

# 공내재하시험을 이용한 암종별 변형계수와 RMR의 상관성

## The Correlation Between RMR and Deformation Modulus by Rock masses using Pressuremeter

안 태 봉<sup>†</sup>

Ahn, Taebong

**ABSTRACT :** In this study, correlation between measured deformation modulus using pressuremeter and RMR value conducted in 10 sites is analyzed, and applicability of the conventional empirical formulas to the rock masses in Korea are analyzed. It is found that if RMR is below 40, the correlation between deformation modulus and RMR accords Kim Gyo-won's formula and Aydan, Serafim and Pereira's one well, but if the RMR exceeds 40, the correlation was lower than those from the formula. Such results may be attribute to the fact that during classification of RMR, scores are weighed relatively more in joint conditions and apertures than such highly correlational items as uniaxial compression strength or RQD, and RMR would not be evaluated qualitatively due to different weathering degrees and rock mass types as well as engineers' personal errors. Sandstone among sedimentary rocks are quite well accord with suggested equation, but correlation of other rocks are due to large variance. In this study, correlation expressions of various rocks are proposed as the function of exponential based on the field test data.

**Keywords :** RMR, Pressuremeter, Deformation modulus, Rock masses

**요 지 :** 본 연구에서는 10개 현장에서 실시한 공내재하시험을 통하여 얻은 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석하여 기존에 사용하고 있는 제안식의 적용성을 평가하였다. RMR이 40보다 작은 경우에는 변형계수와 RMR과의 상관관계가 김교원, Aydan, Serafim과 Pereira의 식과 잘 일치하였지만 RMR이 40보다 큰 경우에는 상관관계가 낮았다. 이것은 RMR 분류 시 일축압축강도나 RQD보다 절리의 상태와 절리의 틈새가 상대적으로 비중치가 크기 때문이며 공학자의 개인적 차이뿐만 아니라 암반의 종류와 다른 풍화도 때문에 정성적으로 평가되는 경향이 있기 때문이다. 퇴적암 중 사암은 제안식과 비교적 잘 일치하지만 다른 사암은 분산이 커서 상관관계가 낮다. 본 연구에서는 현장시험결과를 근거로 새로운 지수함수 형태의 식을 제안하였다.

**주요어 :** RMR, 공내재하시험, 변형계수, 암종

## 1. 서 론

건설공사의 기본이라고 할 수 있는 자세하고 정밀한 지반정보의 요구는 매우 필수적이다. 터널 및 암사면 등 토목 설계에서 암반에 대한 역학적 지반정수 산정은 토목구조물의 설계에 필수적인 요소이다. 암반의 지반정수는 수치해석에서 매우 중요한 요소이지만 현장시험과 실내시험을 통하여 이를 산정해 내는 것은 절리 등 불연속면 특성 등 정확한 값을 얻는데 한계가 있다. 따라서 암반의 변형계수와 같은 지반정수를 구하기 위하여 절리특성을 고려한 RMR 분류법으로부터 구해진 암반평점을 이용한 제안식이 기존의 연구자들에 의하여 제시되었는데 기존의 제안식은 해외의 사례분석을 통하여 산정된 경험식으로 국내의 암반조건에 부합되는 지반정수 산정에 한계가 있다(Aydan 등

1993; Bieniawski, 1978; Serafim 등, 1983; Mohammad, 1997). 국내에서는 김교원(1993)이 수정 RMR에 의한 강도정수 관계식을 제안하였으며, 노양섭(2004)은 구성광물의 풍화정도에 따른 관계식을 제안하였고 정상훈(2005)도 비슷한 연구 결과를 나타냈지만 아직은 지역적 및 암종에 따른 강도 및 변형특성을 고려한 연구는 충분하지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 전국의 여러 현장에서 공내재하시험을 실시하여 변형계수를 측정하고 측정된 변형계수 결과를 이용하여 기존의 제안식별 국내 암반에 적용성을 분석하고, 국내 암반의 암종별 강도정수와 RMR과의 상관관계를 비교 분석하여 국내의 암반조건에 부합되는 관계식을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 암반분류를 위해 시추조사 및 암석코어 채취를 실시하였으며 암석코어를 이용하여 RMR을 산정하고 변형계수를 측정하기 위하여 공내재하시험을 실시하였

<sup>†</sup> 정희원, 우송대학교 철도건설시스템학과 교수(E-mail : tbahn@wsu.ac.kr)

다. 제안식의 적용성을 평가하기 위해 현장암반의 암반분류를 실시하였고, 기존의 제안식의 국내 암반에 대한 적용성을 비교·분석하여 국내 암반의 암종별 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석하여 상관식을 산출하였다. 암종에 따른 변형계수와 RMR의 제안식은 암종에 관계없이 기존에 제안된 방법보다 본 연구에서 제안된 제안식이 개선된 것으로 판단된다.

## 2. 암반의 변형과 암반분류를 이용한 제안식 고찰

암반의 변형은 암반을 구성하고 있는 암석의 성질과 내부에 분포하고 있는 각종 불연속면의 성질 즉, 분포밀도와 방향성 및 느슨함 등에 의하여 지배된다. 또한 응력이나 간극수압 등의 조건에 따라 암반변형특성이 결정된다. 따라서 암반의 변형특성은 불연속면 등의 여러 가지 요인들로 인해 실내시험에서 얻을 수 있는 무결암석 시편의 변형특성과는 다를 수밖에 없다. 일반적으로 현장암반의 변형계수는 실험실에서 얻어지는 무결암석 시편의 변형계수에 비해 10~50% 수준인 것으로 알려져 있다(윤지선, 1992). Borehole jack과 Dilatometer를 사용하여 구한 변형계수는 평판재하시험으로 구한 값보다 1/2~1/3 수준인 것으로 나타났다(Rocha, 1974).

암반 구조물의 설계를 위하여 수치해석모델이 다양하게 적용되면서 암반의 물성치를 수치모델에 적합하게 적용하여야 한다. 이와 같이 현지암반의 변형계수 및 강도정수를 파악하는 것이 매우 중요하다. RMR분류법으로부터 구한

암반평점에 의해 암반의 변형계수 및 강도정수를 평가하는 방법이 제시되었다. 과거 연구자들에 의하여 제안된 방법과 특징을 표 1에 요약하였다. 이 제안식들은 RMR값이 작은 범위에서는 비교적 잘 일치하지만 RMR값이 50 이상 큰 값에서는 추정식이 크게 나오는 경향이 있다. 이것은 일축압축강도의 배점이 낮으며 암석의 종류에 대한 영향을 고려하고 있지 않기 때문이다.

본 연구에서는 RMR지수를 이용하는 변형계수의 산정식들 중에서 최초의 제안식인 Bieniawski(1978)의 식과 Bieniawski의 식을 보완한 RMR이 50 이하일 때 적용되는 Serafim과 Pereira(1983)의 식, 그리고 국내 암반에 대하여 조사한 결과를 이용하여 제안한 김교원(1993)의 식, 그리고 가장 최근에 발표된 Aydan(1997)과 Mohammad(1997)의 식 등 다섯 가지의 식과 현장에서 얻은 측정치와 비교·분석하였으며 암종별로 구분하여 기존 제안식보다 향상된 제안식을 도출하였다. 그림 1은 제안식의 이 5개의 식의 변형계수와 RMR과의 관계를 비교한 결과이다.

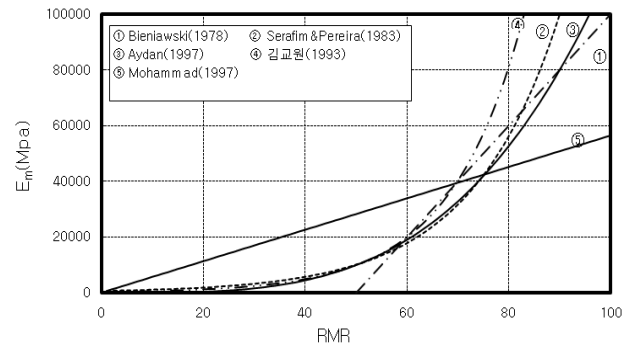


그림 1. 경험식의 RMR- $E_m$ 의 분포양상

표 1. 변형계수 제안식

제안자	제안식 (R= RMR)	개 요
Bieniawski (1978)	$E_m = 2R - 100$ (GPa) (단, R= RMR > 50)	RMR이 50 보다 큰 경우 약 20%의 오차가 있음.
Serafim & Pereira (1983)	$E_m = 10 \left( \frac{R-10}{40} \right)$ (GPa) (단, RMR < 50)	댐 기초에 관련된 여러 가지 사례분석을 바탕으로 변형률의 측정치를 통한 역해석으로부터 제안하였음, RMR이 50 이하일 경우에 대하여 Bieniawski의 제안식을 보완함.
Hoek-Brown (1988)	$E_m = 10 \frac{(GSI-10)}{40} \times \sqrt{\frac{\sigma_c (Mpa)}{100}}$ (GPa) $GSI = R_{89} - 5$ (단, $GSI > 25$ , $\sigma_c < 100MPa$ )	Serafim과 Pereira(1983)의 제안식이 비교적 양호한 암반에 대해서는 잘 맞지만 암반이 불량한 경우에는 너무 높게 나오는 경향이 있다는 점을 지적하며 수정된 경험식
Nicholson & Bieniawski(1990)	$\frac{E_m}{E_i} = 0.0028R^2 + 0.9 \text{Exp}\left(\frac{R}{22.82}\right)$ (GPa)	암반에 대한 RMR과 실험실에서 구한 영률을 이용하여 제안함. RMR이 30 이하일 경우 강성이 매우 크게 감소하는 경향이 있음.
김교원(1993)	$E_m = 300 \times \text{Exp}(0.07R^*) \times 10^{-3}$ (GPa) (단, RMR*은 총 RMR에서 지하수상태 및 절리방향 보정을 제외한 값)	기존의 RMR분류식에서 총 RMR에서 지하수상태 및 절리방향 보정을 제외한 탄성계수를 구하는 식을 제안하였음. 국내 암반을 대상으로 조사한 결과를 바탕으로 만들어졌기 때문에, 다른 제안식에 비해 우리나라의 암반 특성을 가장 잘 반영함.
Aydan(1997)	$E_m = 0.0097 \times R^{3.54} \times 10^{-3}$ (GPa)	
Mohammad(1997)	$E_m = 0.562 \times R + 0.183$ (GPa)	

### 3. 현장시험

#### 3.1 개요

국내의 철도건설 현장 지역에서 공내재하시험 471개의 현장시험자료를 이용하여 암종별로 나타나는 변형계수를 분석하였다. 암반의 변형계수를 구하기 위하여 공내재하시험은 등압분포재하법인 Elastometer와 등변위재하법인 Goodman Jack을 이용하여 수행하였는데 시험현장의 암종별 시험분포 현황은 표 2 및 그림 2와 같다.

#### 3.2 공내재하시험

암반의 변형특성은 암반을 구성하고 있는 암석의 성질, 암반내의 불연속면, 응력상태 및 지하수에 의한 간극수압 등에 의해 좌우되는데 공내재하시험은 시추공벽의 원주전체 또는 일부를 가압하여 가압하중에 따른 공벽면의 변형량을 측정함으로써 강도 및 변형특성을 측정한다. 현장에서 사용한 등압분포재하법은 시추공내에 팽창성 고무튜브를 삽입하고 액체나 기체에 의하여 시험공의 공벽에 하중을 가하는 방법이다. 이 방법의 특징은 시추공 공벽에 하중이 가해짐에 따른 응력분포가 대칭축으로 되어 이론적으로 취급이 용이하다는 것이다. 등압분포재하법에 의한 장비로는 Elastometer, LLT, Menard Pressuremeter 등이 있으며, 국내에서는 풍화암 또는 연암정도의 암반에서는 주로 Elastometer를 주로 사용하고 있고 본 실험에서도 Elastometer를 사용하였다. 등변위재

표 2. 암종별 공내재하시험 현황

번호	분포암종		공내재하시험(회)	비율(%)
1	화성암	화강암	43	28
		반암류	28	
		화산암류	63	
2	변성암	편마암류	77	16
3	퇴적암	사암	22	56
		셰일	56	
		백운암	104	
		석회암	29	
		응회암	49	

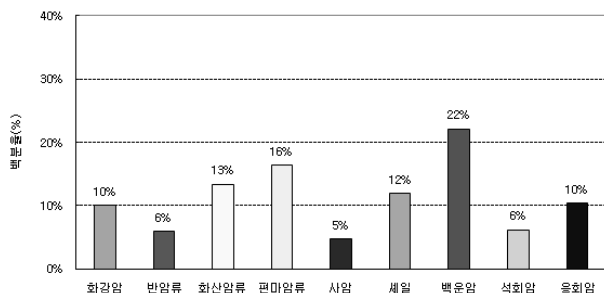


그림 2. 암종별 공내재하시험 분포

하법은 직사각형의 강재재하판을 장착한 Probe를 시추공내에 삽입하고 유압잭에 의한 재하판으로 공벽에 하중을 가하여 시행하는 방법으로 가압하중에 따른 공경변형량을 측정하는 방식이다. 이 방법은 시험할 때 지반내 응력분포가 일정하지 않으나 등압분포 재하시험 보다 큰 하중을 작용시킬 수 있다. 등변위재하법에 의한 장비로는 Goodman Jack, KKT 등이 있으며, 국내에서는 경암정도의 암반에서는 주로 Goodman Jack을 주로 사용하고 있고 본 실험에서도 Goodman Jack을 사용하였다.

#### 3.3 변형계수를 구하는 방법

##### 3.3.1 Elastometer 시험

시험하고자 하는 심도까지 손데(Sonde)를 삽입한 후 가압장치에서 Sonde 외부에 부착된 고무튜브를 팽창시키고, 이때 발생하는 공벽의 변위를 측정하는데 작성된 압력-변위량 곡선을 검토하여 이 중 초기하중 곡선의 직선구간에서 변형계수를 산정한다.

$$E_m = (1 + \nu) \cdot K_b \cdot R_m \quad (1)$$

여기서,  $E_m$ 는 변형계수( $\text{kg/cm}^2$ ),  $\nu$ 는 포아송비,  $K_b$ 는 체적탄성계수( $=d_p/d_r$ ),  $d_p$ 는 압력의 변화( $=P_y - P_o$ ),  $d_r$ 는 고무튜브 반경의 변화( $=R_y - R_o$ ),  $P_y$ 는 항복압력( $\text{kg/cm}^2$ ),  $P_o$ 는 초기압력( $\text{kg/cm}^2$ ),  $R_m$ 은  $(R_o + P_o)/2$  이다.

##### 3.3.2 Goodman Jack 시험

등변위재하법은 등분포재하법과 비교해서 큰 하중을 작용시킬 수 있는 장점을 지니고 있으며, 불균질지반이나 이방성지반의 경우에는 재하방향에 따라 시험치가 다르게 될 경우가 있기 때문에 재하방향을 결정할 때 주의를 기울여야 한다. 시험하고자하는 심도까지 Jack을 삽입한 후 유압펌프로 Jack을 벌리는데 이때 공벽의 변위는 LVDT를 통해 측정을 하며 변위-압력곡선으로부터 변형계수를 산출한다. 변형계수는 압력-공경변화량 관계곡선으로부터 탄성계수( $E$ ) 또는 변형계수( $E_m$ )은 식 (2)와 같이 구한다.

$$E; E_m = 0.86 \times K_{(\nu)} \times d \times \frac{\Delta Q}{\Delta U_d} \quad (2)$$

여기서,  $K_{(\nu)}$ 는 암반의 포아송비에 따른 보정 상수,  $d$ 는 시추공 직경,  $\Delta Q$ 는 강판에 가해지는 압력 증분이며  $\Delta U_d$ 는 공경 변화량 증분이다.

## 4. 시험결과 분석 및 고찰

본 연구는 전국의 여러 현장에서 실시한 현장시험에서 측정된 결과를 이용하여 변형계수와 RMR과의 상관관계를 파악하고 기존 제안식에 의한 추정값과 비교·분석하였다. 분석 방법은 국내 지역의 암반을 화성암, 변성암, 퇴적암으로 분류하여 분석을 실시한 후 암종을 다시 세부적으로 구분하여 적용성을 판단하였으며 추정값과 실측값에 가까운 제안식을 회귀분석으로 구하였다.

### 4.1 암종전체의 변형계수와 기존 제안식과 비교

본 연구에서 실시한 471개의 공내재하시험 결과를 이용하여 암종 전체의 변형계수 측정값과 기존의 제안식에 의한 추정값을 비교해본 결과 그림 3과 같다. 현장시험 결과와 기존제안식을 비교 한 결과 RMR 40 이하에서는 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과 비교적 잘 일치하고 있으나 40 이상에서는 RMR이 증가하면서 측정값이 제안식보다 낮게 분포하는 경향을 나타내고 있다. RMR 전 범위에서는 RMR과의 상관계수( $R^2$ )는 0.286 내외의 범위를 보인다. 이것은 기존 제안식들을 시험결과에 암종 구분 없이 적용하는 것은 무리가 있음을 나타낸다. 암석 전체 공내재하시험을 통한 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 지수함수 형태로 표현하였으며 상관 관계식은 식 (3)과 같다.

$$E_m = 976.39 \text{EXP} 0.0359 * \text{RMR} (\text{MPa}) \quad (3)$$

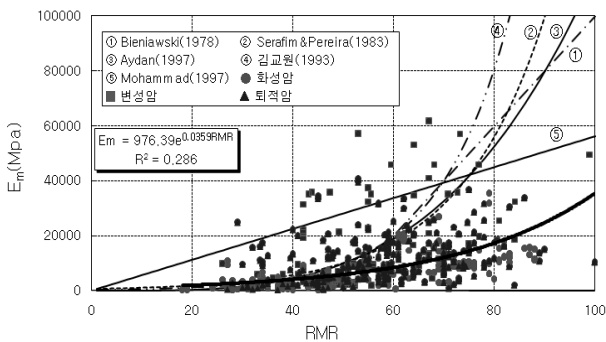


그림 3. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(암종 전체)

### 4.2 화성암의 변형계수와 기존 제안식과 비교

본 연구에서 실시한 134개의 공내재하시험 결과를 이용하여 화성암의 변형계수 측정값과 기존의 제안식에 의한 추정값을 비교해본 결과는 그림 4와 같다. RMR 40~50 이하 범위에서는 김교원, Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과

비교적 잘 일치하고 있으나 그 이상에서는 RMR이 증가하면서 측정값이 제안식보다 낮게 분포하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 RMR값 분류방법 중 일축압축강도의 배점이 낮으며 암석의 종류에 대한 영향을 고려하고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다. 전반적으로 RMR과의 상관계수( $R^2$ )는 0.52 내외의 범위를 보이면서 기존의 제안식은 암종 전체와 비교했을 때보다 상관관계가 크게 증가하였다.

화성암의 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (4)와 같다.

$$E_m = 439.95 \text{EXP} 0.0429 * \text{RMR} (\text{MPa}) \quad (4)$$

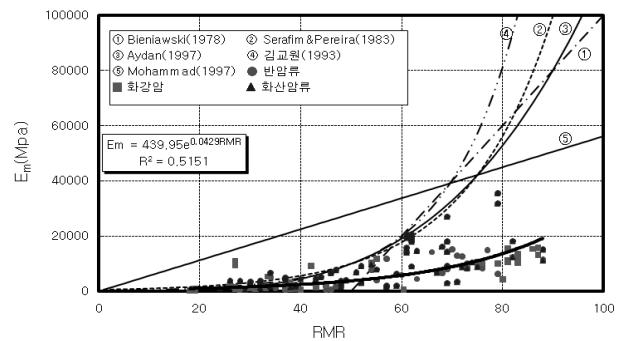


그림 4. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(화성암)

#### 4.2.1 화강암

화강암에서 시행한 43개의 공내재하시험 측정값을 비교한 결과 RMR이 35 이하에서는 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과 거의 일치하고 있으나 RMR값이 35 이상부터는 기존 제안식과 유사한 증가경향을 나타내지만 증가에 따른 측정값이 상대적으로 낮은 경향을 나타냈다(그림 5).

화강암의 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (5)와 같다.

$$E_m = 405.49 \text{EXP} 0.0405 * \text{RMR} (\text{MPa}) \quad (5)$$

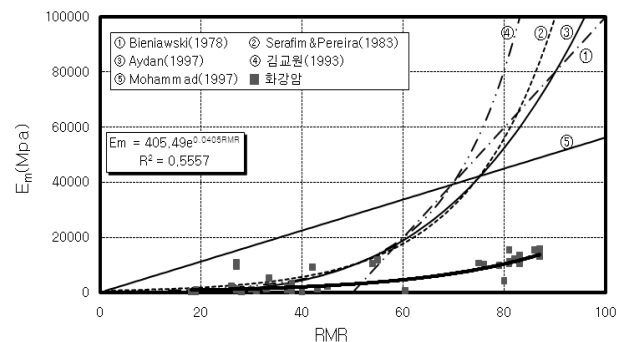


그림 5. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(화강암)

#### 4.2.2 반암

반암류에서 시행한 28개의 공내재하시험 측정값을 비교한 결과 전반적으로는 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과 유사한 증가경향을 나타내지만 RMR증가에 따른 측정값이 그림 6에 나타난 바와 같이 상대적으로 낮은 경향을 보였다. 반암류의 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (6)과 같다.

$$E_m = 108.41 \text{EXP}0.0607 * \text{RMR}(\text{MPa}) \quad (6)$$

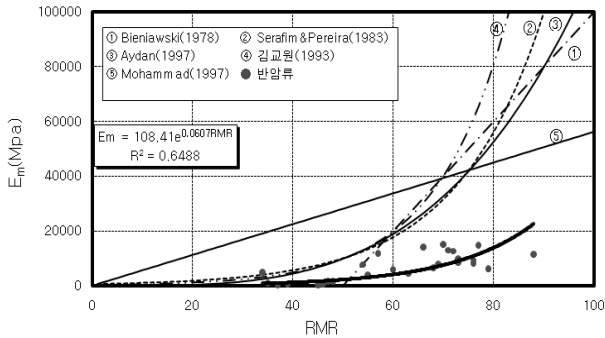


그림 6. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(반암류)

#### 4.2.3 화산암

화산암에서 시행한 63개의 공내재하시험 측정값을 비교한 결과 그림 7에 나타난 바와 같이 RMR이 40 이하에서는 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과 거의 일치하고 있으나 RMR값 40 이상부터는 기존 제안식과 유사한 증가경향을 나타내지만 증가에 따른 측정값이 상대적으로 낮은 경향을 보였다. 화산암의 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (7)과 같다.

$$E_m = 685.58 \text{EXP}0.0401 * \text{RMR}(\text{MPa}) \quad (7)$$

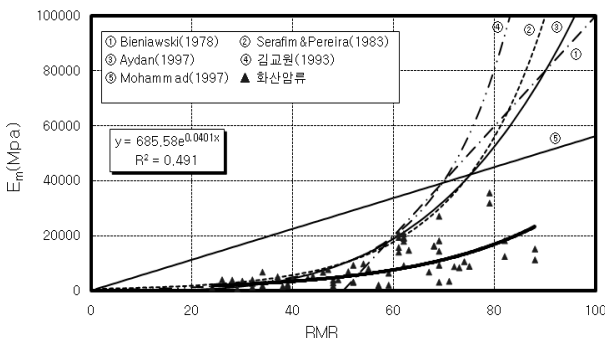


그림 7. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(화산암)

#### 4.3 변성암의 변형계수와 기존 제안식과 비교

본 연구에서 실시한 변성암의 77개의 공내재하시험 결과

를 이용하여 변형계수 측정값과 기존의 제안식에 의한 추정값을 비교한 결과 그림 8과 같다. 상대적으로 변성암이 화성암 및 퇴적암 보다는 기존의 제안식과 유사한 경향을 보여주고 있다. 전체적으로 약 RMR 45~50 이하에서는 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과 일치하고 있으나 약 50 이상에서는 RMR이 증가하면서 측정값이 제안식보다 낮게 분포하는 경향을 나타내고 있다. 전반적으로 RMR과의 상관계수( $R^2$ )는 0.2573 내외의 범위를 보인다. 변성암의 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (8)과 같다.

$$E_m = 1049.6 \text{EXP}0.0415 * \text{RMR}(\text{MPa}) \quad (8)$$

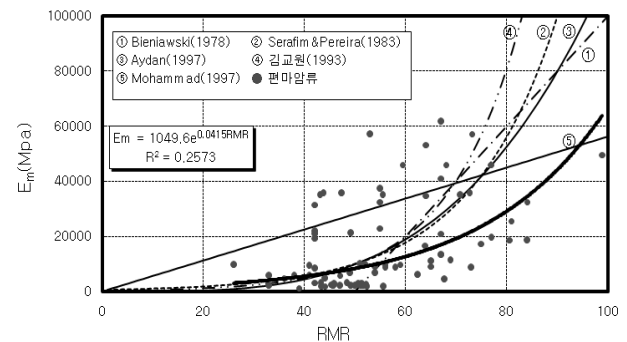


그림 8. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(변성암, 편마암)

#### 4.4 퇴적암의 변형계수와 기존 제안식과 비교

본 연구에서 실시한 260개의 공내재하시험 결과를 이용하여 퇴적암의 변형계수 측정값과 기존의 제안식에 의한 추정값을 비교한 결과는 그림 9와 같다. 전체적으로 RMR 40 이하에서는 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과 잘 일치하거나 높게 나타나고 있으며 40 이상에서는 RMR이 증가하면서 측정값이 제안식보다 낮게 분포하는 경향을 나타내고 있다. 모든 측정값에 대하여서는 RMR과의 상관계수( $R^2$ )는 0.1636 내외의 낮은 범위를 보이며 데이터의 분산이 크다. 퇴적암의 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (9)와 같다. 퇴적암의 경우에는 기존의 제안식이나 본 논문에서 회귀 분석한 회귀분석식과도 다른 암종보다 실험결과의 편차가 커서 상관관계가 낮으므로 일정한 제안식을 제안하기는 어렵다고 판단되나 퇴적암 중 사암은 비교적 상관관계가 높은 것으로 나타났으며 기존의 제안식보다 상관관계가 높게 나타났다.

$$E_m = 1962.1 \text{EXP}0.0255 * \text{RMR}(\text{MPa}) \quad (9)$$

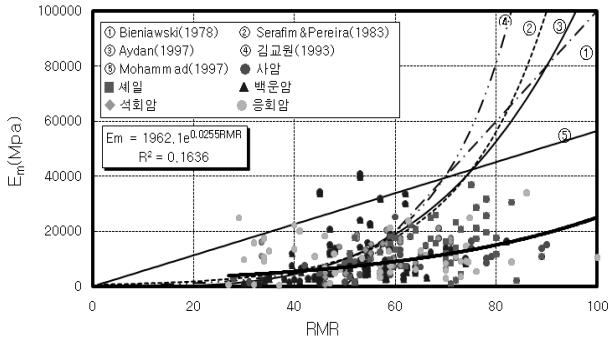


그림 9. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(퇴적암)

#### 4.4.1 사암

사암에서 시행한 22개의 공내재하시험 측정값을 비교한 결과 그림 10에 나타난 바와 같이 RMR이 40 이하에서는 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과 잘 일치하고 있으나 RMR값 40 이상부터는 기존 제안식과 유사한 증가경향을 나타내지만 증가에 따른 측정값이 상대적으로 낮은 경향을 보였다. 사암의 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (10)과 같으며 상관관계  $R^2$ 는 약 0.52로 암종 전체와 비교한 값보다 크며 다른 암종보다도 크게 나타났다.

$$E_m = 674.06 \text{EXP}0.0379 * \text{RMR} (\text{MPa}) \quad (10)$$

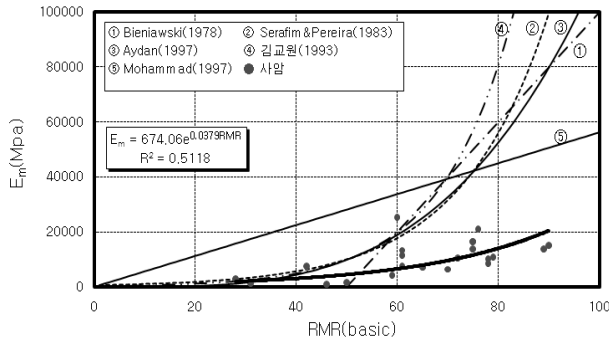


그림 10. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(사암)

#### 4.4.2 셰일

셰일에서 시행한 56개의 공내재하시험 측정값을 비교한 결과 RMR이 대부분 40 이상이며 50 이상의 값에서는 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과 경향은 일치하나 RMR값 45~50 범위 이상부터는 기존 제안식과 유사한 증가 경향을 나타내지만 증가에 따른 측정값이 상대적으로 낮은 경향을 보였다(그림 11). 셰일의 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (11)과 같고 상관계수 값은 아주 낮게 나타났다.

$$E_m = 2426.0 \text{EXP}0.0238 * \text{RMR} (\text{MPa}) \quad (11)$$

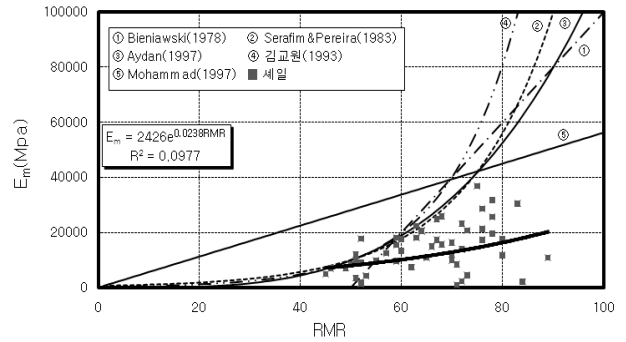


그림 11. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(셰일)

#### 4.4.3 백운암

백운암에서 시행한 104개의 공내재하시험 측정값을 비교한 결과 그림 12에 나타난 바와 같이 RMR이 40~45 이하에서는 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과 비교적 잘 일치하지만 RMR값 45 이상부터는 기존 제안식과 유사한 증가경향을 나타내지만 증가에 따른 측정값이 상대적으로 낮은 경향을 나타냈다. 백운암의 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (12)와 같다.

$$E_m = 1035.4 \text{EXP}0.0364 * \text{RMR} (\text{MPa}) \quad (12)$$

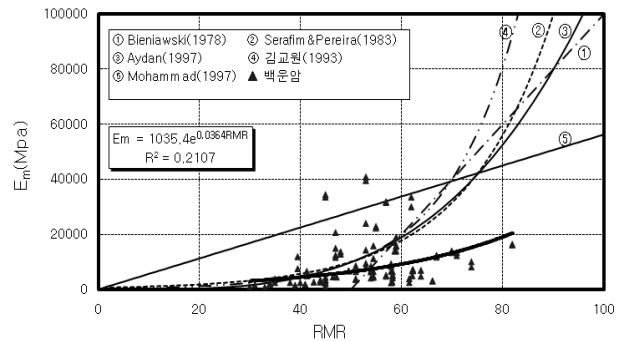


그림 12. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(백운암)

#### 4.4.4 석회암

석회암에서 시행한 29개의 공내재하시험 측정값을 비교한 결과 RMR이 45 이하에서는 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereira의 제안식과 비교적 잘 일치하거나 높게 나타나고 있으나 RMR값 45 이상부터는 기존 제안식과 유사한 증가경향을 나타내지만 증가에 따른 측정값이 상대적으로 낮은 경향을 보였다(그림 13). 석회암의 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (13)과 같다.

$$E_m = 1939.6 \text{EXP}0.0302 * \text{RMR} (\text{MPa}) \quad (13)$$

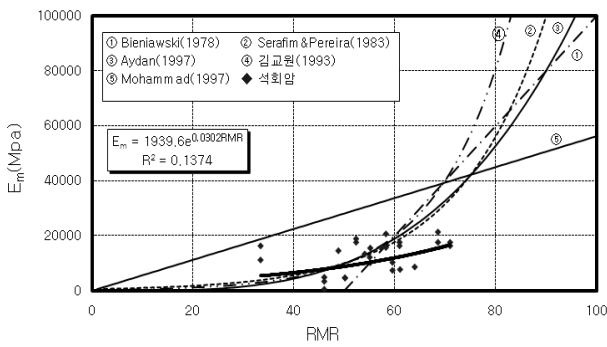


그림 13. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(석회암)

#### 4.4.5 응회암

응회암에서 시행한 49개의 공내재하시험 측정값을 비교한 결과 그림 14와 같이 RMR이 45 이하일 때 측정값이 김교원과 Aydan, Serafim과 Pereir의 기존 제안식보다 높게 측정되었다. 45 이상일 때 측정값이 기존 제안식보다 작게 측정되었으며 제안식 중 Mohammad식과 같은 선형적 경향을 보였으나 특정의 제안식으로 표현하기에는 무리가 있다. 변형계수와 RMR과의 상관관계를 분석한 결과 RMR의 상관관계식은 식 (14)와 같으며 분산이 커서 상관관계가 매우 작다.

$$E_m = 4056.1 \text{EXP}0.0125 * \text{RMR} (\text{MPa}) \quad (14)$$

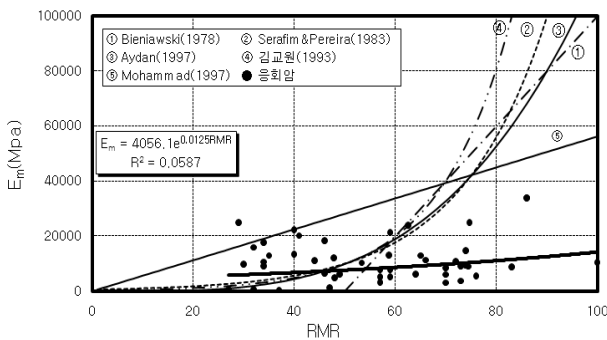


그림 14. 변형계수 측정값과 기존 제안식의 비교(응회암)

### 4.5 변형계수와 RMR과의 상관성평가

본 연구 대상지역인 10개 현장에서 실시한 현장시험에서 취득한 자료를 활용해 암종별 변형계수와 RMR 값과의 상관성 분석을 실시하여 변형계수에 대한 제안식을 도출하였다. 산정된 변형계수는 전체 암종  $E_m = 976.4 \text{exp}0.0359 * \text{RMR}$ 로 상관계수( $R^2$ )는 0.286로 산정되었으며, 암종별 변형계수 산정식은 표 3과 같다.

본 연구에서 변형계수 및 강도정수를 비교 분석한 결과

표 3. 암종별 RMR과 변형계수와의 상관관계식

암종	변형계수 관계식( $E_m$ )	상관계수( $R^2$ )	
암종 전체	$976.4 \text{EXP}0.0359 * \text{RMR}$	0.2860	
화성암	화강암 전체	$439.9 \text{EXP}0.0429 * \text{RMR}$	0.5151
	화강암	$405.5 \text{EXP}0.0405 * \text{RMR}$	0.5557
	반암류	$108.4 \text{EXP}0.0607 * \text{RMR}$	0.6488
	화산암류	$685.6 \text{EXP}0.0401 * \text{RMR}$	0.4910
변성암	편마암	$1049.6 \text{EXP}0.0415 * \text{RMR}$	0.2573
	퇴적암 전체	$1962.1 \text{EXP}0.0255 * \text{RMR}$	0.1636
퇴적암	사암	$674.1 \text{EXP}0.0379 * \text{RMR}$	0.5118
	세일	$2426.0 \text{EXP}0.0238 * \text{RMR}$	0.0977
	백운암	$1035.4 \text{EXP}0.0364 * \text{RMR}$	0.2107
	석회암	$1939.6 \text{EXP}0.0302 * \text{RMR}$	0.1374
	응회암	$4056.1 \text{EXP}0.0125 * \text{RMR}$	0.0587

RMR과 변형계수와의 상관성은 비교적 큰 것으로 분석되었으나 상관계수가 0.286으로 나타나 변형계수의 예측을 위해 RMR을 이용하는 방법은 모든 암종에 한 제안식을 적용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 또한 기존 제안식의 경우 추정값이 RMR이 40 이상에서는 측정값에 비해 과다하게 산정되는 경향을 보이고 있어 국내암반에 적용하는 것은 부적절한 것으로 판단되었다. 퇴적암의 경우에는 기존의 제안식이나 본 논문의 회귀분석식과도 다른 암종보다 실험결과의 편차가 커서 상관관계가 낮으므로 일정한 제안식을 제안하기는 어렵다고 판단된다. 퇴적암 중 사암은 비교적 상관계수가 크게 나타났으며 백운암, 석회암, 세일, 응회암 순으로 상관관계가 큰 것으로 나타났지만 석회암 및 세일, 응회암은 어떤 제안식을 제안하기에는 데이터의 분산이 심한편이다. 이러한 결과는 RMR 분류 시 주어지는 배점이 일축압축강도나 RQD와 같이 상관관계가 좋은 항목보다 절리상태, 절리간격 등에 상대적으로 많은 가중치를 부여하는 요인과 암반의 풍화도, 암석의 종류, 기술자의 개인오차 등에 의한 RMR의 정성적인 평가가 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 따라서 암반의 특성을 고려한 변형계수 및 강도정수의 추정방법을 도출하기 위해서는 향후 보다 많은 양질의 자료를 축적하고 정성적이고 새로운 정밀분석 접근이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 국내 10개소의 철도건설현장에서 수행한 공내재하시험에 의해 측정된 변형계수와 RMR과의 상관성을 분석하여 암종별 변형계수 산정식을 제안하였다. 기존 제안식의 적용성을 비교분석한 결과 RMR값의 일정부분에서는 기

존 제안식과 잘 일치하지만 다른 범위에서는 잘 일치하지 않는다. 암종별로 변형계수와 RMR과의 관계를 세분화하여 기존의 방법보다 잘 일치하는 제안식을 제안하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전체암석에 대한 변형계수( $E_m$ )와 RMR의 상관성 분석 결과 변형계수의 RMR 지수함수형태의 상관관계식은  $E_m = 976.39 \exp(0.0359 \cdot RMR(\text{MPa}))$ 로 나타났다
- (2) RMR을 이용한 기존의 변형계수 제안식은 대부분 RMR 값 약 40 이상에서는 과대 예측되는 경향을 보이고 있어 국내 암반에 적용하는 것은 적합하지 않은 것으로 판단된다.
- (3) 퇴적암 중 사암은 비교적 상관계수가 크게 나타났으며 백운암, 석회암, 셰일, 응회암 순으로 상관관계가 큰 것으로 나타났지만 석회암 및 셰일, 응회암은 어떤 제안식을 제안하기에는 데이터의 분산이 심한편이다.
- (4) 절리 간격과 절리 상태의 경우 암반 변형계수와 상관성이 비교적 높은 것으로 예상되었으며, 일축압축강도는 변형계수와 밀접한 관계가 있음에도 불구하고 RMR 값에 미치는 배점이 적기 때문에 상관성이 낮았다. 또한 지하수의 경우 시추자료로 변형계수를 평가하는데 한계가 있을 것으로 사료되어 평가에서 제외시키는 것이 합리적일 것으로 판단된다.
- (5) 암석의 종류 및 조건에 따라 RMR과 변형계수의 관계는 서로 상이할 수 있으며 경우에 따라서 다른 정수에 따라 좌우될 수도 있음을 알 수 있다. 기존의 암석의 종류를 고려하지 않는 제안식 보다는 암석의 종류를 고려한 제안식이 잘 일치한다.

## 참 고 문 헌

1. 김교원(1993), 지공학적 암반분류의 재평가, *분학술발표대회논문집*, 한국지반공학회, pp. 33~40.
2. 노양섭(2004), *현장암반의 변형계수와 RMR의 상관성*, 석사학위논문, 단국대학교, pp. 10~52.
3. 윤지선 역(1992), *암석역학*, 구미서관, pp. 121~124.
4. 정상훈(2005), *공내재하시험결과를 이용한 암반의 변형계수 추정방법*, 석사학위논문, 한양대학교, pp. 16~33.
5. Aydan, O., Akagi, T. and Kawamoto, T.(1993), The Squeezing Potential of Rocks around Tunnels, Theory and Prediction, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 262, No. 2, pp. 137~163.
6. Bieniawski, Z. T.(1978), Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories, *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics*, Vol. 15, pp. 237~247.
7. Bieniawski, Z. T.(1989), *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., pp. 51~64.
8. Hoek, E. and Brown, E. T.(1988), The Hoek-Brown Failure Criterion a 1988 Update, *Proc. of 15th Canadian Rock Mech. Symp., Rock Engineering for Underground Excavations*, 1082, pp. 31~38.
9. Mohammad, N., Reddish, D. J. and Stace, L. R.(1997), The Relation between In Situ and Laboratory Rock Properties used in Numerical Modelling (Technical Note), *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics. Abstract*. Vol. 34, No. 2, pp. 289~297.
10. Nicholson, G. A. and Bieniawski, Z. T.(1990), A Nonlinear Deformation Modulus Based on Rock Mass Classification, *International Journal of Mining and Geological Engineering*, pp. 181~202.
11. Rocha, M.(1974), Present Possibilities of Studying Foundations of Concrete Dams, *Proceedings of the 3rd International Congress on Rock Mechanics*, Vol. 1A, Denver, Colorado, pp. 879~896.
12. 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*, Laboratory National Engineering Civil, Lisbon, Portugal, Vol. 1(II), pp. 33~44.

(접수일: 2010. 4. 8 심사일: 2010. 5. 18 심사완료일: 2010. 10. 14)