

# 공내재하시험에 의해 측정된 암반의 변형계수와 기존의 주요 변형계수 추정식의 상관성 평가

안경철, 신재근, 정상훈 (태조엔지니어링)  
천병식, 이용재 (한양대학교)

## 1. 서 론

암반의 변형계수를 예측하는 방법으로 RMR을 이용한 추정식이 많이 적용되고 있다. 하지만 이들 추정식들의 경우 대부분 외국 암반에 대한 측정치나 사례 분석 및 역해석에 의해 제안된 경험식들로서 국내 암반의 암종 및 절리, 강도특성, 변형특성 등이 적절히 반영되지 못하고 있다고 판단되며, 국내의 경우 김교원(1993) 등이 수정된 RMR값을 이용한 관계식을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 RMR을 이용한 여러 가지 변형계수 추정식들의 국내 암반에 대한 적용성을 평가하기 위해 공내재하시험으로 측정된 변형계수와 상관성 분석을 실시하였다. 그리고 일축압축강도, RQD, 절리상태 및 절리간격, 지하수의 상태 등 RMR 분류에 적용되는 주요 분류요소 및 측정 심도 등을 독립변수로 가정하여 변형계수와 상관성을 비교 분석하였다. 이를 통해 RMR을 이용한 변형계수 예측시의 문제점과 주요 암반 특성치들이 변형계수에 미치는 영향을 간접적으로 파악하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 RMR 분류

표 1. RMR 분류 평점 비교

변 수	최 대 평 점		비 고
	1976년	1989년	
무결암강도	15	15	* Bieniawski가 발표한 1976년 RMR 분류에서는 암반은 완전히 건조한 상태로 가정하고 있으며 지하수상태의 평점이 10점으로 되어 있음.
RQD	20	20	
절리간격	30	20	
절리상태	25	30	
지하수상태	10	15	
총 점	100	100	

Bieniawski(1976)는 지반역학적 암반분류법 또는 RMR(Rock Mass Rating)으로 지칭되는 암반분류법을 발표하였다. 이후 여러 해 동안 이 분류체계는 더 많은 현장사례들을 참고하여 계속해서 개정(1973, 1974, 1976, 1979, 1989)되어, 평점부여 가중치가 변경되었고 대표적인 평점비교표를 표 1에 수록하였다. 주목할 부분은 지하수의 평가로서 76년에는 완전히 건조한 상태로 가정하여 무조건 10점이 할당되었으나, 79년부터는 15점으로 값이 할당되고 지하수 유출상태에 따라 배점을 달리하였다.

따라서, RMR 값을 이용한 변형계수의 추정 등 다양한 활용을 위해서는 어떻게 분류할 것인가를 결정해야하는데 본 논문에서는 RMR<sub>90</sub>를 이용하여 암반분류를 수행하였다.

## 2.2 원위치 변형계수의 추정

암반의 원위치 변형계수는 모든 유형의 수치해석과 지하공동 주변에서 예측된 변형의 해석에 있어서 중요한 변수이다. 이 변수를 현장에서 측정하는 것은 매우 어렵고 또한 비용이 많이 소요되기 때문에 암반분류를 이용하여 원위치 변형계수를 추정하는 방법들의 개발이 시도되고 있다.

1960년대에는 Deere의 RQD를 사용하여 원위치 변형계수( $E_m$ )를 추정하는 방법들이 제안되었으나 이 방법들은 오늘날 거의 사용되지 않는다.

Bieniawski(1978)는 수많은 현장 사례분석을 수행하여 RMR로부터 원위치 변형계수 추정을 위해 관계식  $E_m=2RMR-100$  (GPa)을 제안하였다. 그 외 댐기초 예측변위를 이용하여 변형계수를 역산한 Serafim & Pereira(1983)와 Q값을 이용하여 예측된 변위와 예측한 변위가 상당히 일치하는 것으로 Barton 등 (1980, 1992, 1993)은 보고하였다.

표 2는 RMR을 이용하여 암반의 변형계수를 추정하는 대표적인 제안식들을 정리한 것으로 본 논문에서는 Q값은 제외하고 RMR값만을 활용하였다.

표 2. RMR을 이용한 주요 변형계수 추정식

제안자	주요 입력값	추정식	특이사항
Bieniawski(1978)	RMR	$E_m=2RMR-100$ (GPa)	RMR>50인 경우 적용
Serafim & Pereira(1983)	RMR	$E_m=10^{(RMR-10)/40}$ (GPa)	RMR<50인 경우 적용
김교원(1993)	수정 RMR	$E_m=300 \times \text{Exp}(0.07RMR) \times 10^{-3}$ (GPa)	RMR분류법에서 지하수, 불연속면 방향의 영향 제외
Aydan(1997)	RMR	$E_m=0.0097 \times RMR^{3.54} \times 10^{-3}$ (GPa)	-
Mohammad(1997)	RMR	$E_m=0.562 \times RMR + 0.183$ (GPa)	-

\* 비 고 : RMR 산정시 방향성은 고려하지 않음

## 2.3 기존 변형계수 추정식의 문제점

RMR 분류는 Bieniawski(1978)의 추정식이 발표된 시기의 RMR 배점방식과 1989년에 발표된 배점방식에 차이가 있음에도 불구하고 추정식이 개선되지 않고 있어 산정된 값의 차이가 있을 수

있다. 또한 평점 부여시 주관적인 판단에 따른 개인 오차, 각 분류 요소들의 가중 점수에 대한 객관성 부족, 각 분류 인자의 특성치를 일정 범위로 구분하여 점수를 부여함으로 인해 그 범위 안에 속하는 최대값과 최소값간의 차이를 합리적으로 반영하지 못하는 등의 불합리성을 내포하고 있다는 문제점을 가지고 있다. 특히, RMR 값 이용시 지하수상태와 불연속면 방향이 보정된 값의 적용여부에 따라서도 암반물성은 다르게 평가될 수 있으므로 주의가 필요하다. 한편, RMR 값에 암반의 구속응력 상태나 풍화도 등과 같이 변형계수에 영향을 미치는 요소 등이 합리적으로 반영되지 않는 등의 문제점은 암반의 변형계수 예측시 근본적인 오류를 내포하고 있을 가능성도 배제할 수 없다고 생각된다.

### 3. 측정값과 추정식의 비교 및 적용성 평가

#### 3.1 공내재하시험을 통한 변형계수 측정

본 연구에 이용된 자료는 국내 8개 현장에서 실시한 공내재하시험의 결과로 응회암, 세일, 사암 등의 퇴적암과 화강암, 안산암 등의 화성암, 그리고 편마암 및 화강편마암 등의 변성암 등 총 7가지 암종으로 그 분포가 다양하였다. 그러나 사암 및 세일의 경우 데이터 수가 부족하여 분석에서 제외하였으며, 화성암과 변성암 중에서 자료의 수가 많은 화강암, 안산암 그리고 편마암에 대해서 분석을 수행하였다.

#### 3.2 측정값과 추정식의 비교

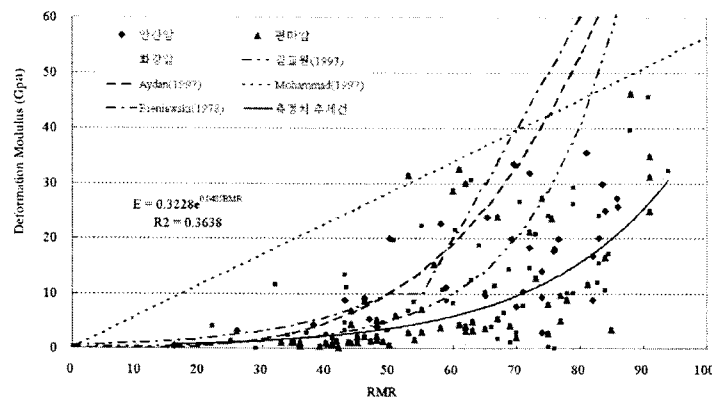


그림 1. 변형계수 추정값과 측정값의 비교(전체)

그림 1에 측정자료 전체의 변형계수 분포와 RMR이 적용된 변형계수 제안식들을 나타내었다. RMR과 암반 변형계수는 양(+)의 상관관계를 보이고 있으며, 이는 기존의 연구 결과들과도 유사한 경향을 보인다. 하지만 대부분의 측정값이 기존 제안식들에 의한 추정값보다 낮게 나타남을 알 수 있다. RMR 값이 50이하인 경우, 김교원(1993)과 Aydan(1997)의 제안식이 비교적 측정값과 유사한 경향을 가지며, RMR 값이 50이상인 경우에는 기존 제안식들에 의한 추정값이 상당히 크게 예측하고 있다는 점을 알 수 있다. 특히, Mohammad(1997)의 제안식은 RMR 값이 50이하인 경우에는 타 제안식에 비해 상당히 큰 값을 예상하고 있으며, 50이상인 경우에는 중간정도의 값을 예측하고 있어 실제로 적용하는 데에는 신중한 판단이 필요할 것으로 생각된다.

### 3.3 암종별 적용성 검토

암종별 RMR과 변형계수의 상관관계를 그림 2에 나타내었다.

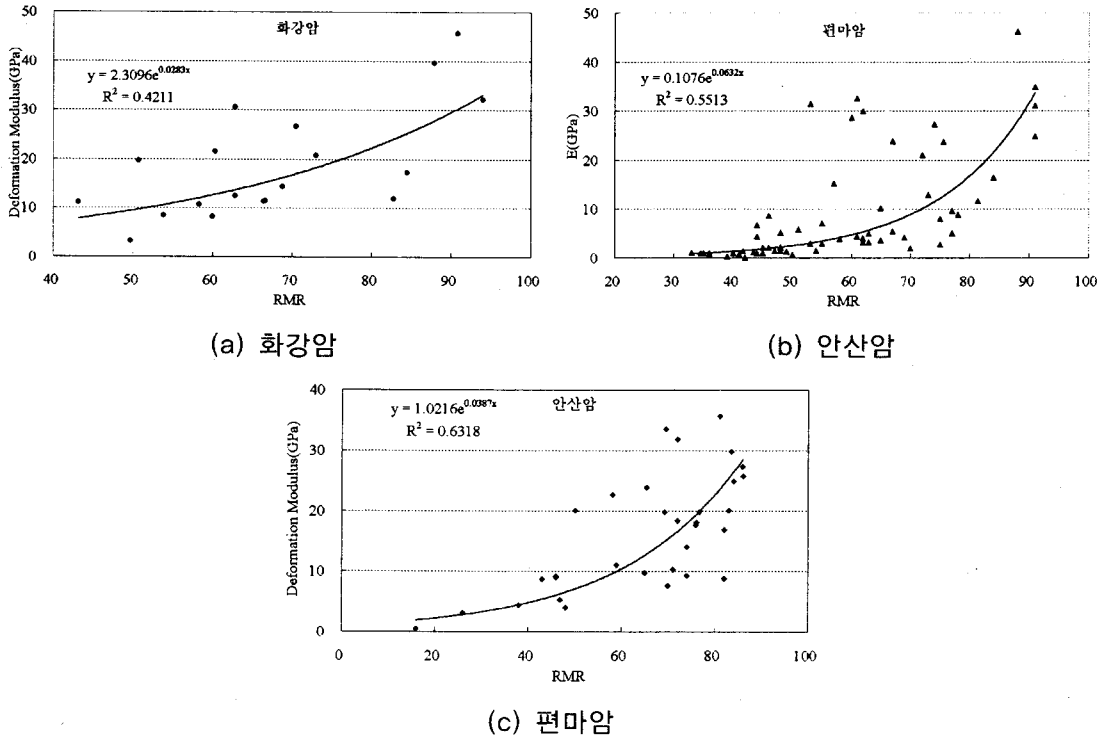


그림 2. 암종별 RMR과 변형계수의 상관관계

그림 2(a)는 화강암만의 자료로서 RMR과 변형계수 관계를 단순회귀분석을 통해 분석한 결과 전체 상관계수가 0.42 정도로 나타나 비교적 신뢰도가 떨어지는 것으로 분석되었으나 그림 2(b) 및 (c)와 같이 안산암이나 편마암은 대체적으로 RMR값이 증가함에 따라 변형계수도 증가하는 경향을 보였고 상관계수가 0.63 및 0.55로서 화강암보다 비교적 상관성이 큰 것으로 분석되었다. 이러한 영향은 성인에 의한 암종특성이기 보다는 현장 암반특성에 따른 분산으로 이해하는 것이 올바른 것으로 판단된다.

### 3.4 RMR 분류항목과 변형계수의 상관성 분석

변형계수와 RMR 분류항목의 비교를 하기 전에 자료의 신뢰도를 확인하기 위한 유효성 검토 차원에서 RMR값과 분류항목간의 상관성 분석이 선행되어야 할 것으로 판단되어 다음과 같이 검토하였다.

#### 3.4.1 RMR값과 분류항목의 상관성 분석

RMR값에 미치는 분류항목별 영향을 검토하기 위해서는 자료의 질이 우선 확보되어야 한다. 따라서 본 검토에서는 상기 자료 중에서 비교적 양호한 경향을 보이는 안산암 자료를 기준으로 검토하였다.

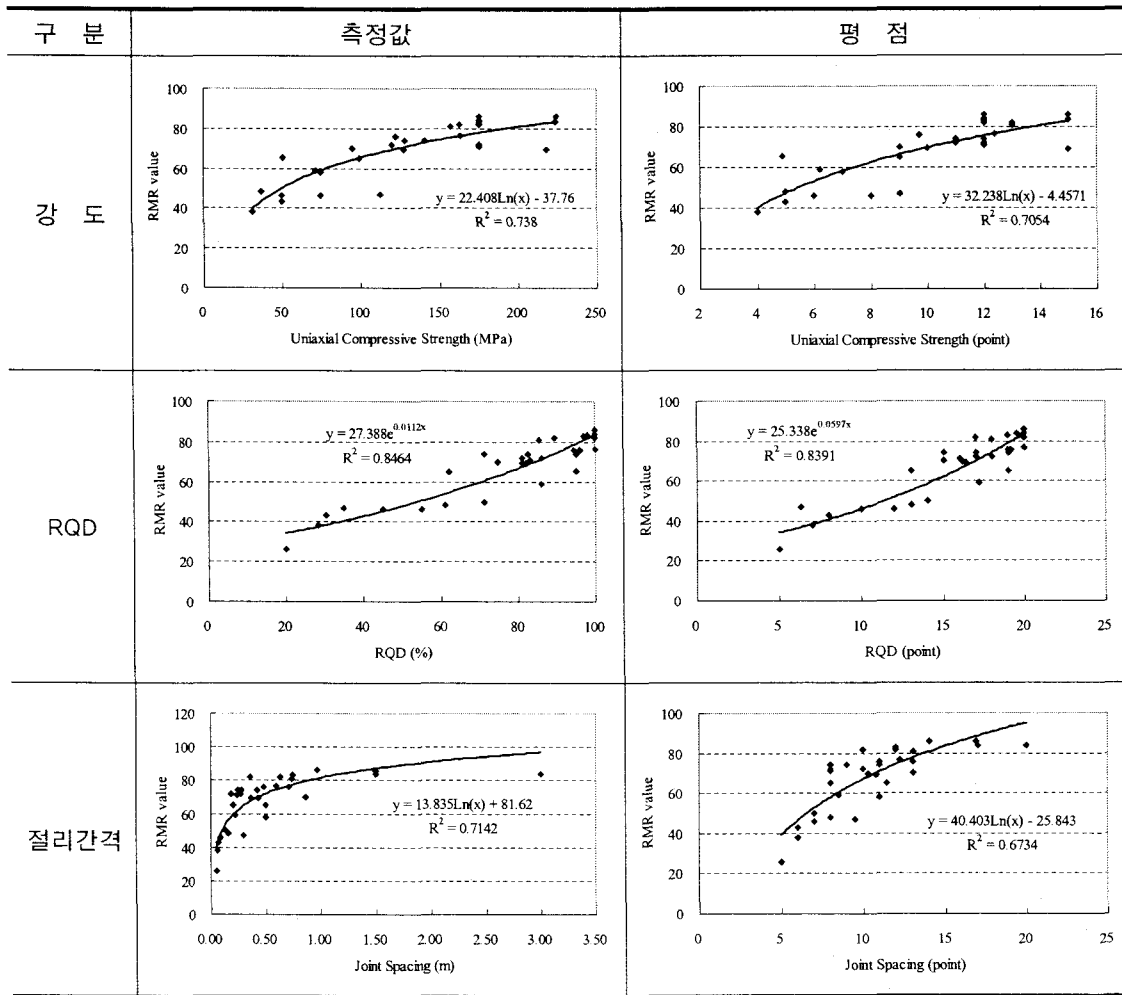


그림 3. RMR 분류항목과 RMR값의 상관관계 (1)

표 1을 참조하면 RMR분류 항목별 RMR값에 영향을 미치는 산술적인 의미는 절리면 상태가 30점으로서 30%를, RQD 및 절리간격이 20%의 영향이 있으며, 일축압축강도는 15점에 불과함을 알 수 있다. 즉, 전체적인 RMR값은 불연속면을 어떻게 평가하느냐가 좌우한다고 해도 과언이 아니다. 또한, 각각의 분류항목별 RMR값과의 상관성분석을 수행한 결과 그림 3과 같이 지수함수, 로그함수, 일차함수 등의 분포특성을 보임을 알 수 있다. 다만 항목별로 조사의 성격이 정량적인 항목과 정성적인 항목이 있으므로 절리상태 및 지하수는 점수로 표현하였으며, 일축압축강도, RQD, 절리간격은 정량적 측정자료로서 활용하는 것이 신뢰성이 증가하는 것으로 나타났다.

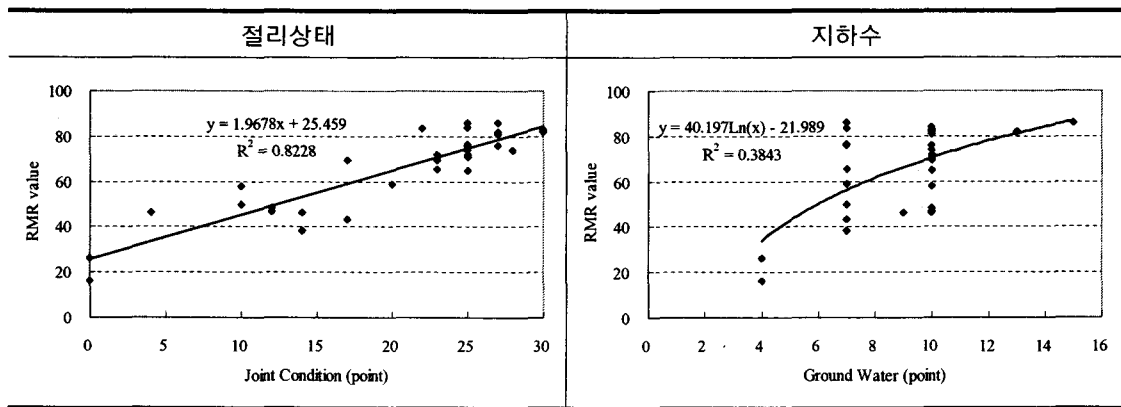


그림 3. RMR 분류항목과 RMR값의 상관관계 (2)

검토결과, 본 연구에 사용한 자료는 항목별로 RMR값에 합리적으로 적용된 것으로 사료되며, 변형계수와 각각의 항목을 검토하는데 충분한 가치가 있는 것으로 판단된다. 그러나, 지하수의 경우 시추자료로 RMR을 평가하는 것은 한계가 있을 것으로 사료되므로 RMR<sub>76</sub> 또는 김교원의 연구에서와 같이 배제(또는 통일)하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

### 3.4.2 RMR 분류항목과 변형계수 상관성 분석

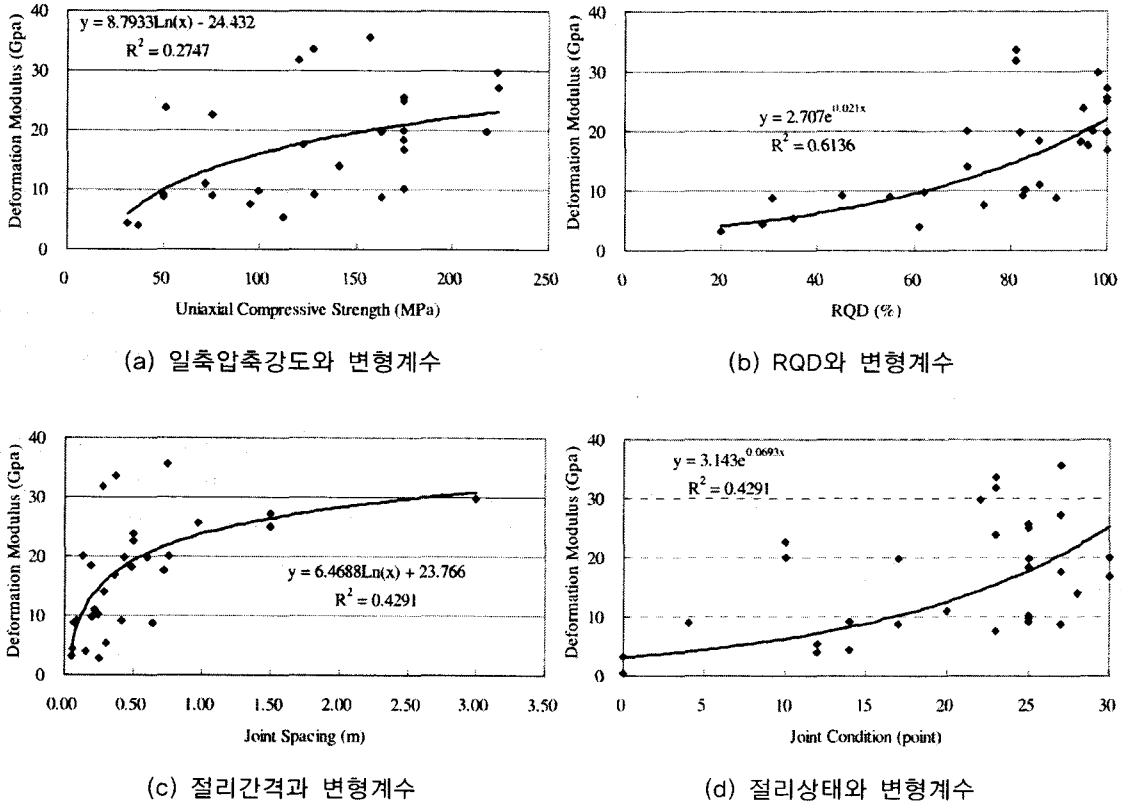


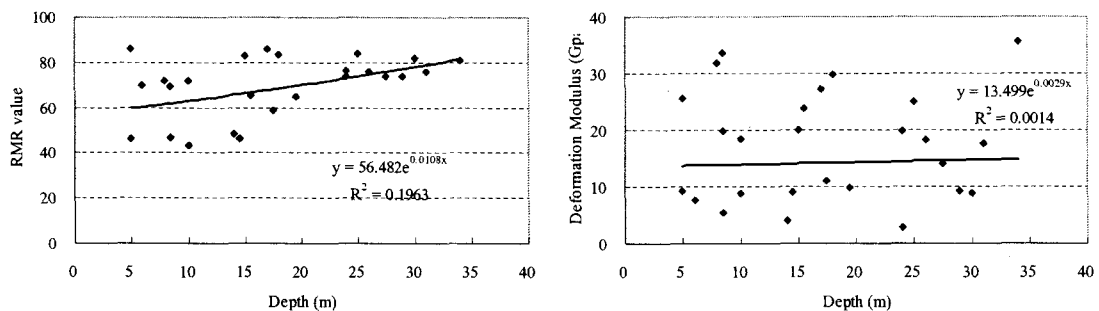
그림 4. RMR 분류항목과 변형계수의 상관관계

그림 4는 RMR 분류항목과 변형계수와의 관계를 나타낸 것으로 RMR 값과의 상관성보다 많이 떨어지고 있음을 알 수 있다. 이는 그림 2의 결과와 같이 RMR 값과 변형계수의 상관성이  $R^2=0.63$ 인 자료로 세부 항목을 검토함에 상관성(Relative error)이 누적되어 신뢰도가 떨어진 것으로 판단된다. 따라서 각각의 분류항목과 변형계수 관계를 정의하긴 어려우나 RQD만큼은 확실한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있으므로 예비설계단계에서 시추조사에 의한 RQD만으로도 암반의 상태 및 변형계수를 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나, 본 연구에서 검토한 일축압축강도와 변형계수와의 상관관계를 주의 깊게 살펴보면 다른 분류항목에 비하여 유난히 신뢰도가 낮은 것으로 나타난다. 이는 3.4.1에 언급한 내용과 같이 RMR값을 산정하는데 있어서 일축압축강도의 영향이 매우 적기 때문인 것으로 표 3에 보인 바와 같이 일축압축강도의 범위에 비하여 배점 차이는 3점(예 : 10MPa=12점, 25MPa=15점)에 불과하기 때문에 RMR값에 미치는 영향이 적은 것으로 비춰지나 탄성학적으로 변형계수와 일축압축강도는 매우 밀접한 관계가 있으므로 암반의 변형계수와 일축압축강도의 상관성을 높이기 위해서는 일축압축강도의 배점에 신경을 써야하며, 일축압축강도 측정시 주의가 필요함을 암시하고 있다고 할 수 있다.

표 3. 무결암강도의 RMR 분류 평점

구 분		범위 (MPa)						
무결암 강 도	점하중 강도지수	>10	4~10	2~4	1~2	이 범위에서는 일축압축강도 측정이 필요		
	일축압축 강 도	>250	100~250	50~100	25~50	5~25	1~5	<1
평 점		15	12	7	4	2	1	0



(a) 측정심도와 RMR값

(b) 측정심도와 변형계수

그림 5. 측정심도와 변형계수의 상관관계

또한, 암반의 변형계수는 암반내 작용 응력 상태에도 영향을 받을 수 있으며, RMR 분류시 고려되지 않은 측정 심도와 암반의 변형계수의 상관성을 분석한 결과 그림 5와 같이 상관성은 크지 않았다. 이는 심도별 암반상태가 매우 불규칙하기 때문으로 판단된다. 즉, 이러한 영향을 단순히

측정 심도로 비교하기에는 무리가 있고, 암반의 강도 및 응력상태, 절리 특성, 풍화 특성 등에도 복합적으로 영향을 미치므로 본 연구에서와 같이 독립변수로 단순화하여 변형계수와 상관관계를 비교하는 데는 오류가 있을 수 있다는 것이다. 그러나 측정 심도가 깊어질수록 암반의 변형특성은 분명히 영향을 받으므로 이에 대한 평가가 있어야 할 것이며, 독립변수로서의 단순 회귀분석이 아닌 다변량 중회귀분석 등을 통한 접근 방법이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 국내 현장에서 공내재하시험으로 측정된 변형계수와 RMR을 이용한 변형계수 예측시의 문제점과 주요 암반 특성치들이 변형계수에 미치는 영향을 간접적으로 파악하고자 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 제안식과 비교해 보았을 때, 김교원의 제안식이 측정값과 비교적 잘 일치하였고, Mohammad의 식은 RMR 값이 50이하인 경우 측정값에 비해 너무 큰 값을 추정하여 국내 현장에 적용시 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.
- (2) RMR을 이용한 기존의 변형계수 제안식들은 검토 현장의 측정자료에 비해 대부분 변형계수를 크게 예측하고 있음을 알 수 있었다. RMR 분류 자체의 신뢰성 문제와 RMR 분류 요소들이 변형계수에 미치는 암반 특성치들의 영향을 합리적으로 반영하지 못하고 있다는 것에 원인이 있는 것으로 판단된다.
- (3) 일축압축강도, RQD, 절리 상태, 절리 간격, 지하수 상태, 측정 심도를 주요 변수로 하여 암반의 변형계수에 미치는 영향에 대한 개개의 상관성 분석을 수행한 결과, RQD가 가장 높은 상관성을 보여 예비설계 단계에서 RQD만으로도 암반의 상태 및 변형계수를 추정할 수 있을 것으로 판단되며 절리 간격과 절리 상태의 경우 또한 암반 변형계수와의 상관성이 비교적 높은 것으로 예상된다.
- (4) 일축압축강도는 변형계수와 밀접한 관계가 있음에도 불구하고 RMR값에 미치는 영향이 적기 때문에 상관성이 낮았다. 따라서 상관성을 높이기 위해서는 일축압축강도의 배점에 신경을 써야하고 일축압축강도 측정시 주의가 필요하다고 판단된다. 또한 지하수의 경우 점수 배점으로 평가되므로 시추자료로 변형계수를 평가하는데 한계가 있을 것으로 사료되어 평가에서 제외시키는 것이 합리적일 것으로 판단된다.
- (5) 측정 심도와 암반 변형계수의 경우에는 변형계수와의 상관성이 결여되어 있었으며, 이는 심도별로 암반상태가 불균질하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 단순히 측정심도로 비교 평가하기에는 무리가 있으므로 독립변수로서의 단순 회귀분석이 아닌 암반의 강도, 응력상태, 절리 특성, 풍화 특성 등을 복합적으로 고려한 접근이 필요할 것으로 판단된다.
- (6) 앞으로 변형계수 및 암반 특성에 관한 자료 확보 및 연구를 통해 암반의 풍화도, 암반의 간극률, 절리 특성 등에 관한 보다 복합적인 결과 도출을 위하여 다변량 중회귀 분석 등과 같은 다양한 접근을 통한 연구가 필요할 것으로 판단된다.



## ■ 참고문헌 ■

1. 김교원(1993), “지공학적 암반분류의 재평가”, 한국지반공학회 봄학술발표대회논문집, 한국지반공학회, pp. 33-40.
2. 대림산업(주)(2000), “중앙선 덕소~양수간 복선전철 건설공사 지반조사 보고서”, pp. 144-145.
3. 대림산업(주)(2002), “전라선 성산~신평간 철도 개량 건설공사 지반조사 보고서”, pp. 143-145, 150-156.
4. 삼성물산 건설부문(2002), “전라선 성산~신평간 철도개량 건설공사 지반조사 보고서”, pp. 108-124.
5. 신희순(1988), “토목기술자를 위한 암반공학(V)”, 한국지반공학회지, Vol. 14, No. 5, pp. 248-258.
6. 이인모(2001), “암반역학의 원리”, 도서출판 새론, pp. 21-40, 194-204.
7. 정형식(2004), “토목기술자를 위한 암반역학”, 도서출판 새론, pp. 33-44, 201-209, 303-321.
8. 천병식(2000), “지반공학 -이론과 실제-”, 구미서관, pp. 514-518, 791-792.
9. Bieniawski, Z.T.(1976), Rock mass classification in rock engineering, Proc., of symposium on Exploration for Rock Engineering, Vol. 1, pp. 97-106.
10. Bieniawski, Z.T.(1978), Determining rock mass deformability: experience from case histories, Intl. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 15, pp. 237-247.
11. Bieniawski, Z.T. (1989), “Engineering Rock Mass Classifications”, pp. 51-64.
12. Serafim JL, Pereira JP.(1983), Considerations on the Geomechanical classification of Bieniawski. International Proceedings of the Symposium on Engineering Geology and Underground Openings, Lisbon, Portugal, pp. 1133-1144.