

터널 지질조사 시스템 개발 및 안정성 분석

노상림¹⁾, 김선명¹⁾, 윤지선¹⁾, 박부성²⁾, 김영구²⁾
¹⁾인하대학교 지구환경공학부
²⁾쌍용건설(주) 기술연구소

1. 서 론

최근 국내에서는 산업발달과 인구증가에 따라 파생되는 사회, 경제적인 문제를 해결하기 위해, 대도시 지하철 건설, 경부 고속철도 건설 및 도시고속도로 건설 등, 대규모 건설사업들이 추진되고 있으며, 이러한 일련의 과정에서 크고 작은 터널들이 전국적으로 많이 건설되고 있다. 터널은 지반에 건설되는 선형구조물로서, 사전에 얻은 지반의 정보가 충분히 반영되어야 하지만 계획단계에서는 실제 터널 주변의 거동과 지보의 효과를 정확히 예측한다는 것은 어려운 점이 많다. 그 때문에 자칫하면 지반에 관한 정보가 불충분한 상태로 시공될 경우가 있어 결과적으로 설계의 대폭적인 변경으로 인한 공사비의 증가, 공기의 지연 및 불의의 사고를 초래하는 일이 있다. 따라서 시공중의 지질조사는 합리적인 터널시공을 위하여 중요한 역할을 한다. 하지만, 현재 터널시공 시 터널 지질조사 방법이 체계화되어 있지 않으며 기관마다 조사방법 및 표현방식이 상이하고, 일부 기관에서 터널 지질조사 자료를 안정성 분석에 활용하고 있으나 지질 전문가의 경험적인 판단에 의존하고 있어 객관성 및 효율성이 떨어진다는 문제점들을 가지고 있다. 또한 현장의 상황에 적합한 각각의 특성에 따른 조사에 대한 보강 대책을 필요로 하지만 현재 이러한 문제에 대한 체계적인 조사방법 및 조사 자료에 관한 활용방안에 관하여 연구가 불충분한 상황이다. 기존의 암반분류로 제시되고 있는 RMR의 경우 국내에서 널리 사용되고 있으나 실제로 현장에서 정확한 데이터를 취득하기에는 어려움이 많다.

또한 터널 시공 시 빈번하게 발생하는 심각한 재해중의 하나가 낙반사고 문제이다. 이러한 낙반사고의 원인은 암반의 불연속면의 특성에 따라 형성되는 암반블록의 거동을 정확히 예측하지 못하는 것에 있으므로, 터널 내 불연속면 상황의 규명은 낙반사고를 예방하기 위하여 필수적이다. 따라서, 국내의 터널에 적합한 과학적인 터널 지질조사 방법과 체계적인 지질조사자료 분석에 의한 시스템을 구축함으로써 보다 합리적으로 터널을 시공할 수 있을 것이다.

본 연구는 암반터널의 지질조사 자료를 이용하여 터널의 지질도, 암반평가, 낙반/붕락 예측을 위한 일련의 연구를 수행하여 암반 내 불연속면 분석기술을 개발하고, 암반평가 시 주관적인 판단을 배제할 수 있는 조사방법을 개발하여, 최종적으로 터널 조사 및 분석 프로그램을 개발함으로써 터널의 안정성을 제고하는데 그 목적이 있다.

2. 암반평가 요소분석

2.1 통계기법의 암반분류에의 적용

비교적 긴 터널이나 이와 유사한 터널군에서는, 막장 관찰 결과에 근거한 원지반의 거동이나 지보패턴의 타당성을 정량적으로 평가하는 목적으로, 기 시공 구간에서 축적된 데이터를 사용한 다변량분석이 유용하다. 현실적으로 얻을 수 있는 수치상의 분석방법으로는 중회귀분석과 판별분석을 들 수 있다. 중회귀분석을 통하여 암반분류 외에도 내공변위나 천단침하 등을 수치적으로 예측할 수 있고, 판별분석에서는 막장관찰 기록 데이터를 근거로 하여 지보패턴, 낙반 또는 터널 변상의 유무 등을 추정하는데 적용할 수 있다. 다변량분석

의 특징은, 한눈으로 보기 어려운 복잡하고 광대한 데이터를 어느 분석 목적의 관점에서 보기 쉬운 형태로 정리하는 것이다.

또한 본 해석법은 통계학의 일부이며 수학적 모델이므로 전제나 가정에 근거한 데이터를 요약하는 것이다. 이 때문에, 전제 등이 만족하지 않으면 모델 그 자체가 무너져 결과는 무의미한 것밖에 얻을 수 없다. 따라서, 현실과 어느 정도 대응하는지가 중요한 문제이며, 얻어진 결과를 과거의 경험과 지식에 의해 상식적인 것으로 수정될 필요가 있다.

2.2 중회귀분석을 이용한 간편 RMR

본 연구에서는 변수선택, 회귀모형의 적합성평가 등의 과정을 거쳐 다음과 같은 간편 RMR을 도출하였다. 표 1에서 볼 수 있듯이 회귀방정식의 모형은 독립변수를 3, 4, 5개로 증가시켰을 때 모두 유의함을 알 수 있다.

표 1. 중회귀의 분산분석표

모형		제공합	자유도	평균제공	F	유의확률
3	선형회귀분석	180838	3	60279	5828	.001(c)
	잔차	9514	920	10		
	합계	190352	923			
4	선형회귀분석	184827	4	46206	7686	.001(d)
	잔차	5524	919	6		
	합계	190352	923			
5	선형회귀분석	188648	5	37729	20331	.001(e)
	잔차	1703	918	2		
	합계	190352	923			

d 예측값: (상수), RQD, DC, GW
e 예측값: (상수), RQD, DC, GW, SD
f 예측값: (상수), RQD, DC, GW, SD, SC
g 종속변수: RMR

▶ $RMR = -1.515 + 1.859 \times RQD + 1.296 \times DC + 0.933GW$

($R^2 = 0.95$)

▶ $RMR = 7.873 + 1.855 \times RQD + 1.198 \times DC + 0.954GW + 1.068 \times SD$

($R^2 = 0.97$)

▶ $RMR = 4.259 + 1.329 \times RQD + 1.066 \times DC + 1.001GW + 1.050 \times SD + 1.103 \times SC$

($R^2 = 0.99$)

상기의 회귀모형의 모든 회귀계수는 그 통계적 유의도가 높아서(유의확률 $0.001 < 0.05$) 회귀계수로서의 의미가 있다고 할 수 있다. 또한 결정계수가 0.95에서 0.99로 매우 설명력이 높은 모형임을 알 수 있다.

터널 현장의 여건상 취득하기 어려운 경우에는 몇 가지 항목이 빠졌다 하더라도 상기의 회귀모형식을 이용하여 원래의 RMR값에 매우 근접한 값을 얻을 수 있다. 또한 RMR점수를 계산할 때 주관적인 판단을 내려야 할 때에 간편 RMR식을 이용하여 보다 객관적인 RMR값을 얻을 수 있다.

2.3 최적 중회귀 모형식에 대한 적용성 평가

본 연구에서 얻은 다중회귀식의 유용성을 검증하기 위하여 타 지역의 지반조사자료(208개소)와 상기의 각

구간별 데이터를 이용하여 실측 RMR값과 회귀식을 이용한 예측 RMR값의 단순회귀분석에서 얻어지는 결정 계수를 이용하여 상호 비교하였다(표 2. 참조).

표 2. 다중회귀 분석을 이용한 예측 RMR과 실측 RMR의 상관관계

모형	선택된 변수	1 구간	2 구간	3 구간	4 구간	타지역
3	RQD DC GW	0.97	0.92	0.96	0.96	0.94
4	RQD DC GW SD	0.98	0.94	0.98	0.98	0.94
5	RQD DC GW SD SC	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97

그 결과 RQD, 절리면 상태, 지하수 상태가 변수로 선택된 모형에서는 결정계수가 0.92~0.97의 값을 나타내었고 RQD, 절리면 상태, 지하수 상태, 불연속면 방향성 보정이 변수로 선택된 모형은 결정계수가 0.94~0.98로 매우 높은 상관성이 있었다. 그림 1에 제시된 모형(model 3 및 model 4)을 이용한 예측 RMR과 실측 RMR의 단순회귀분석 실시 결과를 나타내었다.

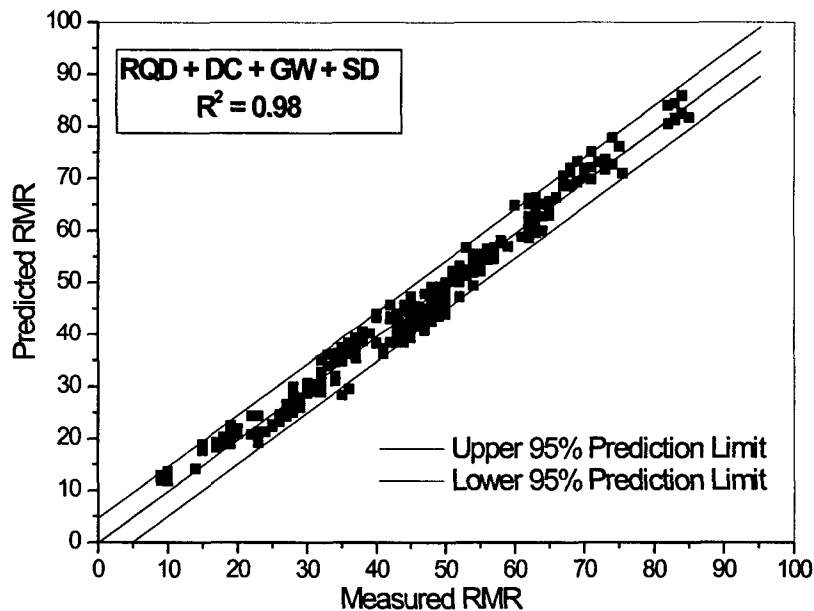


그림 1. 다중회귀분석을 이용한 예측 RMR과 실측 RMR의 관계
(a : model 3 - 1구간, b : model 4 - 1구간)

3. 낙반/붕락 예측기법

3.1 RMR 값에 따른 낙반/붕락

본 도수로 터널에서의 낙반/붕락은 RMR 60이하인 경우에 발생하였다. RMR값을 보강타입 A~F로 범주를 나누어 보았을 때 RMR 60이상인 경우, 즉, Type- A와 B 에서는 924 개소의 막장에서 낙반/붕락이 단 한 건도 발생하지 않았다. 또한 구간별로 얻은 막장에서의 전체 RMR 값과 낙반/붕락 구간의 RMR 비율은 표 3과 같다.

표 3. RMR 값에 따른 낙반/붕락

RMR 값	보강타입	낙반횟수	백분율(%)
41~60	C	18	23
21~40	D	32	39
10~20	E	24	30
10이하	F	6	8

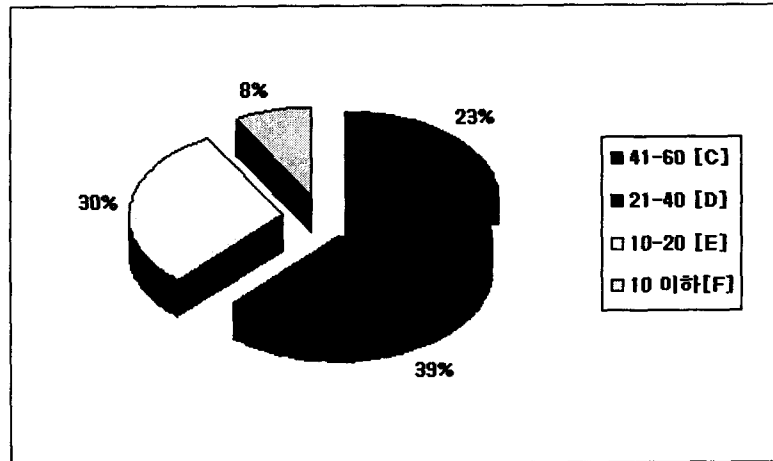


그림 2. RMR에 따른 낙반/붕락 비율

3.2 판별분석을 이용한 낙반예측

설명변수를 RMR의 요소인 강도, RQD, 절리면 간격, 절리면 상태, 지하수 상태, 불연속면 방향성 보정, 절리군의 수로 놓고 반응변수는 낙반깊이 0.4m이상의 구간을 낙반발생 구간, 그 외의 구간을 안정구간으로 하여 분석을 실시한 결과, 절리군의 수 (SN), 불연속면 방향성 보정 (SD), 일축압축강도 (SC), 절리면 상태 (DC)가 판별력이 높은 변수로 결정되었으며 다음과 같은 판별함수가 도출되었다.

$$D = -1.582 + 0.099 \cdot DC + 0.197 \cdot SD + 0.214 \cdot SC - 0.195 \cdot SN$$

여기서, SN: 절리군의 수

DC: 절리면 상태에 대한 점수

SC: 일축압축강도에 대한 점수

SD: 절리면 방향성에 대한 보정

판별함수에 의해 재분류한 결과는 표 4와 같으며 안정구간에서는 잘못 분류된 구간이 844건 중 236건 (28.0%)이었고 낙반구간에서는 80건중 20건(25%)이었다. 또한 전체적으로 약 72.2%가 잘 분류된 것으로 확인되었다. 안정구간과 낙반구간의 오분류는 낙반이 일어난 구간중 낙반깊이가 0.4m이하인 경우를 안정구간으로 분류하여 분석한 영향이라고 판단된다.

표 4. 판별적중률

FALL			예측 소속 집단		전체
			0	1	
원래 값	빈도	0	608	236	844
		1	20	60	80
	%	0	72.0	28.0	100.0
		1	25.0	75.0	100.0

원래의 집단 케이스중 72.2%가 올바르게 분류되었습니다.

4. 터널 조사 및 분석 프로그램

터널 지질조사 시스템은 분할 윈도우 형태로 이루어지며 좌측의 윈도우에는 시스템 전체의 내용을 관리하기 편하도록 프로젝트, 터널 개소 및 터널 막장을 트리 구조로 구현하고 있다. 이 트리 구조는 조사 데이터의 데이터베이스 구조 설계 개념이 아닌 관리의 편의성을 위해 채택된 것으로 윈도우 탐색기와 같이 하부 노드에 터널 막장 관찰 자료 등을 추가할 수 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 하나의 프로젝트를 생성하고 이에 대한 정보를 입력하여 각 터널에 대한 정보를 관리하게 된다. 프로젝트 정보는 프로젝트 코드, 프로젝트 명, 노선이름, 공구이름, 공사일정, 발주 및 시공, 설계자들의 정보 등으로 구성되어 있다.

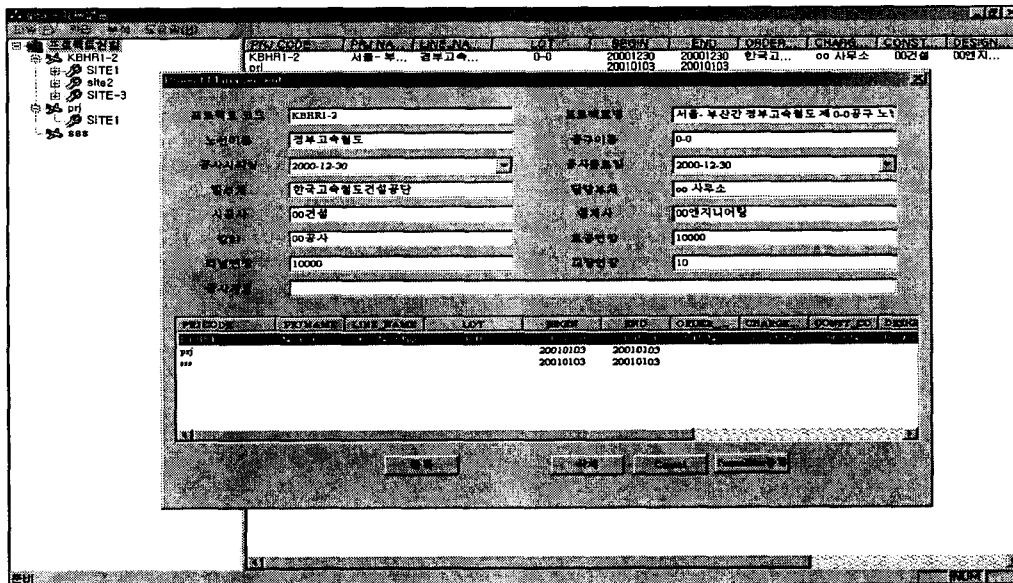


그림 3. 트리 구조 및 프로젝트 관리 입력창

모든 프로젝트 입력창에서는 입력된 다수의 프로젝트에 대한 정보를 확인할 수 있으며, 사용자는 이들 정보들을 등록, 수정, 삭제할 수 있다.

그림 4, 5, 6에서는 간편 RMR, 낙반분석, 블록안정성 프로그램의 분석창을 나타내었다.

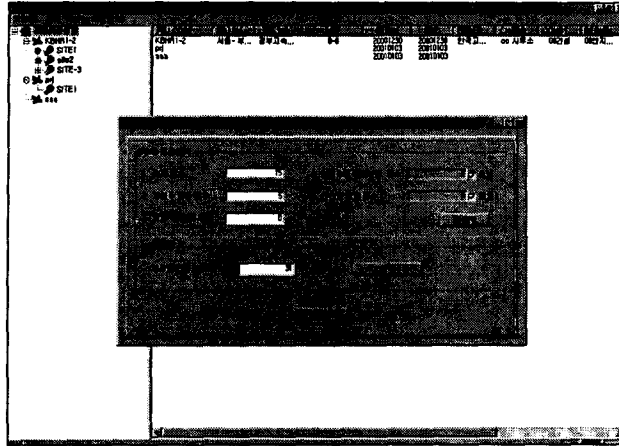


그림 4. 간편 RMR 분석창

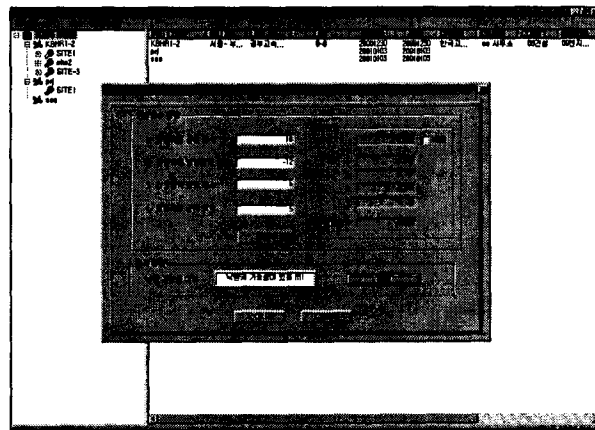


그림 5. 낙반 가능성 추정 분석창

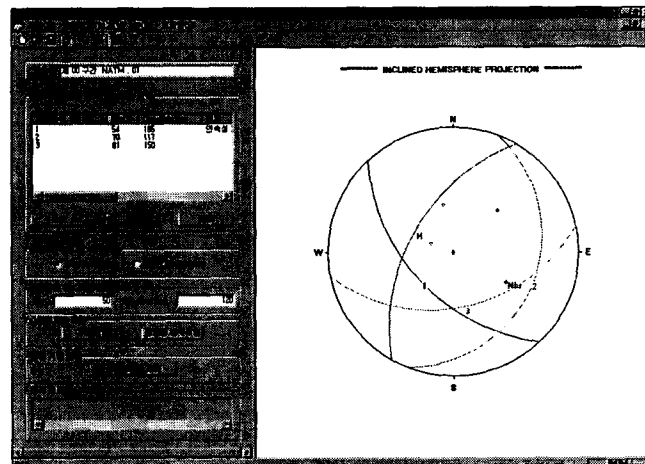


그림 6. 경사진 반구 투영법의 예

5. 결론

본 연구에서는 조사, 시공 정보 등을 통합적으로 관리하고 이를 통해서 터널의 안정성 분석을 실시하기 위한 터널 지질조사 및 안정성 분석 시스템을 개발하여 시공관리의 체계화와 효율성을 증대시키는 것을 최

중 목표로 한다. 이에 다음과 같은 성과를 얻었다.

1) 기존 RMR의 문제점을 보완하기 위하여 다중회귀분석을 이용한 간편 RMR을 제안하였다. RMR 평가 요소는 RQD, 절리면 상태, 지하수 상태, 불연속면 방향성 보정, 일축압축강도의 순으로 그 중요도가 결정되었으며 이에 의거하여 다음과 같이 요소가 3~5개인 최적의 다중회귀모형을 제시하였다.

$$\blacktriangleright \text{RMR} = -1.515 + 1.859 \times \text{RQD} + 1.296 \times \text{DC} + 0.933 \text{GW} \quad (R^2 = 0.95)$$

$$\blacktriangleright \text{RMR} = 7.873 + 1.855 \times \text{RQD} + 1.198 \times \text{DC} + 0.954 \text{GW} + 1.068 \times \text{SD} \quad (R^2 = 0.97)$$

$$\blacktriangleright \text{RMR} = 4.259 + 1.329 \times \text{RQD} + 1.066 \times \text{DC} + 1.001 \text{GW} + 1.050 \times \text{SD} + 1.103 \times \text{SC} \quad (R^2 = 0.99)$$

제시된 모형의 수정 결정계수는 각각 0.95, 0.97, 0.99로 원자료를 잘 설명하고 있음을 확인하였다. 또한 모형의 유용성을 검증하기 위하여 타 지역 지반조사자료(206개소)와 각 구간별 데이터를 이용하여 실측 RMR 값과 회귀식을 이용한 예측 RMR값의 단순회귀분석 실시 결과 결정계수가 대부분 0.9이상으로 매우 높은 설명력을 가지고 있음을 확인하였으며 제시된 모형의 유용성이 검증되었다.

간편 RMR은 터널 현장의 여건상 몇 가지 조사 항목이 누락되었다 하더라도 상기의 회귀모형식을 이용하여 원래의 RMR값에 매우 근접한 값을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 보다 객관적인 RMR값을 유도할 수 있다는 데에 그 특징이 있다.

2) 국내 도수로 터널에서 발생된 80회 가량의 낙반 자료를 이용하여 구간별 실제 보강 사례를 분석한 결과 RMR과 높은 상관성을 가지고 있음을 확인하였다.

또한 낙반 발생의 가능성 유무를 판별하기 위하여 통계적인 기법중 판별분석을 이용함으로써 낙반의 발생 가능성을 예측하였다. 판별분석 결과 다음과 같은 Fisher의 판별함수를 도출하였다.

$$D = -1.582 + 0.099 \cdot DC + 0.197 \cdot SD + 0.214 \cdot SC - 0.195 \cdot SN$$

여기서, SN: 절리군의 수

DC: 절리면 상태에 대한 점수

SC: 일축압축강도에 대한 점수

SD: 절리면 방향성에 대한 보정

판별함수에 의해 재분류한 결과는 안정구간에서는 잘못 분류된 구간이 844건중 236건(28.0%)이었고 낙반 구간에서는 80건중 20건(25%)이었다. 또한 전체적으로 약 72.2%가 잘 분류된 것으로 확인되었다.

3) 터널 지질조사 및 안정성 분석 시스템을 구현하기 위한 시스템 분석을 실시하였으며 이에 터널 지질조사 자료를 통합적으로 관리하기 위한 데이터베이스를 기반으로 하는 응용프로그램을 설계하였다. 데이터베이스는 공사의 일반적인 사항을 포함하는 프로젝트 정보, 터널 정보, 실내 시험 및 시추시험, 현장 시험 그리고 막장관찰 및 RMR/Q 평가를 포함하는 조사 정보, shotcrete 및 rockbolt, 보조공법, 굴착 방법 등을 포함하는 시공 정보로 나뉘어 통합적으로 관리된다. 구축된 데이터베이스를 이용하기 위한 응용프로그램은 사용자 편의를 위해 GUI를 지원하는 Visual C++로 프로그래밍하였다. 본 프로그램에서는 절리의 방향과 크기 및 불연속면 군의 방향과 경사 정보에 의한 평사투영법을 적용한 결과와 간편 RMR 점수 추정 및 낙반 가능성 예측 기능 등을 통해 터널의 전반적인 안정성과 국부적으로 보강이 필요한 지역 등의 지반 정보를 제공한다.

사 사

본 연구는 「쌍용건설(주) 기술연구소」의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구에 도움을 주신 쌍용건설(주) 기술연구소 담당자 여러분께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

1. 日本道路協會, 道路터널 觀察·設計指針, 日本道路協會, pp.192~203, 1994
2. 吉中龍之雄 외, 岩盤分類와 그의 適用, 土木工學社, pp. 62~89, 1993.
3. Bieniawski, Z.T, Rock mechanics design in mining and tunneling, pp. 97~135, 1984
4. 암반공학회 외, 건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술, 암반공학회 외, pp. 541~585. 1999.
5. Priest, S.D, "Estimation of Discontinuity spacing and trace length using scanline", Int. J. Rock. Min. Sci. & Geomech. Vol.18. pp. 183~197. 1981.
6. 한국수자원공사, 수로터널 설계 및 시공지침, 한국수자원공사, pp.77~89. 1997.
7. 조태진, 반구투영법을 이용한 암석역학, 구미서관, pp.71~96. 1999.
8. John C. Davis. "Statics and data analysis in geology", John Wiley & Sons, Inc. pp.330~342. 1986.
9. 구자홍, 高級統計學, 인하대학교 출판부, pp. 39~69. 1995.
10. Wayne W. Daniel, "Applied nonparametric statistics", Pws-kent, pp. 31~73.1990.
11. 김관영 외. 다변량 통계분석법, 자유아카데미, pp.12~54. 1995.
12. 류근호 외, 데이터베이스, 한국방송대학교출판부, pp.58~74,1987.
13. 왕창종 외, 시스템분석 및 설계, 한국방송대학교출판부, pp.124~246, 1992.
14. 토목기술강좌 "토질 및 기초편", 대한토목학회, pp.771-794,1998
15. 이상엽, Visual C++ Programming Bible Ver. 6.x, 영진출판사, pp. 1281-1373, 1998