의 기초공사와 향후 건설예정인 대규모의 토목공사에 대비하여 제주도 암반지반에 대한 공학적 관점에서의 물리적 및 역학적 특성에 대한 심도 깊은 연구가 요구되고 있는 실정이다.

현재까지 제주도 화산암에 대한 지구물리학, 지구지질학적 관점에서의 지질학적, 화학적 특성에 대한 연구로부터 제주도의 지질개관, 형성과정 및 암석학적 특성 등이 정립된 반면, 제주도 화산암에 대한 공학적 관점에서의 물리적 및 역학적 특성에 관한 연구는 몇몇의 연구자에 의해 이루어져 왔지만, 대부분의 연구가 특정 지역의 암석에 대한 물성 및 역학적 특성만을 비교 분석하고 있다(Kim and Choi, 1991; Eum, 2002; Kim, 2006; Nam et al., 2008a,b; Cho et al., 2009; Moon et al., 2014). 제주도 화산암에 대한 물성 및 역학적 특성에 대한 종합적인 비교 분석은 Yang(2014)에 의해 처음으로 이루어졌으나 위의 연구들은 대부분 암석의 일축압축강도 특성만을 다루고 있다.

제주도 현무암에 대한 삼축압축시험의 결과를 이용한 연구는 Kim(2006)과 Nam et al.(2009)에 의해, 제주도 서귀포시 성산을 삼달리 일대에서 채취한 표선리 현무암, 조면암질 현무암, 스크리아에 대하여 처음으로 이루어졌다. 그러나 Kim(2006)과 Nam et al.(2009)의 연구는 각각의 암석에 대한 Mohr-Coulomb 파괴기준과 Hoek-Brown 파괴기준을 비교하는데 그치고 있으며, 제주도 화산암의 특성 중의 하나인 다공성 구조를 나타내는 파라미터와는 비교하고 있지 않다. 그리고 Kim(2006)과 Nam et al.(2009)의 연구를 제외하면, 제주도 화산암

에 대한 삼축압축시험 결과를 이용한 연구는 지금까지 이루어지지 않았다는 것이 현 상황이다.

따라서 본 연구에서는 제주도 북동부 육해상, 남동부 해상 및 북서부 해상에서 채취한 현무암 암석에 대한 삼축압축시험 결과와 Kim(2006)과 Nam et al.(2009)의 연구결과를 이용하여, 제주도 화산암의 다공성 구조를 나타내는 파라미터인 흡수율과 Mohr-Coulomb 파괴기준의 파라미터인 점착력과 내부 마찰각과의 관계 및 그 특성을 각각 살펴보고, 제주도 현무암의 점착력과 내부 마찰각을 추정하기 위한 회귀 관계식을 제안하고자 한다.

## 2. Mohr-Coulomb 파괴기준

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 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 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.

또한 Mohr-Coulomb 파괴기준은 식 (2)와 같이 최대

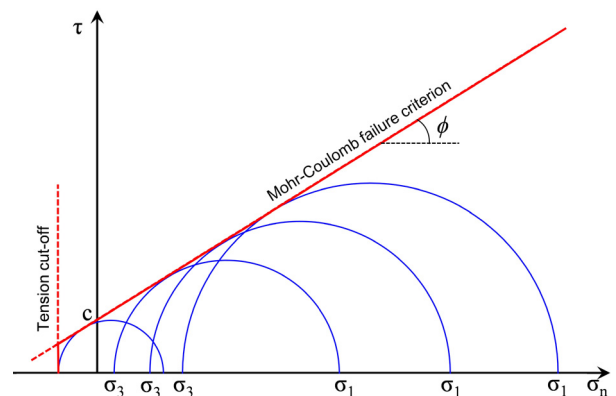


Fig. 1. Mohr-Coulomb failure criterion in terms of normal and shear stresses

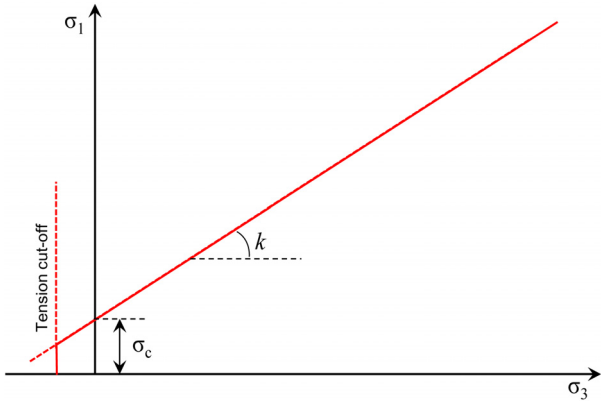


Fig. 2. Mohr-Coulomb failure criterion in terms of principal stresses

주응력  $\sigma_1$ 과 최소 주응력  $\sigma_3$ 와의 관계로 표현할 수 있으며, 식 (2)는 식 (3)과 같이 다시 쓸 수 있다. 식 (3)을 그래프로 나타내면 Fig. 2와 같다.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{2c \cos \phi}{\sigma_3(1 - \sin \phi)} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \sigma_c + k\sigma_3 \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_c$ 는 일축압축강도,  $k$ 는 최초 주응력과 최대 주응력의 관계를 나타내는 직선의 기울기를 의미한다. 그리고 내부 마찰각과 점착력은 다음의 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 각각 계산할 수 있다.

$$\sin \phi = \frac{k-1}{k+1} \quad (4)$$

$$c = \frac{\sigma_c(1 - \sin \phi)}{2 \cos \phi} \quad (5)$$

### 3. 제주도 화산암의 물리적 및 역학적 특성

제주도 현무암의 점착력과 내부 마찰각에 대해서 논하기에 앞서, Yang(2014, 2015)에서 밝혀진 제주도 화산암의 물리적 및 역학적 특성에 대해서 간단히 언급하고, 2장에서 설명한 Mohr-Coulomb 파괴기준의 점착력과 내부 마찰각으로부터 유추할 수 있는 사항을 언급하고자 한다.

Yang(2014, 2015)의 연구에서 보여지는 Fig. 3과 Fig. 4에는 제주도 화산암의 흡수율과 비중의 관계 및 흡수율과 비중의 관계에 있어서 서로 다른 선형근사에 해당

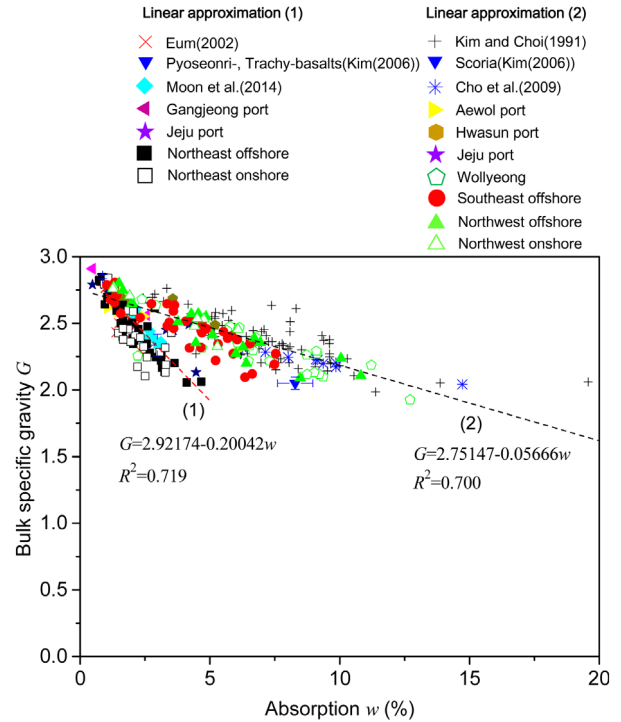


Fig. 3. Relationship between bulk specific gravity and absorption (Yang, 2014; 2015)

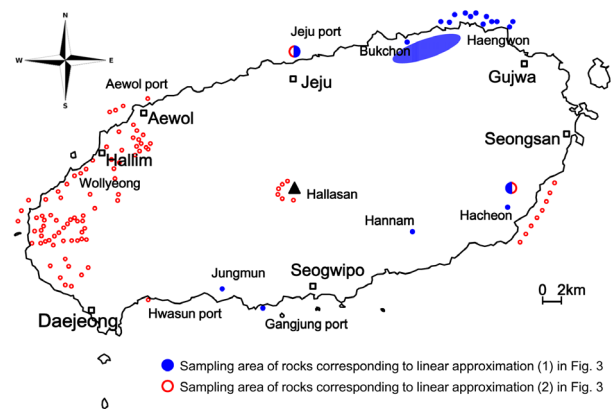


Fig. 4. Regional distribution of rocks corresponding to each of linear approximations (Yang, 2014; 2015)

하는 암석의 지역적 분포를 각각 나타내고 있으며, 본 연구에서 대상으로 하는 제주도 북동부 육해상의 현무암과 Kim(2006)과 Nam et al.(2009)의 표선리 현무암, 조면암질 현무암은 선형근사 (1)에 해당하고, 제주도 남동부 해상 및 북서부 해상의 현무암과 Kim(2006)과 Nam et al.(2009)의 스킨리아는 선형근사 (2)에 해당하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 흡수율과 비중의 관계와 지역적 분포 결과는 심도에 따라 다른 결과를 나타낼 수 있음을 유의할 필요가 있다.

Fig. 3에 나타난 제주도 화산암에 대한 흡수율과 비중의 관계에 있어서 각각의 서로 다른 선형근사에 해당하

는 암석에 대한 흡수율과 일축압축강도의 관계 및 비선형 회귀 관계식을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 5의 결과를 통하여, 제주도 화산암은 흡수율과 비중의 관계에 있어서 두 개의 서로 다른 선형근사로 대표시킬 수 있으며, 서로 다른 선형근사에 해당하는 암석을 구분함으로써 암석의 흡수율과 일축압축강도의 관계를 구분할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5의 비선형 회귀 관계식은 지금까지의 연구 결과를 종합하여 얻어진 관계식이며, 향후 제주도 화산암의 연구결과에 따라 다소 바뀔 가능성이 있음을 유의하기 바란다.

식 (5)를 통하여 점착력은 일축압축강도와 관련이 있다는 것을 알 수 있으며, Yang(2014, 2015)의 연구결과를 통하여 제주도 화산암의 점착력 또한 일축압축강도와 마찬가지로 암석의 흡수율과 비중의 상관관계에 따라 두 개의 서로 다른 회귀 관계식으로 표현될 수 있다는 것을 유추할 수 있다. 따라서 흡수율과 내부 마찰각의 상관관계를 살펴봄으로써, 흡수율을 이용하여 제주

도 현무암에 대한 점착력과 내부 마찰각을 추정할 수 있을 것이라 생각된다.

#### 4. 제주도 현무암의 삼축압축시험

제주 광역경제권 선도사업 R&D사업의 제주 해역 특성에 적합한 해상풍력발전기의 설치를 위한 지반설계 기술 개발의 일환으로 Fig. 6에 나타난 것과 같이 2012년에서 2014년까지 3년간에 걸쳐 제주도 북동부 육해상, 남동부 해상, 북서부 해상에 대하여 시추가 이루어졌으며, 채취된 암석에 대한 구성광물과 조성을 파악하기 위해 편광현미경 및 X-선 회절 분석, 그리고 KS 및 ASTM 시험규정에 입각한 다양한 물성시험 및 강도시험이 수행되었다.

편광현미경 및 X-선 회절 분석 결과, 제주도 북동부 육해상과 남동부 해상에서 채취한 암석의 경우 감람석을 일부 포함하고 있지만, 채취된 암석들의 주요 구성광물은

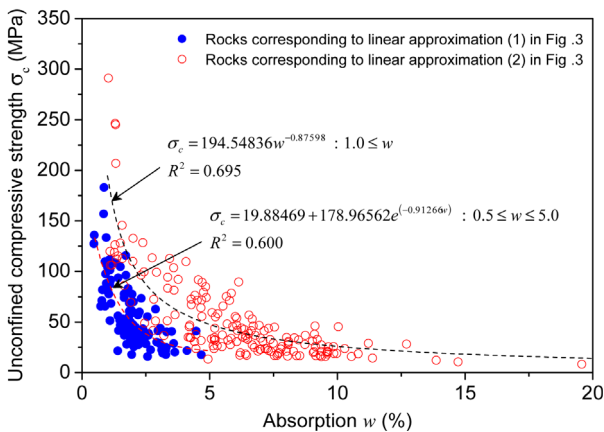


Fig. 5. Relationship between unconfined compressive strength and absorption (Yang, 2015)

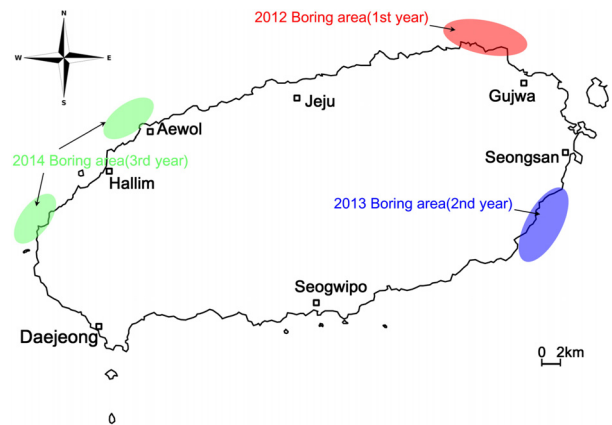


Fig. 6. Location of the boring area

Table 1. Analysis results of microscope observation

	Major mineral components (Vol. %)		
	Plagioclase	Pyroxene	Olivine
Northeast	55.1±4.3	23.07±1.04	5.47±0.75
Southeast offshore	43.75±6.15	25.35±5.02	16.95±3.75
Northwest	69.73±6.21	26.1±6.52	

Table 2. Results of X-ray diffraction analysis

	Major mineral components (wt %)		
	Plagioclase	Pyroxene	Olivine
Northeast	59.03±8.15	27.08±1.78	7.5±2.24
Southeast offshore	48.75±11.24	32.15±7.42	17.35±6.29
Northwest	72.78±8.03	25.65±7.32	

사장석과 휘석으로써 현무암에 해당하였다(Table 1, 2).

강도시험을 위한 암석은 NX구경인 코어 시추기를 이용하여 채취되었으며, 한국암반공학회 시험편 제작 표준법에서 제시하고 있는 종횡비(h/d; h: 암석 시편의 높이, d: 암석 시편의 직경)에 만족하도록 암석 시편을 제작하였고(제주도 북동부: h=99.78±2.67mm, d=50.36±0.26mm;

제주도 남동부: h=121.56±1.05mm, d=52.52±0.55mm; 제주도 북서부: h=110.78±5.20mm, d=49.94±0.24mm), 이들 현무암 암석 시편에 대한 삼축압축시험은 ASTM 규정 D 7012에 따라, 5MPa, 10MPa, 15MPa인 구속압력 아래에서 각각 이루어졌다. 한편 본 연구에서 이들 삼축 압축시험 결과와 비교하는 Kim(2006)과 Nam et al.(2009)

Table 3. Summary of results obtained from the triaxial compression tests for basalts sampled in northeastern, southeastern and northwestern Jeju Island (GK Eng., JPM Inc., and Jeju National Univ., 2013; 2014; 2015)

	Borehole No.	Depth (m)	w (%)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_1 = \sigma_c + k\sigma_3$	$R^2$
Northeast (JB: onshore, BH: offshore)	JB-1	4.0~4.5	1.48	5.0	78.12	$\sigma_1 = 33.873 + 8.652\sigma_3$	0.998
				10.0	118.42		
				15.0	164.64		
	BH-1	12.2~12.6	0.95	5.0	157.76	$\sigma_1 = 98.49 + 12.219\sigma_3$	0.997
				10.0	224.33		
				15.0	279.95		
	BH-8	9.1~9.5	1.57	5.0	92.20	$\sigma_1 = 42.947 + 9.582\sigma_3$	0.998
				10.0	138.08		
				15.0	188.02		
	BH-8	13.7~14.6	3.16	5.0	55.66	$\sigma_1 = 13.647 + 8.245\sigma_3$	0.999
				10.0	94.52		
				15.0	138.11		
	BH-9	9.5~10.0	2.08	5.0	76.29	$\sigma_1 = 31.35 + 8.805\sigma_3$	0.999
				10.0	117.57		
				15.0	164.34		
Southeast offshore	BH-1	4.6~5.0	1.315	5.0	283.1	$\sigma_1 = 244.3 + 7.97\sigma_3$	0.998
				10.0	326.1		
				15.0	362.8		
	BH-3	3.6~4.0	3.594	5.0	90.2	$\sigma_1 = 68.033 + 4.44\sigma_3$	1.000
				10.0	112.5		
				15.0	134.6		
	BH-5	9.3~9.7	3.437	5.0	152.6	$\sigma_1 = 114.7 + 7.81\sigma_3$	0.997
				10.0	195.3		
				15.0	230.7		
	BH-7	9.0~9.4	5.847	5.0	109.5	$\sigma_1 = 79.933 + 6\sigma_3$	0.999
				10.0	140.8		
				15.0	169.5		
	BH-10	9.6~9.9	2.753	5.0	147.5	$\sigma_1 = 117.8 + 5.99\sigma_3$	1.000
				10.0	178.2		
				15.0	207.4		
Northwest offshore	HBH-1	4.7~5.0	4.316	5.0	106.7	$\sigma_1 = 73.5 + 6.69\sigma_3$	1.000
				10.0	140.9		
				15.0	173.6		
	HBH-3	8.4~8.8	4.662	5.0	100.2	$\sigma_1 = 67.9 + 6.43\sigma_3$	1.000
				10.0	131.9		
				15.0	164.5		
	HBH-5	5.4~5.7	3.187	5.0	133.5	$\sigma_1 = 94.9 + 7.71\sigma_3$	1.000
				10.0	171.9		
				15.0	210.6		

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

Table 4. Summary of results obtained from the triaxial compression tests for Pyoseonri basalt, Trachy basalt and Scoria (Kim, 2006; Nam et al., 2009)

	$w$ (%)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_1 = \sigma_c + k\sigma_3$	$R^2$
Pyoseonri basalt	$2.973 \pm 0.347$	0	25.06	$\sigma_1 = 15.862 + 8.002\sigma_3$	0.975
		5	42.53		
		10	101.72		
		15	127.45		
		20	182.65		
Trachy basalt	$0.866 \pm 0.057$	0	127.96	$\sigma_1 = 121.56 + 16.795\sigma_3$	0.96
		5	173.64		
		10	331.10		
		15	360.41		
		20	454.44		
Scoria	$8.284 \pm 0.681$	0	13.37	$\sigma_1 = 12.872 + 3.9403\sigma_3$	0.984
		5	28.14		
		10	57.93		
		15	89.96		
		20	89.96		

의 연구에서는, 직경이 43mm, 높이가 86mm인 표선리 현무암, 조면암질 현무암 암석 시료에 대하여 5MPa, 10MPa, 15MPa, 20MPa인 구속압력 하에서 그리고 스코리아 암석 시료(d=43mm, h=86mm)에 대해서는 5MPa, 10MPa, 20MPa인 구속압력 하에서 삼축압축시험이 이루어졌다.

삼축압축시험에 대한 결과는 Table 3과 Table 4에 각각 정리하였다. Table 3에는 제주도 북동부 육해상, 남동부 해상 및 북서부 해상에서 채취한 현무암 암석의 삼축압축시험 결과와 이 결과를 통하여 얻어진 식 (3)에 나타낸 선형 관계식 및 결정계수를 각각 나타내었으며, Table 4에는 Kim(2006)과 Nam et al.(2009)의 연구 결과를 정리하였다.

### 5. 삼축압축시험 결과에 대한 분석 및 고찰

제주도 화산암의 다공성 구조를 나타내는 파라미터인 흡수율과 제주도 북동부 육해상, 남동부 해상 및 북서부 해상에서 채취한 현무암, Kim(2006)과 Nam et al.(2009)의 표선리 현무암, 조면암질 현무암, 스코리아 등에 대하여 Table 3과 Table 4에 각각 나타낸 선형 관계식의 절점  $\sigma_c$ , 즉 일축압축강도와의 관계를 Fig. 7, 그리고 흡수율과 각각의 암석에 대한 선형 관계식의 기울기  $k$ 의 관계를 Fig. 8에 각각 나타내었다.

Fig. 7을 통하여 알 수 있듯이, 흡수율이 증가함에 따라 제주도 현무암의 일축압축강도는 급격하게 감소하

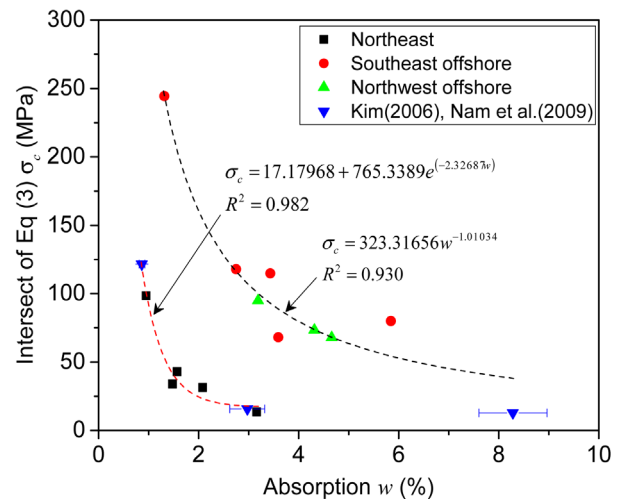


Fig. 7. Relationship between the intercept of Eq. (3) and absorption

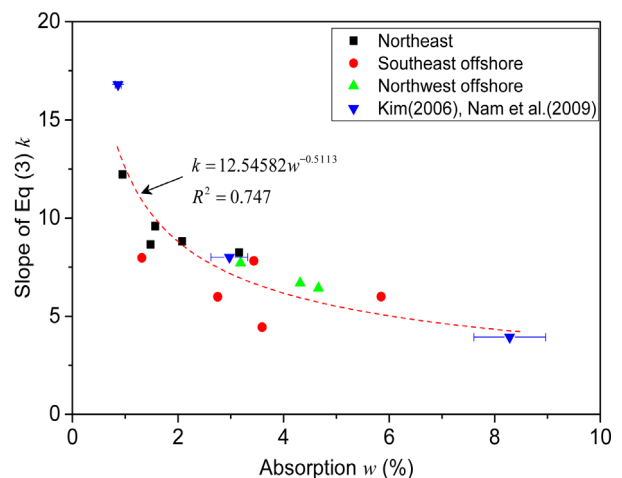


Fig. 8. Relationship between the slope of Eq. (3) and absorption



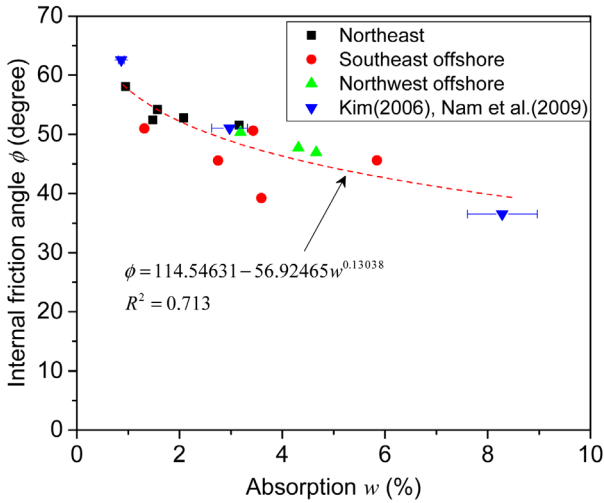


Fig. 9. Relationship between internal friction angle and absorption

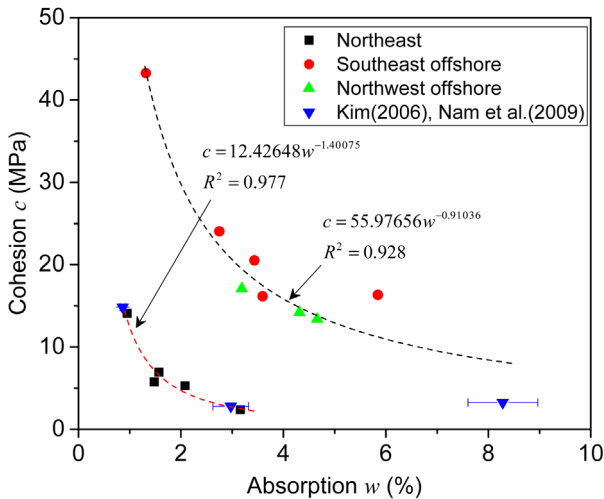


Fig. 10. Relationship between cohesion and absorption

고 있음을 알 수 있으며, Fig. 5와 같이 흡수율의 증가에 따른 두 개의 일축압축강도의 감소 경향이 뚜렷이 구분됨을 확인할 수 있다. 또한 제주도 북동부 육해상의 현무암과 Kim(2006)과 Nam et al.(2009)의 표선리 현무암, 조면암질 현무암은 흡수율과 비중의 관계에 있어서 선형근사 (1)에 해당하고, 제주도 남동부 해상 및 북서부 해상의 현무암과 Kim(2006)과 Nam et al.(2009)의 스킨리아는 선형근사 (2)에 해당하고 있음을 알 수 있다.

식 (3)에 나타난 선형 관계식의 기울기  $k$ 는 식 (4)를 통해 알 수 있듯이 내부 마찰각과 밀접한 관계를 갖고 있으며, 흡수율이 증가함에 따라 기울기  $k$ 는 급속하게 감소하고 있으며(Fig. 8), 절점  $\sigma_c$ 와 달리 암석 비중의 영향을 받지 않고, 암석의 공극의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

각각의 제주도 현무암에 대한 흡수율과 식 (4)와 식

(5)를 이용하여 계산된 내부 마찰각과 점착력의 관계를 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내었다.

Fig. 9에서 보여지는 흡수율과 내부 마찰각의 관계의 경우, 흡수율과 비중의 관계의 영향을 받지 않고, 흡수율이 증가함에 따라 내부 마찰각은 거의 선형적으로 서서히 감소하고 있다. 이를 통하여 식 (3)에 나타난 선형 관계식의 기울기  $k$ 와 마찬가지로 내부 마찰각은 비중의 영향을 받지 않고, 암석의 공극에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10에 나타난 흡수율과 점착력의 관계의 경우, 흡수율이 증가함에 따라 제주도 현무암의 점착력은 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있으며, 3장에서 추론한 바와 같이 흡수율에 대한 점착력의 관계를 두 개의 서로 다른 비선형 회귀 관계식으로 표현할 수 있음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 같은 흡수율에 대하여 비중이 클수록 점착력이 크다는 것을 알 수 있으며, 흡수율과 비중의 관계를 구분함으로써 흡수율에 대한 점착력의 관계를 구분할 수 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 제주도 북동부 육해상, 남동부 해상 및 북서부 해상에서 채취한 현무암에 대한 삼축압축시험 결과를 이용하여, 제주도 현무암의 다공성 구조를 나타내는 파라미터인 흡수율과 점착력 및 내부 마찰각과의 관계를 각각 비교·분석하였으며, 얻어진 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 제주도 현무암의 흡수율과 점착력의 관계는 흡수율과 일축압축강도의 관계와 마찬가지로 흡수율과 비중 사이의 두 개의 서로 다른 선형관계에 따라 명확하게 구분되며, 흡수율이 증가함에 따라 점착력은 급격하게 줄어든다.
- (2) 제주도 현무암의 내부 마찰각은 흡수율과 비중의 상관관계와 관계없이 흡수율이 증가함에 따라 대체적으로 선형으로 서서히 감소하며, 암석 공극의 영향을 크게 받는다.
- (3) 흡수율에 대한 점착력 및 내부 마찰각의 회귀 관계식을 이용하여 제주도 현무암의 대략적인 점착력과 내부 마찰각을 추정할 수 있으며, 앞으로 흡수율이 8% 이상인 다공성 현무암 및 다양한 화산암에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상자원부, 한국산업기술진흥원, (재)제주지역사업평가원의 지원으로 수행된 광역경제권 선도사업 육성사업의 연구결과이며, GK 엔지니어링(주), JPM Inc. 관계자 분들께 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. ASTM D 7012-13, *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.
3. Eum, K.Y. (2002), *Study on the Mechanical Properties of Volcanic Rocks in Chejudo*, Master thesis, Yonsei University, p.63.
4. GK Engineering, JPM Inc., and Jeju National Univ. (2013), *Report of the Leading Industry of Jeju Economic Region*.
5. GK Engineering, JPM Inc., and Jeju National Univ. (2014), *Report of the Leading Industry of Jeju Economic Region*.
6. GK Engineering, JPM Inc., and Jeju National Univ. (2015), *Report of the Leading Industry of Jeju Economic Region*.
7. Kim, J.H. (2006), *A Study on the Mechanical Characteristics and the Strength in Pyoseonri Basalt*, Master thesis, Cheju National University, p.93.
8. 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.
9. Korean Geotechnical Society (2012), *Geology and Rock Mechanics for Geotechnical Engineer II*, CIR Publishing Company, p.735.
10. Korean Society for Rock Mechanics (2005), *Standard method for sampling and preparation of rock specimen*, pp.81-84.
11. 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.
12. 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 Geosynthetic Society*, Vol.7, No.1, pp.12-21.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Yang, S.B. (2015), "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.
17. Yoon, S.H. and Ko, K.W. (2011), *Topography, Geology and Underground Water in Jeju Island*, Nae Ha Publishing Company, p.130.

Received : August 5<sup>th</sup>, 2015

Revised : September 12<sup>th</sup>, 2015

Accepted : September 24<sup>th</sup>, 2015