

제주도 북동부 및 북서부 현무암반의 변형계수 추정

Estimation of Deformation Modulus of Basaltic Rock Masses in Northeastern and Northwestern Jeju Island

양 순 보¹ Yang, Soon-Bo

부 상 필² Boo, Sang-Pil

Abstract

In this study, the *in situ* deformation moduli, which were measured by borehole loading tests at basaltic rock masses located in the northeastern onshore and offshore and the northwestern onshore of Jeju Island, were examined in relation to RQD and RMR. The measured deformation moduli were also compared with the estimated deformation moduli from conventional empirical formulas using RQD and RMR. In addition, the measured deformation moduli were analyzed with respect to both the velocity ratio (V_p/V_s) and dynamic Poisson's ratio, which were obtained from the elastic wave velocities measured by velocity logging tests. As results, with only RQD, it was inappropriate to evaluate the quality of the Jeju island basaltic rock masses, which are characterized by vesicular structures, to select a measurement method of *in situ* deformation moduli, and to estimate the deformation moduli. On the other hand, it was desirable to evaluate the quality of the Jeju Island basaltic rock masses, and to estimate the deformation moduli by using RMR. The conventional empirical formulas using RMR overestimated the deformation moduli of the Jeju Island basaltic rock masses. There was qualitative consistency in the relation between velocity ratio and deformation moduli. To estimate appropriately the deformation moduli of the Jeju Island basaltic rock masses, empirical formulas were proposed as the function of RMR and velocity ratio, respectively.

요 지

본 연구에서는 제주도 북동부 육·해상 및 북서부 육상에 위치한 현무암반에 대한 공내재하시험으로부터 계측된 변형계수와 RQD 및 RMR의 관계를 각각 살펴보았으며, 기존의 경험식들로부터 추정된 변형계수 값과 비교·분석하였다. 뿐만 아니라, 속도검층시험을 통하여 산정된 탄성과 속도비 및 동적 포아송 비와 변형계수의 관계에 대해서도 각각 살펴보았다. 그 결과, 다공성 구조 및 층상 구조가 특징인 제주도 현무암반의 경우, RQD 값만을 이용한 암반등급의 결정, 변형계수 계측방법의 선정 및 변형계수의 추정은 부적절하며, 최소한 RMR을 통하여 암반등급을 결정하고, 변형계수를 추정하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있었다. RMR을 이용한 기존의 변형계수 추정식은 제주도 현무암반의 변형계수에 비해 큰 값을 예측하는 경향을 보였으며, 탄성과 속도비 및 동적 포아송 비와 변형계수는 서로 정성적인 특성이 일치하는 관계에 있었다. 그리고, 적절한 제주도 현무암반의 변형계수를 추정하기 위한 RMR과 탄성과 속도비를 이용한 변형계수 추정식을 각각 제시하였다.

1 정회원, 일본 국립연구개발법인 해상·항공기술연구소 항공공학기술연구소 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@pari.go.jp, beeo17@hotmail.com, Corresponding author, 교신저자)
2 정회원, (주)연웅 E&C 전무 (Member, Executive Director, Yonung Engineering & Construction)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

제주도는 약 200만 년 전부터 역사시대까지 발생한 여러 차례의 화산활동에 의해 형성된 섬으로(Yoon and Ko, 2011), 제주도의 화산암은 다공성 구조인 현무암과 같은 특수한 지질학적 조건을 갖고 있으며, 지역마다 다양한 지질 특성을 보이고 있다. 그리고 제주도 화산암석의 물리·역학적 특성과 관련하여 제주도 내의 다양한 지역에서 채취된 암석에 대하여 연구가 이루어져 왔으며(Kim and Choi, 1991; Eum, 2002; Kim, 2006; Nam et al., 2008a, 2008b; Nam et al., 2009; Cho et al., 2009; Moon et al., 2014), 기존 연구의 종합적인 비교 분석을 통하여, 제주도 화산암석의 물리·역학적 특성 또한 지역마다 차이를 나타내고 있으며, 다공성 구조의 특성을 나타내는 파라미터인 흡수율 및 유효공극률에 대한 겉보기비중의 관계가 화산암석의 일축압축강도는 물론 점착력과 내부마찰각과 같은 강도정수를 지배하고 있음이 밝혀졌다(Yang, 2014, 2015a, 2015b, 2016; Yang and Sassa, 2016, 2017). 뿐만 아니라, 제주도 기반암은 육지부와 달리 화산암층 사이에 연약층인 화산쇄설물 및 공동이 불규칙하게 발달된 층상 구조로 이루어져 있으며, 이로 인해 이전부터 대규모 토목공사 및 지하수 개발에 있어서 수많은 시행착오를 경험하고 있다(Kim, 2006). 그리고, 최근에 건설되고 있는 육상 및 해상 풍력 발전시스템의 기초공사와 향후 건설예정인 대규모의 토목공사에 대비하여 제주도 화산암반에 대한 공학적 관점에서의 물리적 및 역학적 특성에 대한 심도 깊은 연구가 요구되고 있는 실정이다.

암반층에 대하여 말뚝기초의 수평하중에 대한 안정성을 검토할 시 사용되는 p-y곡선법의 수평 지반반력의 산정에 있어서, 공내재하시험(Borehole loading test) 등에 의해 계측된 변형계수를 사용할 것을 권장하고 있으며, 그렇지 않은 경우 기존의 경험식을 통하여 변형계수를 추정하도록 되어 있다. 그리고 변형계수를 추정하기 위한 경험식으로서, RQD(Rock Quality Designation), RMR(Rock Mass Rating), GSI(Geological Strength Index), Q 값 등 암반의 등급을 분류하는데 사용되는 파라미터를 이용한 경험식들이 국내·외에서 많이 제안되어 있

나(Deere et al., 1967; Bieniawski, 1978; Serafim and Pereira, 1983; Kim, 1993; Aydan et al., 1997; Gokceoglu et al., 2003; Hoek and Diederichs, 2006; Barton, 2007; Chun et al., 2009; Ahn, 2011), 현재까지 제주도 화산암반에 대한 변형계수를 추정하기 위한 노력은 전무하였다.

변형계수를 추정하기 위한 경험식의 파라미터로서 사용되는 RQD는 시추장비의 선정 및 시추 방법상의 문제 때문에 실제의 현장조건을 고려한 값의 결정이 어렵고(Koo et al., 1994), Bieniawski(1978)에 의하면, RQD는 불연속면의 방향성 및 연속성 등의 암반의 조건을 나타내는데 한계를 갖고 있으며, 암반의 변형계수를 결정하는데 있어서 적절하지 않다고 보고하고 있다. 그럼에도 불구하고 RQD는 현재까지 여러 현장에서 변형계수를 추정하기 위해 여전히 사용되고 있으며, 특히, 다공성 및 층상 구조가 특징인 제주도 화산암반의 경우 RQD만으로 암반의 등급을 결정하는 것은 부적절하다고 판단된다.

한편, RMR 암반 분류법은 6가지의 변수(암석의 일축 압축강도, RQD, 불연속면의 간격, 불연속면의 상태, 지하수 상태, 불연속면의 방향성)에 각각 할당된 점수의 합으로 산정되는 RMR 값을 근거로 암반의 상태를 5등급으로 분류하는 방법(Bieniawski, 1989)으로, 국내에서는 암반 사면과 암반 내 터널 구조물 설계 및 안정해석에 주로 적용되고 있다. 그러나 RMR 암반 분류법은 기술자 및 전문가의 개괄적인 추정과 경험적인 지식 및 주관적인 판단에 따라 각각의 변수에 할당된 점수를 결정하는 사례가 많고, 그에 따른 RMR 값의 편차가 발생하기 쉽기 때문에 RMR 분류법은 불확정성에서 자유로울 수 없다(Koo et al., 1994).

물리검층 및 물리탐사기법 중에서 속도검층(Velocity logging) 또는 탄성파탐사(Seismic survey)를 통해서 측정되는 탄성과 속도는 암반을 포함한 지반 상태의 평가 및 동적 특성 등을 파악하기 위해 지반조사에서 활발히 활용되고 있으며(Sunwoo et al., 2001; Kwon, 2006; Leem et al., 2009), 특히, 본 연구에서 다루어질 탄성과 속도비(V_p/V_s ; V_p : P파 속도, V_s : S파 속도)는 암석의 성분 및 암반 구조의 상태 파악, 그리고 간극 안에 존재하는 유체의 예측 등 다양한 목적으로 사용되고 있다. 또한,

탄성과 속도비는 간극률, 압밀 정도, 불연속면에 충전된 세립자의 양, 간극 구조, 간극 안의 유체 등의 영향을 받으며, 동적 포아송 비(Dynamic Poisson's ratio: ν_d)와 관련이 있다(Barton, 2007).

본 연구에서는 제주도 북동부 육·해상 및 북서부 육상에 위치한 현무암반에 대하여 공내재하시험을 통하여 측정된 변형계수와 RQD 및 RMR의 각각의 관계는 물론, 기존의 경험식들로부터 추정된 변형계수 값과 비교·분석하였다. 뿐만 아니라, 속도검층 시험으로부터 측정된 탄성과 속도로부터 산정된 탄성과 속도비 및 동적 포아송 비와 변형계수의 관계를 각각 살펴보았으며, 적절한 제주도 현무암반의 변형계수를 추정하기 위하여 위의 각각의 파라미터에 대한 변형계수 추정식을 제안하였다.

2. 현장 시험

2.1 공내재하시험(Borehole loading test)

암반의 변형특성은 암반을 구성하는 암석의 성질, 암반의 불연속면, 응력상태 및 지하수에 의한 간극수압 등에 의해 좌우되며, 공내수평재하시험은 시추공 벽면의 원주전체 또는 일부에 하중을 가하여 가압하중에 따른 공벽면의 변형량을 측정함으로써 강도 및 변형특성을 측정하는 방법으로, 재하방식에 따라 등분포하중방식과 등분포변위방식으로 크게 나뉜다. 등분포하중방식은 시추공내에 팽창성 고무튜브를 삽입하고 액체 또는 기체에 의하여 시추공의 공벽면에 하중을 가하는 방법으로, 장비로는 Elastmeter, Pressuremeter가 있으며, 풍화암 또는 연암 정도의 암반에 주로 사용된다. 한편, 등분포변위방식은 강재 재하판을 장착한 프루브(Probe)를 시추

공 안에 삽입하고, 유압을 이용하여 재하판을 공벽면에 작용시켜 하중을 가하는 방법으로, 장비로는 Goodman jack 또는 KKT가 있으며, 등분포하중방식보다 큰 하중을 작용시킬 수 있기 때문에 경암 정도의 암반에 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 제주도 북동부 육·해상 및 북서부 월령에 위치한 현무암반의 시추공 내에서 Elastmeter-2(Oyo Corp., Japan)와 Goodman jack을 이용하여 각각 측정된 변형계수를 대상으로 분석하고자 한다.

2.2 속도검층(Velocity logging)

속도검층이란 지반 내에서 탄성파가 전달되는 속도, 즉, 탄성과 속도의 심도방향 분포를 측정하는 기법을 말한다. 탄성과 속도는 토목 및 환경 분야의 지반조사에서 많이 측정되고 있으며, 연약지반의 평가, 암반의 분류, 연안지역 매립정도의 평가, 지반의 굴착 난이도 평가 및 지반의 동적 특성의 파악 등에 활용되고 있으며, 다양한 시험법이 제안되어 있다(Jo et al., 2006). 현장에서 흔히 사용되고 있는 시험법으로는 다운 홀 시험(Down-hole seismic test)과 부유형 PS 속도검층(Suspension-PS velocity logging)이 있으며, 이 밖의 업 홀(Up-hole) 시험, 크로스 홀(Cross-hole) 시험에 비하여 시험 수행이 비교적 간단하고 수월하며, 장소의 제약을 받지 않는다. 다운 홀 시험은 1개의 시추공이 필요하며, 시추공 부근의 지표면에서 탄성파를 송신하고 시추공 안에 설치된 수신기의 심도를 변화시키면서 탄성파를 수신하여 구간속도를 계산하는 방법으로, 측정심도가 30m 이하일 경우와 지하수위가 없을 경우 측정값의 정밀도가 높다. 한편, 부유형 PS 속도검층은 시추공 안에 설치된 송·수신기가 부착된 프루브(Probe)를 이용하여 탄성과 속도를 측정하는 방법으로, 심도에 대한 제약은 없지만, 지하수위가 존재하는 구간에 대해서만 측정이 가능하다. 그리고 송수신기 사이의 거리가 짧고, 고주파의 음원을 발생하기 때문에, 이 밖의 속도검층 시험에 비해 수직분해능이 높고, 신뢰도가 높다(Jo et al., 2006).

본 연구에서는 다운 홀 시험(Data logger: McSeis-Sx (Oyo Corp., Japan); Geophone: New borehole pick 3040 (Oyo Corp., Japan))과 부유형 PS 속도검층 시험(Data logger: Geologger-3(Oyo Corp., Japan); Prove: Model-3302A(Oyo Corp., Japan))을 통하여 각각 측정된 탄성과 속도를 이용하였다.

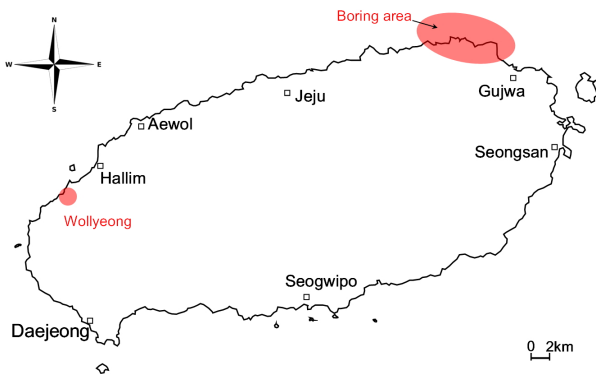


Fig. 1. Location of the boring areas

3. 제주도 현무암층에 대한 탄성과 속도 분석

본 장에서는 제주도 북동부 육·해상의 현무암반에 대한 물리·역학적 특성을 파악하기 위해 실시된 시추조사로부터 얻어진 결과를 중심으로 논하고자 한다. 시추조사의 구체적인 내용은 다음과 같다. 각 시추공에서 채취한 암편을 통하여 RQD를 산정하였으며, 채취된 일부 암편에 대하여 물성시험 및 일축압축강도시험 등을 실시하였다. 그리고 RQD, 일축압축강도 및 불연속면의 특성 등을 통하여 RMR을 산정하였다. 뿐만 아니라, 각 시추공에 대하여 공내재하시험 및 속도검층 시험을 수행하였으며, 육상에 위치한 시추공에서는 다운 홀 시험, 해상의 시추공에서는 부유형 PS 속도검층 시험을 실시하였다. 한편, 제주도 북동부 육·해상 및 북서부 월령에서 채취한 암석은 박편현미경 분석과 X-선 회절 분석을 통하여 현무암에 해당하였다(Yang, 2014, 2015a).

제주도 북동부 육상의 시추공 JB-01에서는 다운 홀 시험과 부유형 PS 속도검층 시험으로부터 각각 측정된 탄성과 속도의 특성을 비교·분석하기 위해, 두 속도검층 시험을 각각 실시하였으며, Fig. 2에 시추공 JB-01에서 각각의 속도검층 시험으로부터 측정된 탄성과 속도와 그 속도비(V_P/V_S)는 물론, RQD 및 지질조사로부터 얻어진 암층에 대한 정보를 심도별로 각각 나타내었다. 그리고 다운 홀 시험으로부터 측정된 탄성과 속도의 경

우, 지층별 탄성과 속도 또한 함께 나타내었다. 각각의 속도검층 시험방법에 의한 탄성과 속도의 심도분포를 통하여, 심도가 약 14m까지의 시추공 주변의 암반은 약 4개의 암층(1~3m, 3~7m, 8~10m, 11~14m)으로 이루어져 있으며, 이는 지질 주상도를 통해서도 확인할 수 있다. 한편, 각각의 속도검층 시험으로부터 얻어진 탄성과 속도비(V_P/V_S)의 경우, 탄성과 속도의 크기 및 암층에 따라 크게 달라지고 있으며, 탄성과 속도가 큰 경암층에서는 탄성과 속도가 작은 연암층에 비해 탄성과 속도비(V_P/V_S)가 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는, 불연속면이 적은 경암반에서는 불연속면이 많은 연암반에 비해 평균적으로 작은 탄성과 속도비(V_P/V_S)를 나타낸다고 보고하고 있는 Barton (2007)의 결과와 정성적으로 일치하고 있다.

Fig. 3은 시추공 JB-01에서 다운 홀 시험과 부유형 PS 속도검층 시험으로부터 각각 측정된 P파 속도(V_P)와 S파 속도(V_S)의 관계를 나타내고 있다. 각각의 속도검층 시험에 의해 측정된 P파 속도와 S파 속도는 서로 선형 관계에 있으며, 부유형 PS 속도검층 시험으로부터 측정된 탄성과 속도는 다운 홀 시험에 의한 것보다 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 속도검층 시험방법에 따른 탄성과 속도의 차이는 널리 알려져 있으며, 그 원인으로는 1) 사용하는 송신주파수와 송수신기 배열간격 차이로 인해 측정되는 매질규모의 차이, 2) 각 탐사

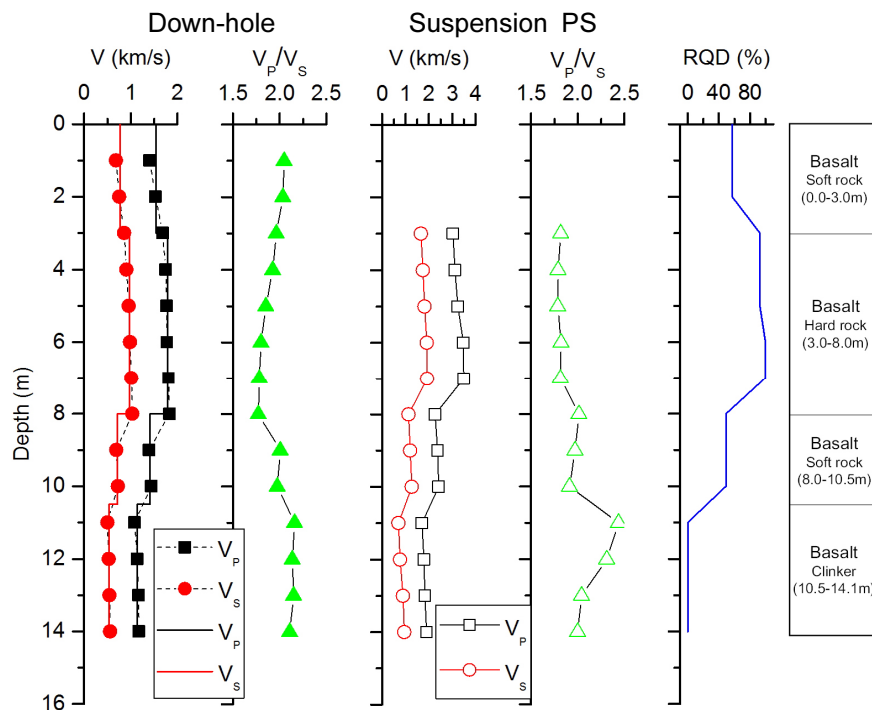


Fig. 2. Depth distributions of elastic wave velocities, velocity ratios and RQD obtained at the borehole JB-01

에 쓰이는 측정장치의 오차와 자료분석 시에 발생할 수 있는 부정확성, 3) 두 탐사방법에서 이용되는 파의 서로 다른 전파특성 등 크게 3가지 이유를 들 수 있다(Stewart et al., 1984; Jo et al., 2006). 그리고 각각의 속도검층 시험에 의해 얻어진 S파 속도에 대한 P파의 속도(Fig. 3 그래프 상의 기울기), 즉, 탄성과 속도비(V_p/V_s)는 대체적으로 일직선상에 놓여 있으며, 비슷한 값을 갖고 있음을 알 수 있다.

위의 두 속도검층 시험에 의해 각각 얻어진 탄성과 속도비(V_p/V_s)에 있어서 유의한 차이가 있는지를 확인하기 위해 t 테스트를 수행하였으며, 이에 대한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 의하면, 각각의 탄성과 속도비(V_p/V_s)의 평균 및 표준편차는 거의 비슷한 값을 보이고 있으며, 유의한 차이가 없음을 알 수 있다 ($p>0.05$). 이러한 결과로부터, 탄성과 속도비는 속도검층 시험방법이 다르더라도 공통적인 파라미터로서 사용할 수 있다는 것을 알 수 있다.

시추공 JB-01에서 다운 홀 시험과 부유형 PS 속도검층 시험으로부터 각각 얻어진 탄성과 속도비(V_p/V_s)와 RQD의 관계 및 각각의 선형근사관계를 Fig. 5에, 그리고 각각의 선형근사의 절편과 기울기에 대한 t테스트 결과

를 Table 1에 나타내었다. 각각의 탄성과 속도비(V_p/V_s)와 RQD는 음(-)의 선형관계에 있으며, RQD값이 증가함에 따라 각각의 탄성과 속도비(V_p/V_s)는 유의하게 감소하고 있다($p<0.001$). 이는 Fig. 2에서 언급한 탄성과 속도비(V_p/V_s)의 특성과 정성적으로 일치하고 있으며, Barton(2007)에 의하면, 평균적으로 탄성과 속도비(V_p/V_s)가 작은 암반에서 Q 분류법에 의해 산정된 Q 값이 크다

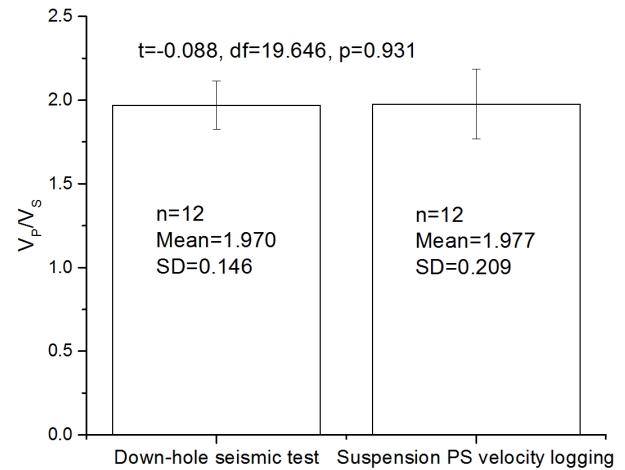


Fig. 4. Comparison between the velocity ratios (V_p/V_s) obtained from Down-hole seismic test and Suspension PS logging test at the borehole JB-01

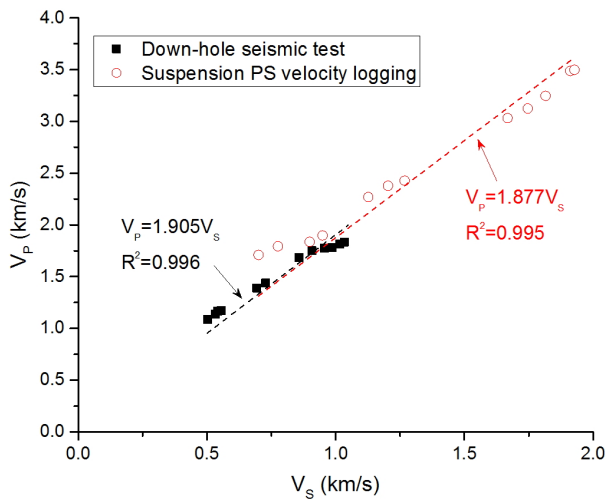


Fig. 3. Relation between P-wave velocity (V_p) and S-wave velocity (V_s) obtained from Down-hole seismic test and Suspension PS logging test at the borehole JB-01

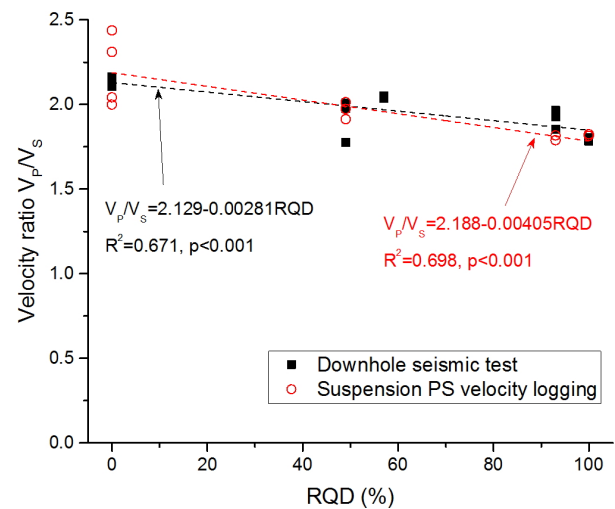


Fig. 5. Relation between velocity ratio (V_p/V_s) and RQD at the borehole JB-01

Table 1. Results of t tests for Y-intercepts and slopes of the linear approximations between velocity ratio (V_p/V_s) and RQD, which were indicated in Fig. 5

	N	Y-intercept					Slope				
		Mean	SD	T value	DF	p	Mean	SD	T value	DF	p
Down-hole	14	2.129	0.139	-0.871	19.599	0.394	-0.00281	0.00213	1.225	19.921	0.235
Suspension PS	12	2.188	0.194				-0.00405	0.0029			

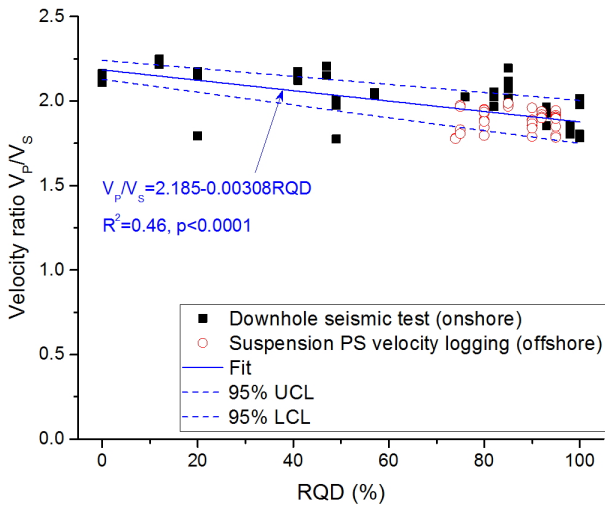


Fig. 6. Relation between velocity ratio (V_p/V_s) and RQD

고 보고하고 있다. 그리고 Table 1의 결과를 통하여, 두 선형근사의 절편과 기울기 사이에는 유의한 차이가 없음을 알 수 있다($p > 0.05$).

Fig. 6은 제주도 북동부 육·해상에 위치한 시추공에 대하여 다운 홀 시험(육상의 시추공)과 부유형 PS 속도 검층 시험(해상의 시추공)으로부터 각각 얻어진 탄성과 속도비(V_p/V_s)와 RQD의 관계를 나타내고 있다. 탄성과 속도비(V_p/V_s)와 RQD는 Fig. 5와 같이 음(-)의 선형관계에 있으며, RQD값이 증가함에 따라 탄성과 속도비(V_p/V_s)는 유의하게 감소하고 있다($p < 0.0001$). 그리고 부유형 PS 속도검층에 의한 탄성과 속도비(V_p/V_s)가 부분적으로 다운 홀 시험에 의한 탄성과 속도비(V_p/V_s)보다 95% 신뢰구간 내에서 작은 값을 나타내고 있다. 이는 서론에서 언급한 바와 같이 탄성과 속도비는 암반의 절리 상태 및 간격, 그리고 암석의 다공성 구조에 영향을 받으며, 이러한 사실로부터 RQD값이 같더라도, 해상에 위치한 현무암반의 상태가 육상의 암반에 비해 절리의 상태 및 간격이 양호하다고 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

4. 제주도 현무암반의 변형계수

본 장에서는 제주도 도내의 육·해상에 위치한 현무암반의 시추공에 대하여 Elastmeter와 Goodman jack을 이용하여 계측된 변형계수와 RQD, RMR, 탄성과 속도비(V_p/V_s) 및 동적 포아송 비(ν_d)의 관계에 대하여 각각 살펴보고자 한다.

4.1 변형계수와 RQD의 관계

제주도 북동부 육·해상, 북서부 월령 및 제주도 도내의 항만공사에서 실시된 시추조사에서 심도에 따라 시추된 일부 무결암에 대한 물성 및 일축압축시험 결과, 공내재하시험(Goodman Jack, Elastmeter 등)으로부터 계측된 변형계수 및 RQD값을 Table 2에 각각 정리하였다.

공내재하시험으로부터 계측된 변형계수와 RQD의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 전체적으로 Goodman Jack (GJ)에 의해 계측된 변형계수가 Elastmeter(EM)에 의한 것보다 큰 값을 나타내고 있으며, 각각의 시험방법에 의해서 계측된 변형계수는 RQD값이 증가함에 따라 지속적으로 유의하게 증가하고 있다($p < 0.001$). 또한, Fig. 7

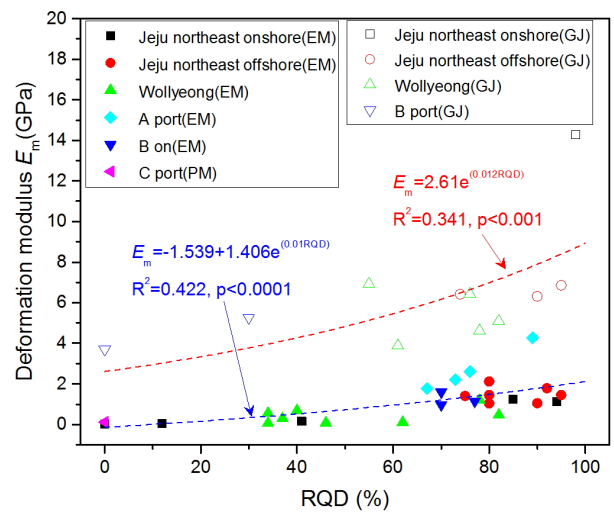


Fig. 7. Relation between deformation modulus E_m and RQD: EM: Elastmeter, GJ: Goodman Jack, PM: Pressuremeter

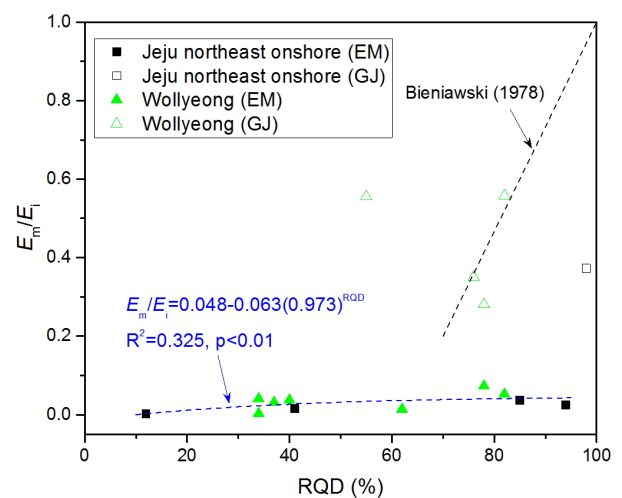


Fig. 8. Relation between E_m/E_1 and RQD: E_m : Deformation modulus of rock mass, E_1 : Elastic modulus of intact rock, EM: Elastmeter, GJ: Goodman Jack

의 C port의 경우, Pressuremeter(PM)에 의해 계측된 변형계수를 나타내고 있으며, Elastmeter(EM)에 의한 변형계수 값과 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다. Fig. 8은 제주도 북동부 육상 및 북서부 월령의 시추공에서

채취한 무결암의 탄성계수에 대한 변형계수의 비(E_m/E_i)와 RQD의 관계 및 Bieniawski(1978)가 제시한 선형 상관관계를 나타내고 있다. Fig. 7의 결과와 같이, Goodman Jack(GJ)에 의해 계측된 변형계수를 통하여 산정된 비

Table 2. Results of physical and mechanical properties of the basaltic intact rocks, and *in situ* deformation modulus and RQD of the basaltic rock masses of Jeju Island

	Borehole No.	Depth (m)	G	w (%)	UCS (MPa)	E_i (Gpa)	ν	RQD (%)	E_m (Gpa)	Borehole loading test
Jeju northeast onshore	JB-02	10.3-10.5	2.596	1.830	67.86	45.002	0.23	94	1.113	Elastmeter
	JB-03	5.0-5.5	2.188	3.300	24.60	15.287	0.24	12	0.038	Elastmeter
		12.7-12.9	2.840	1.080	110.89	38.329	0.21	98	14.288	Goodman Jack
	JB-04	1.5-1.9	2.103	2.510	28.14	34.399	0.24	85	1.239	Elastmeter
4.0-4.1		2.131	3.290	17.67	9.952	0.22	41	0.155	Elastmeter	
Jeju northeast offshore	BH-11	5						74	6.413	Goodman Jack
		8						80	2.111	Elastmeter
		13						92	1.776	Elastmeter
		14						95	6.859	Goodman Jack
		27						80	1.444	Elastmeter
	BH-12	4						80	1.033	Elastmeter
		7						90	1.039	Elastmeter
		12						90	6.314	Goodman Jack
		16						75	1.399	Elastmeter
		18						95	1.445	Elastmeter
Wollyeong	HJB-01	5.1-5.2	2.098	9.370	26.70	9.682	0.27	37	0.296	Elastmeter
		6.1-6.2	2.476	5.780	70	18.59	0.267	76	6.440	Goodman Jack
		7.3-7.4	2.263	8.730	27.1	7.532	0.397	62	0.103	Elastmeter
		9.0-9.1	2.391	6.780	36	9.275	0.297	82	5.094	Goodman Jack
		9.0-9.1	2.391	6.780	36	9.275	0.297	82	0.477	Elastmeter
	HJB-02	5.4-5.5	2.446	5.658	73.8	18.774	0.256	40	0.684	Elastmeter
		6.8-7.0	2.272	9.130	45.3	13.933	0.284	34	0.561	Elastmeter
		7.8-8.0	2.186	11.216	28.3	24.045	0.166	34	0.069	Elastmeter
		18						61	3.884	Goodman Jack
	HJB-03	3.3-3.4	2.354	6.063	45.9	12.687	0.309	55	6.930	Goodman Jack
		7.1-7.3	2.636	2.922	97.3	16.774	0.235	78	4.622	Goodman Jack
		7.1-7.3	2.636	2.922	97.3	16.774	0.235	78	1.203	Elastmeter
		11						46	0.080	Elastmeter
A port	DH-2	13						76	2.616	Elastmeter
	DH-5	24						67	1.769	Elastmeter
	DH-5	27						89	4.282	Elastmeter
	DH-13	13						73	2.205	Elastmeter
B port	NB-7	14						0	3.690	Goodman Jack
	NB-11	12						30	5.260	Goodman Jack
B on	BB-1	21.3						77	1.139	Elastmeter
	BB-2	5.7						70	1.593	Elastmeter
	BB-8	10						70	0.956	Elastmeter
C port	NBH-22	28.0-28.8						0	0.120	Pressuremeter

G : Bulk specific gravity, w : Water absorption ratio, UCS: Unconfined compressive strength, E_i : Elastic modulus, ν : Poisson's ratio, E_m : Deformation modulus

(E_m/E_i) 가 Elastmeter(EM)에 의한 변형계수를 통하여 산정된 비(E_m/E_i)보다 훨씬 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, Elastmeter에 의한 변형계수비(E_m/E_i)는 RQD가 증가함에 따라 유의하게 증가하고 있다($p<0.01$). 위 결과를 통하여, 제주도 현무암반의 변형계수를 RQD에 대하여 나타낼 시, 변형계수의 계측방법에 따른 값의 차이가 나타나고 있음을 알 수 있으며, 제주도의 현무암반과 같이 다공성 및 층상 구조가 특징인 암반에 대하여 RQD값만으로 암반의 등급을 결정하고, 변형계수의 계측방법을 결정하는 것이 타당한지 의문이 생긴다.

4.2 변형계수와 RMR의 관계

제주도 북동부 육상의 현무암반에 대한 RMR 산정과 정(Bieniawski, 1989), 그리고 산정된 RMR과 Elastmeter(EM)와 Goodman Jack(GJ)에 의해 계측된 변형계수의 관계를 Table 3과 Fig. 9에 각각 나타내었다. 뿐만 아니라, 변형계수를 추정하기 위해 제안된 기존의 경험식들과 비교하기 위해, Table 4에 나타난 기존의 경험식들을 통해서 산정된 변형계수 추정값을 Fig. 9에 함께 나타내었다. RMR값이 증가함에 따라 변형계수는 지수적으로 유의하게 증가하고 있으며($p<0.001$), 기존에 제안된 경험식들은 제주도 현무암의 변형계수에 비해서 전체적으로 2~10배에 달하는 값을 추정하고 있다. 한편, Ahn (2011)이 제안한 육지부의 화산암에 대한 변형계수 경험식이 제주도 현무암반의 변형계수에 가장 가까운 값을 추정하고 있지만, 이 또한 크게 추정하고 있음을 알 수 있다. 그리고 변형계수와 RMR의 관계의 경우, 변형

계수와 RQD의 관계와 달리, 변형계수의 계측방법에 따른 값의 차이가 나타나고 있지 않으며, 이러한 결과로부터 RQD만으로 다공성 구조가 특징인 제주도 현무암반의 암질을 결정하고, 변형계수의 계측방법을 선정하는 것은 부적절하며, 최소한 RMR을 통하여 암반등급을 결

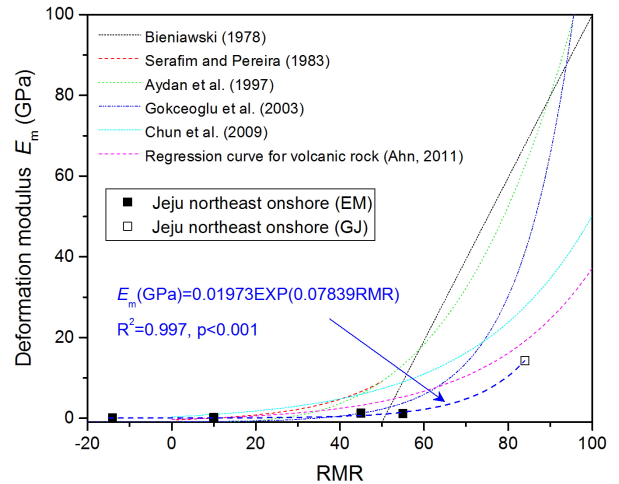


Fig. 9. Relation between RMR and deformation modulus E_m : EM: Elastmeter, GJ: Goodman Jack

Table 4. List of empirical correlations for estimating the rock deformation modulus with RMR

Correlations (E_m in GPa)	References
$E_m = 2 \times RMR - 100$ ($RMR > 50$)	Bieniawski (1978)
$E_m = 10^{((RMR-10)/40)}$ ($RMR \leq 50$)	Serafim and Pereira (1983)
$E_m = 0.0097 \times RMR^{3.54} \times 10^{-3}$	Aydan et al. (1993)
$E_m = 0.0736 \times \text{Exp}(0.0755RMR)$	Gokceoglu et al. (2003)
$E_m = 1.3326 \times \text{Exp}(0.0364RMR)$	Chun et al. (2009)
$E_m = 685.58 \times \text{Exp}(0.0401RMR) \times 10^{-3}$ (Volcanic rocks)	Ahn (2011)

Table 3. Rock mass ratings using the RMR system (Bieniawski, 1989) for the basaltic rock mass in the northeastern onshore of Jeju Island

Borehole No.	Depth (m)	UCS (MPa)	RQD (%)	Spacing of discontinuities (m)	Condition of discontinuities					Groundwater conditions	Orientation of discontinuities	RMR
					Discontinuity length (m)	Separation (mm)	Roughness	Infilling	Weathering			
		Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	
JB-02	10.3	67.86	94	0.28	3~10	1~5	Smooth	HF<5mm	MW	wet	VF	55
	-10.5	7	20	10	2	1	1	4	3	7	0	
JB-03	5.0	24.63	12	0.05	10~20	>5	Slickensided	SF>5mm	Decomposed	flowing	VU	-14
	-5.5	2	3	5	1	0	0	0	0	0	-25	
	12.7	110.9	98	0.75	1~3	0.1~1	Rough	None	Unweathered	damp	VF	84
	-12.9	12	20	15	4	6	5	6	6	10	0	
JB-04	1.5	28.14	85	0.15	3~10	1~5	Smooth	SF<5mm	MW	wet	VF	45
	-1.9	4	17	8	2	1	1	2	3	7	0	
	4.0	17.67	41	0.18	3~10	>5	Slickensided	SF>5mm	HW	dripping	U	10
	-4.1	2	8	8	2	0	0	0	1	4	-15	

HF: Hard filling, SF: Soft filling, HW: High weathered, MW: Moderately weathered, VF: Very favourable, VU: Very unfavourable, U: Unfavourable

정하고 변형계수를 추정하는 것이 바람직하다고 사료된다.

4.3 변형계수와 탄성과 속도비(V_p/V_s)의 관계

제주도 북동부 육·해상에 위치한 시추공에서 계측된 변형계수와 다운 홀 시험과 부유형 PS 속도검층 시험으로부터 각각 얻어진 탄성과 속도로부터 산정된 탄성과 속도비(V_p/V_s)의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 탄성과 속도비(V_p/V_s)가 감소함에 따라 변형계수는 유의하게 증가하고 있으며($p < 0.0001$), 탄성과 속도비(V_p/V_s)가 약 1.8에서 변형계수는 거의 연직으로 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 서론에서 언급을 했듯이, 탄성과 속도비(V_p/V_s)는 Eq. (1)과 같이 동적 포아송 비(Dynamic Poisson's ratio)와 관련이 있으며, 변형계수와 동적 포아송 비(ν_d)의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 포아송 비(ν)는 암반을 포함한 지반의 수치해석 및 설계 분야에서 지반의 측면변형을 반영하는 중요한 파라미터로서, 지반의 강도 및 변형 특성에 영향을 미친다. 한편, Barton (2007)에 의하면, 공극이 거의 존재하지 않는 암반의 경우 동적 포아송 비(ν_d)는 약 0.25의 값을 나타내고, 비압밀 퇴적층에 있어서는 0.45이상의 값을 보인다고 보고하고 있다. Fig. 11을 통하여 알 수 있듯이, 동적 포아송 비(ν_d)가 감소함에 따라, 즉 암반의 강성이 증가함에 따라 변형계수는 지속적으로 유의하게 증가하고 있으며($p < 0.0001$), 동적 포아송 비가 약 0.28에서 변형계수는 연직으로 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한

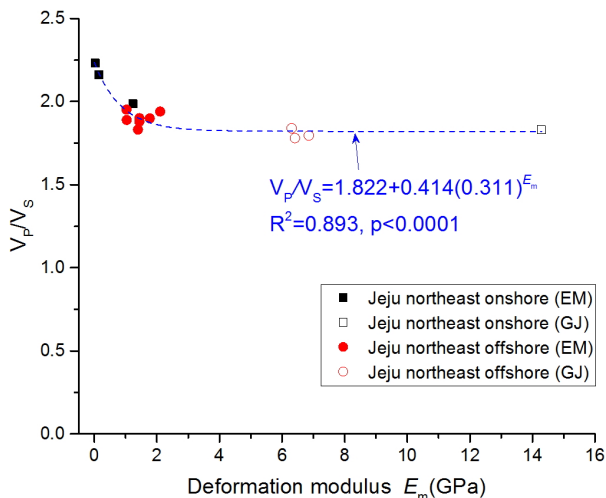


Fig. 10. Relation between deformation modulus E_m and velocity ratio (V_p/V_s): EM: Elastmeter, GJ: Goodman Jack

결과로부터, 탄성과 속도비와 변형계수는 정성적인 특성이 일치하는 관계에 있음을 알 수 있으며, 탄성과 속도비를 통하여 변형계수를 추정할 수 있을 것이라 사료된다. 뿐만 아니라, 탄성과 속도비는, RMR 산정 시 경험적 지식 또는 주관적인 판단이 필요한 암반의 불연속면의 평가에 있어서, 객관적으로 판단할 수 있는 파라미터로서 사용할 수 있을 것이라 사료된다.

$$\nu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad (1)$$

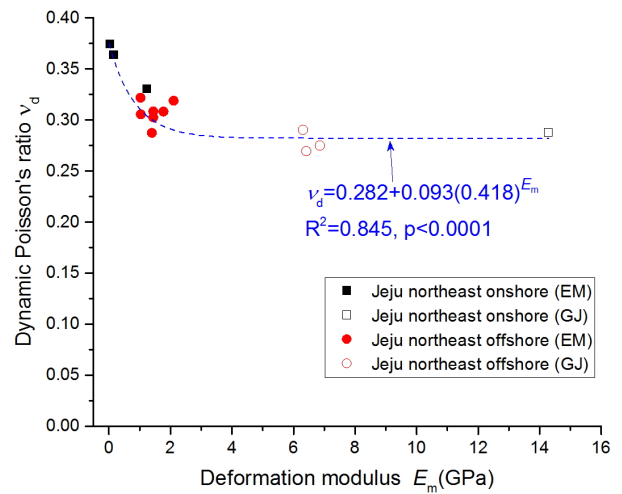


Fig. 11. Relation between deformation modulus E_m and dynamic Poisson's ratio ν_d ; EM: Elastmeter, GJ: Goodman Jack

5. 결론

본 연구에서는 제주도 북동부의 육·해상 및 북서부 육상에 위치한 현무암반에 대하여 공내재하시험(Elastmeter, Goodman jack)을 통하여 계측된 변형계수와 RQD, RMR, 탄성과 속도비(V_p/V_s) 및 동적 포아송 비(ν_d)의 관계를 각각 비교·분석하였다. 그리고 변형계수와 RMR의 관계의 경우, 변형계수를 추정하기 위해 제안된 기존의 경험식들과 비교·분석하였으며, 얻어진 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 변형계수와 RQD의 관계의 경우, 변형계수의 계측 방법에 따른 값의 차이가 나타나고 있으며, 다공성 및 층상 구조가 특징인 제주도 현무암반의 경우, RQD만으로 암질을 결정하고, 변형계수의 계측방법을 선정하는 것은 부적절하며, RQD를 이용한 변형계수의 추정 또한 부적절하다고 사료된다.

- (2) 변형계수와 RMR의 관계의 경우, 변형계수와 RQD의 관계와 달리, 변형계수의 측정방법에 따른 값의 차이가 없으며, 변형계수와 RMR사이에는 지수적인 상관관계가 있다. 변형계수를 추정하기 위한 기존의 경험식들은 제주도 현무암반에 대하여 측정된 변형계수의 2~10배에 달하는 값을 추정하고 있으며, 본 연구에서 제안한 추정식을 통하여 양호한 값을 추정할 수 있을 것이라 사료된다. 그리고 제주도 현무암반의 경우 최소한 RMR을 통하여 암반등급을 결정하고, 변형계수를 추정하는 것이 바람직하다고 사료된다.
- (3) 탄성과 속도비(V_p/V_s) 및 동적 포아송 비(ν_d)와 변형계수의 관계의 경우, 각각 유의한 상관관계에 있으며, 탄성과 속도비와 변형계수 사이에는 정성적으로 특성이 일치하는 관계에 있음을 알 수 있었다. 탄성과 속도비는 변형계수를 추정하기 위한 파라미터는 물론, RMR암반분류의 불연속면 평가에 있어서, 보다 객관적인 암반등급의 추정을 위한 하나의 파라미터로서 이용이 가능하다고 사료된다.

참고문헌 (References)

- Ahn, T. (2011), "The Correlation Between RMR and Deformation Modulus by Rock Masses Using Pressuremeter", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.12, No.1, pp.5-12 (in Korean).
- Aydan, Ö., Ulusay, R., and Kawamoto, T. (1997), "Assessment of Rock Mass Strength for Underground Excavations", *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science*, Vol.34, No.3-4, pp. 1-17.
- Barton, N. (2007), *Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy*, Taylor & Francis, p.729.
- Bieniawski, Z.T. (1978), "Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories", *International Jour. of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics*, Vol.15, pp.237-247.
- Bieniawski, Z.T. (1989), *Engineering rock mass classifications*, John Wiley & Sons, Inc. p.250.
- 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.
- Chun, B., Ryu, W., Sagong, M., and Do, J. (2009), "Indirect Estimation of the Rock Deformation Modulus based on Polynomial and Multiple Regression Analyses of the RMR System", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.46, pp.649-658.
- Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D., and Cording, E.J. (1967), "Design of Surface and Near-surface Construction in Rock" *Proceedings of the 8th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, pp.237-302.
- Eum, K.Y. (2002), Study on the Mechanical Properties of Volcanic Rocks in Chejudo, Master thesis, Yonsei University, p.63.
- Gokceoglu, C., Sonmex, H., and Kayabasi, A. (2003), "Predicting the Deformation Moduli of Rock Masses", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.40, pp.701-710.
- Hoek, E. and Diederichs, M.S. (2006), "Empirical Estimation of Rock Mass Modulus", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.43, pp.203-215.
- Jo, C., Byun, J., and Hwang, S. (2006), "Considerations on the Difficulties in Velocity Logging in the Near Surface Environments", *Geophysics and Geophysical Exploration*, Vol.9, No.3, pp.185-192 (in Korean).
- Kim G.W. (1993), "Revaluation of 「Geomechanics Classifications of Rock Masses」", *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conferences*, pp.33-40 (in Korean).
- Kim, J.H. (2006), *A Study on the Mechanical Characteristics and the Strength in Pyoseonri Basalt*, Master thesis, Cheju National University, p.93 (in Korean).
- 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.
- Koo, H.B., Bae, G.J., Moon, H.D., and Hong, S.W. (1994), "An Evaluation of Rock Mass Rating System as Design Aids in Korea", *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conferences*, pp. 209-216 (in Korean).
- Kwon, B.D. (2006), "On-Land Seismic Survey of Korea", *Economic and Environmental Geology*, Vol.39, No.4, pp.441-446 (in Korean).
- Leem, K.M., Park, J.O., Yu, Y.C., and Song, M.Y. (2009), "Geophysical Well-log Analysis of Andesite and Sedimentary Rocks in Myodo-dong, Yeosu, Southern Korea", *Journal of Korean Earth Science Society*, Vol.30, No.4, pp.401-408 (in Korean).
- 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).
- 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.
- 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.
- 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.
- Serafim, J.L. and Pereira, J. P. (1983), "Consideration of the Geomechanical Classification of Bieniawski", *Proceedings of International Symposium on Engineering Geology in Underground Construction*, Lisbon, Portugal, Vol.1, No.2, pp.33-44.
- Stewart, R.R., Huddleston, P.D., and Kan, T.K. (1984), "Seismic Versus Sonic Velocities: A Vertical Seismic Profiling Study", *Geophysics*, Vol.49, No.8, pp.1153-1168.
- Sunwoo, C., Chung, S.K., Han, K.C., Hwang, S.H., and Lee, S.K. (2001), "Correlation Between the Rock Mass Classification Methods", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.4, pp. 127-134 (in Korean).
- 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).
27. 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).
28. 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).
29. 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).
30. 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).
31. Yang, S. and Sassa, S. (2017), “Effects of Porosity on Mechanical Characteristics of Vesicular Basalts”, *Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp.705-711.
32. Yoon, S.H. and Ko, K.W. (2011), *Topography, Geology and Underground Water in Jeju Island*, Nae Ha Publishing Company, pp.5-57 (in Korean).

Received : October 1st, 2018

Revised : January 9th, 2019

Accepted : January 11th, 2019