

## 지질 조건을 고려한 RMR 인자값 추정을 위한 선형회귀식 제안

김광염<sup>1</sup> · 임성빈<sup>2</sup> · 김성권<sup>2</sup> · 김창용<sup>1</sup> · 서용석<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 지하구조물연구실

<sup>2</sup>충북대학교 지구환경과학과

### Suggestion of Regression Equations for Estimating RMR Factor Rating by Geological Condition

Kwang-Yeom Kim<sup>1</sup>, Sung-Bin Yim<sup>2</sup>, Sung-Kwon Kim<sup>2</sup>, Chang-Yong Kim<sup>1</sup>, and Yong-Seok Seo<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Underground Structure Div., Korea Institute of Construction Technology

<sup>2</sup>Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

일반적으로 국내에서 터널의 지보 설계를 위한 암반분류법으로는 RMR 분류가 사용된다. 터널 시공 중 예비조사계획을 보완하고 노선을 따른 연속적인 지반 정보를 획득하기 위해 막장관찰과 동시에 RMR을 통한 암반분류가 시행된다. 하지만 국내 터널 시공 여건 상 조사를 위한 충분한 시간이 보장되지 않으며, 때로는 막장에서의 직접 관찰이 불가능한 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 RMR 항목 중 상대적으로 조사 시간이 길며 세밀한 관찰이 요구되는 RQD와 불연속면 상태 항목의 배점을 추정하기 위한 선형회귀분석을 수행하였으며, 그 결과 최적 회귀식을 산정 하였다. 또한 기존 연구에서 고려하지 않은 지질조건을 반영하기 위해, 퇴적암, 천매암, 화강암을 기반으로 하는 터널의 데이터를 각각 구분하여 분석하였다. 추정을 위한 변수로는 다른 RMR 항목을 대상으로 선정하였으며, 이들 간의 선형회귀분석을 통해 최종 회귀식을 산정하였다.

**주요어** : RMR 분류법, 선형회귀분석, RQD, 불연속면의 상태

In general, RMR classification system is used for the support design of a tunnel. Face mapping during excavation and RMR-based rock classifications are conducted in order to provide information for complementary changes to preliminary survey plans and for continuous geological estimations in direction of tunnel route. Although they are ever so important, there are not enough time for survey in general and sometimes even face mapping is not available. Linear regression analysis for the estimation of mediating RQD and condition of discontinuities, which require longer time and more detailed observation in RMR, was performed and optimum regression equations are suggested as the result. The geological data collected from tunnels were analyzed in accordance with three rock types as sedimentary rock, phyllite and granite to see geological effects, generally not been considered in previous researches. Parameters for the regression analysis were set another RMR factor.

**Key words** : Rock Mass Rating system, linear regression analysis, Rock Quality Designation, condition of discontinuities

### 서 론

터널의 건설에 있어 효율적이고 안전한 설계와 시공을 위해 지반의 역학적 특성과 주변 지반의 지질 구조를 파악하는 것은 매우 중요하다. 이를 위해 예비조사 단계에서 수행되는 시추조사와 물리탐사 등의 결과를 바

탕으로 터널 노선을 따라 암반분류가 수행된다. 그러나 터널의 기하학적 특성과 원지반이 가지는 복잡한 지질 구조로 인해 예비조사 시 얻은 정보만으로는 터널 전체 구간에 대한 지반의 거동을 정확히 예측하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 있다. 따라서 굴착 중 수행되는 막장 지질조사를 통해 설계단계에서 예측하지 못한 지

\*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

반의 지질학적, 공학적 특성들을 파악하게 된다.

국내 지보 설계를 위한 암반분류법은 일반 터널의 경우는 RMR 분류법을, 대규모 지하공간은 Q 분류법을 많이 사용하지만 전반적으로 RMR 분류의 사용이 우세한 편이다. RMR 분류법은 Bieniawski(1973)에 의해 개발된 경험에 바탕을 둔 암반분류 방법으로 5가지 항목, 즉 무결암의 강도, 암질지수(RQD), 불연속면의 간격, 불연속면의 상태, 지하수 상태에 대한 배점을 결정한 후 터널과 불연속면의 기하학적 방향에 따라 보정치를 적용하게 된다. RMR 분류법은 많은 연구자들에 의한 확장 적용에 힘입어 발전되어 터널, 공동, 광산, 사면, 기초 등과 같은 공학적 실체에서의 다기능성과 사용의 용이성이 검증되어 왔다(Bieniawski, 1976, Romana, 1985; Lauffer, 1988).

그러나 국내 터널 시공 여건 상 막장 관찰 및 암반분류를 위한 시간이 부족하며, 때로는 작업 환경과 막장에 내포된 위험으로 인해 상세한 조사를 위한 막장으로의 접근이 어려운 경우가 많다. 김광엽 등(2006)에 의해서도 국내 막장 관찰을 위한 불충분한 조건 등에 대해 언급된 바 있다. 이러한 원인으로 인해 막장에 대한 상세한 조사가 수행되기 어려우며, 특히 불충분한 데이터를 바탕으로 암반분류가 수행되는 경우가 많다. 많은 지질 항목 중 상대적으로 간접적인 평가가 어렵거나 미세한 측정이 요구되는 항목, 즉 암질지수(RQD)와 불연속면 상태에 대한 정보 획득이 더욱 어렵다.

시추 시 굴진 길이에 대한 10 cm 이상 코어 길이 함의 백분율로 정의되는 RQD는 시추조사를 통해 정확히 측정될 수 있다. 그러나 대부분의 시공현장에서는 체적 절리계수( $J_v$ )를 이용한 추정식(Palmstrom, 2005)을 이용하여 RQD를 산정하고 있다. 하지만 이 방법은 각 절리군에 대한 상세한 간격 조사가 요구된다. RMR 구성인자 중 가장 높은 배점이 할당된 절리면의 상태에 대한 정보를 획득하기 위해서는 절리면의 연장 길이, 간극, 충전물, 거칠기 등을 조사해야 한다. 하지만 충전물, 거칠기, 간극의 측정 등은 세밀한 조사가 요구된다. 따라서 RQD와 절리면 상태에 대한 정보는 막장 관찰 시간이 보장되지 않거나, 막장으로의 접근이 어려운 경우에는 직접 측정이 어렵다.

RMR 평가를 위한 일부 제한 조건을 고려하여 RMR 추정을 위한 연구가 국내에서 많이 수행되어 왔다. 위용근 등(2000)은 다중회귀분석을 통하여 RQD, 절리상태, 지하수 등에 관한 다중회귀모형을 제시하였다. 그리고 다변량 판별분석을 통해 정량적인 데이터인 암석강도와

RQD만을 가지고 RMR 값을 산정하는 연구가 수행되었으며(이송 등, 2004), 시추공에서 평가된 자료를 바탕으로 다중회귀모형을 제안한 연구도 수행된 바 있다(노상립 등, 2003).

상기 연구들은 다양한 지질조건을 고려하지 않고 모든 암반을 동일한 조건으로 하여 분석하였다. 서용석 등(2005)과 임성빈 등(2007)은 통계 분석을 통해 서로 다른 지질조건에 따라 각 RMR 인자의 기여도가 변화함을 보인 바 있다. 본 연구에서는 이러한 지질조건을 반영하기 위해 국내에서 빈번하게 산출되는 암종인 퇴적암류, 천매암, 화강암을 기반으로 하는 터널을 대상으로 분석하였다. 각각은 저각의 층리가 발달한 퇴적암 지대, 고각의 엽리가 발달한 천매암 지대, 괴상의 화강암 지대로 구분될 수 있다. 또한 선행 연구들은 시추조사와 실내시험 등 간접적으로 획득된 정보를 통해 RMR 값을 결정하였다. 그러나 본 연구에서는 실제 터널 시공 중 막장에 대한 직접적인 암반분류를 실시하는 경우를 조건으로 하였으며, 막장으로의 접근이 어렵거나 조사 시간이 부족할 경우 가장 측정이 어려운 인자, 즉 RQD와 절리면의 상태를 결정하기 위해 결정 대상 RMR 인자와 매개변수로 사용될 다른 RMR 인자들 간의 상관분석을 실시하였다. 이 중 가장 높은 상관성을 보이는 인자를 최종 매개변수로 결정하였다. 마지막으로 대상 인자와 매개변수 인자 간의 선형회귀분석을 통해 최종 회귀식을 산정하였다.

## 연구지역의 RMR 배점의 통계적 특성

### 퇴적암 터널

퇴적암 터널의 지질은 중생대 백악기 경상누층군 하양층군의 퇴적암류, 이를 부분적으로 관입한 불국사 화강암 그리고 화강암의 관입으로 인한 접촉열변성작용의 산물인 혼펠스 등으로 구성된다. 대상지역에 가장 넓게 분포하는 퇴적암류는 주로 적색, 녹회색 및 암회색의 사암과 세일이 교호한다. 저각의 층리가 우세하게 발달해 있고, 상대적으로 고각의 절리군의 발달은 미약한 편이다.

터널 시공 중 총 1,547개의 막장을 대상으로 관찰 및 RMR 평가가 수행되었다. 방향성 보정 인자를 제외한 기초 RMR( $RMR_0$ )의 범위는 16~79이며, 이는 II~V등급의 지반에 해당된다. III등급으로 평가된 막장이 774개소로 가장 많으며, II등급 408개소, IV등급 341개소의 순이다. 대체적으로 보통 상태의 지반이 많이 분포한다. Table 1에 퇴적암 터널의 지반 등급별 RMR 인자의 배

Table 1. Statistical characteristics of RMR factors on each rock type.

Rock type	Sedimentary rock tunnel						Phyllite tunnel						Granite tunnel						
	Data number	Mean rating	Median rating	Mode rating	Standard deviation	Range of rating	Data number	Mean rating	Median rating	Mode rating	Standard deviation	Range of rating	Data number	Mean rating	Median rating	Mode rating	Standard deviation	Range of rating	
I	R1						12.0	12	12	0.00	0	14.1	15	15	1.40	3			
	R2						20.0	20	20	0.00	0	18.21	17	17	1.48	3			
	R3						15.0	15	15	0.00	0	18.3	20	20	2.74	12			
	R4	4	25.0	25	25	0.00	0	25.0	25	25	0.00	0	26.6	25	25	2.17	10		
	R5		10.0	10	10	0.00	0	10.0	10	10	0.00	0	11.9	10	10	3.06	15		
	RMR <sub>6</sub>		82	82	82	0.00	0	82	82	82	0.00	0	89.1	89	82	5.34	19		
II	R1		13.1	13	14	0.82	6	10.6	12	12	2.27	5	11.9	12	12	2.17	8		
	R2		13.8	15	15	2.15	9	16.4	17	13	3.02	7	14.4	13	13	2.69	12		
	R3	408	13.9	15	15	2.14	10	12.3	10	10	2.52	5	12.2	10	10	3.40	12		
	R4		16.9	16	16	2.81	15	22.3	20	20	2.52	5	23.8	25	25	2.57	16		
	R5		11.6	10	10	2.41	11	8.7	10	10	2.70	10	8.6	10	10	4.06	15		
	RMR <sub>6</sub>		69.3	69	72	3.59	18	70.326	70	70	5.12	17	71.0	70	70	5.674	19		
III	R1		11.5	12	12	1.25	8	7.4	7	7	1.29	5	7.9	7	7	2.60	8		
	R2		11.7	12	10	2.70	12	11.0	13	13	2.87	14	10.6	10.5	8	2.73	9		
	R3	774	10.1	10	10	1.80	7	8.9	8	8	1.01	2	9.9	10	10	0.89	7		
	R4		10.1	10	10	2.09	13	15.1	20	20	5.04	10	19.3	20	20	3.69	15		
	R5		9.3	10	10	1.70	15	8.4	10	10	2.13	6	5.7	5.5	4	3.10	10		
	RMR <sub>6</sub>		52.8	54	58	5.48	19	50.8	50	53	5.35	18	53.4	54	60	5.37	19		
IV	R1		6.1	6	6	1.66	9	6.6	7	7	1.00	3	3.7	4	4	1.25	5		
	R2		4.2	3	3	2.27	8	6.3	8	8	2.85	10	8.0	8	8	1.82	10		
	R3		6.0	8	8	2.66	10	7.3	8	8	1.25	3	8.8	9	10	1.42	5		
	R4	341	4.7	4	4	1.89	9	64	7.5	10	4.36	10	9.3	10	10	3.26	16		
	R5		6.8	7	7	1.50	6	5.3	7	7	2.55	10	5.9	7	7	2.89	10		
	RMR <sub>6</sub>		27.8	28	21	6.45	19	33.047	33	40	5.66	18	35.7	36	36	2.36	10		
V	R1		3.8	4	4	0.82	3	4.0	4	4	0.00	0							
	R2		3.0	3	3	0.00	0	3.0	3	3	0.00	0							
	R3		3.3	3	3	0.76	2	5.0	5	5	0.00	0							
	R4	24	4.1	5	6	2.43	7	2	0.0	0	0.00	0							
	R5		4.7	4	4	1.31	4	7.0	7	7	0.00	0							
	RMR <sub>6</sub>		18.9	10	20	1.67	4	19.0	19	19	0.00	0							
Total	R1		10.6	12	12	2.96	13	8.0	7	7	2.31	8	11.5	12	12	3.52	13		
	R2		10.5	11	3	4.40	15	10.7	8	8	5.14	17	14.8	17	17	3.97	17		
	R3		10.1	10	10	3.56	20	9.3	8	8	2.70	10	13.9	15	15	4.55	15		
	R4	1,547	10.6	10	10	4.88	23	170	14.1	10	7.50	25	23.2	25	25	5.04	30		
	R5		9.3	10	10	2.56	16	7.3	7	7	2.88	10	9.1	10	10	4.23	15		
	RMR <sub>6</sub>		51.1	55	59	15.88	63	49.4	47.5	40	16.65	63	72.5	74.5	74.5	16.91	71		

점 빈도 분포특성 및 이들의 통계적 특성을 나타내었다. RMR 구성 인자의 평균 배점은 무결암의 일축압축강도(R1)가 10.6, 암질지수(RQD, R2)가 10.5, 불연속면의 간격(R3)이 10.1, 불연속면의 상태(R4)가 10.6 그리고 지허수 상태(R5)가 9.3이다. 이들의 합은 51.1이며, 이는 퇴적암 터널의 평균 기초 RMR( $RMR_b$ )에 해당된다. 암반 등급이 높아질수록, 즉  $RMR_b$  값이 커질수록 각 인자의 평균 배점도 높아지며, 이 중 무결암의 강도(R1)와 암질지수(R2), 불연속면의 상태(R4)의 배점은 III, IV 등급 간의 격차가 상대적으로 크다. 각 RMR 인자의 표준편차를 살펴보면, R1, R2, R3, R4, R5는 각각 3.0, 4.4, 3.6, 4.9, 2.6이며  $RMR_b$ 의 표준편차는 15.9이다. RMR 항목별 할당된 배점이 각각 15, 20, 20, 30, 15임을 감안하면, 대체적으로 항목의 표준편차는 할당된 배점과 비례한다. 이는 더 많은 배점이 할당된 RMR

항목이 더 큰 편차를 나타내어  $RMR_b$ 에 더 많은 영향을 주었음을 의미한다. 상대적으로 보면, 암질지수(R2)의 배점 분포 변동이 가장 크다.

퇴적암 터널의 지반 등급별 RMR 인자의 배점 분포 특성을 Fig. 1에 히스토그램으로 요약하였다.

**천매암 터널**

대상 터널을 구성하는 암종인 천매암은 옥천대 백봉리층군의 운교리층의 변성암류에 해당된다. 주로 암갈색 내지 암녹색의 세립질 내지 중립질의 사질 천매암으로 구성되어 있으며, 비교적 고각의 엽리가 발달해 있다.

터널 시공 중 수행된 170개의 막장에 대한 암반분류 결과,  $RMR_b$  값은 17~82점의 범위를 가지며 대부분은 II~IV등급의 구간에 분포한다.  $RMR_b$ 의 평균은 49.2점으로 III등급의 암반에 해당된다. 그러나 IV등급으로 평가

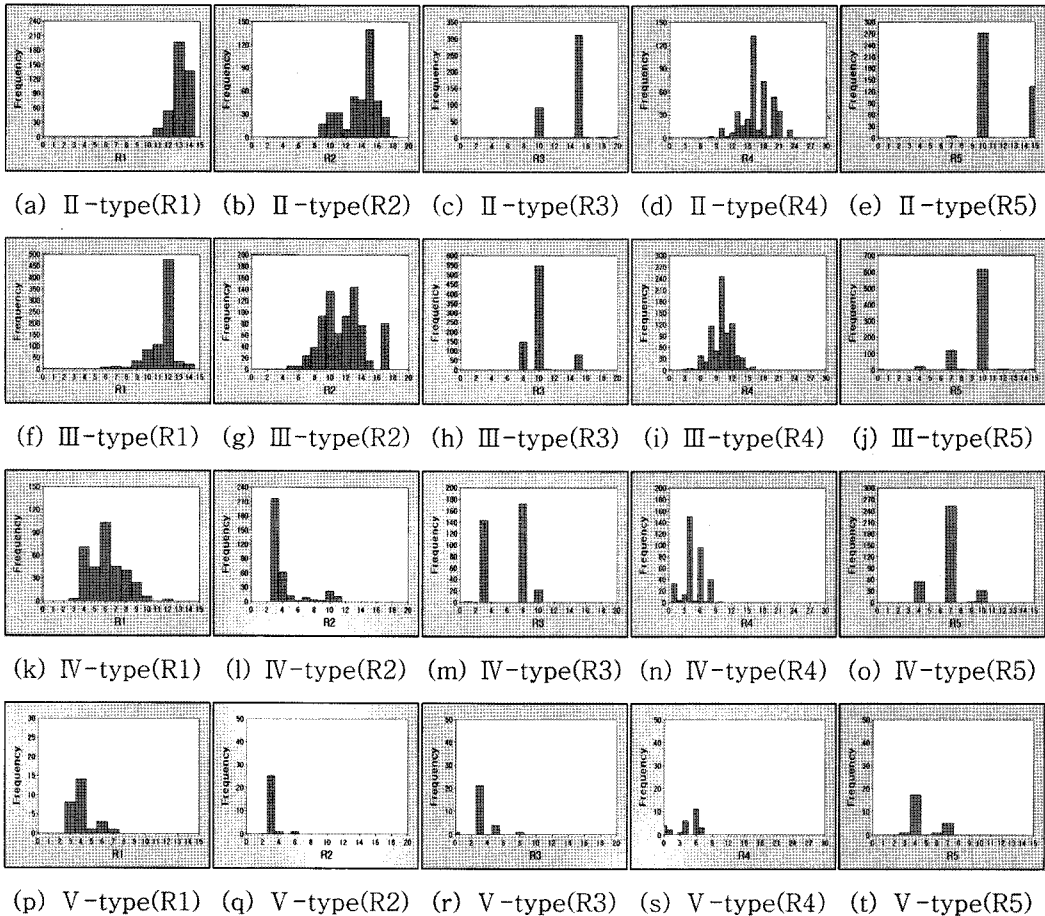


Fig. 1. Histograms showing frequencies of each RMR value for sedimentary rock tunnel.

된 막장이 64개소로 57개소의 III등급보다 많다. 따라서 대체적으로 다소 불량한 지반 또는 보통 상태의 지반이 우세하게 발달한다. Table 1에 천매암 터널의 각 RMR 인자의 통계적 배점 특성을 간략하게 정리하였다. RMR 인자인 R1, R2, R3, R4, R5의 평균 배점은 각각 8.0, 10.7, 9.3, 14.1, 7.3이며, 표준편차는 각각 2.3, 5.1, 2.7, 7.5, 2.9이다. 평균 기초 RMR( $RMR_b$ )은 49.4이며,  $RMR_b$ 의 표준편차는 16.7이다. 퇴적암 터널에 비해 RMR 인자들의 배점은 암반 등급의 변화에 따라 상대

적으로 일정하게 변한다. 지하수 상태(R5)의 배점이 IV 등급에 비해 V등급 암반에서 더 높은 값을 보이지만, V등급에 해당되는 암반의 막장이 2개소로 매우 적기 때문에 통계적으로 의미를 부여하기는 어렵다. 무결암의 강도 항목(R1)과 지하수 상태 항목(R5)의 평균 배점은 8.0점과 7.3점으로 퇴적암 터널에 비해 약 2.6점과 2.0점이 낮으며, 절리면 상태 항목(R4)은 3.5점 높은 14.1점이다. 전체 RMR에서 할당된 배점에 비해 절리 간격 항목(R3)의 표준편차는 2.88로 낮은 값을 보인다. 이는

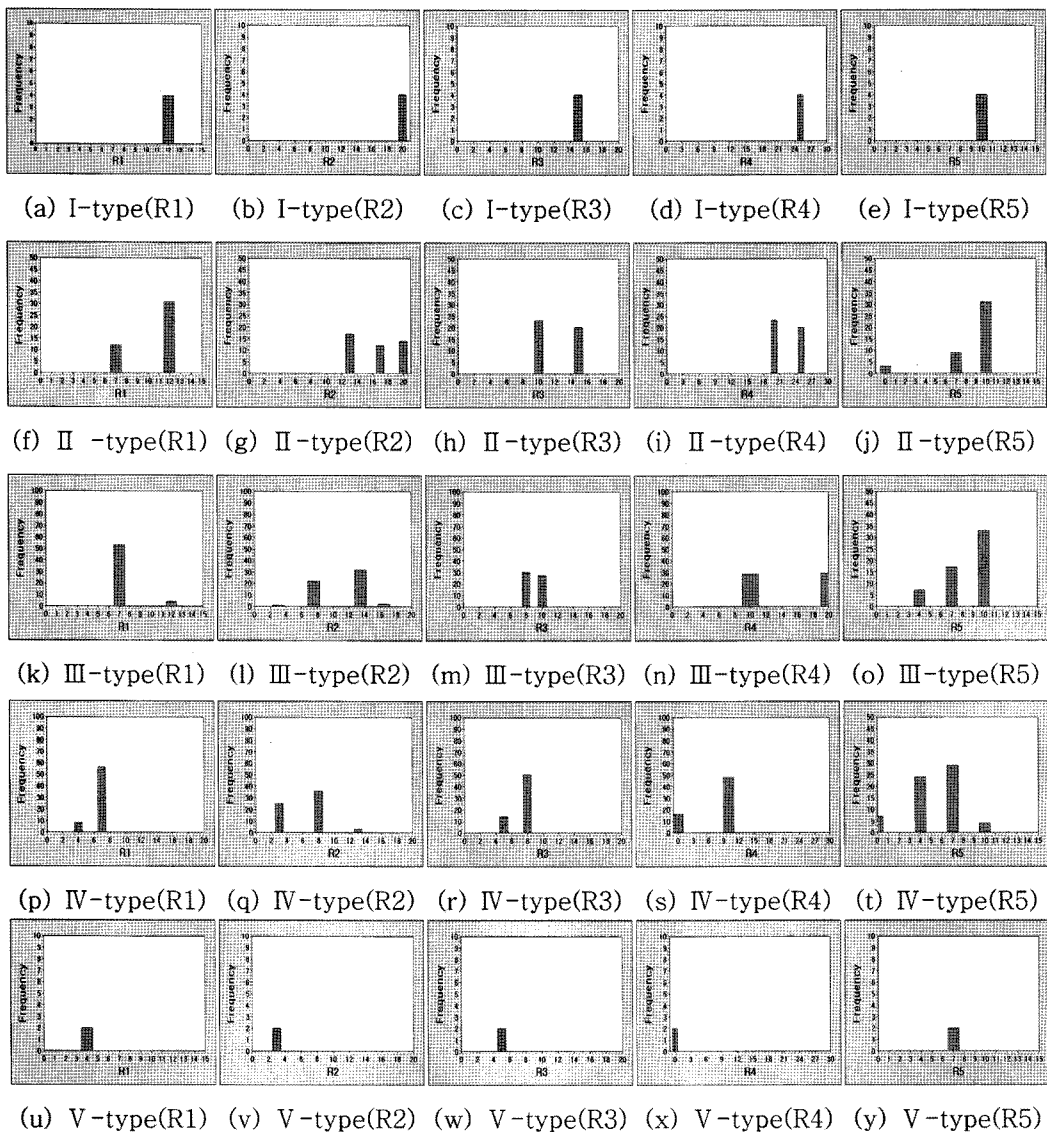


Fig. 2. Histograms showing frequencies of each RMR value for phyllite tunnel.

천매암 터널을 구성하는 암반에서의 절리 간격의 편차가 상대적으로 크지 않음을 의미한다. 이와는 반대로 높은 표준편차를 가지는 절리면 상태 항목(R4)은 전체 RMR값에 큰 영향을 끼쳤을 것이다.

Figure 2는 천매암 터널의 암반 등급별 RMR 인자의 배점 빈도수 및 분포특성을 히스토그램으로 요약하여 나타낸 것이다.

**화강암 터널**

C 터널은 불국사 관입암류에 속하는 언양화강암으로 구성되어 있으며, 주로 절리의 발달이 미약한 괴상의 형태로 산출된다.

시공 중 획득된 총 310개 막장에 대한 RMR 평가 데이터가 해석에 사용되었다. 화강암 터널에서의 RMR<sub>b</sub>의 범위는 29~100이며 이는 I~IV등급에 해당된다. I등

급으로 분류된 막장이 122개소, II등급이 106개소로 퇴적암 터널과 천매암 터널에 비해 양호한 상태의 지반이 주로 분포한다. RMR 인자의 배점 빈도와 분포특성 그리고 이들의 통계적 특성을 Table 1에 정리하였다. RMR 인자인 R1, R2, R3, R4, R5의 평균 배점은 각각 11.5, 14.8, 13.9, 23.2, 9.1이며, 표준편차는 각각 3.5, 4.0, 4.6, 5.0, 4.2이다. 평균 기초 RMR(RMR<sub>b</sub>)은 72.5이며, RMR<sub>b</sub>의 표준편차는 16.9이다. 각 RMR 인자의 평균 배점이 퇴적암, 천매암 터널보다 높으며, 이는 화강암 터널의 양호한 지반 상태를 반영한다. 특히 불연속면의 상태(R4)의 평균 배점은 퇴적암 터널보다 12.6 점, 천매암 터널보다 9.1점이 높다. 아마도 풍화작용 및 단층 등의 구조작용이 상대적으로 적었기 때문일 것이다. 하지만 지하수 상태(R5)의 배점은 퇴적암 터널과 유사하다.

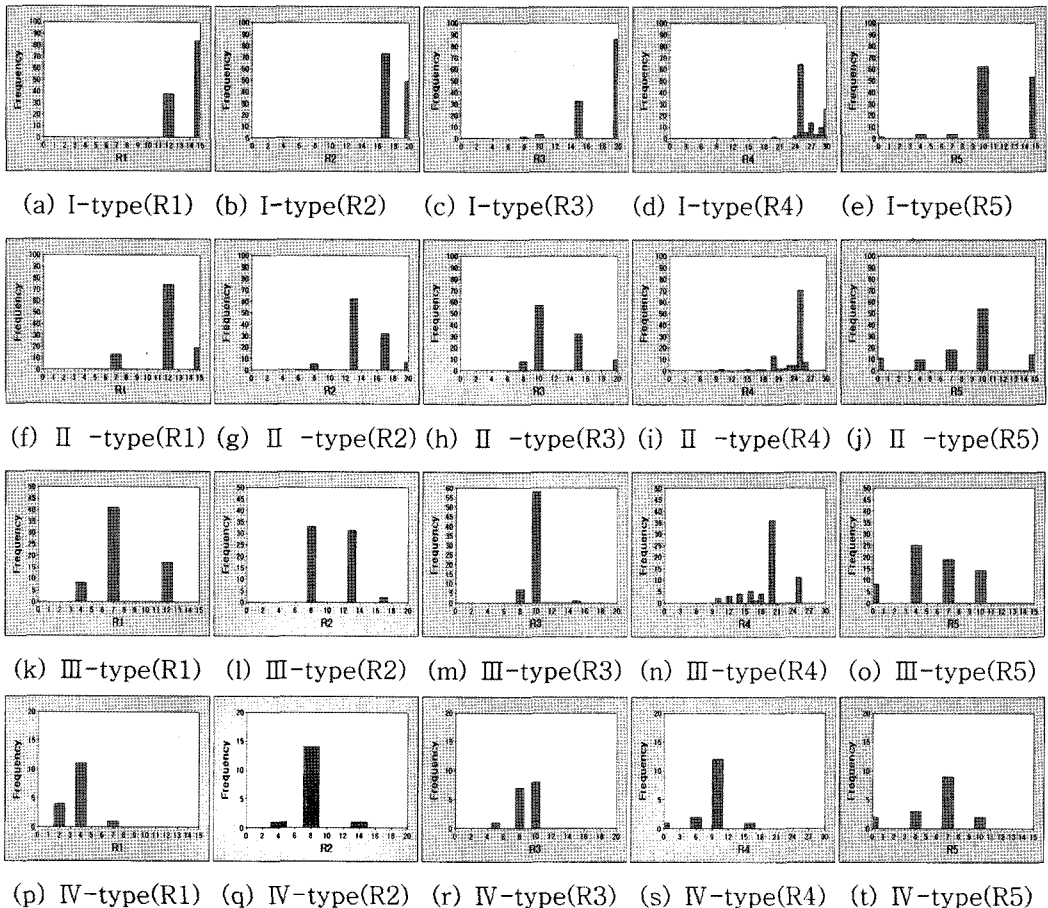


Fig. 3. Histograms showing frequencies of each RMR value for granite tunnel.

화강암 터널의 지반 등급별 RMR 인자의 배점 분포 특성을 Fig. 3에 히스토그램으로 요약하였다.

**선형회귀분석을 이용한 RMR 인자의 회귀식 산정**

본 연구에서는 RMR 인자 중 터널 시공 현장의 특성 상 때때로 측정이 어려운 암질지수(R2)와 불연속면의 상태(R4)의 배점을 추정하기 위하여 이들 인자와 나머지 RMR 인자간의 상관성을 분석하였으며, 그 중 가장 높은 상관성을 보이는 인자간의 회귀분석을 실시하였다. 현장에서의 사용 편의성을 고려하여 매개변수는 RMR 인자로 하였으며, 1개의 변수를 가지는 선형모형을 추정하였다. 특히 국내에 분포하는 대표적인 지질조건을 반영하기 위하여, 저각의 층리를 우세하게 포함하는 퇴적암을 기반으로 하는 터널, 고각의 엽리가 발달한 천매암을 기반으로 하는 터널 그리고 괴상의 화강암을 기반으로 하는 터널에 대해 각각 분석을 수행하였으며 그 결과를 비교 분석 하였다.

**퇴적암 터널**

퇴적암을 기반으로 하는 터널의 RMR 데이터는 총 1,547개이다. 이 데이터를 이용하여 각 RMR 구성 항목

**Table 2.** Correlation coefficients between each RMR factor for sedimentary rock tunnel.

RMR factor	R1	R2	R3	R4	R5
Strength of intact rock(R1)	-	0.83	0.65	0.76	0.59
RQD(R2)	0.83	-	0.76	0.70	0.64
Spacing of discontinuities(R3)	0.65	0.76	-	0.76	0.51
Condition of discontinuities(R4)	0.76	0.70	0.76	-	0.50
Groundwater(R5)	0.59	0.64	0.51	0.50	-

간의 선형회귀분석을 통한 상관성을 분석하였다. 이 중 두 변수 간 단선적 관계의 강도를 나타내는 상관계수( $r$ )를 요약하여 Table 2에 나타내었다. 암질지수 인자(R2)는 무결암의 강도 인자(R1)와 가장 높은 상관성( $r=0.83$ )을 가지며, 지하수 상태(R5)와 가장 낮은 상관관계( $r=0.59$ )를 나타낸다. 절리면 상태 인자(R4)는 무결암의 강도 인자(R1) 및 불연속면 간격 인자(R3)와  $r=0.76$ 으로 가장 높은 상관성을 보이며, 지하수 상태 인자(R5)와 가장 낮은 상관관계( $r=0.50$ )를 가진다.

RMR의 구성항목인 암질지수 인자(R2)와 가장 높은 상관성을 보이는 무결암의 강도 인자(R1)간의 선형회귀 분석 결과는 Fig. 4와 같으며, 그 결과 산정된 선형 회귀식은 식 (1)과 같다. 회귀식의 상관계수( $r$ )는 0.83, 표준편차(SD)는 2.48이다.

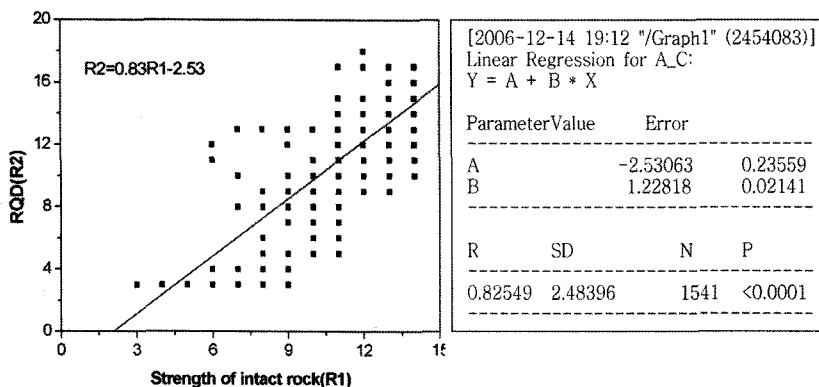
$$R2 = 0.83R1 - 2.53 \quad r = 0.83, SD = 2.48 \quad (1)$$

식(1)에 의해 계산된 RQD 인자(R2)의 배점을 적용한  $RMR_c$ 과 측정된  $RMR_s$  사이의 관계를 Fig. 5(a)에 도시 하였다. 계산된  $RMR_c$  값의 정확도를 표현하기 위하여 평균오차(Average Error, AE) 개념을 사용하였으며, 식 (2)에 의해 계산된다.

$$AE = \frac{1}{n} \sum |RMR_s - RMR_c| \quad (2)$$

총 1,547개의 막장에서 측정된  $RMR_s$ 와 추정된  $RMR_c$  사이는 2.00의 평균오차(AE)를 가진다.

퇴적암 터널에서의 불연속면 상태 인자(R4)는 무결암의 강도(R1) 및 불연속면 간격(R3)과 가장 높은 상관성을 보인다. 그 중 무결암의 강도(R1)와는 0.76의 상관계수( $r$ )를 나타내며, 도출된 선형 회귀식은 식 (3)과 같다.



**Fig. 4.** The result of linear regression analysis of R1-R3 for the sedimentary rock tunnel

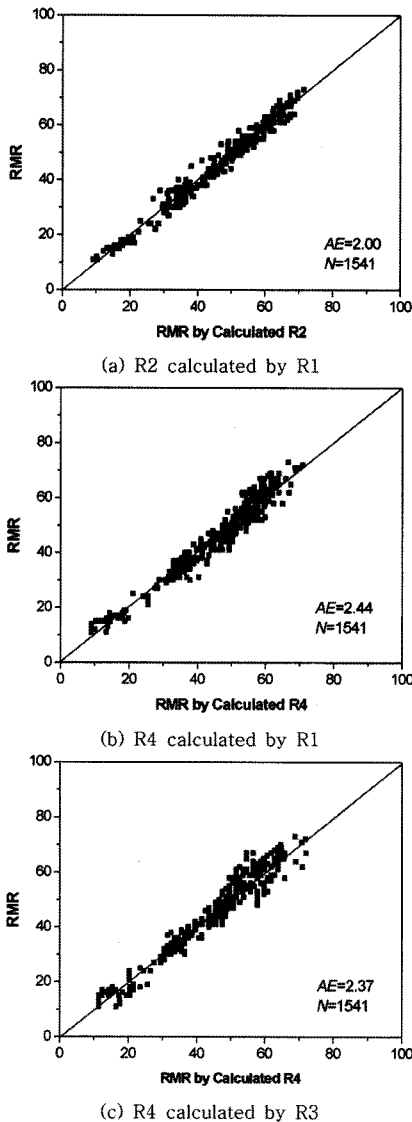


Fig. 5. Relationship between  $RMR_c$  and  $RMR_o$  for sedimentary rock tunnel.

회귀식의 상관계수( $r$ )는 0.76, 표준편차( $SD$ )는 3.14이다.

$$R4 = 1.26R1 - 2.74 \quad r = 0.76, SD = 3.14 \quad (3)$$

퇴적암 터널에서 식 (3)을 통해 산정된 절리상태 인자( $R4$ )의 배점을 적용하여  $RMR_c$ 을 산정한 후, 이 값과 원래의  $RMR_o$ 와 비교하였다(Fig. 5(b)). 그 결과 평균오차(AE)는 2.44이다.

불연속면 상태 인자( $R4$ )와 불연속면 간격 인자( $R3$ )간의 선형회귀 분석 결과, 상관계수( $r$ )는 0.76, 표준편차

( $SD$ )는 3.20이다. 산출된 선형 회귀식은 식 (4)와 같다.

$$R4 = 1.04R1 - 0.12 \quad r = 0.76, SD = 3.20 \quad (4)$$

식 (3)에 의해 계산된 절리상태 인자( $R4$ )의 배점을 적용한  $RMR_c$ 과 측정된  $RMR_o$ 는 Fig. 5(c)에서와 같이 비교되었으며, 평균오차(AE)는 2.37이다.

### 천매암 터널

천매암 터널의 분석을 위해서는 총 170개의 RMR 평가 자료가 사용되었다. 각 RMR 인자 상호간의 상관계수( $r$ )는 Table 3과 같다. 암질지수 인자( $R2$ )는 불연속면 간격 인자( $R3$ )와 가장 높은 상관계수( $r$ )인 0.85를 나

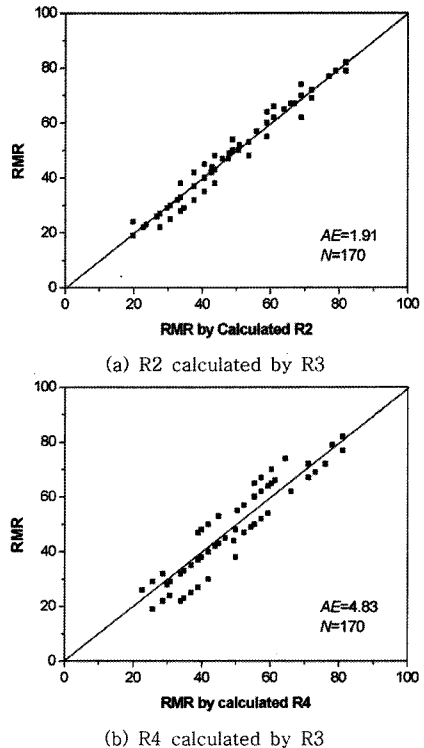


Fig. 6. Relationship between  $RMR_c$  and  $RMR_o$  for phyllite tunnel.

Table 3. Correlation coefficients between each RMR factor for phyllite tunnel.

RMR factor	R1	R2	R3	R4	R5
Strength of intact rock(R1)	-	0.63	0.60	0.59	0.18
RQD(R2)	0.63	-	0.85	0.57	0.37
Spacing of discontinuities(R3)	0.60	0.85	-	0.63	0.34
Condition of discontinuities(R4)	0.59	0.57	0.63	-	0.44
Groundwater(R5)	0.18	0.37	0.34	0.44	-



타낸다. 불연속면 상태 인자(R4) 또한 불연속면 간격 인자(R3)와 가장 높은 상관성( $r=0.63$ )을 보인다. 두 항목 모두 지하수 상태 인자(R5)와 가장 낮은 상관관계를 보인다.

상관계수( $r$ ) 0.85로 가장 높은 상관성을 보이는 암질지수 인자(R2)와 불연속면 간격 인자(R3) 사이의 선형회귀분석 결과 도출된 회귀식은 식 (5)와 같다. 이 경우의 표준편차( $SD$ )는 2.72이다.

$$R2 = 1.62R3 - 4.30 \quad r = 0.85, SD = 2.72 \quad (5)$$

천매암 터널의 170개 막장에 대하여 불연속면 간격 인자(R3)를 이용해 산정한 암질지수 항목(R2)의 배점을 적용한  $RMR_c$ 와 실제 측정된  $RMR_o$  사이의 관계는 Fig. 6(a)와 같으며, 이들 간의 평균오차(AE)는 1.91이다.

불연속면 상태 인자(R4)와 가장 높은 상관성을 보이는 RMR 인자는 Table 3에서와 같이 불연속면 간격 인자(R3)이며, 이 둘 사이의 선형회귀분석 결과 획득된 회귀식은 식 (6)과 같다.

$$R4 = 1.73R3 - 2.09 \quad r = 0.63, SD = 5.86 \quad (6)$$

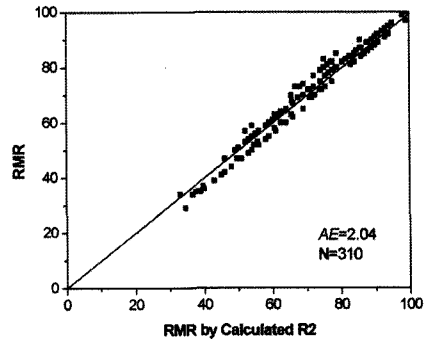
식 (6)에 의해 산정된 불연속면 상태 인자(R4)를 적용하여  $RMR_c$ 를 산출하였다. 이  $RMR_c$ 와 현장에서 측정된  $RMR_o$ 의 상관관계를 도시하여 Fig. 6(b)에 나타내었다. 이들 간의 평균오차(AE)는 4.83으로 비교적 높은 값을 보인다.

### 화강암 터널

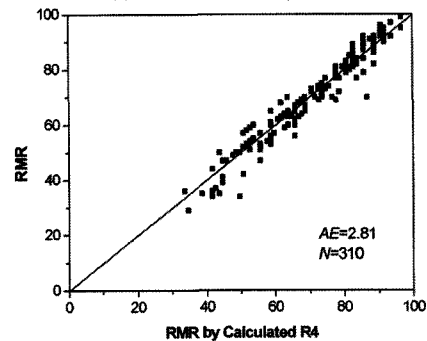
총 310개의 화강암 터널의 RMR 데이터가 통계분석을 위해 사용되었다. 각 RMR 항목 간의 회귀분석 결과 중 상관계수( $r$ )를 Table 4에 요약하였다. 화강암 터널에서의 암질지수 인자(R2)는 불연속면 간격 인자(R3)와 가장 높은 상관성( $r=0.79$ )을 보이며, 불연속면 상태 인자(R4)는 무결암의 강도 인자(R1)와 가장 높은 상관계수( $r$ )인 0.71을 나타낸다. 암질지수 인자(R2)와 불연속면 상태 인자(R4)는 모두 지하수 상태 인자(R5)와 가장 낮은 상관성을 가진다.

**Table 4.** Correlation coefficients between RMR factors for the granite tunnel.

RMR factor	R1	R2	R3	R4	R5
Strength of intact rock(R1)	-	0.77	0.65	0.71	0.28
RQD(R2)	0.77	-	0.79	0.62	0.37
Spacing of discontinuities(R3)	0.65	0.79	-	0.53	0.27
Condition of discontinuities(R4)	0.71	0.62	0.53	-	0.40
Groundwater(R5)	0.28	0.37	0.27	0.40	-



(a) R2 calculated by R3



(b) R4 calculated by R1

**Fig. 7.** Relationship between  $RMR_o$  and  $RMR_c$  for granite tunnel.

화강암 터널의 암질지수(R2) 및 이와 가장 높은 상관성을 가지는 불연속면 간격 인자(R3) 사이의 선형회귀분석 결과 도출된 회귀식은 식 (7)과 같으며, 각 항목 사이는 0.79의 상관계수( $r$ )와 2.45의 표준편차( $SD$ )를 가진다.

$$R2 = 0.68R3 - 5.29 \quad r = 0.79, SD = 2.45 \quad (7)$$

Figure 7(a)은 식 (7)에 의해 구해진 암질지수(R2)를 적용한  $RMR_c$ 와 현장에서 측정된  $RMR_o$  사이의 상관관계를 도시한 것이다. 총 310개 데이터에 대한 평균오차(AE)는 2.04이다.

화강암 터널에서 무결암의 강도 인자(R1)는 불연속면 상태 항목(R4)과 가장 높은 상관관계를 나타내며, 이들 사이의 선형회귀분석 결과 상관계수( $r$ ) 0.71, 표준편차( $SD$ ) 3.57이며, 도출된 회귀식은 식 (8)과 같다.

$$R4 = 1.01R1 - 11.59 \quad r = 0.71, SD = 2.57 \quad (8)$$

현장에서 직접 측정된  $RMR_o$ 와 식 (8)에 의해 계산된  $RMR_c$  사이의 관계를 Fig. 7(b)에 도시하였다. 그 결과 평균오차(AE)는 2.81이다.

### 결과 분석

저각의 층리면이 발달한 퇴적암을 기반으로 하는 터널, 고각의 엽리가 발달한 천매암을 기반으로 하는 터널 그리고 피상의 화강암을 기반으로 하는 터널에서 측정된 RMR 데이터의 통계분석 수행 결과 중, 다른 RMR 인자의 배점을 이용하여 암질지수 인자(R2)와 불연속면의 상태 인자(R4)를 추정하기 위한 회귀식, 각 항목간의 상관관계( $r$ ) 및 표준편차( $SD$ ), 그리고 현장에서 측정된 RMR<sub>c</sub>와 추정된 회귀식에 의해 계산된 인자의 배점을 적용한 RMR<sub>c</sub> 사이의 평균오차(AE) 등을 Table 5에 요약하였다. 전체적으로 암질지수 항목(R2)의 추정식이 불연속면의 상태 항목(R4)의 추정식에 비해 상관계수( $r$ )가 높고 평균오차(AE)는 낮다. 이 중 천매암 터널의 암질지수 인자(R2)를 추정하기 위한 식이 상관계수( $r$ ) 0.85, 평균오차(AE) 1.91로 가장 최적의 회귀식이며, 반대로 천매암 터널의 불연속면 상태 인자(R4)를 추정하기 위한 식은 상관계수( $r$ ) 0.63, 평균오차(AE) 4.83으로 가장 낮은 적용성을 보인다.

일반적으로 암질지수(RQD)는 다른 RMR 구성 인자 중 불연속면 간격 인자(R3)와 가장 관련성이 크다. 통계분석 결과에서도 천매암과 화강암을 기반으로 하는 터널에서의 암질지수(RQD)에 대한 배점은 불연속면 간격을 이용하는 것이 상대적으로 가장 적합한 것으로 확인되었다. 그러나 퇴적암 터널의 경우 암질지수 항목(R2)과 무결암의 강도 항목(R1)의 상관성이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 퇴적암에서 규칙적으로 발달하는 층리의 영향일 것으로 판단된다. 일반적으로 RMR 평가 시 불연속면의 간격은 주 절리, 즉 퇴적암에서는 층리면의 간격을 측정하는 경우가 많다. 규칙적인 층리면은 전 구간에 대해 비교적 유사한 양상을 가지며 발달했을 것이고, 여러 불연속면 군의 조합에 의해 결정되는 RQD에 대해서는 많은 변별력을 가지지 않았을 것으로 판단된다.

하지만 고각의 엽리를 가지는 천매암의 경우, 엽리간의 접촉이 양호하다면 불연속면으로 측정되지 않는다. 또한 피상의 화강암은 많은 절리군을 포함하지 않는 경우가 많다. 따라서 천매암과 화강암 터널에서의 불연속면 간격과 암질지수(RQD)간의 상관관계는 상대적으로 높아진다.

각각의 터널에서 불연속면 상태를 추정하기 위한 변수로 무결암의 강도 또는 불연속면의 간격 인자가 가장 적합한 것으로 확인되었다. RMR의 불연속면의 상태 인자(R4)에는 각각 연장성, 간극, 풍화도, 거칠기 등이 포함된다. 이들은 암반의 풍화상태와 파쇄상태 등과 직간접적으로 관계를 가진다. 따라서 풍화도와 가장 큰 관계가 있는 무결암의 강도(R1), RQD를 제외한다면 파쇄 정도와 가장 큰 관계가 있는 불연속면의 간격(R3)이 불연속면의 상태와 높은 상관성을 나타낸다. 천매암 터널과 화강암 터널의 결과를 비교해보면, 불연속면의 발달이 상대적으로 우세한 천매암 터널에서는 불연속면의 간격 인자(R3), 절리의 발달이 미약한 피상의 화강암을 기반으로 하는 터널의 경우는 무결암의 강도 인자(R3)가 불연속면의 상태와 더 큰 상관성을 가진다.

사실 RMR 인자의 배점을 추정하기 위하여 본 연구에서 사용한 단순한 선형회귀분석이 아니라, 여러 다른 RMR 항목을 고려한 다중회귀분석을 사용하면 더 적은 오차를 가지는 회귀모델을 제시할 수 있을 것이다. 하지만 천매암 터널의 불연속면 상태 인자(R4)를 제외하면 대략 2점대 정도의 평균 오차를 가진다. 이는 전체 RMR 값에 비하면 매우 적은 크기이며, 특히 등급 간의 배점 간격이 20점임을 고려한다면 의미가 크지 않다. 따라서 현장에서의 사용 용이성과 즉각적인 판단이 요구되는 현장 상황을 고려한다면 복잡한 비선형 회귀모형보다는 다소 정확도는 낮더라도 단순한 선형 회귀모형이 더 적합할 것으로 판단된다. 그리고 제시된 선형 회귀모형은 현장에서 비교적 측정이 용이한 RMR 인자를

**Table 5.** The summarized result of linear regression analysis for calculating RQD and condition of discontinuities using other RMR factors.

Tunnel	Target	Optimum regression	$r$	$SD$	AE
Sedimentary rock tunnel	RQD	$R2 = 0.83R1 - 2.53$	0.83	2.48	2.00
	Condition of discontinuities	$R4 = 1.26R1 - 2.74$	0.76	3.14	2.44
		$R4 = 1.04R3 - 0.12$	0.76	3.20	2.37
Phyllite tunnel	RQD	$R2 = 1.62R3 - 4.30$	0.85	2.72	1.91
	Condition of discontinuities	$R4 = 1.74R3 - 2.09$	0.63	5.86	4.83
		RQD	$R2 = 0.68R3 - 5.26$	0.79	2.45
Granite tunnel	Condition of discontinuities	$R4 = 1.01R1 - 11.59$	0.71	3.57	2.81

매개변수로 사용함으로써 조사의 편의성이 고려되었다. 특히 각기 다른 지질 조건을 고려한 본 연구를 감안하면, 조건별로 각각 다른 많은 수의 비선형 회귀모델은 현장에서의 사용에 부적합하다.

상기 통계분석 결과 산정된 각각의 회귀식들은 터널 시공 시 시간 및 공간적 제약으로 인해 막장조사를 위한 조건이 충분하지 않을 때 사용될 수 있을 것이다. 물론 경험 많은 조사자의 경우 여러 상황을 감안하여 직접 측정하지 못한 RMR 인자의 배점을 직관적으로 판단할 수 있을 것이다. 또한 이러한 방법으로부터 통계적 방법에 의존하는 것보다 더 현실적인 결과를 산정할 수 있을 것이다. 그러나 국내 여건상 모든 터널 현장에서 숙련된 기술자가 막장 관찰을 수행하기는 불가능하다. 이는 간접적인 방법에 의해 암질지수 및 불연속면의 상태 등의 판단이 어려운 경향이 부족한 기술자들이 많음을 의미한다. 이러한 기술자들에게는 조사여건이 충분히 보장되지 않는 특수한 경우 그렇게 큰 오차를 보이지 않는 상관식을 사용하는 경우가 더 유리할 수도 있다.

## 결 론

국내 터널 시공 현장의 현실을 고려하여 RMR 인자 중 측정이 용이하지 않은 암질지수 인자(R2)와 불연속면 상태 인자(R4)를 추정할 수 있는 간단한 선형 회귀식을 제안하였다. 현장 적용성 향상을 위해 현장에서 측정이 용이한 RMR 인자들을 매개변수로 하였으며, 국내의 대표적인 지질 조건을 고려하기 위하여 저각 층리면 을 포함하는 퇴적암과 고각의 엽리를 가지는 천매암 그리고 괴상의 화강암을 각각 기반으로 하는 3개 터널로 구분하여 분석을 수행하였다.

1) RMR 인자의 배점 추정을 위해 사용된 매개변수는 다른 RMR 인자로 설정하였으며, 변수의 개수를 1개로 하는 선형 회귀모형을 채택하여 현장 적용의 용이성과 판단의 신속성을 고려하였다.

2) 산정된 각각의 회귀모형에 의해 계산된 RMR<sub>c</sub>와 현장에서 측정된 RMR<sub>s</sub>는 평균 2점대 정도의 차이를 보인다. 이는 전체 RMR 배점과 20점인 급간 간격을 고려한다면 작은 크기이다.

3) 다른 지질 조건을 가지는 3개소 터널의 선형회귀 분석 결과, 각각의 지역적인 지질 특성이 반영된 회귀모형이 산정되었다. 이는 각 지질 조건별로 지질인자들의 영향도가 다름을 나타내는 간접적인 증거가 될 수 있다. 즉 지질 조건별 RMR 배점 체계의 수정이 필요함을 의

미한다.

4) 현장에서의 사용 편의성과 지질 조건별로 다른 회귀모형의 다양성을 감안한다면, 비선형 회귀모형 보다는 평균 2점대의 오차를 보이는 단순한 선형회귀모형이 현장에서의 RMR 인자 추정에 더 적합할 것으로 판단된다.

5) 본 연구를 통해 산정된 간편식은 터널 시공 중 충실한 조사가 어려운 불가피한 경우에 한해 사용되어야 한다. 숙련된 기술자에 의한 직관적인 판단이 더 현실적인 결과를 도출함은 당연하지만, 이러한 판단이 어려운 비숙련 기술자에게는 크지 않은 오차범위 내에서 암반을 평가할 수 있는 차선택이 될 수 있을 것이다.

## 사 사

본 연구는 건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업인 "IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시공기술개발(과제번호:C105A1020001-05A0502-00240)" 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김광염, 김창용, 임성빈, 윤현석, 서용석, 2006, 국내 터널시공 중 막장지질조사의 문제점 및 개선방안에 관한 연구, 대한지질공학회지, 16(3), pp.265-273.
- 노상립, 윤지선, 2003, 통계적 기법을 이용한 터널에서의 암반분류에 관한 연구, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.4635-4640.
- 서용석, 김창용, 김광염, 이현우, 2005, 정준상관분석을 이용한 막장등급평가 수량화기법 연구, 대한지질공학회지, 15(4), pp.463-473.
- 위용근, 노상립, 윤지선, 2000, 다변량 분석을 이용한 터널에서의 효율적인 암반분류에 관한 연구, 한국터널공학회 터널기술논문집, 2(2), pp.41-49.
- 이송, 안태훈, 유오식, 2004, 다변량 판별분석을 통한 터널 설계시의 암반분류 연구, 한국터널공학회 터널기술논문집, 6(3), pp.237-245.
- 임성빈, 서용석, 김창용, 김광염, 2007, 수량화방법 I을 이용한 퇴적암 터널의 지질 인자별 변위 영향도 분석, 대한지질공학회지, 17(2), pp.263-270.
- Bieniawski, Z. W., 1973, Engineering Classification of Jointed Rock Mass, The Civil Engineer in South Africa, 15, pp.335-344.
- Bieniawski, Z. W., 1976, Rock Mass Classification in Rock Engineering, Proc. of the Sym. on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, pp.97-106.
- Lauffer, H., 1988, Zur Gebirgsklassifizierung bei Frastvortrieben, felsbau, 6(3), pp.137-149.
- Palmstrom, A., 2005, Measurements of and correlations between block size and rock quality designation(RQD), Tunnelling and Underground Space Technology, 20(4), pp.362-377.
- Romana, M., 1985, New Adjustment Ratings for Appli-

cation of Bieniawski Classification to Slopes, Int. Sym. on the Roli of Rock Mechanics, Zacatecas, pp.49-53.

---

2007년 11월 2일 원고접수, 2007년 12월 13일 게재승인

#### 김광엽

한국건설기술연구원 국토지반연구부  
411-712 경기도 고양시 일산구 시민대로 1190  
Tel: 031-910-0225  
Fax: 031-910-0211  
E-mail: kimky@kict.re.kr

#### 임성빈

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-273-9645  
E-mail: bins123@hanmail.net

#### 김성권

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-273-9645  
E-mail: 302bedal@hanmail.net

#### 김창용

한국건설기술연구원 국토지반연구부  
411-712 경기도 고양시 일산구 시민대로 1190  
Tel: 031-910-0224  
Fax: 031-910-0211  
E-mail: cykim@kict.re.kr

#### 서용석

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-273-9645  
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr