

제주도 북서부 및 남동부 현무암의 물리적 & 역학적 특성

Physical and Mechanical Characteristics of Basalts in Northwestern and Southeastern Jeju Island

양 순 보¹ Yang, Soon-Bo

Abstract

Volcanic rocks in Jeju Island have vesicular structure caused by various environmental factors, and indicate the differences in geological and mechanical characteristics from region to region. In addition, the bedrock of Jeju Island shows stratified structure, that is, soft layers composed of pyroclastic rocks or cavities are irregularly developed between the basalt layers by several times of volcanic activity. In this study, various physical tests and unconfined compressive strength test were conducted for intact rocks sampled in northwestern onshore and offshore of Jeju Island. The results obtained in the tests were compared with the physical and mechanical characteristics of intact rocks sampled in southeastern offshore of Jeju Island. As a results, it was confirmed that the physical and mechanical characteristics of basalts sampled in northwestern Jeju Island were similar to those of basalts sampled in southeastern offshore of Jeju Island. In addition, it was possible to estimate approximate design parameters from the correlation of mechanical properties with physical properties of basalts in Jeju Island.

요 지

제주도 화산암은 여러 환경적인 요인으로 인하여 크기와 분포가 다양한 기공이 많은 다공성 구조를 보이고 있으며, 지질학적 그리고 역학적 특성 또한 지역마다 차이를 나타내고 있다. 뿐만 아니라, 제주도의 기반암은 여러 차례의 화산활동으로 인해 현무암층 사이에 연약층인 화산쇄설물 및 공동이 불규칙하게 발달된 층상구조로 이루어져 있다. 본 연구에서는 제주도 북서부 육-해상에서 채취한 현무암 암석에 대하여 다양한 물성 시험 및 일축압축강도 시험을 수행하고, 그 결과를 제주도 남동부 해상에서 채취한 현무암 암석의 물리적, 역학적 특성과 비교·분석하였다. 그 결과 제주도 북서부 육-해상에서 채취한 현무암 암석의 물리, 역학적 특성은 제주도 남동부 해상에서 채취한 현무암 암석과 유사한 관계에 있음을 확인할 수 있었으며, 물리적 특성과 역학적 특성의 상관관계로부터 대략적인 설계정수를 추정할 수 있었다.

Keywords : Basalt of Jeju Island, Absorption, Bulk specific gravity, Ultrasonic velocity, Unconfined compressive strength, Elastic modulus, Poisson's ratio

1 정희원, 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, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

우리나라의 화산활동은 중생대의 중성 내지 산성 화산암류의 분출과 신생대의 현무암의 분출로 크게 구분된다. 중생대의 화산암은 옥천대 및 경상분지 내에 주로 분포하고, 제3기 후기와 제4기의 신생대 화산활동은 제주도, 울릉도, 철원~진곡 일대, 포항분지의 구룡포 일대에서 일어났다(KGS, 2012). 이 중에서 제주도는 약 200만 년 전부터 역사시대까지 발생한 여러 차례의 화산활동에 의해 형성된 섬으로(Yoon and Ko, 2011), 제주도의 화산암은 지역마다 지질학적으로 다양하게 분포하고 있으며, 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, 이전부터 대규모 토목공사 및 지하수 개발에 있어서 수많은 시행착오를 경험하고 있다(Kim, 2006; Nam et al., 2008a; Yang et al., 2013). 그리고 최근의 육상 및 해상 풍력발전 시스템의 기초 건설 및 앞으로 예상되는 이전의 토목공사와 비교할 수 없는 대규모의 토목공사에 따른 제주도 암반지반에 대한 공학적 관점에서의 물리적 및 역학적 특성에 대한 심도 깊은 연구가 요구되고 있는 실정이다.

제주도 화산암에 대한 연구는 지구물리학, 지구지질학적 관점에서 지질학적 특성 및 화학적 특성에 대한 연구가 활발히 진행되어 제주도의 지질개관, 형성과정 및 암석학적 특정 등이 정립되었다.

반면 제주도 화산암에 대한 공학적 관점에서의 물리적 및 역학적 특성에 관한 연구는 몇몇의 연구자에 의해 이루어져 왔지만, 대부분의 연구가 암석을 채취한 지역에 국한된 결과만을 나타내고 있으며(Kim and Choi, 1991; Eum, 2002; Kim, 2006, Nam et al., 2008a,b; Nam et al., 2009; Cho et al., 2009; Moon et al., 2014), 제주도 화산암의 물리, 역학적 특성에 대한 종합적인 비교·분석은 Yang(2014)에 의해 처음으로 기존에 발표된 연구 논문 및 보고서의 결과를 이용하여 이루어졌다. 그러나 위의 연구 중에서 Moon et al.(2014)의 연구를 제외한

대부분의 연구는 역학적 특성에 있어서 일축압축강도를 다루고 있으며, 그 밖의 탄성계수, 포아송비와 같은 탄성상수에 대해서는 다루고 있지 않다.

한편, 다공성 구조인 현무암의 특성을 나타내기 위해 다양한 파라미터가 사용되어 왔다. Kelsall et al.(1986)은 균열이 있고 풍화된 조립 현무암과 다공성 용암의 공학적 특성을 파악하기 위해, 분쇄된 샘플의 비중을 통해 산정된 총 공극률과 일축압축강도, 점하중강도지수와의 관계를 나타내고 있으며, Al-Harti et al.(1999)은 이미지 분석 기술을 통해 추정된 총 공극률과 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비 등과 같은 역학적 특성과의 관계를 나타내고 있다. 그리고 Gates(2008)는 다공성 구조인 현무암의 일축압축강도를 추정하기 위해, 비중과 일축압축강도와의 관계를 나타내고 있다.

제주도 화산암에 대한 연구의 경우, Kim and Choi(1991)는 화산암체의 기공 상태(크기, 모양, 방향성)가 암체의 공학적 성질을 좌우한다고 보고, 암석 표면의 기공 상태를 조사하여 유효강도비를 도출하고 있으며, Eum(2002)은 제주도 화산암을 유공질 암석과 무공질 암석으로 각각 분류하고, 분류된 각각의 암석 공시체에 대하여 비중, 흡수율, 일축압축강도, 압열인장강도, 휨강도 등을 측정하고 있다. Kim(2006), Nam et al.(2008a, b), Nam et al.(2009)은 제주도 현무암에 대한 공학적 특성을 파악하기 위해, 표선리 현무암, 조면암질 현무암, 스킨리아에 대하여 다양한 물성 및 강도시험을 수행하고 있으나, 다공성 구조인 현무암의 특성을 나타내는 파라미터와 역학적 특성은 비교하고 있지 않다. Cho et al.(2009)는 한라산 조면암에 대한 연구에서 공극률은 암석입자 자체의 내부구조와 암석 내에 존재하는 불연속면의 분포 특성 및 입자 결합상태를 간접적으로 반영하는 공학적 풍화지수로서 신뢰도가 높다고 보고, 공극률과 건조 밀도, 비중, 초음파속도, 흡수율, 일축압축강도 등과의 상관관계를 각각 나타내고 있으며, 흡수율은 광물 입자간의 공극, 광물의 벽개면, 광물 내의 미세균열 등에 의해 흡수되는 모든 수분의 함량을 측정하여 산정되며, 암석의 공학적 성질과 밀접한 관계가 있음을 언급하고 있다. Moon et al.(2014)은 제주도 현무암의 다공성 구조를 나타내는 파라미터를 공극률이라고 생각하는 한편, 공극률을 산정하는 데 있어서 표면 공극이 큰 암석의 공극률을 결정하는 경우 표면 공극을 무시하는 캘리퍼 방법은 공극률을 과소평가하고, 표면 공극을 제외하고 공극률을 결정하는 부력이용 방법을 사용하는

것이 합리적이라고 보고하고 있으며, 일축압축강도, 인장강도, 초음파속도와와의 상관관계를 각각 나타내고 있다. Yang(2014)은 위에서 언급한 연구들과 여러 보고서들의 결과를 이용하여 제주도 화산암의 다공성 구조를 나타내는 파라미터를 흡수율과 공극률로 하고, 흡수율 및 공극률과 비중(Bulk specific gravity) 사이의 관계로부터 제주도 화산암은 크게 두 개의 타입으로 공학적으로 구분할 수 있음을 밝혔다. 그리고 흡수율 및 공극률과 비중 그리고 일축압축강도와의 각각의 상관관계에 있어서 흡수율과의 상관성이 높다고 보고하고 있다.

따라서 본 연구에서는 현무암의 다공성 구조를 나타내는 파라미터로서 흡수율을 사용하고, 제주도 북서부 육·해상에서 채취한 현무암 암석의 흡수율과 비중의 관계 및 P와 속도와 S와 속도의 관계를 살펴봄으로써, Yang(2014)에서 언급한 어떤 타입의 화산암에 속하는지 알아보기로 한다. 그리고 제주도 북서부 육·해상 및 남동부 해상에서 시추된 현무암 암석의 기본적인 물리적 특성은 물론 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비와 같은 역학적 특성에 대하여 비교·분석하고, 그 역학적 특성을 추정하기 위한 회귀 관계식을 제안하고자 한다.

2. 암석의 채취, 시편의 제작 및 시험방법

제주 광역경제권 선도사업 R&D사업의 제주 해역 특성에 적합한 해상풍력발전기 설치를 위한 지반설계기술 개발의 일환으로 Fig. 1에 나타난 것과 같이 제주도 북서부 육상과 해상에 대하여 시추가 이루어졌다. 이를 통하여 채취된 암석에 대하여 구성광물과 조성을 파악하기 위해 편광현미경 및 X-선 회절 분석을 수행하였으며, KS 및 ASTM 시험규정에 입각하여 다양한 물성시험 및 강도시험을 수행하였다.

비트의 크기가 NX구경인 코어 시추기로 채취된 암석의 직경은 해상 암석의 경우 $49.94 \pm 0.243\text{mm}$, 육상 암석의 경우 $52.25 \pm 0.053\text{mm}$ 였다. 암석의 압축강도시험 규정 KS E 3033에 의하면 시험편의 종횡비(h/d; h: 암석 시편의 높이, d: 암석 시편의 직경)는 2에 가까운 것으로 하고 있으며, 해설에서 1.8~2.2의 범위가 바람직하다고 하고 있다. 그리고 ASTM 규정 D 4543-04에서는 암석 시편의 종횡비(h/d)가 2.0~2.5 사이에 들고, 시편의 직경은 적어도 47mm 이상이어야 함을 규정하고 있다. 본 연구에서는 시추된 암석의 역학적 특성을 파악하기 위해, KS 규정 및 ASTM 규정을 만족하도록 종횡

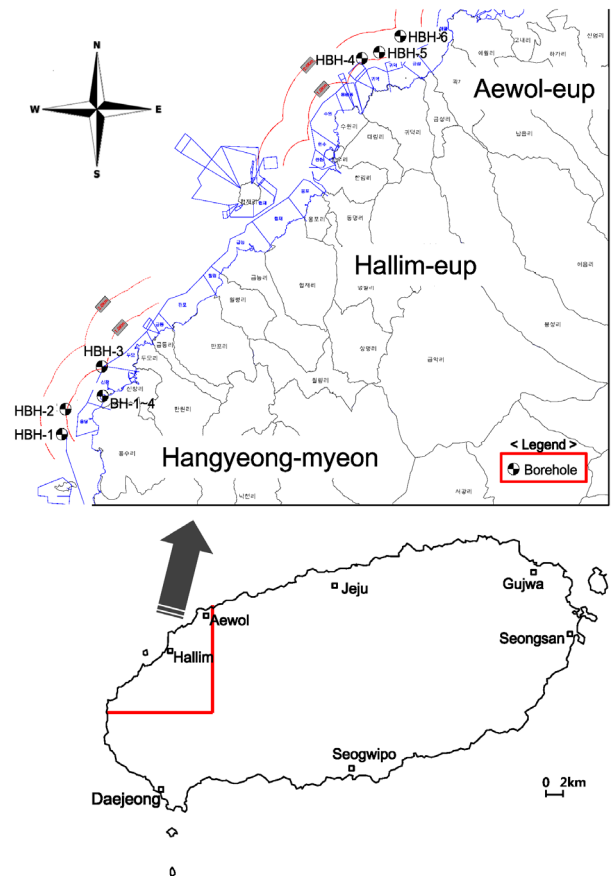


Fig. 1. Location of the study area

비를 약 2.2로 설정하여 시편의 높이를 해상 암석의 경우 $110.8 \pm 5.204\text{mm}$ (h/d = 2.22 ± 0.104), 육상 암석의 경우 $114.04 \pm 0.855\text{mm}$ (h/d = 2.18 ± 0.016)로 제작하였다.

암석의 물리적 특성을 파악하기 위해 ASTM C97/C97M-09에 입각한 밀도, 비중, 공극률 및 흡수율 시험, 그리고 ASTM D 2845-08에 따라 초음파속도 시험을 수행하였다. 그리고 암석의 역학적 특성을 파악하기 위해 ASTM D 7012-07에 따라 가압속도를 0.5MPa/s로 축하중을 가하여 일축압축강도시험을 수행하였으며, 강도시험 수행 시 축변형율과 횡변형율을 측정하여 일축압축강도의 50% 구간에서의 접선탄성계수와 포아송비를 각각 계산하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 제주도 북서부 육·해상 암석의 광물조성

제주도 북서부 육상(BH) 및 해상(HBH)에서 시추한 암석의 박편현미경 분석과 X-선 회절 분석에 의한 구성광물을 Table 1과 2에 각각 나타내었다. 분석 결과 일부

Table 1. Analysis results of Microscope observation

Borehole No.	Depth m	Mineral components		
			Vol. %	
BH-3	9.0~9.1	Major Comp.	Plagioclase	Pyroxene
			66.9	23.3
		Minor Comp.	Hornblende	
			5.5	
		Accessories	Opaque mineral	
			4.3	
HBH-1	19.2~19.4	Major Comp.	Plagioclase	Pyroxene
			63.3	35.4
		Minor Comp.		
		Accessories	Opaque mineral	
			1.3	
HBH-3	22.0~22.1	Major Comp.	Plagioclase	Pyroxene
			70.9	25.3
		Minor Comp.		
		Accessories	Opaque mineral	
			3.8	
HBH-4	2.3~2.4	Major Comp.	Plagioclase	Pyroxene
			77.8	20.4
		Minor Comp.		
		Accessories	Opaque mineral	
			1.8	

Table 2. Results of x-ray diffraction analysis

Borehole No.	Depth m	Components		
			Wt %	
BH-3	8.9~9.0	Plagioclase	Pyroxene	Hornblende
		80.0	20.0	-
HBH-1	19.2~19.4	Plagioclase	Pyroxene	Hornblende
		67.8	25.9	6.3
HBH-3	22.0~22.1	Plagioclase	Pyroxene	Hornblende
		64.1	35.9	-
HBH-5	2.3~2.4	Plagioclase	Pyroxene	Hornblende
		79.2	20.8	-

암석에서 각섬석이 나타나고 있지만, 암석의 주요 구성 광물은 사장석과 휘석으로서 제주도 북서부 육·해상에서 시추된 암석은 현무암이라고 할 수 있다.

3.2 제주도 북서부 육·해상 현무암의 물성 및 강도시험 결과

제주도 북서부 육상(BH)과 해상(HBH)에서 채취한

현무암에 대한 물리적 및 역학적 특성을 파악하기 위한 시험 결과를 시추공별로 Table 3과 4에 각각 나타내었다. 그리고 Yang(2014)의 연구 결과와 비교하기 위해 ASTM D 7012-04에 Eq. (1)과 같이 제시된 종횡비를 고려한 수정일축압축강도의 값도 나타내었다.

$$\sigma_c = \frac{\sigma'_c}{0.88 + 0.222(d/h)} \quad (1)$$

Table 3. Summary of results for rock specimens sampled in northwestern onshore of Jeju Island

Borehole No.	Depth (m)	ρ_d (g/cm ³)	G	w (%)	n (%)	Ultrasonic velocity (m/s)		σ'_c (MPa)	ν	E_t (GPa)	σ_c (MPa)
						V_p	V_s				
BH-1	3.0~3.1	2.363	2.455	6.080	14.925	4247.2	2632.3	40.9	0.23	32.3	41.6
BH-1	10.1~10.2	2.697	2.706	1.912	5.175	2965.6	1702.8	68.0	0.36	17.0	69.3
BH-2	2.0~2.1	2.320	2.479	4.410	10.931	2300.1	1458.2	29.8	0.38	10.3	30.4
BH-2	13.0~13.1	2.763	2.772	1.292	3.582	2978.2	1750.1	124.0	0.34	17.7	126.3
BH-3	5.9~6.0	2.510	2.532	4.762	12.058	3551.0	2347.2	77.9	0.36	20.5	79.3
BH-3	7.9~8.0	2.514	2.536	4.514	11.449	2905.8	1742.0	70.0	0.54	13.5	71.4
BH-4	1.0~1.1	2.119	2.326	5.295	12.317	2003.7	1322.0	26.0	0.15	7.3	26.5
BH-4	15.0~15.1	2.752	2.759	1.267	3.495	2926.8	1748.1	116.8	0.52	18.38	118.9

ρ_d : Dry density, G : Bulk specific gravity, w : Absorption ratio, n : Porosity, V_p : P-wave velocity, V_s : S-wave velocity, σ'_c : Unconfined compressive strength (UCS), ν : Poisson's ratio, E_t : Tangent elastic modulus, σ_c : Corrected UCS

Table 4. Summary of results for rock specimens sampled in northwestern offshore of Jeju Island

Borehole No.	Depth (m)	ρ_d (g/cm ³)	G	w (%)	n (%)	Ultrasonic velocity (m/s)		σ'_c (MPa)	ν	E_t (GPa)	σ_c (MPa)
						V_p	V_s				
HBH-1	0.8~0.9	2.249	2.36	6.94	16.356	4114.8	2761.7	45.6	0.23	29.4	46.6
HBH-1	2.6~2.7	2.548	2.57	4.56	11.719	4707.6	2690.9	89.7	0.20	27.9	91.6
HBH-1	8.5~8.6	2.005	2.11	10.82	22.813	3874.4	2573.5	18.0	0.32	16.1	18.5
HBH-1	16.0~16.1	2.795	2.80	1.50	4.205	4773.9	2695.6	127.1	0.32	23.9	128.0
HBH-2	5.6~5.7	2.230	2.39	6.71	16.012	4268.3	2947.7	45.0	0.18	21.3	46.0
HBH-2	9.9~10.0	2.634	2.65	2.00	5.285	4172.8	2891.7	107.4	0.25	16.3	109.8
HBH-2	20.8~20.9	2.175	2.32	6.28	14.576	3200.9	2222.5	34.3	0.18	15.1	35.0
HBH-3	4.2~4.3	2.490	2.51	3.77	9.467	4177.4	2896.6	90.2	0.24	19.4	92.1
HBH-3	10.1~10.2	1.997	2.20	6.41	14.098	3875.7	2528.0	35.8	0.13	17.9	36.6
HBH-4	2.0~2.1	2.643	2.65	2.00	5.313	4332.5	2608.7	131.5	0.23	26.1	132.6
HBH-4	8.3~8.4	2.266	2.35	4.46	10.498	3916.4	2644.4	36.6	0.24	18.8	37.4
HBH-4	13.4~13.5	2.010	2.09	8.48	17.724	3595.7	2492.8	31.6	0.26	13.8	32.3
HBH-5	4.1~4.2	2.548	2.57	4.28	11.007	4173.8	2619.5	65.6	0.23	16.8	67.1
HBH-5	10.7~10.8	2.491	2.55	4.85	12.365	4490.0	2904.5	82.9	0.20	21.5	84.8
HBH-5	15.3~15.4	2.160	2.24	10.04	22.474	3947.2	2646.1	44.2	0.24	13.2	45.2
HBH-5	28.0~28.1	2.733	2.75	1.65	4.529	3568.4	2424.6	84.0	0.37	16.2	86.0
HBH-6	3.1~3.2	2.188	2.27	6.01	13.652	3318.1	2279.5	54.8	0.22	13.7	55.4
HBH-6	8.7~8.8	2.456	2.48	4.42	10.962	3553.7	2310.2	74.7	0.27	16.2	76.3
HBH-6	16.5~16.6	2.356	2.41	5.10	12.299	4135.6	2750.3	58.1	0.20	18.2	59.4

여기서, σ_c 는 수정된 일축압축강도, σ'_c 는 측정된 일축압축강도를 나타낸다.

3.3 제주도 북서부 육·해상 현무암의 물리, 역학적 특성

3.3.1 흡수율과 비중의 관계

본 절에서는 Yang(2014)의 연구 결과와 비교하기 위해, 흡수율과 비중 사이의 관계를 살펴보기로 한다. 그러나 Yang(2014)이 참고로 한 일부 문헌(Kim and Choi, 1991; Cho et al., 2009)에는 건조밀도에 대한 정보만이

나와 있으며, Yang(2014)은 건조밀도를 비중으로 간주하고 흡수율 및 공극률과 비중의 관계를 나타내었다. 그래서 흡수율과 비중의 관계를 살펴보기 이전에 제주도 북서부 육·해상에서 채취한 현무암 암석, Moon et al.(2014)의 제주도 북동부 육상의 현무암 암석, Yang(2014)이 참고로 한 애월항, 강정항 그리고 제주도 남동부 해상 및 제주 북서부 월령리 일대에서 시추된 암석에 대한 보고서의 결과를 통하여 건조밀도와 비중 사이의 관계를 먼저 살펴보기로 한다. Fig. 2는 건조밀도와 비중의 관계를 나타내고 있으며, 건조밀도가 약 2.75g/cm³ 이상

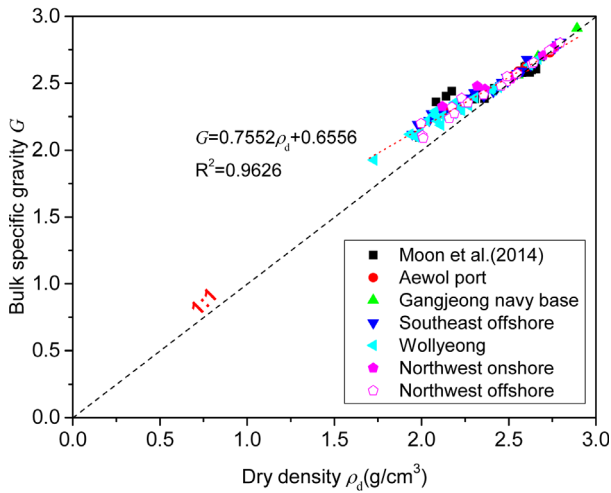


Fig. 2. Relationship between bulk specific gravity and dry density

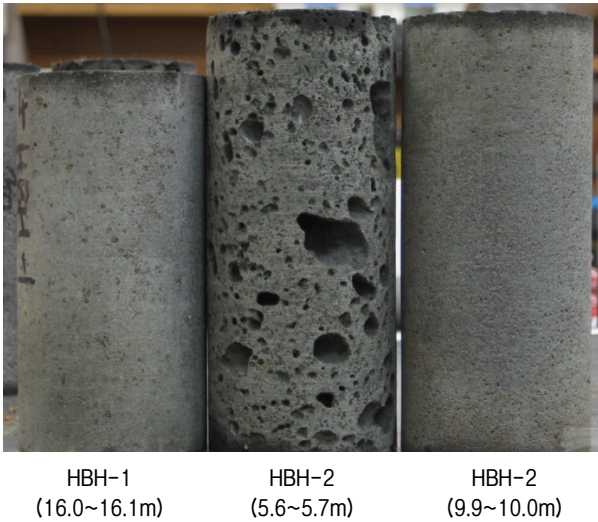


Fig. 3. Some of test specimens

에서는 비중과 거의 같은 값을 나타내고 있지만, 건조밀도가 점차적으로 작아짐에 따라 비중과의 차이가 증가하고 있으며, 상대적으로 비중이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 3의 중앙에 위치한 현무암 암석의 공시체와 같이, 건조밀도가 작아짐에 따라 제주도의 현무암 표면의 기공이 발달하기 때문에 나타나는 결과이며, 건조밀도와 비중을 산정할 때 암석 시료의 체적을 측정하는 방법의 차이에 기인한다. Fig. 2의 결과와 같이, 암석의 표면에 기공이 없을 때는 암석 시료의 체적을 측정하는데 있어서 부력이용 방법과 캘리퍼스를 이용하는 방법의 차이가 거의 없지만, 암석의 표면에 기공이 발달함에 따라 그 차이는 증가하게 된다. 그리고 Fig. 2에 나타난 건조밀도가 약 1.7g/cm^3 미만에서는 더 이상 원주 또는 정사각주 형태의 공시체를 제작할 수 없는 암석 알갱

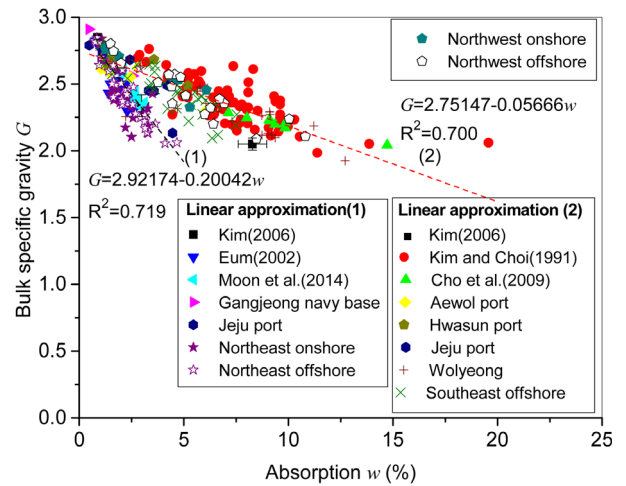


Fig. 4. Relationship between bulk specific gravity and absorption

이의 형태로 채취가 되고, 일축압축강도 시험은 불가능할 것이라고 사료된다.

Kim and Choi(1991)와 Cho et al.(2009)의 건조밀도를 Fig. 2의 선형 관계식을 이용하여, 비중으로 환산하고, 제주도 북서부 육·해상에서 채취한 현무암 암석의 흡수율과 비중의 관계 및 그 밖의 제주도 화산암에 대한 흡수율과 비중의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4를 통해 알 수 있듯이, 전체적으로 흡수율이 증가함에 따라 비중은 약 3.0을 시작으로 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있으며, 두 개의 서로 다른 선형근사로 흡수율과 비중의 관계를 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 그리고 제주도 북서부 육·해상에서 채취한 현무암은 두 개의 서로 다른 선형근사 관계에서 선형근사 (2)에 해당하고 있음을 알 수 있으며, Yang(2014)의 제주도 북서부 월령리 및 제주도 남동부 해상 등에서 채취한 현무암의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.3.2 P파 속도와 S파 속도의 관계

Castagna et al.(1985)에 의하면, 암석의 초음파 속도는 암석의 조직, 공극률, 이방성, 공극 내 함유물질의 종류, 공극의 모양, 암석의 밀도 등에 따라 상이하게 변하며, 일반적으로 P파 속도와 S파 속도는 선형인 관계에 있다고 보고하고 있다. Yang(2014)은 제주도 화산암 암석에 대한 P파 속도와 S파 속도의 관계를 비교하면서, P파 속도와 S파 속도의 관계는 선형의 관계에 있으며, 흡수율 및 공극률과 비중 사이의 관계에 있어서 선형근사 (1)에 해당하는 암석보다 선형근사 (2)에 해당하는 암석의 P파 속도에 대한 S파 속도의 기울기가 크다는

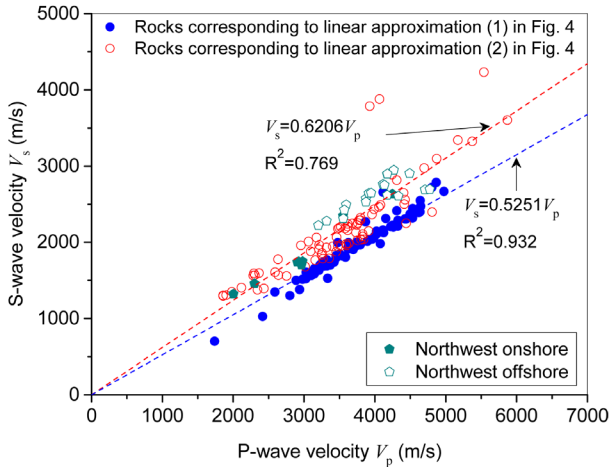


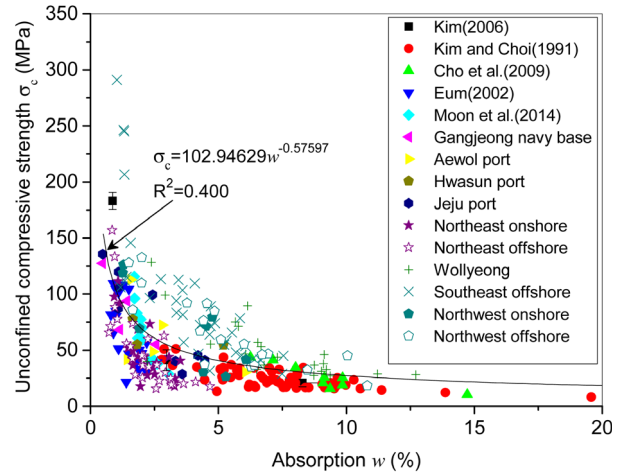
Fig. 5. Relationship between S-wave velocity and P-wave velocity

것을 보이고 있다.

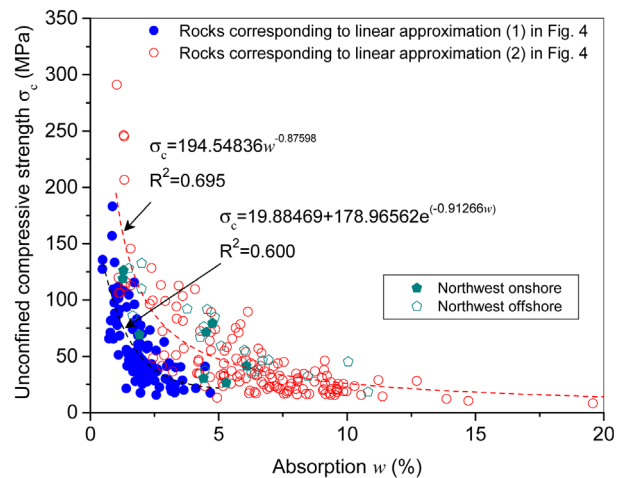
Fig. 5는 제주도 북서부 육·해상의 현무암 암석에 대한 P파 속도와 S파 속도의 관계와 Fig. 4의 흡수율과 비중의 관계에 있어서 선형근사 (1)과 (2)에 해당하는 각각의 암석에 대한 P파 속도와 S파 속도의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 5를 통해 알 수 있듯이 제주도 북서부 육·해상의 현무암 암석의 P파 속도와 S파 속도는 대체적으로 선형의 관계에 있으며, 선형근사 (2)에 해당하는 암석의 P파 속도에 대한 S파 속도의 기울기와 비슷한 결과를 나타내고 있다. 그리고 선형근사 (1)에 해당하는 암석보다 선형근사 (2)에 해당하는 암석의 P파 속도에 대한 S파 속도의 기울기가 대체적으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.3.3 흡수율과 일축압축강도의 관계

제주도 북서부 육·해상에서 채취한 현무암 암석의 흡수율과 일축압축강도의 관계, 그리고 Yang(2014)의 연구 결과와 비교하기 위해, Fig. 6(a)에 흡수율과 중형비를 고려한 수정 일축압축강도의 관계 및 전체 결과에 대한 최소제곱법 회귀분석에 의한 비선형 근사곡선을 나타내었다. 그리고 Fig. 6(b)에 Fig. 4에 나타난 흡수율과 비중 사이의 관계에서 선형근사 (1)과 선형근사 (2)에 해당하는 각각의 암석을 구분하여 흡수율과 수정 일축압축강도의 관계를 나타내었으며, 각각의 선형근사에 해당하는 암석에 대한 근사곡선을 나타내었다. Fig. 6(b)에서 알 수 있듯이, 제주도 북서부 육·해상에서 채취한 현무암 암석의 흡수율과 수정 일축압축강도의 관계는 선형근사 (2)에 해당하는 암석의 결과범위 안에 포함되어 있음을 알 수 있다. 그리고 전체적으로 일축압축강도



(a) Non-linear regression analysis of total data



(b) Non-linear regression analysis of rocks corresponding to respective linear approximations in Fig. 4

Fig. 6. Relationship between unconfined compressive strength and absorption

는 흡수율이 감소함에 따라 지수적으로 증가하고 있으며, 일축압축강도의 편차 또한 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 Yang(2014)에서 언급을 했듯이, 제주도 화산암에 대한 흡수율의 증가에 따른 비중의 감소 경향을 분석함으로써 암석을 구분하고, 서로 다른 경향에 해당하는 암석의 흡수율과 일축압축강도와의 관계를 각각 나타냄으로써 근사곡선의 결정계수는 크게 증가하고 있다.

Fig. 6을 통하여 제주도 화산암의 일축압축강도에 대한 암석의 비중 및 암석의 다공성 구조의 특성을 나타내는 흡수율의 영향을 알 수 있지만, 위에서 언급을 했듯이, 흡수율이 감소함에 따라 거의 같은 흡수율 범위에서 일축압축강도의 편차는 크게 증가하고 있으며, 일축압축강도에 영향을 미치는 본 연구에서 고려하고 있

지 않은 파라미터 또는 일축압축강도 시험에 있어서 예상하지 못한 어떠한 영향이 포함되어 있을 가능성이 크다. 따라서 실제에 일축압축강도를 설계에 이용할 시에는 실내시험을 통하여 계측된 일축압축강도 값을 그대로 사용하기 보다는 Fig. 6의 흡수율과 일축압축강도 사이의 회귀 관계식을 통하여 추정된 값과 비교하여, 안전 측으로 일축압축강도를 조정할 필요가 있다고 판단된다.

3.4 제주도 북서부 육·해상 및 남동부 해상 현무암의 역학적 특성

위에서 제주도 북서부 육·해상에서 채취한 현무암 암석에 대한 흡수율과 비중의 관계 그리고 P와 속도와 S와 속도의 관계를 비교함으로써, 제주도 북서부 육·해상에서 채취한 현무암은 Yang(2014)에서 말하는 제주도 화산암의 두 개의 서로 다른 선형근사 관계에서 제주도 북서부 월령리 및 제주도 남동부 해상에서 채취한 현무암 등과 같은 선형근사 (2)에 해당하는 암석임을 알 수 있었다.

따라서 본 절에서는 선형근사 (2)에 해당하는 암석, 즉 제주도 북서부 월령리 현무암 암석($h/d = 2.18 \pm 0.029$)의 결과를 포함한 제주도 북서부 육·해상의 현무암 암석과 제주도 남동부 해상에서 채취한 암석($h/d = 2.32 \pm 0.059$)의 탄성계수 및 포아송비와 같은 탄성상수의 특성에 대해서 논하고자 한다.

한편, Thuro et al.(2001)은 케르산트암과 석회암 암석에 대한 일축압축강도, 탄성계수 및 파괴 일(destruction work) 등 역학적 특성의 크기 효과(scale effect)에 관한 연구에서, 공시체 높이와 직경의 비, 즉 종횡비가 1.0에서 3.0 사이의 전형적인 범위 안에서, 종횡비는 파괴 일, 탄성계수, 인장강도에 대한 영향이 크지만, 그에 비해 일축압축강도에 대한 영향은 미미하다고 보고하고 있으며, 탄성계수의 측정에 있어서 공시체의 종횡비가 2.0 이상이어야 함을 강조하고 있다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이, ASTM 규정 D 4543-04에서도 암석 공시체의 종횡비가 2.0~2.5 사이에 있어야 함을 언급하고 있다. 따라서 그 밖의 선형근사 (2)에 해당하는 암석의 경우 역학적 특성에 있어서 일축압축강도만을 나타내고 있거나, 암석 공시체의 종횡비가 2.0 미만인 경우가 대부분임으로 본 연구에서는 제외하기로 한다.

3.4.1 흡수율과 탄성상수의 관계

Fig. 7은 제주도 북서부 육·해상의 현무암 및 남동부 해상의 현무암에 대한 흡수율과 접선탄성계수의 관계를 나타내고 있다. 전체적으로 흡수율이 감소함에 따라 접선탄성계수는 지수적으로 증가하고 있으며, 흡수율에 대한 접선탄성계수의 편차 또한 매우 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 7에는 흡수율 전체 범위에 대한 근사곡선 (1)과 흡수율이 $w \leq 2.0\%$ 인 범위에서의 근사곡선 (2), 그리고 흡수율이 $w > 2.0\%$ 인 범위에 대한 근사곡선 (3)으로 나누어 흡수율과 접선탄성계수와의 회귀 관계식 및 결정계수를 나타내고 있으나, 각각의 근사곡선의 결정계수는 작다는 것을 알 수 있다. 한편 Moon et al.(2014)은 제주도 북동부 육상의 현무암 암석에 대한 공극률과 할선탄성계수의 상관관계를 나타내고, 공극률에 대한 할선탄성계수의 편차를 암석 공시체의 변형율을 측정하는 게이지에 의한 영향이라고 판단하고 있다.

Fig. 8은 흡수율과 포아송비의 관계를 나타내고 있다. 포아송비가 0.5 이상인 값도 있지만, 전체적으로 포아송비는 전체 흡수율 범위에 걸쳐 대체적으로 0.1~0.4 사이에 있으며, 0.5 이상인 값을 제외하면, 흡수율이 감소함에 따라 포아송비 값의 편차는 줄어들고 있음을 알 수 있다. 한편, Gercek(2007)은 현무암에 있어서 포아송비의 전형적인 범위는 0.1~0.35이며, 공극률 보다는 공극의 크기, 형상, 방향성, 분포 및 연결성 등이 포아송비의 결정을 복잡하게 한다고 언급하고 있다. 그리고 Moon et al.(2014)도 언급한 바와 같이 다공성 구조인 현무암은 암석 공시체 표면의 기공의 배열과 형태에 따라 파괴 형상이 현저하게 달라지기 때문에, 변형율 측정에 있어

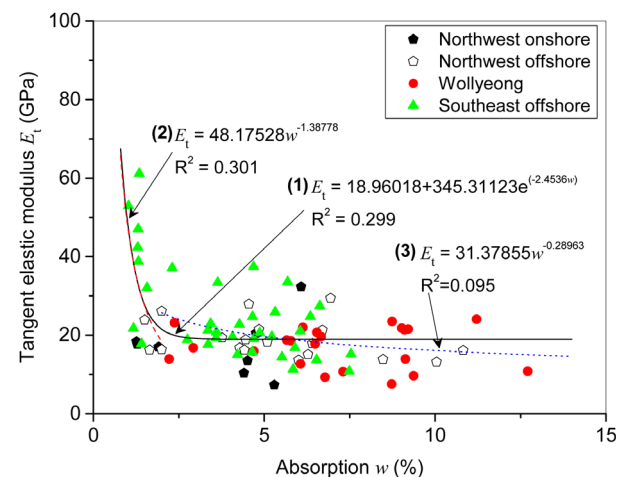


Fig. 7. Relationship between tangent elastic modulus and absorption

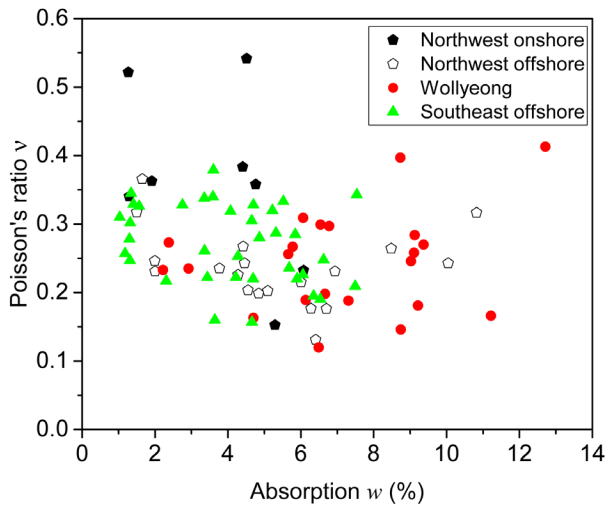


Fig. 8. Relationship between Poisson's ratio and absorption

서 스트레인 게이지 보다는 익스텐소미터 또는 LVDTs를 이용하는 것이 바람직하다고 생각된다.

한편 공극률과 점선탄성계수의 상관관계 또한 살펴 보았지만, 흡수율과 점선탄성계수의 결정계수보다 작은 값을 나타내었으며, 따라서 본 연구에서는 흡수율과 점선탄성계수의 관계만을 나타내었다.

3.4.2 일축압축강도와 탄성상수의 관계

Fig. 9는 측정된 일축압축강도와 점선탄성계수의 관계를 나타내고 있다. 또한 Deere and Miller(1966)의 암석분류와 비교하기 위해 횡축과 종축을 대수(logarithm)로 나타내었다. 한편, Deere and Miller(1966)는 일축압축강도에 따라 무결암(intact rock)을 5구간으로 분류하고 있지만, Fig. 9에는 ISRM(1981)의 일축압축강도에 따른 무결암 분류에 따라 6구간으로 구분하여 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있듯이, 제주도 북서부 육·해상 및 남동부 해상의 현무암의 일축압축강도와 점선탄성계수의 범위는 Deere and Miller(1966)의 현무암을 포함한 화산암에 대한 전형적인 범위 안에 대부분 들어가고 있으며, 대부분의 결과가 일축압축강도에 대한 점선탄성계수의 비(Modulus ratio)에 있어서 200:1에서 500:1 사이에 있음을 알 수 있다. 그리고 이러한 결과로부터 제주도 북서부 육·해상 및 남동부 해상의 현무암을 포함한 Fig. 4의 선형근사 (2)에 해당하는 암석은 연암(low strength)에서 경암(high strength)에 해당하며, 평균적인 탄성계수 비(average modulus ratio)의 범위 안에 있다고 판단해도 무방하다고 사료된다.

Fig. 10은 측정된 일축압축강도와 포아송비의 관계를

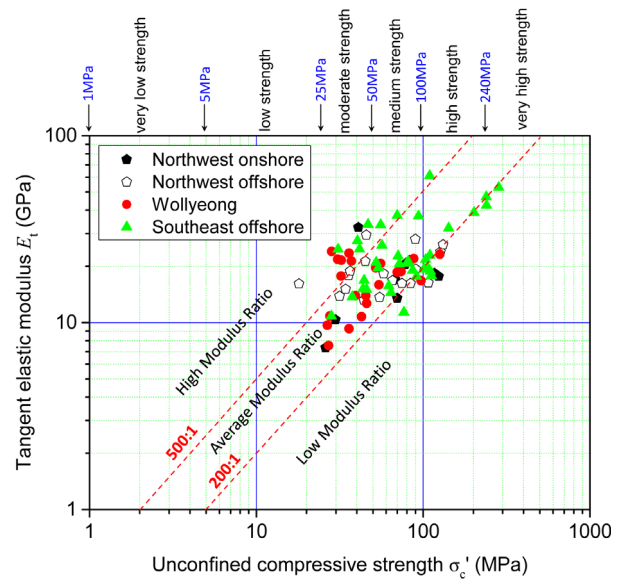


Fig. 9. Relationship between tangent elastic modulus and unconfined compressive strength

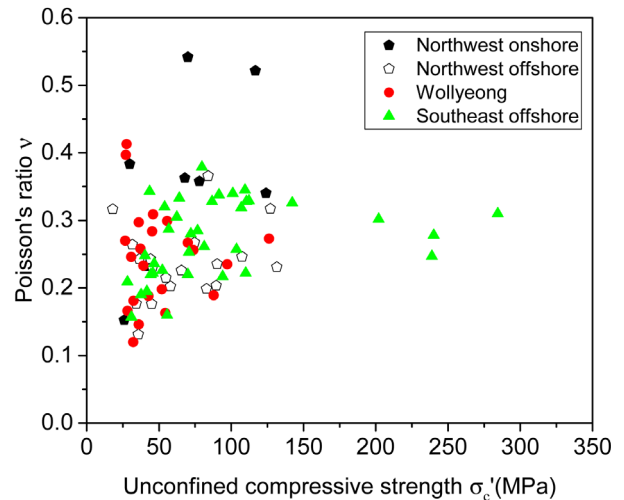


Fig. 10. Relationship between Poisson's ratio and unconfined compressive strength

나타내고 있다. 포아송비가 0.5 이상인 값을 제외하면, 전체적으로 일축압축강도가 증가함에 따라 약 0.25~0.3을 중심으로 0.1~0.45 범위 사이에서 분산되어 있던 포아송비는 약 0.25~0.3 사이에서 수렴하고 있음을 알 수 있다. 한편, Gercek(2007)과 Zhang and Bentley(2005)에 의하면, 암석의 포아송비는 암석의 구성광물과 미세한 균열에 의해 영향을 받는다고 언급하고 있다. 그리고 Christensen(1996)은 암석의 포아송비의 결정에 있어서 암석의 구성광물 중 사장석이 중요한 역할을 한다고 보고하고 있으며, 사장석의 An 함량에 따라 포아송비는 0.28~0.31 사이에 있음을 보고하고 있다. 따라서 Fig. 10의 일축압축강도의 증가에 따른 포아송비의 변화를

통하여, 다공성 구조인 제주도 현무암의 공극 특성과 현무암의 주요 구성광물인 사장석이 포아송비의 결정에 있어서 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

3.4.3 초음파 속도와 역학적 특성의 관계

초음파 속도에 의한 암석의 일축압축강도 등 역학적 특성의 추정에는 점하중 시험, 슈미트해머 시험 등과 함께 간단한 시험에 의해 이루어지기 때문에, 일축압축강도 시험의 정밀한 암석 공시체의 준비 등에 시간이 걸리는 불편한 점을 해소하기 위해 그 활용도를 높이기 위한 다양한 연구가 국내외에서 진행되고 있다(Baek et al., 2006; Choi and Baek, 2014; Inoue and Ohomi, 1981; Kahraman, 2001; Moradian and Behnia, 2009; Yasar and Erdogan, 2004).

한편 제주도 화산암에 대한 연구의 경우, Nam et al. (2008a)은 표선리 현무암, 조면암질 현무암, 스크리아에 대하여 슈미트해머 시험으로 추정된 일축압축강도와 실제 일축압축강도 시험에 의한 강도를 비교하고 있으며, Moon et al.(2014)은 제주도 북동부에서 채취한 현무암에 대하여 P파 속도와 일축압축강도 및 할선탄성계수와 상관을 나타내고 있다.

본 절에서는 제주도 북서부 육·해상 및 남동부 해상에서 채취한 현무암 암석에 대한 초음파 속도와 일축압축강도 및 접선탄성계수 등의 역학적 특성과의 관계에 대하여 논하고자 한다. 기존의 연구에 의하면 P파 속도 또는 P파 속도와 건조밀도를 함께 고려하여 일축압축강도 및 탄성계수와 상관을 나타내어 선형 회귀 관계식 또는 비선형 회귀 관계식을 제안하고 있으며, 따라서 본 연구에서도 P파 속도 또는 P파 속도와 건조밀도를 함께

고려하여 역학적 특성과의 상관관계를 살펴보기로 한다.

Table 5와 Table 6은 각각 일축압축강도와 접선탄성계수의 회귀분석 결과를 나타내고 있으며, V_p 와 $V_p\rho_d$ 에 대한 선형 및 비선형 회귀 관계식 및 결정계수를 나타

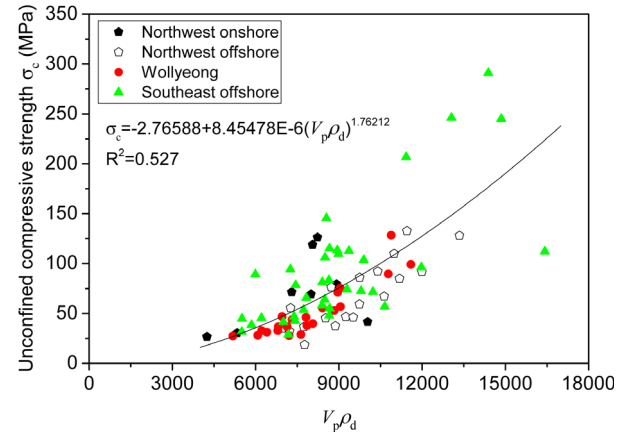


Fig. 11. Relationship between unconfined compressive strength and $V_p\rho_d$

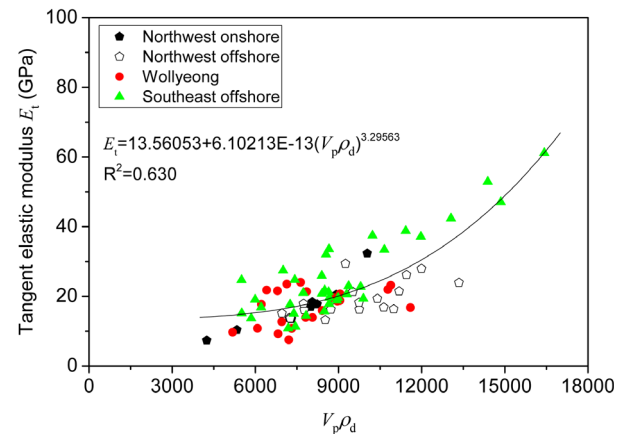


Fig. 12. Relationship between tangent elastic modulus and $V_p\rho_d$

Table 5. Proposed equations for predicting unconfined compressive strength

Parameters	Equations	a	b	c	R^2
σ_c (MPa), V_p (m/s)	$\sigma_c = a + b(V_p)$	-56.95526	0.03571	-	0.237
	$\sigma_c = a + b(V_p)^c$	39.8034	3.22491E-13	3.91252	0.299
σ_c (MPa), V_p (m/s), ρ_d (g/cm ³)	$\sigma_c = a + b(V_p\rho_d)$	-66.8462	0.01622	-	0.515
	$\sigma_c = a + b(V_p\rho_d)^c$	-2.76588	8.45478E-6	1.76212	0.527

Table 6. Proposed equations for predicting tangent elastic modulus

Parameters	Equations	a	b	c	R^2
E_t (GPa), V_p (m/s)	$E_t = a + b(V_p)$	-14.66294	0.00969	-	0.484
	$E_t = a + b(V_p)^c$	13.41028	1.29E-16	4.66957	0.629
E_t (GPa), V_p (m/s), ρ_d (g/cm ³)	$E_t = a + b(V_p\rho_d)$	-6.79463	0.00319	-	0.553
	$E_t = a + b(V_p\rho_d)^c$	13.56053	6.10213E-13	3.29563	0.630

내고 있다. Table 5와 Table 6을 통하여 알 수 있듯이, 일축압축강도 또는 접선탄성계수의 추정에서 선형 회귀 관계식 보다는 비선형 회귀 관계식의 결정계수가 높다는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 P파 속도만을 이용한 추정보다는 P파 속도와 건조밀도를 함께 고려하여 일축압축강도 또는 접선탄성계수를 추정하는 것이 결정계수가 높음을 알 수 있으며, 이러한 경향은 Choi and Baek(2014)과 Moradian and Behnia(2009)의 연구결과와 유사하였다. 그리고 Fig. 11과 Fig. 12에 $V_{p\rho_d}$ 에 대한 제주도 북서부 육·해상 및 남동부 해상의 현무암의 일축압축강도와 접선탄성계수의 관계 및 비선형 회귀 관계식을 각각 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 제주도 북서부 육·해상 및 남동부 해상에서 시추한 현무암의 물리, 역학적 특성을 비교·분석하였으며, 얻어진 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 제주도 북서부 육·해상의 현무암은 흡수율과 비중의 관계, P파 속도와 S파 속도의 관계 및 흡수율과 일축압축강도의 관계를 통하여 제주도 남동부 해상의 현무암과 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 제주도 북서부 육·해상 및 남동부 해상의 현무암에 대한 흡수율과 접선탄성계수 및 포아송비와 같은 탄성상수와의 비교·분석을 통하여, 흡수율의 변화에 따른 접선탄성계수 및 포아송비의 경향을 어느 정도 알 수 있었지만, 접선탄성계수와 포아송비를 추정할 수 있을 정도로 결정계수는 높지 않았다.
- (3) 제주도 북서부 육·해상 및 남동부 해상의 현무암에 대한 일축압축강도와 접선탄성계수의 관계를 통하여, 흡수율과 비중의 관계에 있어서 선형근사 (2)에 해당하는 제주도 화산암은 연암에서 경암에 해당하며, 평균적인 탄성계수 비를 갖고 있다고 사료된다. 그리고 일축압축강도와 포아송비의 관계를 통하여, 낮은 일축압축강도의 제주도 현무암의 경우, 암석 표면 및 내부에 존재하는 공극의 영향으로 인해 포아송비의 결정이 어렵지만, 대체적으로 0.25~0.3 사이를 중심으로 분산되어 있음을 알 수 있었으며, 일축압축강도가 증가함에 따라 암석의 공극의 영향은 서서히 줄어들고, 약 150MPa 이상의 일축압축강도

에서는 0.25~0.3 사이로 수렴하는 경향을 알 수 있었다. 이를 통하여 선형근사 (2)에 해당하는 제주도 현무암의 포아송비는 0.25~0.3 사이에서 결정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

- (4) 제주도 북서부 육·해상 및 남동부 해상의 현무암에 대한 초음파 속도와 일축압축강도 및 접선탄성계수와의 상관관계에 있어서, P파 속도만을 고려하는 것보다 P파 속도와 건조밀도를 함께 고려하여 상관관계를 나타내는 것이 결정계수가 높음을 확인할 수 있었다.
- (5) 제주도 현무암에 대한 일축압축강도, 접선탄성계수 및 포아송비와 같은 역학적 특성을 추정할 시에는, 우선 흡수율을 이용하여 일축압축강도를 추정하고, 추정된 일축압축강도를 통하여, 접선탄성계수와 포아송비를 추정하거나, 초음파 속도를 이용하여 역학적 특성을 추정하는 것이 바람직하다고 사료된다.

감사의 글

자료를 제공해 주신 GK 엔지니어링(주), JPM Inc. 관계자 분들께 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Al-Harathi, A.A., Al-Amri, and Shehata, W.M. (1999), "The Porosity and Engineering Properties of Vesicular Basalt in Saudi Arabia", *Engineering Geology*, Vol.54, No.3-4, pp.313-320.
2. ASTM C97/C97M-09, *Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone*, ASTM International.
3. ASTM D 2845-08, *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*, ASTM International.
4. ASTM D 4543-04, *Standard Practices for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances*, ASTM International.
5. ASTM D 7012-04, *Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*, ASTM International.
6. ASTM D 7012-07, *Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*, ASTM International.
7. Baek, S.C., Kim, Y.T., Kim, H.T., Yoon, J.S., and Lee, Y.G. (2006), "Evaluation of Rock Uniaxial Compressive Strength using Ultrasonic Velocity", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.7, No.2, pp.33-42. (in Korean)
8. Castagna, J.P., Batzle, M.L., and Eastwood, R.L. (1985), "Relationship between Compressional-Wave and Shear-Wave Velocities in Clastic Silicate Rocks", *Geophysics*, Vol.50, No.4, pp.571-581.
9. 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*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol.19, No.4, pp.287-303. (in Korean)
10. Choi, G. and Baek, S. (2014), “Predicting the Uniaxial Compressive Strength and Young’s Modulus of Rocks using Ultrasonic Velocity”, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.15, No.2, pp.53-58. (in Korean)
 11. Christensen, N.I. (1996), “Poisson’s Ratio and Crustal Seismology”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.101, pp.3139-3156.
 12. Deere, D.U. and Miller, R.P. (1966), *Engineering classification and index properties for intact rock*, Technical Report No. EFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory Kirtland Air Force Base, New Mexico.
 13. Eum, K.Y. (2002), *Study on the Mechanical Properties of Volcanic Rocks in Chejudo*, Master thesis, Yonsei University. (in Korean)
 14. Gates, W.C.B. (2008), “Estimating the Unconfined Compressive Strength of Vesicular Basalts via Bulk Specific Gravity of the Rock Sample”, *Proceedings 42nd US Rock Mechanics Symposium*, San Francisco, California.
 15. Gercek, H. (2007), “Poisson’s Ratio Values for Rocks”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.44, pp.1-13.
 16. Inoue, M. and Ohomi, M. (1981), “Relation between Uniaxial Compressive Strength and Elastic Wave Velocity of Soft Rock”, *Proceedings of the International Symposium on Weak Rock*, Tokyo, pp.9-13.
 17. International Society for Rock Mechanics (1981), *Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring*, Pergamon Press.
 18. Kahraman, S. (2001), “Evaluation of Simple Methods for Assessing the Uniaxial Compressive Strength of Rock”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.38, No.7, pp.981-994.
 19. Kelsall, P.C., Watters, R.J., and Franzone, J.G. (1986), “Engineering Characterization of Fissured, Weathered Dolerite and Vesicular Basalt”, *Proceedings 27th US Symposium on Rock Mechanics*, Tuscaloosa, Alabama, pp.77-84.
 20. Kim, J.H. (2006), *A Study on the Mechanical Characteristics and the Strength in Pyoseonri Basalt*, Master thesis, Cheju National University. (in Korean)
 21. 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)
 22. Korean Geotechnical Society (2012), *Geology and Rock Mechanics for Geotechnical Engineer II*, CIR Publishing Company, p.735. (in Korean)
 23. KS E 3033, *Method of Test for Compressive Strength of Rock*, Korean Standards Association. (in Korean)
 24. 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)
 25. Moradian, Z.A. and Behnia, M. (2009), “Predicting the Uniaxial Compressive Strength and Static Young’s Modulus of Intact Sedimentary Rocks using the Ultrasonic Test”, *International Journal of Geomechanics*, Vol.9, No.1, pp.14-19.
 26. 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. (in Korean)
 27. 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)
 28. 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)
 29. Thuro, K., Plinninger, R.J., Záh, S., and Schütz, S. (2001), “Scale Effects in Rock Strength Properties. Part 1: Unconfined Compressive Test and Brazilian Test”, *Proceedings of ISRM Regional Symposium EUROK 2001*, pp.169-174.
 30. Yang, K.H., Seo, S.D., Cho, Y.S., and Park, J.J. (2013), “Numerical Analysis of Offshore Wind Turbine Foundation Considering Properties of Soft Layer in Jeju”, *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.12, No.4, pp.45-56. (in Korean)
 31. 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)
 32. Yasar, E. and Erdogan, Y. (2004), “Correlating Sound Velocity with the Density, Compressive Strength and Young’s Modulus of Carbonate Rocks”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.41, No.5, pp.871-875.
 33. Yoon, S.H. and Ko, K.W. (2011), *Topography, Geology and Underground Water in Jeju Island*, Nae Ha Publishing Company, p.130. (in Korean)
 34. Zhang, J.J. and Bentley, L.R. (2005), *Factors determining Poisson’s ratio*, CREWES Research Report, Vol.17, pp.1-15.

Received : May 26th, 2015

Revised : July 5th, 2015

Accepted : July 7th, 2015