



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

제주 현무암 지반의 변형계수
추정

The Estimation of Deformation Modulus of
Jeju Basalt Ground

濟州大學校 産業大學院

土木工學科

李 光 守

2018年 8月

제주 현무암 지반의 변형계수 추정

指導教授 李 東 昱

李 光 守

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2018 年 6 月

李光守의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 김 상 진 

委 員 이 동 우 

委 員 고 성 현 

濟州大學校 産業大學院

The Estimation of Deformation Modulus of Jeju Basalt Ground

Kwang-Soo Lee

(Supervised by Professor Dong Wook Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for
the degree of Master of Engineering

2018. 8.

This thesis has been examined and approved by

Thesis director, Sang-Jin Kim, Prof. of Civil Engineering

Thesis director, Seong-Hyun Ko, Prof. of Civil Engineering

Thesis director, Dong Wook Lee, Prof. of Civil Engineering

June. 2018

Department of Civil Engineering
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Table	vi
List of Figure	vii
Abstract	ix
I. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용 및 방법	2
1.3 연구동향	3
II. 이론적 배경	5
2.1 암반의 특성	5
2.1.1 개요	5
2.1.1 암반의 강도특성	5
2.1.3 암반의 변형특성	6
2.2 공학적 암반분류방법	8
2.2.1 암반분류법의 개요	8
2.2.2 암질지수(RQD) 분류방법	9
2.2.3 RMR 분류방법	11
2.2.4 Q-System 분류방법	16
2.2.5 RMR 분류방법의 문제점과 적용방안	19
2.3 공내재하시험	22
2.3.1 시험개요	22
2.3.2 시험방법	22
2.3.3 해석방법	24
2.3.4 시험적용상의 문제점	26

2.4 기존 변형계수 산정을 위한 제안식	27
2.4.1 국외 변형계수 제안식	27
2.4.2 국내 변형계수 제안식	28
2.4.3 상관성 분석을 위한 기존 제안식 적용	29
III. 현무암의 RMR 분류에 의한 결과분석	30
3.1 시험결과	30
3.1.1 일축압축강도시험	30
3.1.2 공내재하시험	33
3.2 현무암의 RMR과 기존 제안식과의 상관성 분석	36
3.3 현무암의 RMR 특성치와 변형계수의 상관관계 분석	39
3.3.1 일축압축강도와 변형계수의 상관관계	39
3.3.2 암질지수와 변형계수의 상관관계	42
3.3.3 절리간격과 변형계수의 상관관계	44
3.4 현무암의 RMR과 변형계수의 상관관계 분석	46
IV. 현무암과 타암종들의 상관성 비교분석	48
4.1 현무암과 타암종들의 특성치 RMR 분류평점 비교	48
4.1.1 일축압축강도 RMR 분류평점(R1) 비교	49
4.1.2 암질지수 RMR 분류평점(R2) 비교	50
4.1.3 절리간격 RMR 분류평점(R3) 비교	51
4.1.4 절리상대 RMR 분류평점(R4) 비교	53
4.2 현무암과 타암종들의 변형계수 상관관계 분석	55
V. 결론	57
Reference	59
감사의 글	63

List of Table

Table 2.1. Classification of Rock Quality using R.Q.D (Deere, 1963)	10
Table 2.2. Rock Mass Rating System (Bieniawski, 1989; Abbas & Konietzky, 2015)	12
Table 2.2.(a) Five basic rock mass class classification parameters and their ratings (R1 ~R5)	12
Table 2.2.(b) Effects of joint Orientation in Tunneling (R6)	12
Table 2.2.(c) Rating Adjustment for Joint Orientations (R6)	13
Table 2.2.(d) Guidelines for Classification of Discontinuity Conditions	13
Table 2.2.(e) Rock mass Classes Determined from Total Ratings	13
Table 2.2.(f) Rating Adjustment for Joint Orientations	13
Table 2.3. Rock Classification Class by Q Value (ISRM, 1981; KGS, 2000) ..	18
Table 2.4. Seepage Water of Discontinuity (kim, 2001)	20
Table 2.5. $K(\nu)$ Constant According to Poisson's ratio (ν) (KGS, 2000)	25
Table 3.1. Uniaxial Compressive Strength Test Results of Jeju's Basalt (Unit: MPa)	31
Table 3.2. Results of Modulus of Deformation Measurement by region in Jeju's (Unit: GPa)	34
Table 3.3. Regression Analysis Result for Uniaxial Compressive Strength ..	41
Table 3.4. Regression Analysis Result for Rock Quality Designation	42
Table 3.5. Regression Analysis Result for Joint spacing	44
Table 3.6. Regression Analysis Result for RMR	46
Table 4.1. RMR(R1) According to Rock Type	49
Table 4.2. RMR(R2) According to Rock Type	51
Table 4.3. RMR(R3) According to Rock Type	52
Table 4.4. RMR(R4) According to Rock Type	53
Table 4.5. Regression Analysis Result for Rock Types	56

List of Figure

Fig. 2.1. Initial Elastic Modulus and Deformation Modulus (Do et al, 2006) ...	6
Fig. 2.2. Procedure for Measurement and Calculation of Rock Quality Designation (RQD) (Deere and Deere, 1988)	9
Fig. 2.3. Ratings for Strength of Intact Rock (Bieniawski, 1989)	14
Fig. 2.4. Ratings of RQD (Bieniawski, 1989)	15
Fig. 2.5. Ratings for Discontinuity Spacing (Bieniawski, 1989)	15
Fig. 2.6. The Q Support Chart (Grimstad and Barton, 1993; Kim, 2014)	16
Fig. 2.7. Borehole Load Test By Dilatometer (KGS, 2000; Do et al, 2006)	23
Fig. 2.8. Borehole Load Test By Borehole jack (KGS, 2000; Do et al, 2006)	23
Fig. 2.9. Pressure-Borehole radius Relationship Curve by Pressure Meter Test	24
Fig. 3.1. Uniaxial Compressive Strength Test of Jeju' s Basalt	30
Fig. 3.2. Uniaxial Compressive Strength distribution for Jeju' s Basalt	32
Fig. 3.3. Borehole Pressure Meter Test by region of Jeju' s	33
Fig. 3.4. Deformation Modulus Distribution for Jeju' s Basalt	35
Fig. 3.5. Correlation of RMR and Deformation Modulus	36
Fig. 3.6. Fig. 3.6 RMR < 50	37
Fig. 3.7. Fig. 3.6 RMR > 50	37
Fig. 3.8. Correlation Between Uniaxial Compressive Strength and Deformation Modulus	40
Fig. 3.9. Correlation Between Rock Quality Designation and Deformation Modulus	43
Fig. 3.10. Correlation Between Joint spacing and Deformation Modulus	45
Fig. 3.11. Correlation Between Measurement RMR and Deformation Modulus	47
Fig. 4.1. RMR(R1) Frequency According to Rock Types	49
Fig. 4.2. RMR(R2) Frequency According to Rock Types	50
Fig. 4.3. RMR(R3) Frequency According to Rock Types	51

Fig. 4.4. RMR(R4) Frequency According to Rock Types53

Fig. 4.5. Correlation Between RMR and Modulus of Deformation by Rock
Types55

Abstract

As civil engineering and construction works are actively in progress in Jeju recently, proper estimation of the deformation modulus on basalt for analyzing the reliability of structures is regarded critical. However, geotechnical assessment is still insufficient.

Deformation Modulus is currently measured through field test which requires a great deal of time and cost. Many of domestic and international empirical formula are introduced through the case study in order to resolve this issue. However, it is struggling to estimate proper deformation modulus for intensity of bedrock and deformation characteristics. Therefore, relationship on the estimation of deformation modulus at basalt area in Jeju is analyzed by utilizing experimental value at the site and RMR classification value.

Comparing to relationship of 5 other different types of rock referencing advanced research, it is observed that basalt has an equal relationship with gneiss, lower than granite gneiss and andesite while it has higher relationship than granite and tuff.

By analyzing characteristic values of basalt rock and RMR classification, prediction equation has been calculated. However, relationship was barely found and application seems to be inappropriate. Additional research is needed by undertaking extensive analysis which reflects characteristics of the rock.

I. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

암반의 변형계수는 암반 내 터널의 안정성 및 지보시스템 설계와 토목 및 건축공사에 따른 암반구조물에 대한 지반안정 해석 시 중요한 요소로 작용한다. 제주도의 경우 근래 들어 대규모 토목 및 건축공사가 활발히 진행되면서 현무암에 대한 변형계수의 적절한 평가가 매우 중요하게 여겨지고 있으나, 제주도를 형성하고 있는 현무암에 대한 지반공학적 측면에서의 평가는 많이 부족한 실정이다.

변형계수는 현재 보편적으로 현장시험을 통하여 자료를 얻기 때문에 시간과 비용이 많이 소요된다. 이러한 문제점들을 보완하고자 현장암반의 변형계수를 추정하기 위하여 암석의 강도 및 변형특성을 고려해 RMR 분류법으로부터 구한 암반의 평점을 이용한 제안식이 등장하게 된다.

기준에 해외에서 제안된 식으로는 Bieniawski(1978)가 사례분석을 통해 처음으로 경험식을 제안하였으며, 이를 보완한 Serafim & Pereira(1983)의 식, 그리고 가장 근래에 발표된 식으로는 Aydan(1997)의 식과 Mohammad(1997)의 식이 있다. 또한 이 외에도 RMR 및 실내시험결과와 탄성률을 이용한 Nicholson & Bieniawski(1990)의 식과 Mitral at al(1994)의 식, GSI(Geological Strength Index)를 이용한 Hook & Brown(1997)의 식 등이 있다.

국내에서 제안된 식으로는 암반조사를 통하여 국내에 변형특성을 고려한 Kim(1993)의 식과 다수의 변형계수와 암반의 풍화등급에 상관관계를 이용한 Jang & Kim(2003)의 식 등이 있다.

최근 국내에서는 해외에서 제안된 식들을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 국내 암반에 적용 시 변형특성을 적절하게 반영하지 못하고 있는 실정이

다. 이는 대부분 국외에서 측정된 암반에서의 결과를 토대로 제안된 식들임에 따라 적용하는데 있어서 국내 암반의 불연속면의 특성 등을 제대로 반영하고 있지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 국내에서도 변형계수와 상관성 분석을 통한 경험식이 제안되고 있는데, 현재 제주도 현무암의 변형계수 추정에 관한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 현무암에 대한 RMR 분류를 통하여 기존 제안식과의 상관성을 분석하고, 공내재하시험에서 얻은 변형계수 실측값을 이용하여 주요 암반의 특성치 및 RMR과 변형계수의 실측값을 회귀분석을 통하여 상관관계를 분석함으로써 현지지반에 변형계수 추정식을 산출하기 위함이다.

1.2 연구내용 및 방법

제주도내 현장에서 계측된 변형계수 데이터와 RMR 암반분류를 통해 기존의 제안식을 이용하여 예측한 암반의 변형계수와 상관성을 파악하고, 현무암에 대한 변형계수 추정식을 산출하기 위한 연구를 진행하였다.

첫째, 현장 내에서 시추조사를 진행하면서 수행된 원위치시험으로 공내재하시험을 수행하여 실측된 암반의 변형계수와 암석코아 샘플을 이용한 일축압축강도 시험데이터를 수집하였으며, 지역별로 분포되는 값의 범위를 파악하였다.

둘째, 시추를 통해 얻어진 시료상자의 암석코아시료 중 공내재하시험을 실시한 심도를 기준으로 그 암반의 특성을 고려하여 약 1m 전·후 코아를 RMR법에 의해 분류를 진행하였다.

셋째, RMR 분류점수를 이용한 기존제안식의 추정값과 실측된 변형계수의 상관성에 관한 비교분석을 실시하였다.

넷째, RMR의 주요 특성치인 일축압축강도, 암질지수(RQD), 절리간격과 실측

된 변형계수와 의 상관관계를 파악하였다.

다섯째, 현무암에서 평가된 RMR 결과를 활용하여 변형계수와 의 상관관계를 파악하고, 그에 따른 회귀분석식을 산출하였으며, 선행연구된 다른 지역에 분포되는 다른 암종들에 대한 RMR 분류요소의 평점 및 변형계수 데이터를 활용하여 상관성을 비교분석하였다.

1.3 연구동향

변형계수를 포함한 모든 물성치는 현장에서 직접 측정을 하여 결과를 얻는게 가장 신뢰도가 높은 방법이지만, 비용적인 측면과 측정하는 방식에 따른 오차 등은 감안하여야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 수많은 현장사례 연구를 통하여 해외에서 RMR 분류를 이용한 제안식이 나오기 시작하였으며, 이를 국내 암반에 반영할 시 과대한 값이 측정됨에 따라 국내에 적합한 변형계수 산정을 위한 경험식들에 대한 연구가 진행 중인 실정이다.

Kim(1993)은 불연속적 특성구분에 의한 지반평가의 모순성을 배제하기 위하여 RMR 분류안에 제시되는 평점의 지반 특성치와 중앙값을 대응시켜 회귀분석을 하여 각 RMR 분류인자의 특성치에 따른 평점을 일정한 수식으로 표현한 수정안을 제시하였으며, 지수함수를 통한 변형계수 산정식을 제안하였다.

Ro et al.(2003)은 연암 이상의 변형계수를 파악하기 위하여 서울·경기, 경상도, 전라도 등의 지역을 대상으로 실시한 105개의 시험자료를 토대로 각 암종별 특성을 파악하여 RMR을 이용한 구성광물의 풍화정도에 따른 추정식을 도출하였다.

Jang and Kim(2003)은 지난 10년간 국내의 152개 현장에서 측정된 2354개의 변형계수를 활용하여 풍화등급과 RMR 분류값을 비교하였으며, 풍화등급에 의한 변형계수 분포와 RMR을 이용한 변형계수를 추정하는 새로운 식을 제안하

였다.

Oh and Ahn(2011)은 안산암, 응회암지역을 대상으로 공내재하시험과 일축 및 삼축압축시험을 수행하고, 암반 강도정수 점착력과 내부마찰각에 대한 추정식을 산출하였으며, 기존에 Bieniawski가 제안한 감쇠계수를 적용한 식을 제안하였다.

Sun et al.(2011)은 국내 화강암을 대상으로 조사된 RQD, RMR과 Q 시스템의 암반분류법간의 상관관계에 대하여 분석을 실시하였으며, 기존의 암반분류법간의 상관관계를 보다 간편화하여 상관관계식을 유도하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 암반의 특성

2.1.1 개요

구조물을 역학적으로 검토할 경우 구조물을 구성하는 재료의 역학적인 특성을 알아야 한다. 암반으로 구성된 재료의 구조물을 검토하는 경우에는 그 특성들을 잘 파악해야 한다. 하지만 암반은 다른 구조의 재료와 비교하면 특수성을 가지고 있기 때문에 매우 복잡한 형상을 나타내고 있다(KGS, 2000).

암반의 특성을 파악하는 것은 매우 어려운 일이며, 일부 시험을 수행하였고 해도 자료에 대한 불확실성이 존재하며, 전체적인 암반의 규모를 대표하는 값으로 단정할 수는 없다.

2.1.2 암반의 강도특성

암반이 강도는 암석의 종류별, 물리적 및 화학적인 특성에 따라서 달라지게 되는데 암반의 파괴는 불연속면의 성장, 병합에 의해 발생되기 쉬우며, 이것은 불연속면의 선단 부근에서 응력이 집중적으로 발생되기 쉽기 때문이다. 암반의 강도는 암석 강도 및 불연속면의 특성에 지배되며, 암반의 전단강도는 내부마찰력과 점착력으로 나타낼 수 있다.

암반의 압축강도를 적절하게 평가하기 위해서는 두가지 요소가 고려되어야 하는데, 첫 번째 요소는 불연속면 사이의 무결암(Intact rock)의 압축강도에 대한 크기 효과이다. 두 번째 요소는 압축강도에 대한 불연속면의 영향이며, 암반의 압축강도에 대한 절리의 영향에 대해 많은 조사자들이 모델을 이용한 연구가 진행되었다. 일축압축강도에 대한 수평, 수직, 대각선의 절리의 영향에 관한 모델연구를 하였을 때, 일축압축강도의 감소는 절리수가 6개를 초과할 때 줄어드는 경향을 보였으며, 수평절리와 수직절리에 의한 압축강도의 감소는 약

30% 정도이다(KGS, 2000).

2.1.3 암반의 변형특성

암반의 변형특성은 터널굴착에 따른 원지반 거동을 추정할 경우 가장 기본적으로 검토되는 특성이다. 내공변위 및 지표침하량의 계산에서는 변형계수를 정확히 구분할 필요가 있으며, 원위치에서의 변형계수 측정은 암반에 하중을 재하하여 변형량을 측정하여 실시한다. 재하방법에 따른 평판재하시험, 시추를 통한 공내시험법 등 여러 방법들이 있는데, 현재 보편적으로 공내재하시험이 가장 많이 이용되고 있다(KGS, 2000).

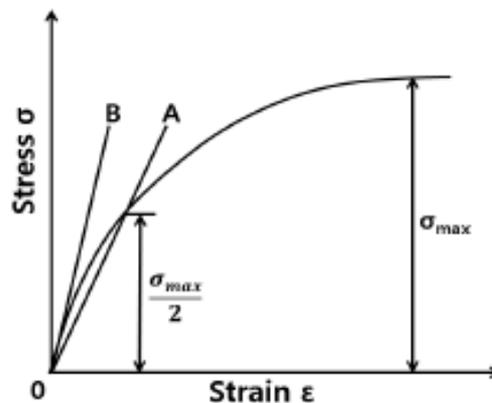


Fig. 2.1 Initial Elastic Modulus and Deformation Modulus(Do at al, 2006)

흙과 암반의 응력-변형률 곡선의 기울기를 변형계수라고 하며, Fig. 2.1은 응력-변형률 곡선을 나타내고 있는데, 직선 OB의 기울기를 초기탄성계수(E_i)라고 하고, 직선 OA는 변형계수이다. 이 변형계수는 응력의 최대치가 1/2이 되는 지점과 원점을 연결하는 기울기이다. 이것은 흙의 탄성체가 아니므로 탄성계수 보다는 변형계수로 E_{50} 또는 E_s 로 표현한다. Wu(1996)의 변형계수 E_s 는 삼축 시험에 의한 응력-변형률 곡선에서 1% 축변형에 대응하는 점과 원점을 잇는 직선의 기울기로 정의하고 있다. 암반의 변형(탄성)계수는 침하량 또는 변형률 계산, 안정성 검토, 내진설계 등의 기초자료로 활용된다(Do at al, 2006).

압반의 변형계수는 불연속면에 대하여 크게 영향을 받지만 시험규모에 따라 그 영향을 충분히 반영하지 못하는 경우도 있다. 원위치시험에 의한 결과일지라도 시험결과가 실제로 반영될 때에는 시험법과 현장조건에 대해 신중하게 검토할 필요가 있다.

2.2 공학적 암반분류방법

2.2.1 암반분류법의 개요

암반분류법은 터널을 비롯한 구조물의 지하굴착과 관련한 설계 및 시공의 방식으로 중요하게 작용하고 있으며, 암반 공학에서 널리 사용되어지고 있다. 분류체계들 가운데 가장 널리 알려진 것은 1946년에 소개된 Terzaghi의 암반하중 분류법이다. 최초의 실용적인 분류체계인 Terzaghi(1946)의 암반하중 분류법은 미국에서 최근까지도 사용되어져 왔는데, 강지보재를 사용한 터널굴착이 효과가 매우 큰 것으로 증명되었다(Lee, 2007).

하지만 Terzaghi(1946)의 암반하중 분류법이 강지보재에 한정되어 있어 슛크리트나 록볼트에 의한 보강공법이 개발되면서 적용성이 떨어지게 되었다. 이후에 Deere(1963)는 현장 암반의 암질을 표현하기 위해 시추코어를 이용한 암질지수(RQD)를 정량적인 암질평가방법을 제안하였다. Bieniawski(1973)에 의해 RMR 분류법이 발표되었으며, 이후에 현장 사례들을 참조하여 1989년에 재수정된 RMR 분류법을 제안하고, 이 분류법으로 암반의 보강방법도 함께 제안하였다. 그리고 스칸디나비아 반도에서 212개 터널 굴착사례를 분석한 Barton et al.(1974)에 의해 암반의 특성을 평가하고 터널의 지보량을 산정하기 위한 Q-system이 제안되었으며, 1994년에 보완되었다(Kim, 2015).

RMR 분류와 Q-System 분류는 지보패턴의 설정을 위해 해외를 비롯한 국내에서 가장 대표적으로 사용되는 암반의 분류법으로 RMR 분류법은 암석강도, RQD 등 5가지 기본분류요소와 보정분류요소 1가지로 총 6가지의 요소의 합이 0~100점으로 RMR 평점을 산정하여 5등급으로 분류하며, Q-System 분류는 RQD, 절리특성 등 총 6가지의 변수를 이용해 등급을 산정하게 되는데, 둘 다 평가하는 기술자의 판단에 따라 값의 차이를 보일 수 있기 때문에 숙련된 기술을 요하게 된다.

2.2.2 암질지수(RQD) 분류방법

암질지수(Rock Quality Designation)는 Deere(1963)에 의해 암석코아에 대해 공학적으로 설명하는 방법을 제안하였으며, 1968년에 국제적으로 알려지면서 널리 사용하게 되었고, 이후 RMR과 Q-System에서 분류요소에 암질지수를 포함하였다.

암질지수인 RQD를 정량적으로 평가하기 위해 Fig 2.2와 같이 제안하였으며, 시추를 통해 얻어진 코아를 관찰하여 RQD를 산정하는 방법은 Table 2.1과 같다.

$$RQD = \frac{\sum \frac{LENGTH\ OF\ SOUND\ CORE}{PECES} > 4\ INCHES\ (100mm)}{L_r} \times 100\ (%) \quad (2.1)$$

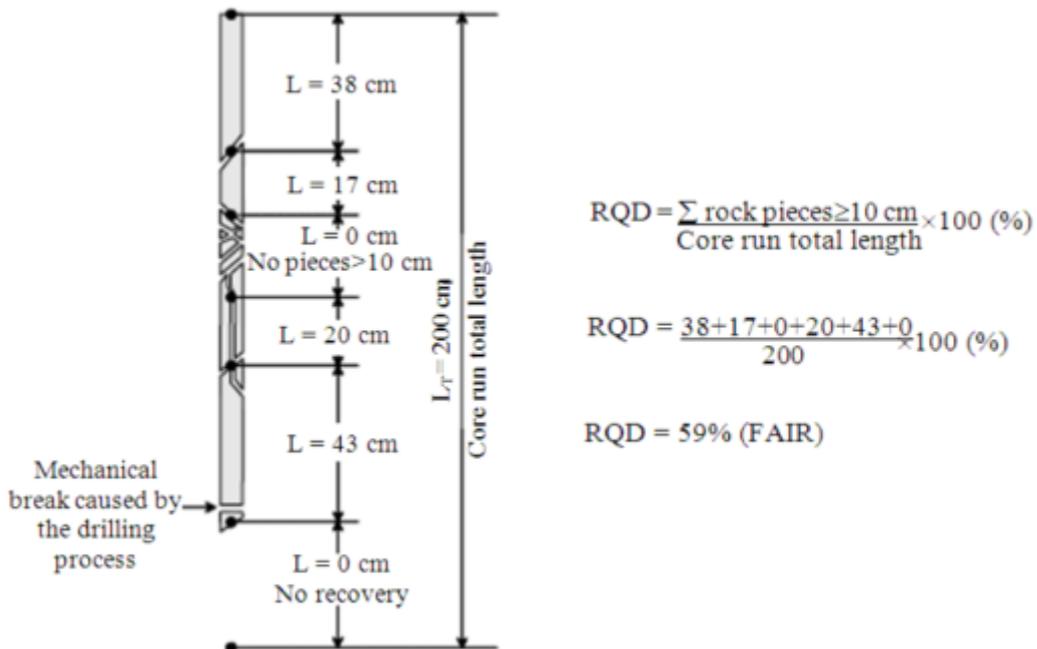


Fig. 2.2 Procedure for Measurement and Calculation of Rock Quality Designation (RQD) (Deere and Deere, 1988)

최초 NX 크기의 시추코아 직경이 54.7mm 이상인 이중관으로 된 더블코아바렐에서 얻을 수 있는 크기의 코아를 사용해야 한다고 규정하였으며, 최근에는 코아의 회수율과 작업효율을 높이기 위해 삼중관으로 된 트리플코아바렐(직경 54.0mm)로 된 제품을 많이 사용하는 추세이다.

Table 2.1은 Deere(1963)에 의해 암질분류기준에 따라 RQD 범위를 산정한 것으로 암질상태가 매우 양호한 경우 90~100%, 양호 75~90%, 보통 50~75%, 불량 25~50%, 매우 불량은 25% 이하로 정하고 있다.

Table 2.1 Classification of Rock Quality Using R.Q.D (Deere, 1963)

Description of Rock Quality	R.Q.D (%) (Rock Quality Designation)
Excellent	90-100
Good	75-90
Fair	50-75
Poor	25-50
Very Poor	0-25

Palmstorm(1982)은 시추작업이 불가능 한 현장여건일 경우에 시추코아를 이용한 RQD를 산정이 불가하므로 다음과 같이 제안하여 간접적으로 RQD를 추정할 수 있는 식을 제안하였다.

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (2.2)$$

J_v : 단위 체적당 절리의 수

$J_v < 4.5$ 일 때, $RQD = 100(\%)$

암질지수를 나타내는 RQD의 경우 최소값일 때 0%과 최대값에서는 100%을 주고 있는데 그 사이에 영역에서는 암질을 평가할 수 있는 변별력이 없다는 한계점을 가지고 있다(Kim, 2015).

2.2.3 RMR 분류방법

RMR(Rock Mass Rating) 분류법은 남아프리카공화국 출신인 펜실베니아 대학의 Bieniawski 교수에 의해 1972~1973년에 제안되었으며, 초기에 RMR분류법은 터널 및 광산용으로 개발되었는데, 여러 분야에 접목시키면서 적용범위가 넓어지며, 그 대표적 범위로는 댐의 기초, 석탄광, 사면의 안정 등이다(KGS, 2000).

RMR 분류법은 터널에서 지보가 없는 상태에서의 유지시간 및 구간 등을 예측할 수 있으며, 많은 적용사례를 통하여 암반의 물리적인 성질과 불연속면의 방향성을 고려할 수 있다는 점을 장점으로 들 수 있다(Kim, 2015). 하지만 지보량 결정에 있어서는 불연속면 군이 3개 이하일 경우 불연속면의 간격이 보수적으로 평가되기 때문에 상당히 제한적으로 적용될 수 있다.(Sun at al, 2011; Kim, 2015)

RMR 분류는 기존에 발표된 내용을 수정 및 보완하게 되면서 1989년에 공학용 암반분류방법으로 발표되었다. 이 RMR분류는 현장에서 시추작업을 통하여 얻은 자료를 가지고 무결암의 일축압축강도, 암질지수(R.Q.D), 절리간격, 절리면의 상태, 지하수 등 5가지의 항목에 관한 기본분류변수와 터널, 기초, 사면과 같은 구조물의 절리의 방향성을 보정분류변수로 하여 총 6가지에 항목에 대하여 각각의 인자들을 판단하고 평점을 부여한다.

RMR 분류기준(Bieniawski, 1989) 중 기본분류변수 5가지의 변수에 따른 평점은 Table. 2.2(a)와 같으며, 각각의 인자들에 대한 평점합이 최대 100점으로 하여 항목별로 일축압축강도는 0~15점, 암질지수(R.Q.D)는 3~20점, 절리간격은 5~30점, 지하수상태는 0~15점으로 점수를 부여한다. Table. 2.2(c)는 절리에 대한 방향성인 주향과 경사의 평점보정 방법으로 터널은 -12~0점, 기초는 -25~0점, 사면은 -60~0점으로 사면에 대한 평점보정이 가장 크다.

Table 2.2 Rock Mass Rating System(Bieniawski, 1989; Abbas & Konietzky, 2015)

(a). Five Basic Rock Mass Class Classification Parameters and Their Ratings (R1~R5)

Parameter(R1-R5)		Range of values							
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	For this low range-uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
		Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality R.Q.D		90% ~ 100%	75% ~ 90%	50% ~ 75%	25% ~ 50%	< 25%		
	Rating		20	15	10	8	3		
3	Joint Spacing		> 2.0 m	0.6-2.0 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of Joints		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	slightly rough surfaces Separation < 1mm Slightly weathered walls	slightly rough surfaces Separation < 1mm Highly weathered walls	slickensided surfaces or Gouge < 5mm thick or Separation 1-5mm Continuous	Soft gouge > 5mm thick or Separation > 5mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10m tunnel length (t/m)	None	< 10	10-25	25-125	> 125		
		(Joint water press/ (Major principal σ))	0	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		

(b). Effects of Joint Orientation in Tunneling (R6)

Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis		Dip 0° -20°
Drive with		Drive against dip		Dip 45° -90°	Dip 20° -45°	
Dip 45° -90°	Dip 20° -45°	Dip 45° -90°	Dip 20° -45°			Dip 45° -90°
Very favorable	favorable	fair	unfavorable	Very unfavorable	fair	

(c). Rating Adjustment for Joint Orientations (R6)

Strike and dip orientation of joints		Very favorable	favorable	fair	Unfavorable	Very Unfavorable
Ratings	Tunnels	0	-2	-5	-10	-12
	Fondations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60

(d). Guidelines for Classification of Discontinuity Conditions

Parameter	Range of values				
Discontinuity length (persistence)	< 1m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
	6	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	< 0.1 m	0.1-1.0mm	1-5 mm	> 5 mm
	6	5	4	1	0
Roughness	Vert rough	Rough	slightly rough	smooth	slickensided
	6	5	3	1	0
Infilling (gouge)	Hard filling			Soft filling	
	None	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed
	6	5	3	1	0

(e). Rock Mass Classes Determined from Total Ratings

Rating class no. Description	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
	I	II	III	IV	V
	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock

(f). Rating Adjustment for Joint Orientations

Class no.	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	20 years for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hours for 2.5 m span	30 minutes for 1 m span
Cohesion of rock mass(KPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Friction angle of rock mass (de-grees)	> 45	35-45	25-35	15-25	< 15

불연속면의 방향성에 대한 요소는 개발 초기에 정량적인 값이 아닌 정성적인 값들로 구성됨에 따라 터널의 경우 Table 2.2(b)와 같이 정량적인 평점으로 환산하는 방법을 제시하였다. 터널, 기초, 사면에 해당되는 불연속면의 방향성에 대한 요소는 Table 2.2(c)와 같다.

Table 2.2(e)는 RMR 평점점수의 간격에 따라 I ~ V 등급으로 암반등급을 산정한 것이며, 매우 양호한 암반의 경우 100~81점, 매우 불량한 암반일 경우는 20점 이하인 경우에 적용한다. 또한 Table 2.2(f)는 암반등급에 따른 평균 자립시간을 표현하고, 암반의 점착력과 암반의 내부마찰각을 범위로 제시하고 있다.

각 요소들의 측정치가 각 등급별로 경계선에 있을 때나 각 범주사이에 배점의 변화 폭이 너무 커서 이를 완화시키기 위하여 각 요소인자의 연속적인 값을 정하기 위해서는 Table 2.2(d)와 Fig. 2.3~2.5을 이용하여 점수를 산정한다.

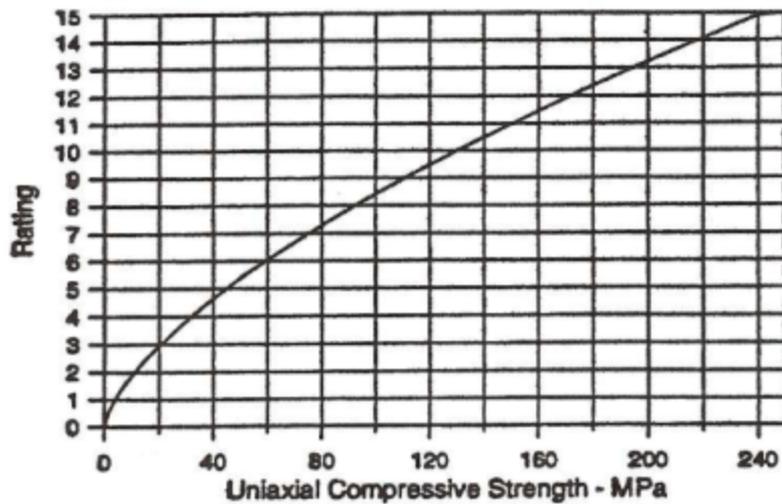


Fig. 2.3 Ratings for Strength of Intact Rock (Bieniawski, 1989)

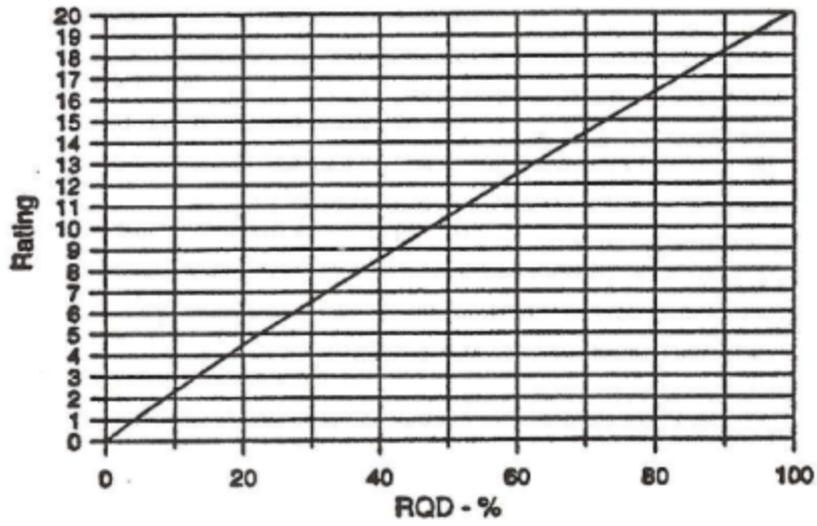


Fig. 2.4 Ratings of RQD (Bieniawski, 1989)

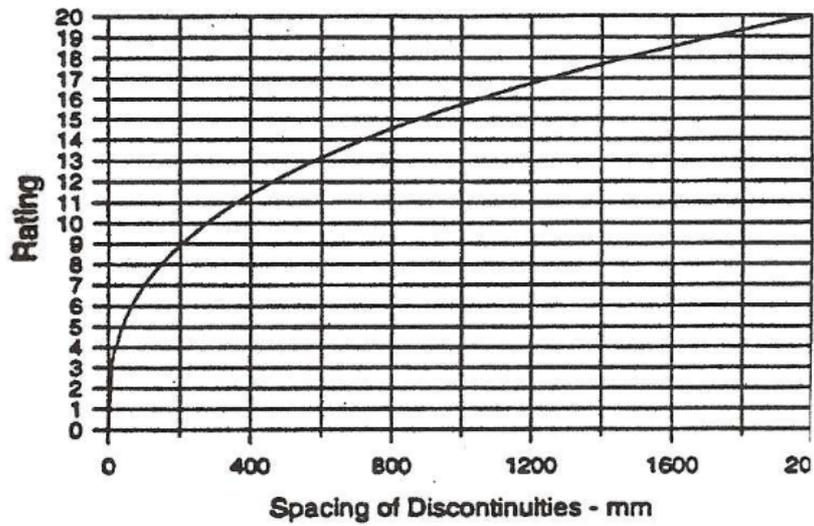


Fig. 2.5 Ratings for Discontinuity Spacing (Bieniawski, 1989)

2.2.4 Q-System 분류방법

Q-System(Rock Mass Quality System)은 터널에서 암반의 지보재 필요성을 평가하기 위한 방법으로 암반분류를 하기 위해서 노르웨이 지반공학 연구소인 NGI의 Batou, Lien 그리고 1974년에 Lunde가 발표하여 개발되었으며, 현재에도 암반분류법 중 중요하게 쓰여지고 있으며, 터널과 지하공동에 대한 크기와 연계된 내용으로 1,000개 이상의 사례를 기반으로 하고 있다(Kim, 2014).

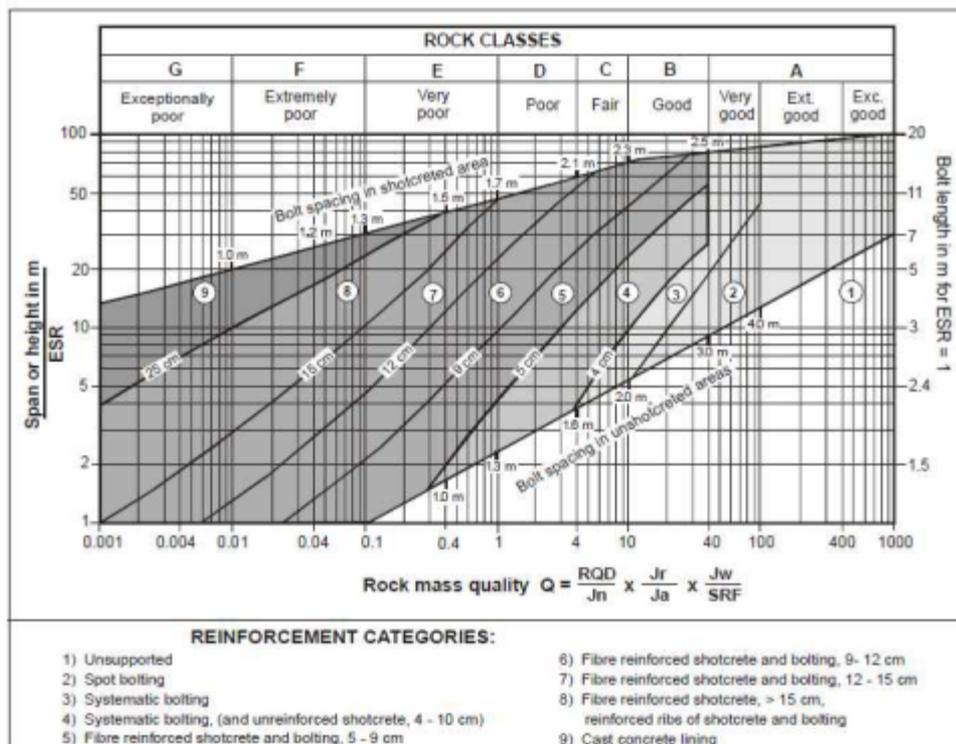


Fig. 2.6 The Q Support Chart(Grimstad and Barton, 1993; Kim, 2014)

Q-System의 특징으로는 정량적인 분류체계로써 암반의 전단강도에 주안점을 둔 암반분류이며, 현장의 응력을 고려하지만 RMR 분류와는 다르게 불연속면의 방향성은 검토가 복잡하여 분류평가의 간략성을 잃어버릴 수 있기 때문에 분류요소로서는 고려하지 않는다. 세밀한 암반분류에 의해 구체적이고 체계적인 보강방안이 제시된다는 장점이 있으며, 단점으로는 설계 시 노출된 암반이 양호한 경우나 굴착되는 현장에서의 막장관찰을 통하여 항목들을 비교적 정확하게 조사할 수 있다는 점을 들 수 있고, 일반적으로 시추조사된 코아만으

로는 6가지 분류요소에 대하여 신뢰성 있는 판단을 하기 어렵다는 단점이 있다(KGS, 2000).

암반을 정량적으로 평가하는 Q-System에 대한 6개의 분류요소는 아래의 항목과 같다.

- ① RQD
- ② 절리군(joint set)의 수
- ③ 가장 상태가 불량한 절리나 불연속면의 거칠기
- ④ 취약한 절리면의 충전물 또는 변질정도
- ⑤ 지하수의 유입 상태
- ⑥ 응력조건

이 조건들을 3개의 항으로 나누어 이들의 곱으로 표현한 전체 암반등급 Q값에 대한 식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2.3)$$

여기서,

RQD ; 암질지수(전체 시추코아 중 10cm 이상의 코아 백분율)

J_n ; 절리군의 수

J_r ; 절리면 거칠기계수

J_a ; 절리의 풍화 및 변질계수

J_w ; 절리 내 지하수에 의한 저감계수

SRF ; 응력저감계수

암반의 특성 Q는 세가지 변수인 암반의 기하학적인 상태(RQD/ J_n), 절리간의 전단강도(RQD/ J_n), 환경적 요소인 작용응력(J_w /SRF)로 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다(KGS, 2000).

$$Q = (\text{암반의 기하학적 상태}) \times (\text{절리의 전단강도}) \times (\text{환경적 요소}) \quad (2.4)$$

Q-System은 6개의 분류요소를 이용하여 정량적인 해석을 통해 계산되는 Q 값의 범위는 0.001~1000으로 RMR 분류보다는 제한적으로 사용되는 경향이 있는 것으로 파악된다. 설계단계에서는 지질 및 지질과 관련된 공학적인 특성을 완벽하게 파악해 굴착에 따른 장비와 굴착방법, 지보방법을 상세히 기술하여 사전에 예측을 하기 때문에 NATM 공법과 같은 사전예측 지보방법으로 계측을 통한 최종 지보 시기와 지보량을 결정하는 방법과는 근본적으로 다르다(Kim, 2014).

앞서 말한 바와 같이 많은 경험과 지식을 갖춘 숙련자일수록 오차범위가 작을 것으로 보이며, 세부적으로 평가가 가능한 장점을 이용한 대단면인 터널 및 유동성과 팽창성을 고려하는 암반조건에 적용하는 것은 양호하다(Yu, 2009).

Table 2.3 Rock Classification Class by Q Value(ISRM, 1981; KGS, 2000)

Q Value	Grade	Condition of Rock Quality	
400 ~ 1000	1	Exceptionally Good	예외적으로 양호
100 ~ 400	2	Extremely Good	극히 양호
40 ~ 100	3	Very Good	매우 양호
10 ~ 40	4	Good	양호
4 ~ 10	5	Fair	보통
1 ~ 4	6	Poor	불량
0.1 ~ 1	7	Very Poor	매우 불량
0.1 ~ 0.01	8	Extremely	극히 불량
0.01 ~ 0.001	9	Exceptionally Poor	예외적으로 불량

2.2.5 RMR 분류방법의 문제점과 적용방안

초기에 제안된 RMR 분류방법은 정성적으로 평점을 부여하기 때문에 주관적인 기준에 개입 가능성과 각 분류요소들의 점수 배점에 대한 객관성 및 근거의 부족, 각각의 분류인자의 특성치를 일정범위로 구분하여 평점을 부여함으로써 인하여 그 범위에 속하는 최대값과 최소값 간의 차이를 합리적으로 반영하지 못하는 등의 문제점을 가지고 있다(Kim, 1993; Lee, 2007).

RMR 분류법은 또한 각 요소들에 대한 평점을 부여할 때 경계에 해당되는 점수는 제안자의 경험에 절대적으로 의존하기 때문에 분류를 실시하는 엔지니어의 경험에 따른 숙련도에 의해 전혀 다른 결과를 초래할 수 있으며, 설계단계에서 커다란 오류를 범할 수 있는 가능성이 있으므로 RMR 시스템에 대한 근본적인 재평가가 필요한 실정이다. 또한 직접적인 시험과 조사를 통한 결과인 무결암의 강도와 암질지수인 RQD는 총점 100점 가운데 35점에 불과한 반면, 터널이 실시설계 단계에서 개략적으로 추측할 수 밖에 없는 불연속면의 간격 및 상태, 지하수 상태 등은 65점으로 등급을 결정하는데 막대한 영향을 미친다(Kim, 2001).

RMR 분류법에서 분류요소 중 ISRM(1981)에서는 기술자의 개인오차를 최소화하고 암반의 정량적인 평가를 위해 불연속면의 방향성 및 연속성, 간격, 거칠기 등 10가지의 조사 항목을 선정하고 각 항목의 기준을 제시하였는데, 불연속면의 기재 방법과 각 기재항목에 대한 등급만 제시하였을 뿐 기재한 결과인 등급에 따른 불연속면의 공학적 특성을 정량화하는 방안에 대하여서는 언급이 없기 때문에 조사된 결과를 설계자가 이용하는 데에 한계가 있다(Kim, 2001).

RMR 분류에서 지하수 상태(R5)와 방향성(R6)에 대한 점수를 정량적으로 배점하기가 곤란하며, Kim(1993)은 변형계수는 R5와 R6과는 무관한 특성이라고 연구를 통해 밝힌 바 있다. 지하수 Bieniawski(1989)의 지하수 배점 중 일반적인 상태에서 수위가 없으므로 완전 건조한 상태로 15점인 최대점을 줄 수 있지만,

제주도는 기후 특성상 울릉도 다음으로 비가 많이 오는 지역이며, 표면의 90% 이상이 투수성이 강한 다공질의 현무암으로 지반이 형성되고 있다. 또한 현장시험지역은 전반적으로 저지대(EL.+0~200m)와 중산간지대(EL.+200~600m)에 속하고 있는데, 대부분 시험이 진행된 지역은 일부 해안가 지역에서의 해수위를 제외하면 지하수위가 조사심도 내에 분포되지 않음에 따라 RMR 분류요소 중 지하수 상태(R5)에 대하여 점수를 산정하는데 문제가 있다. Kim(2001)이 ISRM에서 침투수에 대하여 등급으로 구분한 것을 연구를 통해 정량적 수치화 시킨 결과를 참고하였다.

Table. 2.4에 나타낸 바와 같이 불연속면의 비충전과 충전 불연속면으로 구분되며, 각각 III 등급인 건조하지만 물이 흐른 증거가 있는 조건과, II 등급의 충전물이 습하나 자유수가 없는 조건에 해당되는 점수인 10점을 본 연구에서 RMR 산정시 일괄적으로 적용하였다.

Table 2.4 Seepage Water of Discontinuity (Kim, 2001)

구분	Grade	Description	RMR
Non-filling discontinuity	I	The discontinuity is very tight and dry, water flow along it does not appear possible	15
	II	The discontinuity is dry with no evidence of water flow	15
	III	The discontinuity is dry but shows evidence of water flow, i.e rust staining, etc	10
	IV	The discontinuity is damp but no free water is present	7
	V	The discontinuity show seepage, occasional drops of water but no continuous flow	4
	VI	The discontinuity shows a continuous flow of water	0
Charge discontinuity	I	The filling material is heavily consolidated and dry, significant flaw appears unlikely due to very low permeability	15
	II	The filling materials are damp but no free water is present	10
	III	The filling materials are wet, occasional drops of water	7
	IV	The filling materials show signs of ouwwash, continuous flow of water	4
	V	The filling materials are washed out locally, considerable water flow along outwash channels	0
	VI	The filling materials are washed out completely, very high water pressures are experienced, especially on first exposure	0

또한, 불연속면의 방향성(R6)에 대한 보정은 제주도의 경우 터널을 제외한 기초와 사면에 해당될 수 있는데, 제주도는 화산섬으로 여러 회의 분출을 거침에 따라 지반의 변화가 타 지역에 비해 심하여 불연속적인 방향성에 대한 분석이 힘들고, 기술자의 판단에 따라 RMR 점수가 과소평가될 수 있을 것으로 보임에 따라 객관성을 높이기 위해 본 연구에서는 일괄적으로 0점을 적용하였다.

2.3 공내재하시험(KGS, 2000)

2.3.1 시험개요

원지반의 시추공을 이용하여 적용할 수 있는 재하시험방법은 공내에 시험깊이까지 Probe를 삽입하여 기중에 따라 연암부터 경암까지 넓은 범위에서 지반에 적용할 수 있지만 최대하중이나 압력 측정의 정밀도, 최대 측정이 가능한 변위나 변위 측정의 정밀도 등을 고려하여 적절한 기중이나 형식에 맞는 것을 선택할 필요가 있다.

공내재하시험은 원위치에서 시험을 실시함에 따라 교란되지 않은 암석의 변형계수를 구하기 위함이며, 시추공을 이용하여 공벽에 압력을 가해 이로 인해 발생하는 공벽의 변형량을 측정하여 지반의 성질, 강도 및 변형특성을 조사한다. 일반적으로 지반 변형계수를 구하는 목적으로 실시하지만, 지반의 탄성계수나 항복치를 얻고 이완영역을 파악하기 위해 실시하는 경우도 있다.

2.3.2 시험방법

공내재하시험에는 등분포재하법과 등변위재하법으로 구분되며, 이와 관련된 설명은 다음과 같다.

가. 등분포재하법

시추공 내에 고무튜브인 Probe를 삽입하여 수압, 유압, 가스압 등에 의해 고무관을 팽창시켜 시추공 벽면에 재하시키는 등분포하중을 주는 방식이며, 이 방식의 특징으로는 시추공 공벽에 대하여 동등한 하중이 가해지기 때문에 응력분포가 축대칭이 되고 이론적인 취급에 용이한 것이다. 그러나, 불균질한 지반이나 이방성지반의 경우에 얻어지는 변형계수 등은 시험한 지점의 공벽 전 둘레의 평균값이 된다. 등분포재하법에 의한 기중으로는 Pressuremeter와 Elastomter 등이 널리 알려져 있다.

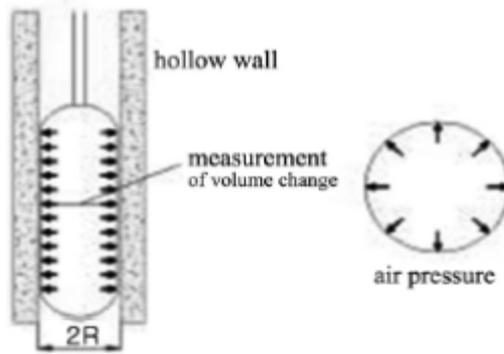


Fig. 2.7 Borehole Load Test By dilatometer (KGS, 2000; Do et al, 2006)

나. 등변위재하법

직사각형의 강제 재하판을 장착한 Probe를 시추공 내에 삽입하고 유압잭으로 재하판에 의해 공벽에 하중을 작용시키는 방법이다. 이 방법은 시험 시 지반 내 응력분포가 복잡하지만 등분포재하법과 비교해서 큰 하중을 작용시킬 수 있는 장점이 있다. 단, 불균질한 지반이나 이방성지반의 경우에는 재하방향에 따라 시험값이 다르게 나타날 수 있기 때문에 재하방향을 정확히 할 필요가 있다. 등변위재하법에 의한 기중으로는 Goodman Jack 등이 있다.

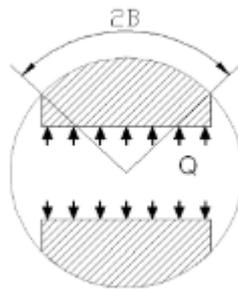


Fig. 2.8 Borehole Load Test By Borehole jack (KGS, 2000; Do et al, 2006)

2.3.3 해석방법

Fig. 2.9는 공내재하시험을 수행하여 얻은 결과를 압력-공경변화량의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

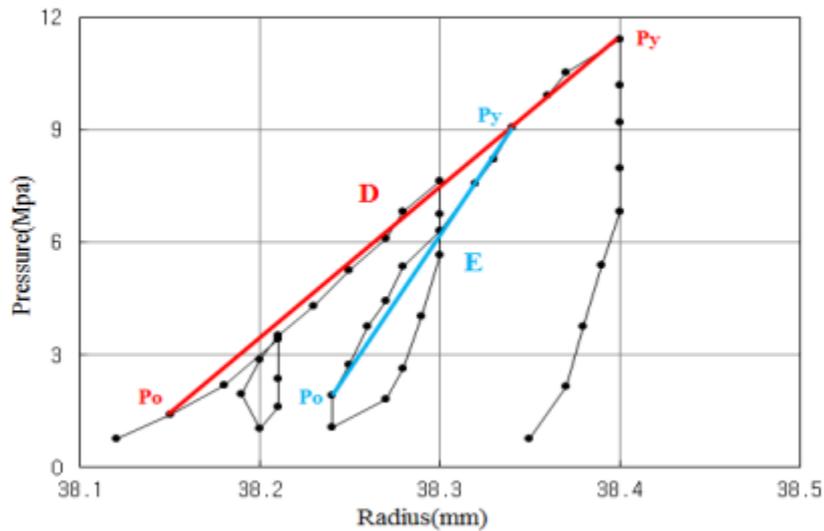


Fig. 2.9 Pressure-Borehole radius Relationship Curve by Pressure Meter Test

가. Dilatometer

등분포재하법인 Dilatometer를 이용한 공내재하시험으로 압력-공경변화량 관계곡선이 얻어졌을 때, 이로부터 탄성계수(E) 또는 변형계수(D)는 다음식으로부터 계산된다.

$$E, D = (1+\nu) \times R_m \times K = (1+\nu) \times \frac{R_1 + R_2}{2} \times \frac{\Delta P}{\Delta R} \quad (2.5)$$

여기서 ΔP ; 각 재하단계별 직선구간의 압력증분

ΔR ; 공경변화량

R_1, R_2 ; 가압전후의 시험공 반경

ν ; 포아송비

이 방식은 시험공 공벽에 대하여 동등한 하중이 가해지기 때문에 응력분포가 축대칭이 되고, 이론적인 취급이 용이하지만 불균질 암반이나 이방성 암반의 경우에는 얻어지는 변형계수가 시험지점의 공벽 전 둘레의 평균값이 된다.

나. Borehole jack

등변위재하법인 Borehole jack을 이용한 공내재하시험으로부터 얻어진 압력-공경량 관계곡선으로부터 탄성계수(E) 및 변형계수(D)의 계산식은 다음과 같다.

$$E, D = 0.86 \times K(\nu) \times d \times \frac{\Delta Q}{\Delta U_d} \quad (2.6)$$

여기서 ΔQ ; 강판에 가해지는 압력증분

ΔU_d ; 공경변화량 증분

d ; 시추공 직경 $K(\nu)$; 암반의 포아송비에 따른 보정상수

Goodman jack의 경우 측정압력은 작동피스톤의 압력(QH)이며, 실제 강판에 가해지는 유효압력(Q)은 경암용 및 연암용 jack에 따라 다르다. 포아송비의 차이에 따른 변형계수의 값은 큰 변화가 없는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 암반의 포아송비는 0.25 내외이므로 Table 2.5과 같이 계산식에서 $K(\nu)$ 값으로 1.438을 사용하는 것이 일반적이다.

Table 2.5 $K(\nu)$ constant According to Poisson's ratio (ν) (KGS, 2000)

ν	0.1	0.2	0.25	0.3	0.33	0.4	0.5
$K(\nu)$	1.519	1.474	1.438	1.397	1.366	1.289	1.151

2.3.4 시험적용상의 문제점

Elastometer는 시험 시 변위를 특정하는 경우 변형량이 작은 경질암반에서는 물의 압축성이나 고무튜브의 두께 변화 등에 의해 보정이 필요하며, 불균질성이 현저한 암반에서는 검출부가 국부적인 변형특성을 나타내는 경우가 있기 때문에 충분한 주의를 요한다.

Goodman jack 시험은 한쪽방향으로 재하하기 때문에 공벽주변의 절리분포 방향에 의하여 구해진 변형계수의 값이 다르게 되므로 시험시에는 절리분포와 재하면 관계에 대하여 유의하여야 하며, 재하시 심도마다 재하판을 90°로 변화시켜가면서 시험하는 것이 바람직하다.

Elastometer와 Goodman jack 모두 연암에서 적용되어질 수 있으나, 국내에서는 Goodman jack의 경우 경암용으로만 많이 사용되고 있는데, 그 이유에 대하여는 불명확하다.

재하시험 시 대상지반의 특성에 따라 측정값에 대한 오차를 감안한 시험을 계획하여야 하며, 불균질한 암반일 경우에는 측정값이 분산되어 대표값을 산정하는 것이 곤란한 경우가 있는데, 일정 부분은 이상값을 확인하여 제거하는 것이 가능하지만 탄성과탐사와 같은 물리검층 등의 자료를 비교분석하여 적합한 변형계수 값을 산정할 필요성이 있다고 판단된다.

2.4 기존 변형계수 산정을 위한 제안식

암반의 변형계수는 절리 등 불연속면의 존재로 인하여 시추 시 채취된 코아 암석의 변형계수와는 다른 값을 가지며 현장시험을 통한 변형계수 측정의 어려움과 높은 비용으로 인하여 국내 암반 설계 시 가장 많이 이용되는 암반분류 기준의 하나인 RMR값을 이용하여 암반의 변형계수를 간접적으로 산정하는 경우가 많다(Jung, 2011).

암반분류를 근거로 한 암반의 변형계수 산정에 관한 많은 노력이 있어 왔는데, 1960년대 Deere는 처음으로 암질지수를 이용하여 암반 변형계수를 산출한 적이 있지만 근래에는 거의 사용하지 않는다. Mohammad(1997) 등은 최근 수년 동안 발표된 약 40여 편의 수치해석 결과들을 참고하여 각각의 논문들에서 수치해석용 입력변수가 어떻게 적용되는지를 살펴보기도 하였다(KGS, 2000).

2.4.1 국외 변형계수 제안식

1) Bieniawski(1978)의 제안식

Bieniawski(1978)는 수차례 사례분석을 통하여 변형계수를 산정하는 다음의 식을 제안하였다. 이 식은 RMR이 50보다 큰 경우 18.2%의 오차범위 내에서 허용되는 것으로 알려져 있으며, RMR이 50이하인 경우에는 달리 적용되어야 한다(KGS, 2000).

$$Em(GPa) = 2RMR - 100 \quad (\text{단, } RMR > 50) \quad (2.7)$$

2) Serafim & Pereira(1983)의 제안식

Serafim과 Pereira(1983)는 RMR이 50이하인 경우 많은 사례분석을 통해 상관계수를 제안하였으며, 비교적 양호한 암반에서는 일치하지만 불량한 암반일 경우 변형계수의 값이 너무 높게 나오는 경향이 있다(Oh and An, 2010).

$$E_m(GPa) = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)} \quad (\text{단, } RMR > 50) \quad (2.8)$$

3) Aydan(1997)과 Mohammad(1997)의 제안식

Aydan(1997)과 Mohammad(1997)는 각각 다른 현장의 사례분석을 통하여 아래와 같이 RMR과 변형계수간의 관계식을 제안하였다(Lee, 2007).

$$\text{Aydan(1997)} ; \quad E_m = 0.0097 \times RMR^{3.54} \times 10^{-3} \quad (GPa) \quad (2.9)$$

$$\text{Mohammad(1997)} ; \quad E_m = 0.562 \times RMR^{3.54} + 0.183 \quad (GPa) \quad (2.10)$$

4) Hoek-Brown(1997)의 제안식

Hoek-Brown(1997)은 Serafim & Pereira(1983)의 제안식이 비교적 양호한 암반에 대해서는 잘 맞지만 암반이 불량한 경우에는 너무 높게 나오는 경향이 있다는 점을 지적하며 수정된 경험식을 제안하였다(Yu, 2009).

$$E_m(GPa) = 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \times \sqrt{\frac{\sigma_c(Mpa)}{100}} \quad (2.11)$$

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

(단, $GSI > 25$, $\sigma_c < 100$ MPa)

2.4.2 국내 변형계수 제안식

1) Kim(1993)의 제안식

기존의 RMR분류식에서 총 RMR에서 지하수상태 및 정리방향 보정을 제외한 변형계수를 구하는 식을 제안하였다. 이 식은 국내 암반을 대상으로 조사한 결과를 바탕으로 만들어졌기 때문에, 다른 제안식에 비해 우리나라 암반 특성을 가장 잘 반영하고 있다(Lee, 2007).

$$E_m(GPa) = 30 \exp^{0.007 \times RMR^*} \times 10^{-3} \quad (2.12)$$

(RMR* = 지하수 및 절리방향 보정 제외)

2) Jang & Kim(2003)의 제안식

국내의 조사 현장에서 공내재하시험을 통하여 측정된 다수의 변형계수와 암반의 풍화등급 및 RMR 값을 이용한 상관관계를 연구하였으며, 변형계수를 추정하는 새로운 식을 아래와 같이 제안하였다.

$$E_m = 10^{\left(\frac{RMR-16}{50}\right)} (GPa) \quad (2.13)$$

2.4.3 상관성 분석을 위한 기존 제안식 적용

본 연구에서는 기존 연구에서 가장 많이 사용되는 RMR 지수를 이용한 변형계수 산정식들 중 최초의 제안식인 Bienawski(1978)의 식은 RMR이 50 이상일 때 적용하며, RMR이 50 이하일 때는 Serafim & Pereira(1983)의 식을 적용한다. 또한 Aydan(1997)과 Mohammad(1997)은 많은 현장사례 연구를 통해 제안된 식임을 감안하여 본 연구에서 적용하였고, 국내 암반에 대한 조사결과를 토대로 제안한 Kim(1993)의 식을 포함하여 총 다섯 가지의 식을 활용하였으며, 현무암의 RMR 점수를 통해 산정된 추정값과 현장에서 공내재하시험을 통하여 측정된 실측값의 상관성에 대하여 비교·분석하였다.

III. 현무암의 RMR 분류에 의한 결과분석

본 연구에서는 제주도내에 분포되는 현무암지반에서 각 지역별로 현장에서 수행되었던 Yang(2015)의 논문에 수록된 일부 자료를 포함한 총 41개의 공내 재하시험 자료의 변형계수 실측값과 기존의 제안되었던 대표적인 식들과의 상관성에 대하여 파악하였으며, 현무암의 특성치 및 RMR과의 상관관계를 회귀 분석을 통해 결정계수(R^2)에 따른 상관관계식을 산출하였다.

3.1 시험결과

3.1.1 일축압축강도시험

일축압축강도의 경우 암석의 시편재료에 축방향으로 압축력을 주게되면 변형이 발생하게 되며, 압축력을 증가시켜 암석의 시편이 파괴가 일어날 때의 하중을 측정하여 일축압축강도를 산정한다. 암석의 일축압축강도는 암반내부에 존재하고 있는 지하수를 비롯한 불연속면과 충전물 등의 영향을 고려하지 않은 값이며, 기초의 지지력을 평가하는 가장 기본적인 강도시험으로써 강도가 크면 기초의 지지력도 크다(Yang, 2015).

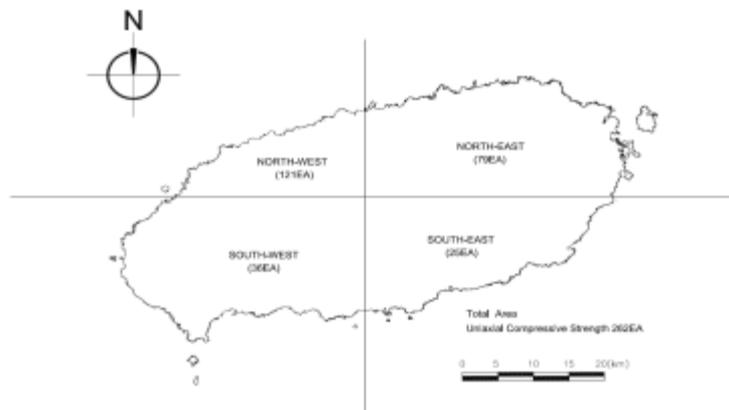


Fig. 3.1 Uniaxial Compressive Strength Test of Jeju's Basalt

Fig. 3.1은 제주도내 공내재하시험 현장을 포함한 제주도 전 지역에서 실시된 261개의 일축압축강도(Uniaxial Compressive Strength)에 대하여 북동부, 북서부, 남동부, 남서부 및 전체지역으로 구분하여 나타낸 것이다.

Table. 3.1에서 보여지는 바와 같이 지역별로 수행된 암석코아시료의 시험된 수량을 살펴보면 남동부는 79개, 북서부는 121개, 남동부는 25개, 남서부는 36개로 북부지역에 대비 남부지역의 시험수량이 다소 적은 편이다.

Table 3.1 Uniaxial Compressive Strength Test Results of Jeju' s Basalt (Unit: MPa)

Sortation	North-East	North-West	South-East	South-West	Total Area
Minimum	17.0	12.3	17.2	14.2	12.3
Middle	52.5	56.5	40.5	45.5	52.5
Maximum	145.8	148.9	79.1	118.4	148.9
Average	65.9	58.6	45.2	54.8	59.0
Standard deviation	35.9	27.6	17.1	26.0	29.9
Skewness	0.63	0.41	0.60	0.61	0.73
Kurtosis	-0.72	-0.21	-0.60	-0.33	0.00
Data	79	121	25	36	261

최소값은 북동부와 남동부 지역에서 약 17.0MPa로 가장 높게 나타나고 있으며, 상대적으로 북서부에서 12.3MPa로 가장 낮은 값을 보인다. 최대값 또한 북서부에서 148.9MPa로 가장 높게 나타나며, 전체지역의 중앙값은 52.5MPa로 평균에 비해 10%, 지역별로는 4~20% 감소되는 경향을 보이고 있는데, 북서부에서 비교적 차이가 크지 않은 것으로 확인된다. 일축압축강도의 표준편차는 남동부에서 평균 대비 17.1MPa로 가장 분산도가 낮고, 북동부에서 35.9MPa로 분산도가 가장 큰 것으로 파악된다.

전체지역에 대한 일축압축강도 평균은 59.0MPa인 것으로 결과에서 나타나고 있으며, 지역별 평균은 약 50~70MPa 사이의 값으로 확인되고, 북동부 지역에

서 65.9MPa로 가장 높게 나타나고 있다.

Fig 3.2의 확률밀도함수의 곡선분포 형태를 보면 전반적으로 양의 왜도값을 나타내면서 오른쪽으로 긴 꼬리를 보임에 따라 큰 값의 영향을 받는 것으로 파악된다. Yang(2015) 또한 기존 연구를 통해 현무암의 일축압축강도는 소수의 공극이 작고 조직이 치밀한 암석에 의해 극단적인 큰 값이 평균에 영향을 미치는 것으로 파악된다고 언급한 바 있으며, 신뢰도를 높이기 위해서는 평균보다는 중앙값을 고려하는 것이 옳을 것으로 판단된다.

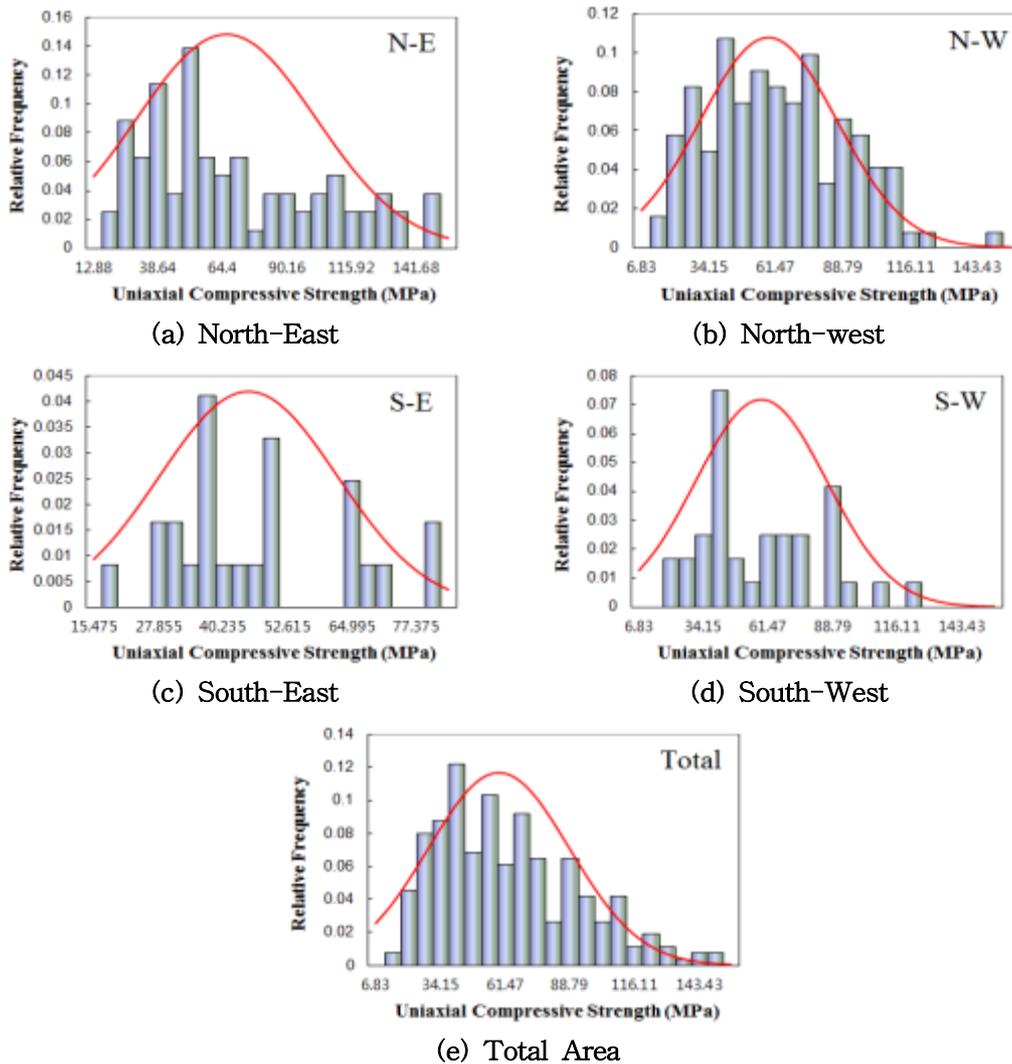


Fig 3.2 Uniaxial Compressive Strength distribution for Jeju' s Basalt

3.1.2 공내재하시험

제주도의 경우 지표지질의 대부분이 현무암으로 구성되며, 기공 및 절리의 발달로 인하여 강도가 약한 구간이 대부분이다. 시험방식은 등분포재하법으로 시추공 내에 고무튜브인 Probe를 삽입하여 측정하는 방법을 사용하였으며, 시험기는 일본 OYO사의 Elastometer-2로 측정하였다.

공내재하시험(Pressure Meter Test)은 제주도 내 13개의 현장에서 시추공을 이용한 41개의 공내재하시험이 실시되었다. Fig. 3.3에서 보여지는 바와 같이 지역별로는 북동부지역 19개, 북서부지역 9개, 남동부지역 1개, 남서부지역 12개로 남동부 지역에 대한 수량이 가장 적은 것으로 파악된다.

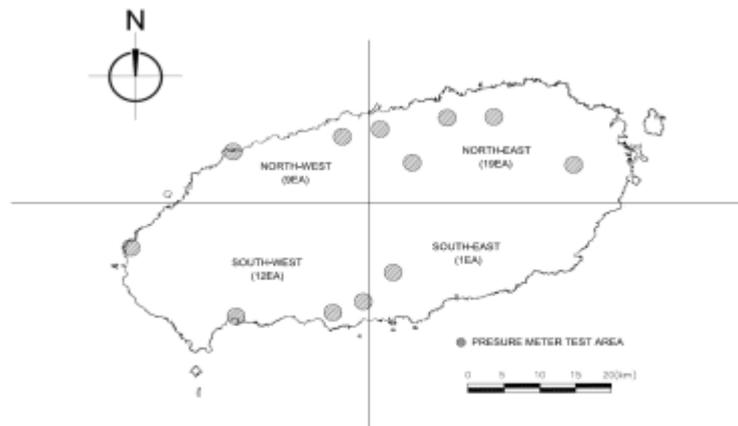


Fig. 3.3 Borehole Pressure Meter Test by region of Jeju' s

시험심도는 최소 1.0m에서 최대 38.5m 깊이로 다양하며, 평균심도는 약 10m 정도이다. 시험이 진행된 현장의 경우 일부 해안가 지대에서 조수간만의 차에 따른 해수위를 제외하면 대다수의 조사지역에서는 수위가 형성되지 않는 것이 특징이다.

지역별 공내재하시험에 의한 변형계수 측정결과를 Table 3.2와 같이 북동부, 북서부, 남동부, 남서부 4개의 지역과 전체지역일 때의 측정결과를 분류하여

기재하였다.

Table 3.2 Results of Deformation Modulus Measurement by region in Jeju's (Unit: GPa)

Sortation	North-East	North-West	South-East	South-West	Total Area
Minimum	0.04	0.07	-	0.11	0.04
Middle	1.25	0.52	-	1.51	1.13
Maximum	3.98	1.54	-	3.55	3.98
Average	1.26	0.68	3.06	1.60	1.28
Standard deviation	0.90	0.48	-	1.11	0.97
Skewness	1.40	0.71	-	0.48	1.05
Kurtosis	3.67	-0.46	-	-0.51	0.88
Data	19	9	1	12	41

변형계수의 포아송비는 시험구간의 암석은 풍화암에서 보통암에 해당되고 있으며, 분류된 암반의 포아송비 범위는 0.33~0.23으로 적용되었다.

측정된 변형계수의 값은 최소값은 데이터의 수가 적어 비교가 힘든 남동부를 제외하면 0.04~0.11GPa의 범위를 보이고 있으며, 최대값은 3.98GPa로 북동부 지역에서 가장 높은 값을 보이고 있다. 전체지역의 중앙값은 1.25GPa로 평균과는 큰 차이를 보이지 않는다.

전체지역에 대한 평균의 경우 남동부에서 측정된 값인 3.06GPa를 포함하여 1.28GPa인 것으로 나타나고 있으며, 지역별 평균은 북동부는 1.26GPa, 북서부는 0.68GPa, 남서부는 1.60GPa로 확인되면서 남서부에서 비교적 큰 것으로 파악된다. 표준편차의 경우 북동부와 남서부에서 북서부에 비해 크게 나타나면서 평균 대비 분산도가 큰 것으로 보인다.

Fig. 3.4는 데이터가 적은 남동부를 제외한 지역의 확률밀도함수의 곡선분포

를 나타낸 것이다. 지역별 데이터는 0보다 큰 양의 왜도를 보이면서 오른쪽으로 꼬리가 길게 늘어지는 현상을 볼 수 있는데, 북서부의 경우 소수의 큰 값에 의해 양의 왜도가 가장 크게 나타나고 있다. 전체지역으로 살펴봤을 때 일축압축강도와 동일하게 큰 값의 영향을 받는 것으로 파악된다.

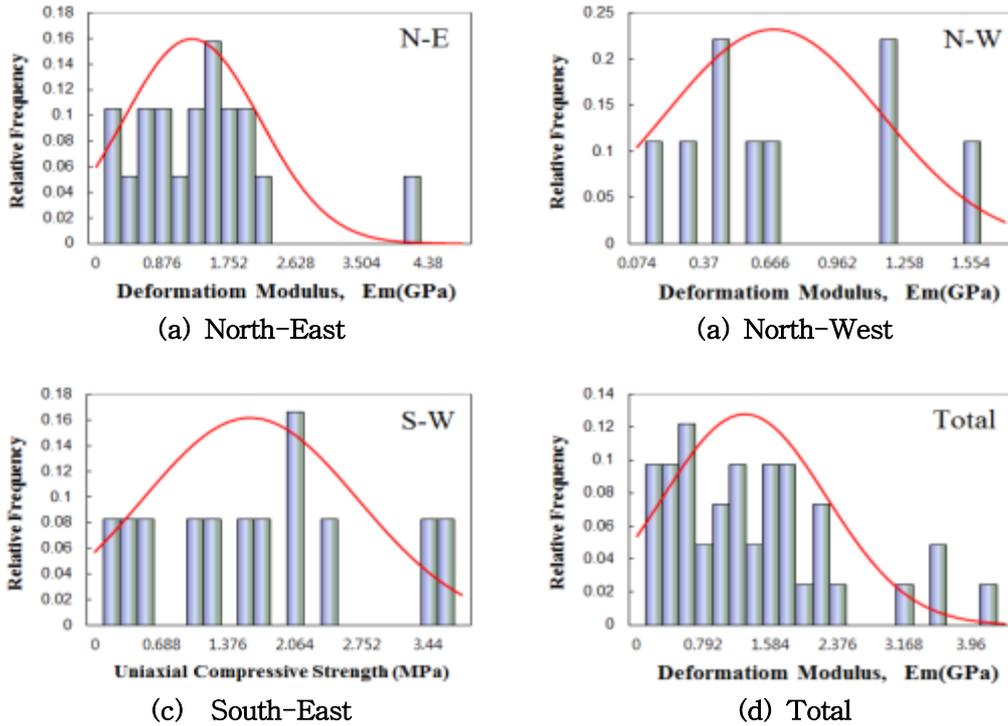


Fig 3.4 Deformation Modulus Distribution for Jeju' s Basalt

3.2 현무암의 RMR과 기존 제안식의 상관성 분석

Fig. 3.5는 각 제안식별 RMR 점수에 대한 변형계수 추정값을 나타낸 것이다. 변형계수 산정에 사용된 제안식은 기존 연구에서 변형계수와의 상관관계에 대하여 많이 활용되었던 대표적인 5개의 경험식을 선정하였다.

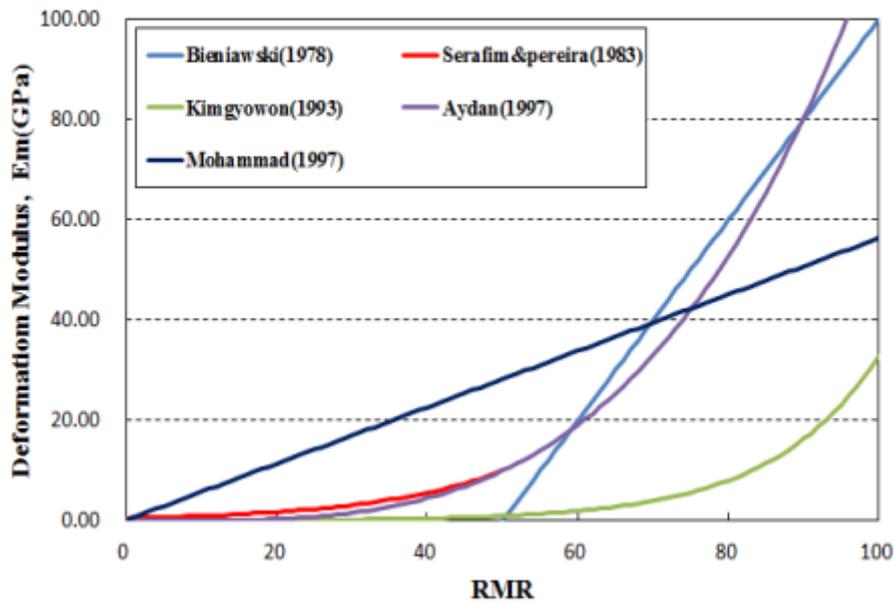


Fig. 3.5 Correlation of RMR and Deformation Modulus

Bieniawski(1978)의 제안식과 Serafim & Pereira(1983)의 제안식은 RMR 점수가 50을 기준으로 다른 경향을 보임에 따라 상관성을 분석함에 있어 이러한 특성을 감안하여 점수가 50보다 큰 경우 Bieniawski의 식, 작은 경우 Serafim & Pereira의 식을 이용하였다. 김교원(1993)의 식 같은 경우 본 상관성 분석에서는 지하수위를 적용하였을 때를 가정한 결과가 반영된 것이다. RMR 값이 50 이하에서는 Serafim & Pereira(1983)의 식과 Aydan(1997)이 제안식이 비슷한 추세의 경향을 보이고 있으며, 기존 제안식에서는 국내 제안식인 Kim(1993)의 식이 RMR 값이 증가함에 따라 가장 완만한 변형계수의 증가폭을 보이고 있다.

Fig. 3.6과 Fig. 3.7은 Bieniawski(1978)의 식과 Serafim & Pereira(1983)의 식이 RMR 50을 기준으로 각각 다르게 평가됨에 따라 구분을 하여 나타낸 것이다.

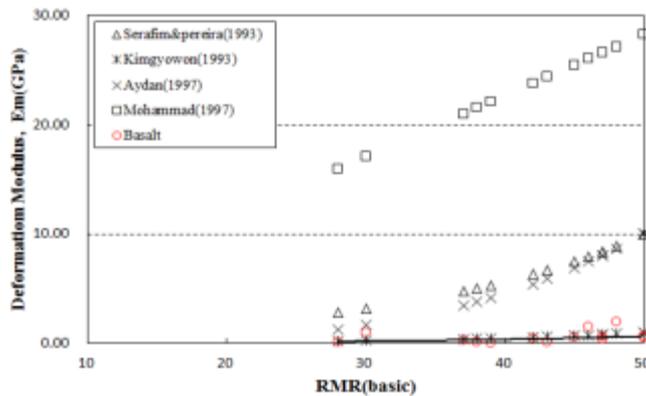


Fig. 3.6 RMR < 50

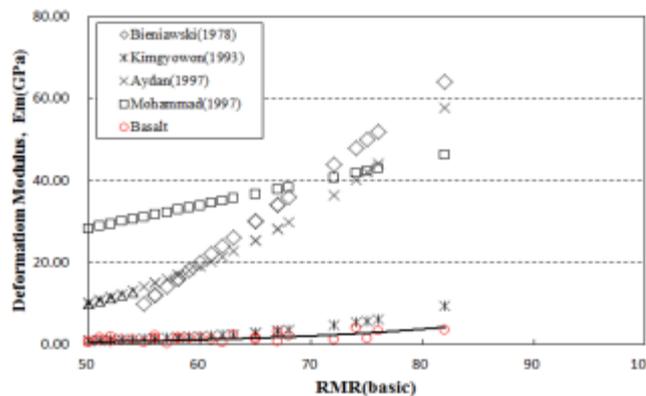


Fig. 3.7 RMR > 50

RMR 분류에 따른 변형계수 실측값과 기존 제안식에 의한 추정값을 비교하여 분석한 결과, Bieniawski(1978)의 제안식과 Mohammad(1997)의 제안식은 과대한 값이 산정되면서 큰 차이를 보인다. Serafim & Pereira(1993) 역시 추정값이 높은 것으로 확인되며, Aydan(1997)의 식은 30 이하의 RMR 점수에서 약간 유사한 경향을 보인다.

비교된 제안식 중에서는 현무암의 RMR 분류에 따른 변형계수와 Kim(1993)이 제안한 식에 의한 추정값이 약 20 후반에서 70점까지의 RMR 점수에서 가장 유

사한 경향의 패턴을 나타내며, 그 이상의 점수에서는 차이가 있는 것으로 보인다. 각 동일한 RMR 점수 내에서도 변형계수 값이 차이를 보이고 있기는 하나, 전반적으로 37~74점에서 70% 이상의 높은 상관성을 보이고 있다.

기존 제안식의 경우 대부분 변형계수 추정값이 상당히 크게 예측되고 있는 것을 알 수 있으며, Kim(1993)의 제안식이 가장 높은 상관성을 보이고 있는데, 이는 한정된 RMR 점수에 대한 결과이므로 실제 적용함에 있어 신중히 고려하고 판단하여야 할 것으로 사료된다.

3.3 현무암의 주요 RMR 특성치와 변형계수 상관관계 분석

RMR 분류시 항목별로 RMR값에 미치는 영향의 경우 일축압축강도가 차지하는 비중은 15%, 암질지수는 20%, 절리간격은 20%, 절리상태 30%, 지하수상태 10%로 50% 이상이 불연속면의 대한 평가로 구성된다.

RMR 분류에서 주요한 특성치인 다섯가지 요소 중 일축압축강도, 암질지수(RQD), 절리간격에 대한 특성치를 변형계수와 비교·분석하였다. 절리상태의 경우 정성적인 해석이 다른 요소에 비해 많아 수치화하기 어려우며, 지하수 또한 제주도의 지역적 특성 상 측정심도 내 해수위를 제외하면 수위가 형성되지 않기 때문에 본 절에서는 제외하였다.

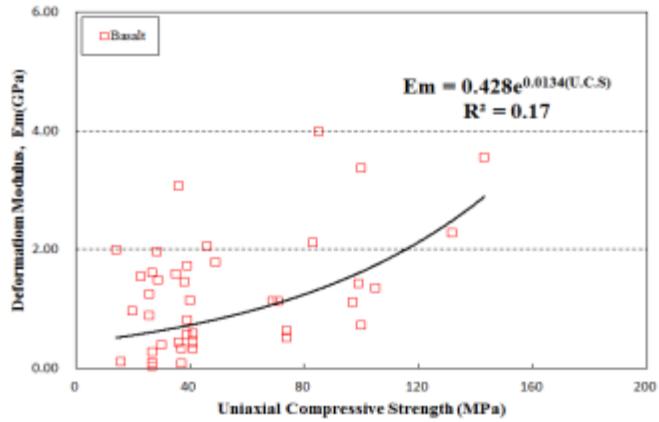
해당되는 각 특성치별로 지수, 선형 로그, 2차함수의 형태로 회귀분석함에 따라 상관관계식과 결정계수(R^2)를 산출하였다.

3.3.1 일축압축강도와 변형계수의 상관관계

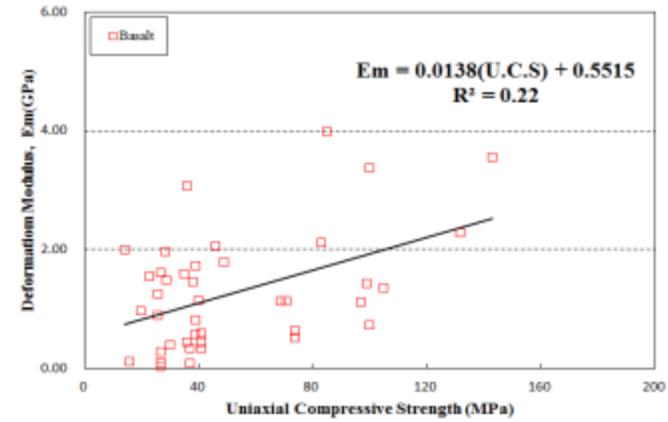
RMR 분류에 사용된 일축압축강도의 경우 평균 52MPa를 보이고 있으며, 중앙값이 39MPa로 강도가 약 20~40MPa 사이에 많은 분포양상을 보이고 있다. 현무암의 경우 일축압축강도가 변형계수에 미치는 영향이 작은 것으로 파악된다.

암석의 강도가 증가할수록 변형계수가 커지는 패턴을 보이나 같은 강도 내에서도 변형계수의 값이 큰 차이를 보이는 결과를 나타내고 있다. 동일한 암석일 지라도 시료의 상태에 따라 큰 차이를 보이며, 이는 압축강도시험 시 기공의 크기 및 육안관찰에서 보이지 않는 시료에 내재되어 있는 절리 등이 큰 변수로 작용하는 것으로 판단된다.

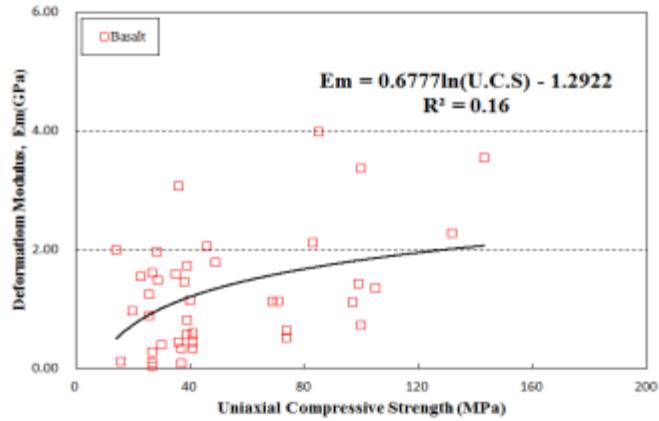
Fig. 3.8은 지수함수, 선형함수, 로그함수, 2차함수로 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다.



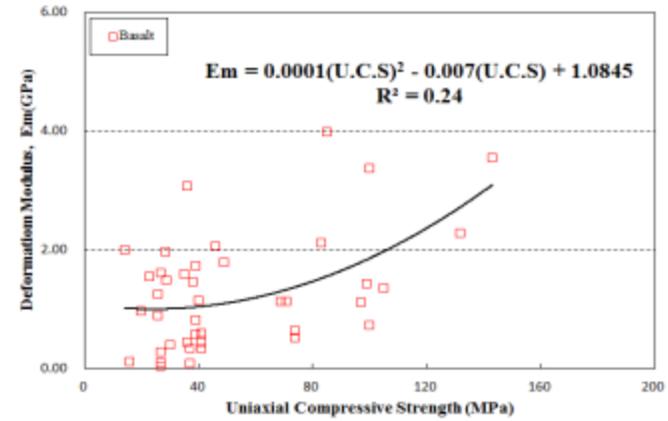
(a) Exponential



(b) Linear



(c) Logarithmic



(d) Quadratic Polynomial

Fig 3.8 Correlation Between Uniaxial Compressive Strength and Deformation Modulus

일축압축강도(Uniaxial Compressive Strength)와 변형계수의 회귀분석식과 결정 계수(R^2)는 Table 3.3과 같다.

Table 3.3 Regression Analysis Result for Uniaxial Compressive Strength

Function Type	Regression Analysis Formula	Coefficient of Determination
Exponential	$E_m = 0.428 \text{ EXP}(0.0134 \text{ U.C.S})$	$R^2 = 0.17$
Linear	$E_m = 0.0138(\text{U.C.S}) + 0.5515$	$R^2 = 0.22$
Logarithmic	$E_m = 0.6777 \ln(\text{U.C.S}) - 1.2922$	$R^2 = 0.16$
Quadratic Polynomial	$E_m = 0.0001(\text{U.C.S})^2 - 0.007(\text{U.C.S}) + 1.0845$	$R^2 = 0.24$

일축압축강도에 대하여 지수, 선형, 로그, 2차함수의 형태로 회귀분석 하였을 때, 결정계수(R^2)는 지수함수 0.17, 선형함수 0.22, 로그함수 0.16, 2차함수 0.24의 결과를 나타내면서 2차함수에서 가장 큰 상관성을 보이고 있으나, 현무암의 일축압축강도와 변형계수와의 상관성은 작은 것으로 파악된다.

3.3.2 암질지수와 변형계수의 상관관계

Deere(1963)의 식을 이용하여 RQD를 산정하였으며, 약 20% 이하의 암질지수를 제외하면 현무암의 경우 대부분 40% 이상의 암질상태를 나타내고 있다. 암질의 평균은 68%이며, 전반적인 현무암의 암질은 Deere(1963)의 암반분류에 의하면 보통(50~75%)~양호(75~90%)한 암질상태를 나타내고 있다.

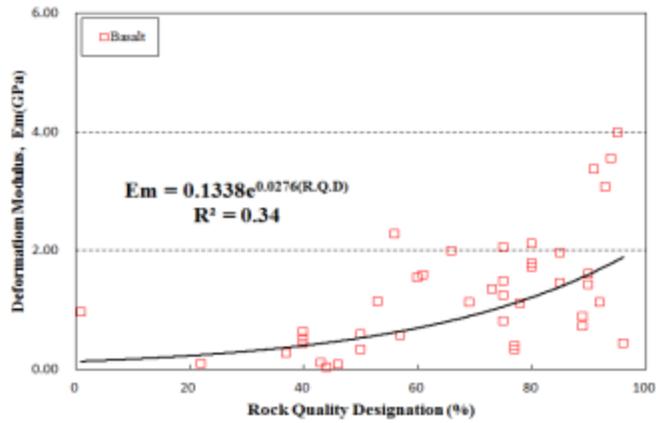
암질지수가 클수록 변형계수가 증가되는 양상을 보이고 있기는 하나, 상대적으로 RQD가 높은 양호~매우 양호한 암질에서도 변형계수가 매우 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 공내재하시험 수행시 암반 내에서도 상대적으로 절리가 발달되어 변형을 일으키기 쉬운 구간에서 수행하게 됨에 따라 RQD 산정시 시험구간이 고려되지 않을 경우 차이가 있을 것으로 판단된다.

암질지수(Rock Quality Designation)와 변형계수의 회귀분석식과 결정계수는 Table 3.4와 같다.

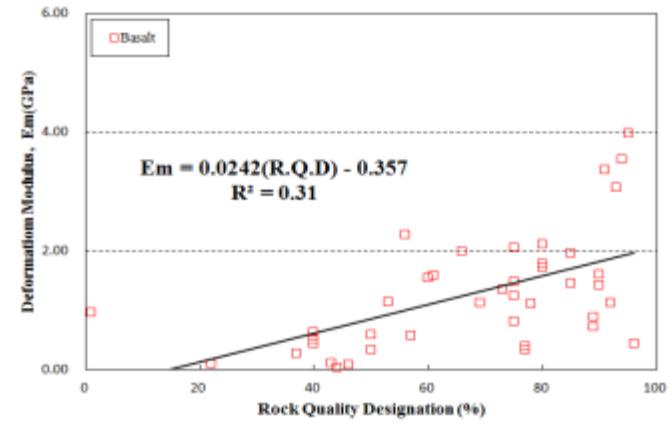
Table 3.4 Regression Analysis Result for Rock Quality Designation

Function Type	Regression Analysis Formula	Coefficient of Determination
Exponential	$E_m = 0.1338 \text{ EXP}(0.0276 \text{ R.Q.D})$	$R^2 = 0.34$
Linear	$E_m = 0.0242(\text{R.Q.D}) - 0.357$	$R^2 = 0.31$
Logarithmic	$E_m = 0.4174 \ln(\text{R.Q.D}) - 0.4295$	$R^2 = 0.10$
Quadratic polynomial	$E_m = 0.0004(\text{R.Q.D})^2 - 0.017(\text{R.Q.D}) + 0.6436$	$R^2 = 0.36$

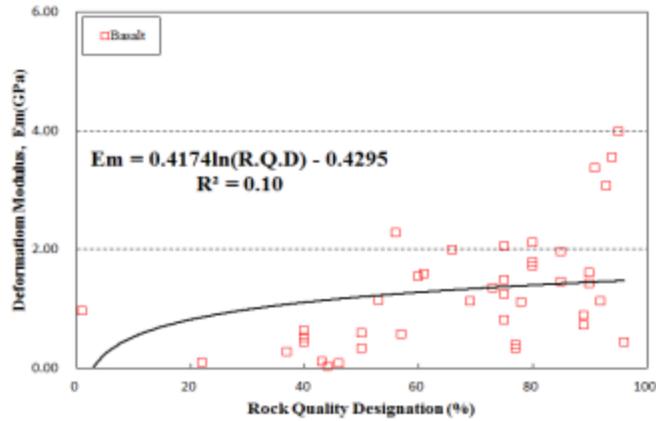
결정계수(R²)는 지수함수 0.34, 선형함수 0.31, 로그함수 0.10, 2차함수 0.36으로 2차함수에서 가장 상관성이 큰 것으로 파악되며, 일축압축강도와 변형계수의 상관성 보다 높은 것으로 확인된다. Fig. 3.9는 각 함수별 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다.



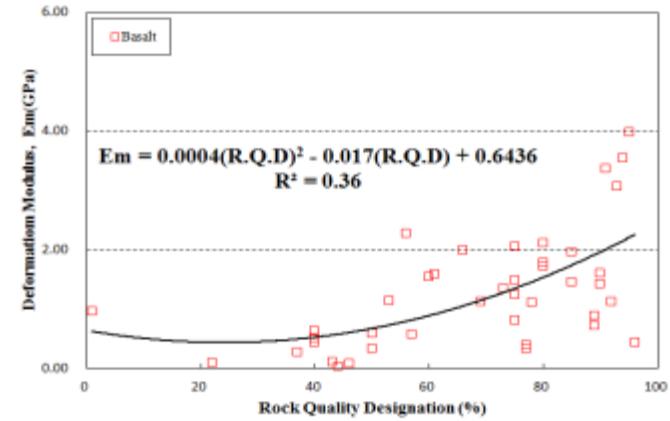
(a) Exponential



(b) Linear



(c) Logarithmic



(d) Quadratic Polynomial

Fig 3.9 Correlation Between Rock Quality Designation and Deformation Modulus

3.3.3 절리간격과 변형계수의 상관관계

현무암의 RMR 분류에서 평가된 절리간격은 최소 50mm에서 최대 740mm인 것으로 확인된다. 대부분 간격은 40mm 이하에 해당되고 있으며, 동일한 절리간격 내에서도 변형계수의 값이 크게 차이가 나는 것으로 확인된다.

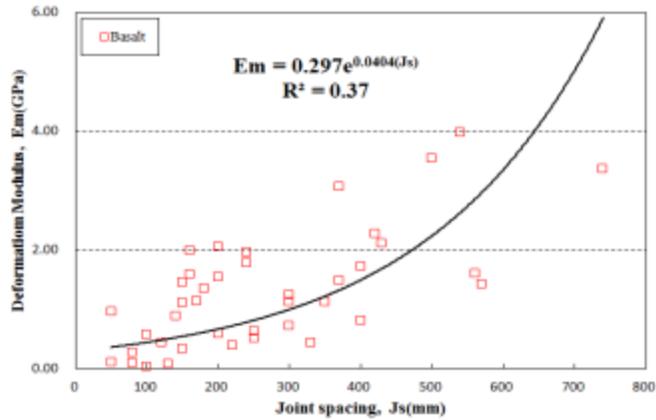
암반을 분류하는 구간 내에서도 암석의 절리간격이 일정치 않고 매우 불규칙하며, 방향성이 다양하다. 이 때문에 각기 다른 간격에 대하여 대표성을 반영하기 어려운 점이 있으므로 평균을 내어 산정하게 된다.

절리간격(Joint spacing)과 변형계수의 회귀분석식과 결정계수는 Table 3.5와 같다.

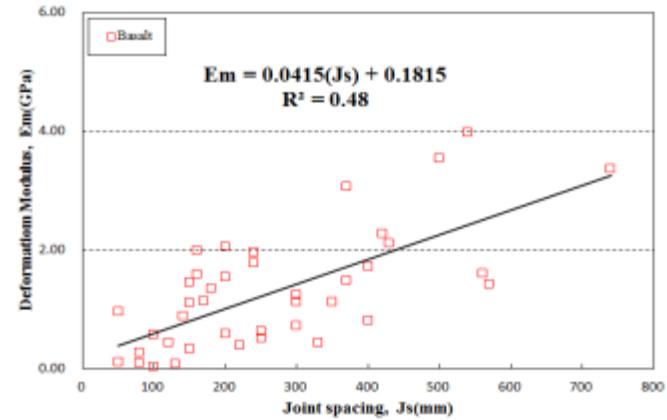
Table 3.5 Regression Analysis Result for Joint spacing

Function Type	Regression Analysis Formula	Coefficient of Determination
Exponential	$E_m = 0.297 \text{ EXP}(0.0404 J_s)$	$R^2 = 0.37$
Linear	$E_m = 0.0415(J_s) + 0.1815$	$R^2 = 0.48$
Logarithmic	$E_m = 0.9649 \ln(J_s) - 1.696$	$R^2 = 0.42$
Quadratic polynomial	$E_m = 4E-05(J_s)^2 - 0.0387(J_s) + 0.216$	$R^2 = 0.48$

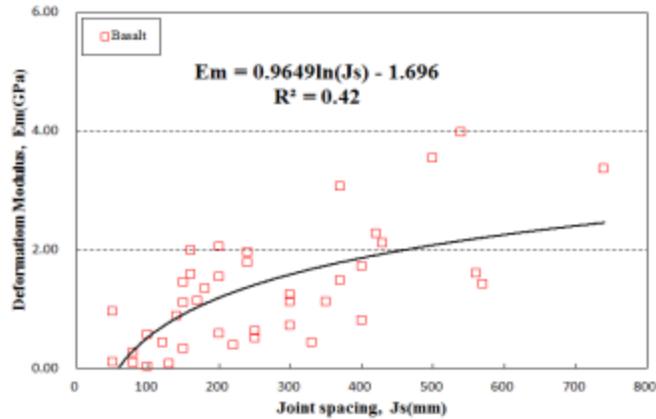
결정계수(R^2)는 지수, 선형, 로그, 2차 함수의 형태로 회귀분석한 결과 지수함수 0.37, 선형함수 0.48, 로그함수 0.42, 2차함수 0.48로 선형함수와 2차함수에서 0.48로 가장 높게 나타나고 있다. 현무암의 특성치와 변형계수의 상관관계를 파악해본 결과 일축압축강도와 암질지수 보다는 절리간격과 변형계수의 상관성이 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. Fig 3.10은 각 함수별 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다.



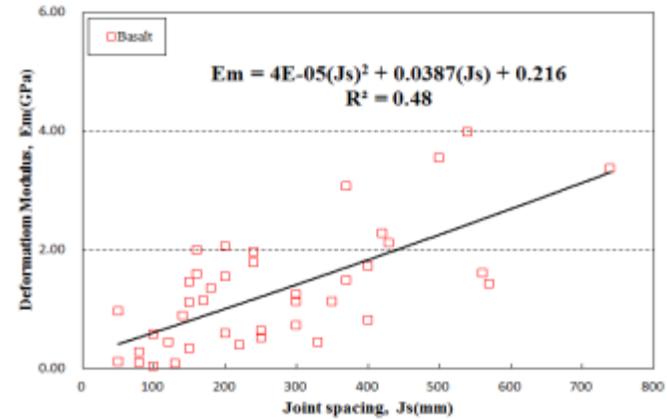
(a) Exponential



(b) Linear



(c) Logarithmic



(d) Quadratic Polynomial

Fig 3.10 Correlation Between Joint spacing and Deformation Modulus

3.4 현무암의 RMR과 변형계수의 상관관계 분석

일축압축강도, 암질지수, 절리간격 및 절리상태에 대하여 등급의 경계선과 각 범주사이에 배점의 변화폭을 Bieniawski(1989)가 제안한 각각의 보정식을 이용하여 점수를 산정하였으며, 지하수위의 경우 10점, 불연속면의 방향성에 대한 보정은 0점을 적용하였다.

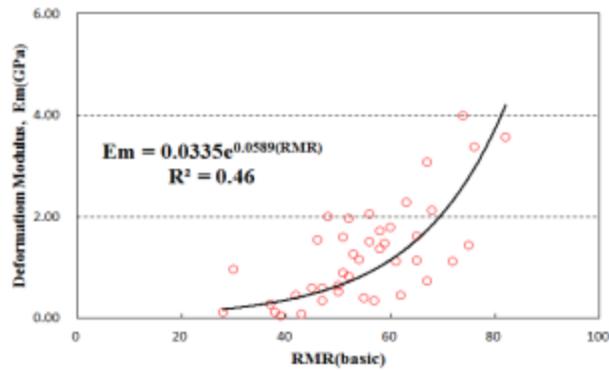
제주도내 41개의 공내재하시험을 실시하기 위해 시추가 진행됨에 따라 채취된 시료를 가지고 시험을 수행한 구간에서 약 1m 전·후의 암석을 RMR 분류한 결과는 최소 28점에서 최대 82점의 점수로 분류되며, 현무암의 경우 약 50~70점대의 분포도가 큰 것으로 파악된다.

RMR 점수와 변형계수의 회귀분석식과 결정계수는 Table 3.6과 같다.

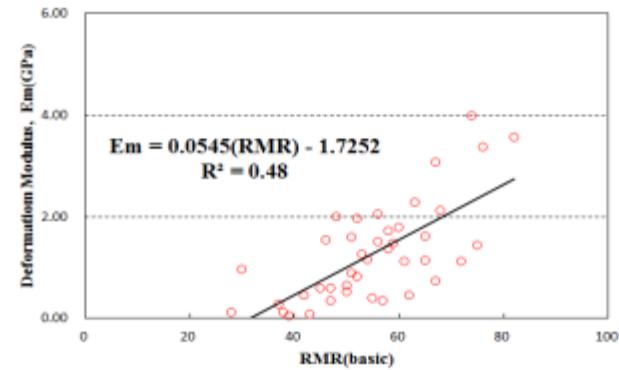
Table 3.6 Regression Analysis Result for RMR

Function Type	Regression Analysis Formula	Coefficient of Determination
Exponential	$E_m = 0.0335 \text{ EXP}(0.0589 \text{ RMR})$	$R^2 = 0.46$
Linear	$E_m = 0.0545(\text{RMR}) - 1.7252$	$R^2 = 0.48$
Logarithmic	$E_m = 2.6578 \ln(\text{RMR}) - 9.3094$	$R^2 = 0.43$
Quadratic polynomial	$E_m = 0.001(\text{RMR})^2 - 0.05(\text{RMR}) + 1.0047$	$R^2 = 0.52$

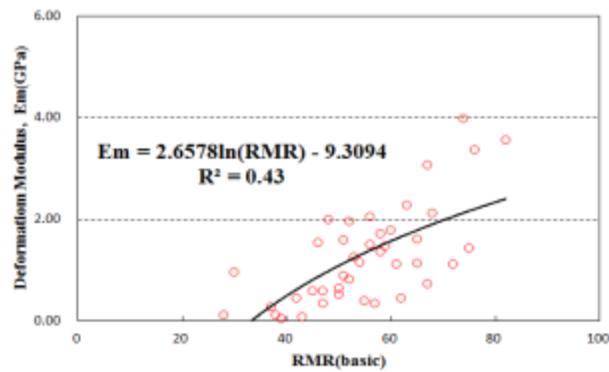
RMR 분류점수와 변형계수의 상관관계를 분석하기 위해 지수, 선형, 로그, 2차함수의 형태로 회귀분석한 결과 결정계수(R^2)는 지수함수 0.46, 선형함수 0.48, 로그함수 0.43, 2차함수 0.52로 2차함수에서 가장 높게 나타나고 있으며, 현무암의 RMR 점수의 경우 암질지수와 절리간격의 특성치와 상관성이 큰 것으로 파악된다. Fig 3.11은 각 함수별 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다.



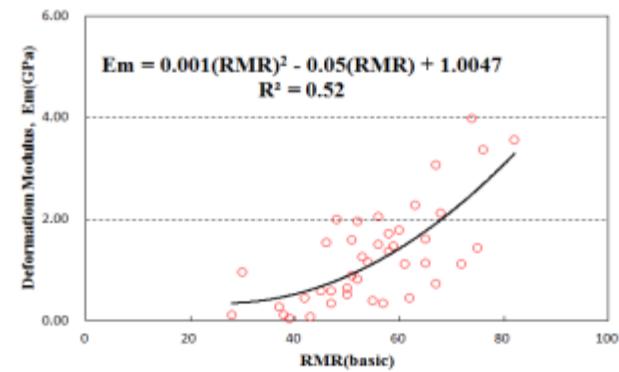
(a) Exponential



(b) Linear



(c) Logarithmic



(d) Quadratic Polynomial

Fig 3.11 Correlation Between RMR and Deformation Modulus

IV. 현무암과 타암종들의 상관성 비교분석

제주도의 경우 다양한 암질분류를 할 수 없기 때문에 기존에 연구되었던 Lee(2007)의 연구에서 회귀분석을 통하여 각 현장의 편마암, 화강편마암, 화강암, 응회암, 안산암에 대한 변형계수와의 상관성을 분석한 결과 및 부록으로 관련된 데이터를 수록함에 따라 현무암과의 비교를 위해 활용하였다.

암종별 특성에 따라 변형계수 값이 차이를 보일 수 있는데, 주로 연암층에서 사용하는 최대가압능력이 20MPa인 Elatometer와 경암층에서 약 70MPa까지 사용되는 Goodman Jack 기종 중 현무암의 경우 Elatometer 방식으로 한 자료를 대상으로 하였으며, 비교대상의 경우 측정방식에 관한 구분이 없음에 따라 전체적인 데이터를 이용하여 비교분석 하였다.

4.1 현무암과 타암종들의 특성치 RMR 분류평점 비교

현무암과 타암종과의 각 특성치의 RMR 분류평점을 비교하기 위해 현무암 47개를 비롯한 편마암 63개, 화강편마암 9개, 화강암 30개, 응회암 54개, 안산암 32개를 활용하여 RMR 평가요소 중 지하수위를 제외한 일축압축강도, 암질지수(RQD), 절리간격, 절리상태에 대한 평점에 대하여 비교하였다.

각 비교요소에 대한 평점은 일축압축강도의 경우 0~15점, 암질지수 3~15점, 절리간격은 5~20점, 절리상태는 0~30으로 암종별로 빈도수를 파악하고, 최소, 중간, 최대, 평균으로 구분하여 현무암과 각 암종별 평점을 비교하였을 때 평점의 차이 및 각 요소의 특성을 파악하였다.

4.1.1 일축압축강도 RMR 분류평점(R1) 비교

Fig. 4.1은 일축압축강도(Uniaxial Compressive Strength)의 RMR 분류를 통하여 구한 각 암종별 평점(R1)과 빈도수 관계를 나타낸 것이다.

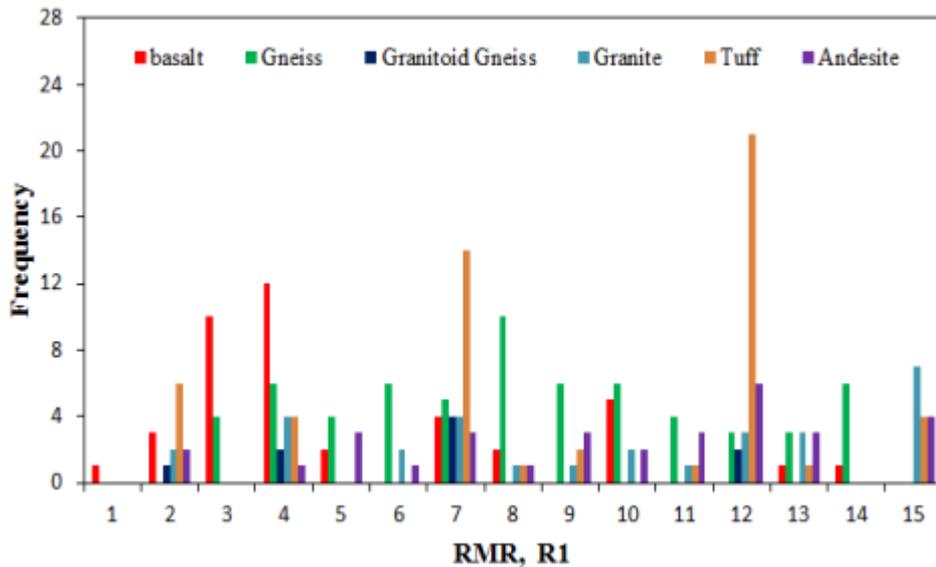


Fig. 4.1 RMR(R1) Frequency According to Rock Types

각 암종별로 빈도수에 따라 1~5점은 불량, 6~11점은 보통, 11점~15점은 양호인 상태로 가정한 결과 불량한 상태의 빈도는 약 19~60%로 현무암이 60% 정도로 가장 높으며, 보통인 상태의 빈도에서는 약 23~52%로 편마암에서 가장 높고, 양호한 빈도는 약 4~50%로 응회암과 안산암에서 가장 높은 50% 정도의 빈도를 보이고 있다.

Table 4.1 RMR(R1) According to Rock Types

Sortation	Basalt	Gneiss	Granitoid Gneiss	Granite	Tuff	Andesite
Minimum	1	3	2	2	2	2
Maximum	14	14	12	15	15	15
Average	5	8	7	10	9	10
Data	41	63	9	30	54	32

Table 4.1은 각 암종별로 일축압축강도의 분류평점을 최소, 최대, 평균으로 나누어 기재한 결과이다. 최소점은 1점으로 현무암에서 가장 낮은 점수인 것으로 확인된다. 최대점은 화강암, 응회암, 안산암에서 15점으로 가장 높게 나타나고 있다. 암종별로 평균은 5~10점으로 현무암에서 최하점인 5점으로 확인되면서 비교된 암종들 중에서는 가장 강도가 낮은 상태를 나타내는 것으로 확인된다.

4.1.2 암질지수 RMR 분류평점(R2) 비교

Fig. 4.2는 각 암종별 암질지수(Rock Quality Designation)의 RMR 분류를 통하여 구한 각 암종별 평점(R2)과 빈도수 관계를 표현한 것이다.

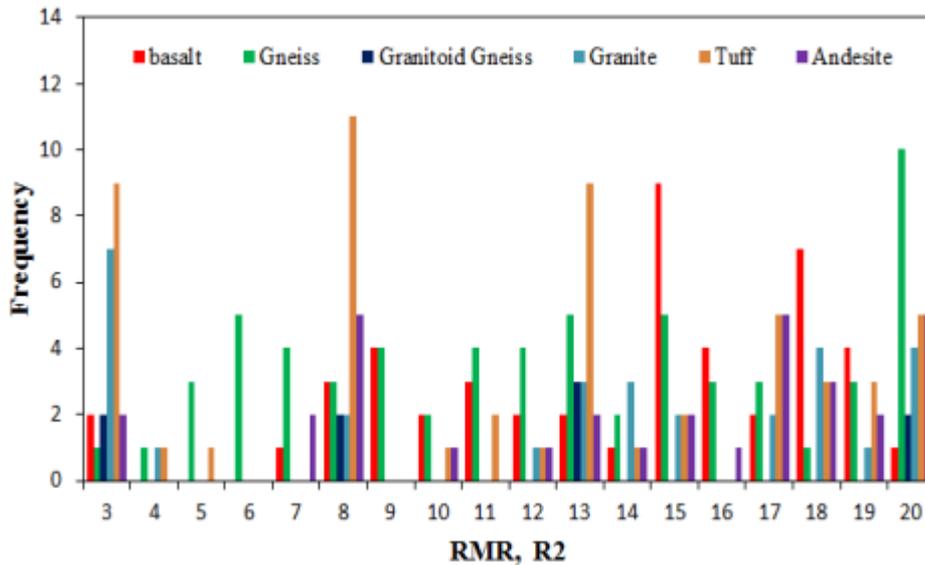


Fig. 4.2 RMR(R2) Frequency According to Rock Types

각 암종별로 빈도수에 따라 3~8점은 불량, 9~14점은 보통, 15점~20점은 양호인 상태로 가정한 결과 불량한 상태의 빈도는 약 13~44%로 화강편마암과 응회암에서 40% 이상을 보이고 있으며, 보통인 상태의 빈도에서는 약 16~33%로 편마암과 화강편마암에서 30% 이상을 나타내고 있다. 양호한 빈도는 약 22~57%로 안산암에서 50% 이상의 빈도를 보이면서 가장 높은 것으로 확인되며, 현무암은 약 49%로 안산암 다음으로 높다.

Table 4.2는 각 암종별로 암질지수의 분류평점을 최소, 최대, 평균으로 나누어 기재한 결과이다.

Table 4.2 RMR(R2) According to Rock Types

Sortation	Basalt	Gneiss	Granitoid Gneiss	Granite	Tuff	Andesite
Minimum	3	3	3	3	3	3
Maximum	19	20	20	20	20	20
Average	14	13	11	12	12	14
Data	41	63	9	30	54	31

최소점과 최대점은 각각 3점과 20점으로 모두 동일한 것으로 파악된다. 암종별 평균은 11~14점으로 현무암과 안산암에서 가장 높은 것으로 확인되면서 비교된 암종 중에서는 양호한 암질상태를 나타내는 것으로 확인된다.

4.1.3 절리간격 RMR분류평점(R3) 비교

Fig. 4.3은 절리간격(Joint spacing)의 RMR 분류를 통하여 구한 각 암종별 평점(R3)과 빈도수 관계를 표현한 것이다.

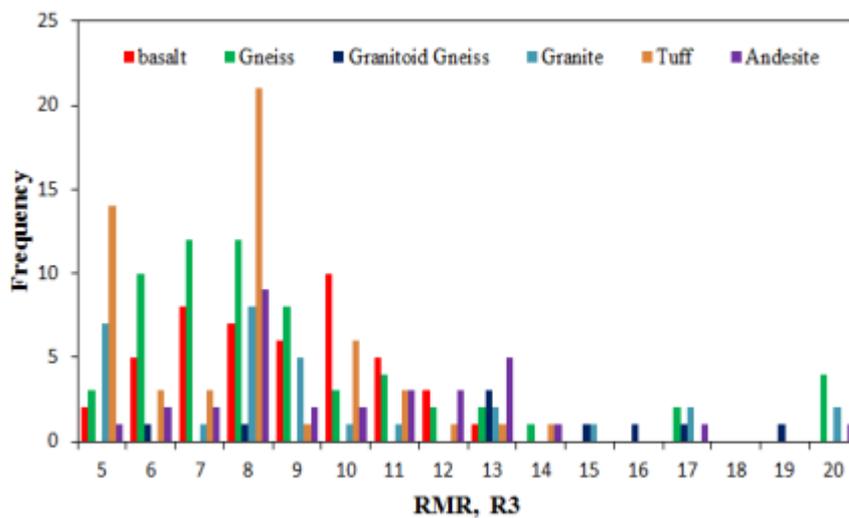


Fig. 4.3 RMR(R3) Frequency According to Rock Types

각 암종별로 빈도수에 따라 5~9점은 불량, 10~14점은 보통, 15점~20점은 양호인 상태로 가정된 결과 불량한 상태의 빈도는 약 22~78%로 화강암과 응회암에서 70% 이상을 보이고 있으며, 보통인 상태의 빈도에서는 약 13~44%로 현무암과 안산암에서 40% 이상을 나타내고 있다. 양호한 빈도는 약 0~44%로 화강편마암에서 40% 이상의 빈도를 보이면서 가장 높은 것으로 확인된다.

Table 4.3은 각 암종별로 절리간격의 분류평점을 최소, 최대, 평균으로 나누어 기재한 결과이다.

Table 4.3 RMR(R3) According to Rock Types

Sortation	Basalt	Gneiss	Granitoid Gneiss	Granite	Tuff	Andesite
Minimum	5	5	6	5	5	5
Maximum	13	20	19	20	14	20
Average	9	9	13	10	7	10
Data	41	63	9	30	54	31

최소점은 대부분 5점으로 화강편마암에서 6점으로 비교적 높으며, 최대점은 편마암, 화강암, 안산암에서 20점으로 가장 높게 나타나고 있다. 암종별 평균은 7~13점으로 화강편마암에서 가장 높은 것으로 확인되고 있다. 현무암은 편마암과 동일한 9점을 보이면서 비교된 암종들 중에서는 응회암 다음으로 불량한 상태를 보이고 있다.

4.1.4 절리상태 RMR분류평점(R4) 비교

Fig. 4.4는 절리상태(Condition of Joints)의 RMR 분류를 통하여 구한 각 암종별 평점(R4)과 빈도수 관계를 표현한 것이다.

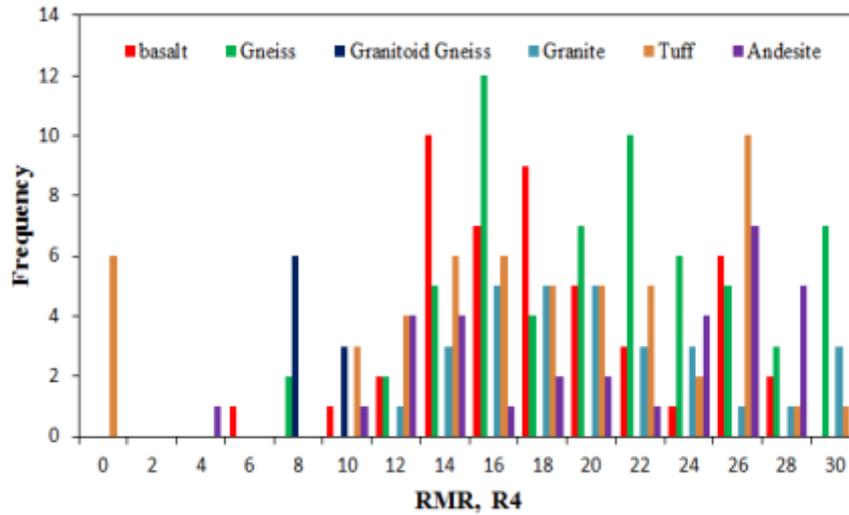


Fig. 4.4 RMR(R4) Frequency According to Rock Types

각 암종별로 빈도수에 따라 0~8점은 불량, 10~20점은 보통, 22점~30점은 양호인 상태로 가정된 결과 불량한 상태의 빈도는 약 0~67%로 화강편마암에서 가장 불량함을 보이며, 다른 암종들의 경우 약 10% 이하인 것으로 보인다. 보통인 상태의 빈도에서는 약 33~72%로 현무암에서 70% 이상을 나타내고 있다. 양호한 빈도는 약 0~53%로 안산암에서 50% 이상의 빈도를 보이면서 가장 높은 것으로 확인된다.

Table 4.4 RMR(R4) According to Rock Types

Sortation	Basalt	Gneiss	Granitoid Gneiss	Granite	Tuff	Andesite
Minimum	6	8	7	11	0	4
Maximum	28	30	10	29	30	28
Average	18	20	8	20	17	20
Data	41	63	9	30	54	31

Table 4.4는 각 암종별로 절리상태의 분류평점을 최소, 최대, 평균으로 나누어 기재한 결과이다. 최소점은 응회암에서 0점을 보이면서 가장 낮고, 화강암에서 11점으로 가장 높게 나타나고 있다. 최대점은 화강암에서 10점으로 가장 낮으며, 다른 암종들의 경우 28~30점으로 높은 점수로 확인된다. 암종별 평균은 8~20점으로 편마암, 화강암, 안산암이 20점으로 가장 높은 것으로 보인다. 현무암은 18점으로 비교된 암종 중에서는 양호한 절리상태를 나타내고 있다.

4.2 현무암 및 타암종들의 변형계수 상관관계 분석

Fig. 4.5은 암종별 RMR과 변형계수의 상관관계를 나타낸 것이며, 각 암종별 회귀분석에 따른 경험식과 결정계수는 Table 4.5와 같다.

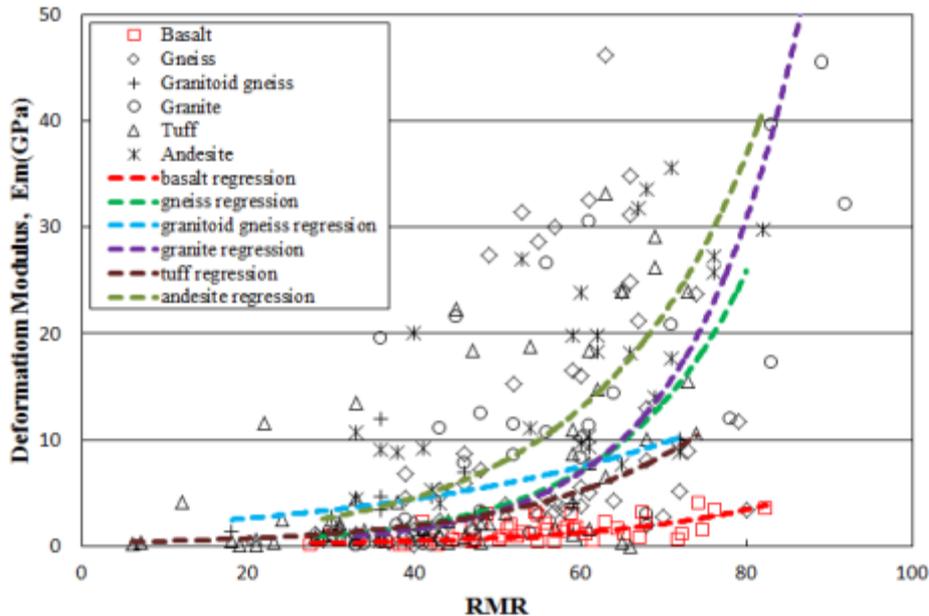


Fig. 4.5 Correlation Between RMR and Modulus of Deformation by Rock Types

변형계수 측정값은 편마암은 0.11~46.19GPa, 화강편마암은 1.4~11.96GPa, 화강암은 0.11~45.62GPa, 응회암은 0.01~33.21GPa, 안산암은 0.45~35.59GPa, 현무암의 경우 0.04~3.98GPa의 값을 보이고 있다. 암종별 측정값의 경우 최소값은 응회암이 0.01GPa로 가장 낮은 값을 보이고 있으며, 최대값은 화강암과 편마암이 각각 45.62GPa, 46.19GPa로 비교대상 중 가장 높은 값을 나타내는 것으로 파악된다.

Table 4.5는 현무암을 비롯하여 기존 연구를 통해 추정된 식과 그에 따른 결정계수를 나타낸 것이며, 결정계수(R^2)는 편마암 0.52, 화강편마암 0.72, 화강암 0.29, 응회암 0.17, 안산암 0.54, 현무암은 0.52으로 화강편마암이 비교된 암종

중에서는 0.7 이상으로 가장 높은 상관성을 보인다.

Table 4.5 Regression Analysis Result for Rock Types

Rock Type	Regression Analysis Formula	Coefficient of Determination
Gneiss	$E_m = 0.1260 \text{ EXP}(0.0600 \text{ RMR})$	$R^2 = 0.52$
Granitoid Gneiss	$E_m = 0.9376 \text{ EXP}(0.0298 \text{ RMR})$	$R^2 = 0.72$
Granite	$E_m = 2.2624 \text{ EXP}(0.2896 \text{ RMR})$	$R^2 = 0.29$
Tuff	$E_m = 0.3979 \text{ EXP}(0.0385 \text{ RMR})$	$R^2 = 0.17$
Andesite	$E_m = 1.0707 \text{ EXP}(0.0372 \text{ RMR})$	$R^2 = 0.54$
Basalt	$E_m = 0.001(\text{RMR})^2 - 0.05(\text{RMR}) + 1.0047$	$R^2 = 0.52$

현무암의 경우 다른 암종과 비교하였을 때, 결정계수(R^2)가 0.52로 변성암인 편마암과 동일한 상관성을 보이고 있으며, 화강편마암, 안산암 보다 낮은 반면, 화강암, 응회암보다는 높은 상관성을 보이고 있다.

현무암의 경우 비교된 암종 중에서는 0.5 이상의 결정계수를 보이면서 비교적 높은 상관성을 보이고 있으나, 적용성은 크지 않은 것으로 파악된다. 하지만 현무암에 대한 기존 문헌자료가 없으므로 변형계수에 대한 예측자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 향후 많은 데이터를 축적하여 복합적인 변수를 고려하는 다변량 분석과 같은 정밀분석이 필요할 것으로 판단된다.

RMR을 이용한 경험식을 제안할 경우 앞에서 전술한 바와 같이 RMR 분류 시 각 분류요소의 인자들에 대하여 면밀히 파악하여 점수를 산정해야 할 것으로 판단되며, RMR 분류법이 정성적인 해석요소가 많다는 점과 기술자의 개인적인 판단에 따라 배점의 차이가 많을 수 있다는 점을 주의하여야 할 것으로 보인다.

V. 결론

본 연구에서는 제주도 내 분포되는 현무암에 대하여 지역별로 강도 및 변형계수의 범위를 파악하였으며, RMR 분류를 실시하여 실측된 변형계수와의 상관관계를 분석하였다. 또한 현무암과 제주도 외의 지역에서 수행되었던 타암종들에 대한 RMR 분류요소의 주요특성치 평점비교 및 변형계수와의 상관성에 대하여 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 현무암의 일축압축강도의 경우 전체지역에 대한 일축압축강도 평균값은 59.0MPa, 중간값은 52.5MPa로 확인되는데, 확률밀도함수의 곡선분포에서 전반적으로 양의 왜도를 보이면서 우측으로 긴 꼬리를 나타내고 있다. 기공이 비교적 적어 치밀한 소수의 극단적인 큰 값에 의해 강도의 평균이 높게 평가될 수 있음에 따라 중앙값을 고려하는게 옳을 것으로 판단된다. 변형계수의 곡선분포 또한 일축압축강도 동일한 양의 왜도를 보이고 있으며, 전체지역의 평균이 1.28GPa로 중앙값과의 차이는 비교적 크지 않으나 큰 값의 영향을 받는 것으로 파악된다. 변형계수의 경우 전체적인 데이터의 수가 한정적이기 때문에 추가적인 자료 확보를 통한 비교·분석이 이뤄져야 할 것으로 판단된다.
- (2) 현무암의 주요 암반특성치 중 일축압축강도, 암질지수, 절리간격에 대하여 변형계수와의 상관관계를 회귀분석한 결과, 결정계수(R^2)는 일축압축강도의 경우 결정계수가 0.24, 암질지수인 RQD는 0.36, 절리간격은 0.48로 확인된다. 비교된 현무암의 특성치 중 변형계수와의 상관성은 절리간격에서 비교적 큰 것으로 파악된다.
- (3) 현무암 외에 다른 지역의 암석인 편마암, 화강편마암, 화강암, 응회암, 안산암의 자료를 포함하여 암종들과의 RMR 분류평점을 비교하였을 때, 일축압축강도와 절리간격은 다른 암종들에 비해 낮은 평점을 나타내면서 비교적 불량한 상태인 것으로 파악되며, 암질지수와 절리상태는 비교적

높은 평점을 보이면서 양호한 상태인 것으로 확인된다.

- (4) 도외의 다른 지역 암석인 편마암, 화강편마암, 화강암, 응회암, 안산암의 자료를 참조하여 RMR과 변형계수에 대하여 상관관계를 분석한 결과를 비교해보면, 화강편마암이 가장 높은 0.7 이상의 상관성을 나타내며, 편마암, 안산암, 현무암은 0.5 이상으로 비교적 높은 것으로 확인되고 있다. 화강암과 응회암은 다소 낮은 0.3 이하의 상관성을 보이고 있다. 현무암의 RMR을 이용하여 회귀분석을 통해 결정계수(R^2)가 0.52인 변형계수 추정식은 다음과 같이 산출되었다.

$$E_m = 0.001(RMR)^2 - 0.05(RMR) + 1.0047$$

본 연구를 통하여 추정된 식은 상관성은 크지 않은 것으로 확인되나, 앞서 밝힌 바와 같이 현무암의 변형계수에 관한 문헌자료가 없음에 따라 예측자료로의 활용이 가능할 것으로 판단된다. 향후 더 많은 자료를 확보하여 보다 정밀한 분석이 이뤄져야 할 것으로 보이며, 추정식의 활용성을 증대시키기 위해 단일변수가 아닌 복합적인 변수를 고려하는 다변량 분석기법을 이용한 예측이 필요할 것으로 판단된다.

Reference

- Abbas, S. M. and Konietzky, H., (2015). *Rock Mass Classification Systems*, Available at: www.researchgate.net/publication/277504261 (Accessed: March 21, 2018)
- Ahn, K. C., Shin, J. K., Jeong, S. H., Chun, B. S. and Lee, Y. J., (2006). "Correlation Between the Deformation Modulus of the Rock Mass Measured by the In-hole Test and the Existing Strain Estimating Equation" *Journal of Spring Conference Korean Society for Rock Mechanics*, KSRM, pp. 63-71 (in Korean).
- Aydan, O., (1997). *Seismic Characteristics of Turkish Earthquakes*, Turkish Earthquake Foundation, TDV/TR 97-007, p. 41 (in Turkish).
- Barton, N., Lien, R. and Lunde, J., (1974). "Engineering Classification of Rock Masses for the 4 Design of Tunnel Support," *Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236 (in English).
- Bieniawski, Z. T., (1973). *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*, Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, Vol 15(12), pp.335-343
- Bieniawski, Z. T., (1978). "Determining Rock Mass Deformability – Experience from Case Histories" *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics*, pp. 237~247
- Bieniawski, Z. T., (1989). *Engineering Rock Mass Classifications* Pergamon Press, pp. 51-64.
- Deere, D. U., (1963). *Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes*, *Rock mechanics and engineering geology*, Vol.1(1), pp.16-22
- Deere, D. U. and Miller, R. P., (1966). *Engineering classification and index properties of rock*, Technical Report No.AFNL-TR-65-116, Albuquerque, NM : Air Force Weapons Laboratory. (in English)
- Deere, D. U., (1968). *Geological Considerations*, In : Stagg, K. G., Zienkiewicz, O. C.(Eds.), *Rock Mechanics in Engineering Practice*, Wiley, London, pp.1-20 (in England).

- Deere, D. U. and D. W. Deere, (1988). *The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, In: Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, Kirkaldie, L. (Ed.). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp: 91-101 (in English).
- Deere, D. U., (1989). *Rock Quality Designation (RQD) After 20 years, US Army Corps engineers, Contract Report GL-89-1, Waterways Experimental Station, Vicksburg, MS* (in English).
- Do, J. N., Lee, J. K., Chun, b. s., (2006). "Analysis of Co-relationship between Rock Mass Grade by RMR and Estimation Method of Rock Deformation Modulus by Suggested Formulas" *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, KGES, Vol. 13, No. 4, pp. 13-26 (in Korean).
- Goodman, R. E., (1980). *Rock characterization Testing and Monitoring - ISRM Suggested Method*, Pergamon Press, pp.129~160
- Grimstad, E. and Barton, N., (1993). "Updating of the Q-system for NMT" *International Symposium on Sprayed Concrete, Fagernes, Proceedings*, pp.46-66 (in Norway).
- Hoek, E., Brown, E. T., (1997). "Practical Estimates of Rock Mass Strength", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol 34, pp.1165-1186 (in English).
- International Society for Rock Mechanics(ISRM), (1981). *Rock Characterization, Testing and Monitoring-ISRM Suggested Methods*, E. T. Brown(Editor), Pergamon, Oxford, pp. 211 (in English).
- Jang, B. A. and Kim, H. Y., (2003). "Correlation Between Weathering Degree as well as RMR and Deformation Modulus of Rock Mass" *Journal of 2003 Conference Korean Society of Engineering Geology*, KSEG, pp. 119-124 (in Korean).
- Jeong, G. H., (2011). *Co-relationship between Rock Mass Grade by Rock Mass Rating system(RMR) and Estimation Method of Rock Deformation Modulus by Suggested Formula*, Master Thesis, Hanyang University Graduate School Department of Civil and Environmental Engineering, pp. 64-85 (in Korean).
- Kim, B. H., (2002). *Revaluation of Rock Mass Classification using multivariate analysis and Estimation of the Support on Tunnel*, Doctor Dissertation,, Chonnam National University Graduate School Department of Resources Engineering pp. 1-8 (in Korean).

- Kim, G. W., (1993). "Geomechanics Classifications of Rock Masses", Journal of Spring 1993 National Conference Korean Geotechnical Society, KGS, pp. 33-40 (in Korean).
- Kim, G. W., (2001). "Geological engineering characteristics and investigation problems of rock discontinuity(Focusing on quantification of discontinuity characteristics)" *Journal of Spring National Conference Korean Geotechnical Society*, pp. 185-198 (in Korean).
- Kim, J. H., (2015). *A Study on the Correlation between the Rock Mass Classification Methods using Borehole Core*, Master Thesis, University of Seoul Graduate School Civil Engineering, pp. 7-33 (in Korean).
- Kim, Y. G., (2014). *A Study on the Relationship Between Stability Analysis and the Factors Related to RMR in the NATM Tunnel Excavation*, Doctor Dissertation, Dong-a University Graduate School Department of Energy Resources Engineering Specialized, pp.20-27 (in Korean).
- Korean Geotechnical Society(KGS), (2000). *Rock Engineering for Civil Engineers*, Goomibook, pp. 283-325 (in Korean).
- Lee, Y. J., (2007). *Estimation of Deformation Modulus of Rock Masses by Using Statistical Multi-variate Analysis*, Doctor Dissertation, Hanyang University Graduate School Department of Mechanical Engineering, pp. 2-67 (in Korean).
- Mitri H. S, Edrissi R, Henning J. (1994). "Finite element modelling of cablebolted stopes in hard rock ground mines", Presented at the SME Annual Meeting. Albuquerque : New Mexico, pp.94-116 (in English).
- Mohammad S., (1997). *The Using of Scattering Technique in the Determination of Material Color Spectrum and Detecting its Specific Behaviour*, Elektroteknika dan Aplikasi Laser Jakarta, pp. 4-12 (in Indonesian).
- Nicholson G. A., Bieniawski A. T., (1990). "A Nonlinear Deformation Modulus based on Rock Mass Classification" *International Journal of Mining and Geological Engineering*, Vol 8, pp. 181-202 (in English).
- Oh, S. W., Ahn, B. C., (2010). "The Estimation Method of Empirical Formula of Strength Parameters by RMR System and Uniaxial Strength" *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, KGES, Vol. 11, No. 1, pp. 13-18 (in Korean).

- Palmstrom, A., (1982). *The Volumetric Joint Count A Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Mass Jointing*, In : IAEG Congress, New Delhi, pp.221-228 (in English).
- Ro, Y. S., Kim, C. K., Huh, K. H. and Kim, H. M., (2004). Correlation between RMR and Deformation Modulus for In Situ Rock, *Korean Society of Civil Engineers 2004 Convention Conference & Civil Expo*, KSCE, pp. 4305-4310 (in Korean).
- Serafim, J. L. and Pereira, J. P., (1983). "Consideration of the Geomechanical Classification of Bieniawski" *proceedings of the Int. Symp. on Engineering Geology and Underground Construction*. Vol.2, pp. 33-42
- Sunwoo, C., Ryu, D. W., Kim, H. M., and Kim, k. S., (2011). "Study on the Geotechnical Characteristics of Granite in Korea and their Correlation with Rock Classification Method" *Tunnel and Underground Space*, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, KSRM, Vol 21(3), pp. 205-215 (in Korean).
- Synn, J. H and Shin H. S., (2002). "Empirical Equations for Rock Mass Classifications and Rock Property Evaluations", *Journal of Spring Conference Korean Geotechnical Society*, KGS, pp. 79-86 (in Korean).
- Terzaghi, L., (1946). *Rock Defects and Load on Tunnel Support, Introduction to Rock Tunneling with Steel Supports*, a book by Proctor, R. V. and White, T. L., Commercial Shearing & Stamping Co. Youngs town, Ohio, U.S.A. pp.15-99 (in English).
- Wu, T. H., (1966). *Soil Mechanics*, Allyn and Bacon, Boston, p.431 (in English).
- Yang, K. H., (2015). *Analysis on Behavior of Laterally Loaded Piles Embedded in Basalt Rock for Offshore Wind Turbine*, Doctor Dissertation,, Jeju National University Graduate School Department of Specialized Wind Energy pp.36-37, 167-171 (in Korean).
- Yu, B. J., (2009). *The Correlation Between RMR and Deformation Modulus Classified by a kind of Rock masses*, Master Thesis, Woosong University Graduate School Department of Railroad Construction Environment Enginner Civil Enginnering major, pp. 35-50 (in Korean).

