

서울일대 암반을 대상으로 한 Geotechnical Information System (GTIS)의 개발 및 활용 (1)

김정엽¹⁾ · 전효택²⁾ · 박형동³⁾

A Development and Utilization of Geotechnical Information System (GTIS) of the Rock Mass in Seoul Metropolitan Area (1)

Jung-Youp Kim, Hyo-Taek Chon and Hyeong-Dong Park

Abstract Geotechnical Information System (GTIS) for efficient management of three dimensional borehole data has been developed. Some problems were raised during the input process of borehole data, and alternative solutions were sought. According to the previous geotechnical reports, there is no unified weathering classification scheme. A criterion, 100 times/30 cm from SPT, was turned out inappropriate to the discrimination of weathered rock from weathered soil. It has also been suggested that weathered soil, weathered rock, soft rock, and hard rock should be defined as CW, HW, MW, and SW~fresh condition. For better comparison of RQD, the use of NX size coring is recommended for the whole area although BX size coring has been used in excavated area. The limit of drilling depth up to 1 m from the top of surface of hard rock should be extended to avoid possible wrong interpretation of rock head due to the existence of corestone. The input data were analysed by geostatistical methods. It is found that the range in semivariogram is about 300 m, and that the variance of gneiss is greater than that of granite. It is because the granite data analysed came from almost single uniform rock mass (i. e. Seoul granite), but gneiss data came from the rock mass (i.e. Gyeonggi gneiss complex) experienced several metamorphic processes.

1. 서 론

지하철, 지하유류비축기지과 같은 지하구조물의 건설이나, 대형 건축물의 건설을 위한 지반조사로서 시추조사는 가장 기본적이라 할 수 있다. 국내에서 지반조사를 위한 시추조사가 언제부터 수행되었는지 알려지고 있지는 않지만 현재 기록으로 남아 있는 가장 오래된 대규모의 지반조사보고서는 수도권 지하철 1호선 건설을 위해 1971년 작성된 지질조사보고서이다.^{1,2)} 이후 수도권에서는 지하철 2~8호선, 경부고속전철 등의 대규모 사업이 수행되면서 수많은 시추조사가 실시되었다. 그러나 이와 같은 대형 건설사업을 위한 시추공 자료들은 건설당시에만 사용되었을 뿐 이후 자료의 보존 및 관리가 되

지 않아 기존의 자료가 있는 지역임에도 불구하고 이후에 수행되는 사업을 위해서 또다시 같은 지역에 시추공사를 수행한 예를 흔히 볼 수 있다. 또한 시추공 자료들은 체계적으로 정리되지 못한 채 지질조사보고서에 수록되어 왔으며 이에 따라 현장에서도 시추공 자료들을 충분히 활용하지 못하고 있는 실정이다.

이러한 문제점들은 시추공 자료가 4차원적인 data속성을 지니고 있기 때문에 발생한다. 시추공 자료는 X, Y, Z 좌표, 즉 3차원 좌표공간에 속성 값이 주어지는 자료이기 때문에 자료의 처리과정이 난해하고 이에 따라

- 1) 정회원, 선경건설주식회사
- 2) 정회원, 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수
- 3) 정회원, 배재대학교 건설공학부 자원환경공학 전공

자료의 시각화가 힘들다. 공간상의 자료처리와 관련하여 1980년대 이후 GIS(Geographical Information System)가 급격히 보급되며 관심을 끌었지만 이와같은 기존의 GIS는 근본적으로 지표상의 지형공간 정보를 대상으로 하는 2차원적인 자료처리라는 한계를 갖고 있다. 이에 따라 최근에는 GIS로는 해결할 수 없는 지하공간의 개발이나 지하수오염 등의 문제가 급증하면서 이를 해결하기 위하여 3차원 공간상의 자료처리를 위한 GSIS(Geoscientific Information System)의 개념이 도입되어 선진국에서는 실용화 단계에 이르고 있지만,³⁾ 아직 국내에는 GSIS라는 용어조차 소개되지 못하고 있는 실정이다.

이에 따라 이 연구에서는 국내에서 가장 많은 시추공이 굴착된 서울 일대의 시추공 자료들을 대상으로 체계적으로 관리하고, 효과적으로 시각화하여 지하구조물을 설계할 때 기본 자료로 쓰일 수 있으며, 시공현장에서 손쉽게 사용할 수 있는 Geotechnical Information System(GTIS)을 개발하고자 하였으며, 자료의 입력과정에서 나타난 지반조사보고서의 문제점을 지적하고 그 해결방안을 모색하고자 하였다.

서울 일대를 대상으로 작성된 지반조사보고서¹⁻²¹⁾를 모아 Windows 3.1용 데이터베이스 프로그램인 Lotus Approach를 이용하여 시추공 자료를 정리하였다. 정리된 자료는 크게 HOLE.dbf, WEATHER.dbf, RQD.dbf의 세 가지 파일로 나누어 입력되었다(Fig. 1).

HOLE.dbf는 시추공의 명칭, UTM좌표를 이용한 위치, 표고, 암종, 시추구경, 지하수위의 정보를 담고 있는 파일로서 총 2037개의 레코드를 갖고 있다(Fig. 2). 지반조사보고서에 기록되는 표고는 철도표고로서 서울역 구내의 기설수준점(표고 (+) 124.312 m)을 기준으로 하며 이는 해수면을 기준으로 한 일반적인 표고에 비해 100.3 m가 높다.²²⁾

2037개의 레코드 중 766개가 화강암이고 1247개가 편마암이며 나머지 24개는 충적층, 암맥, 규암, 편암으로 구성되어 있다(Table 1). 암종은 지표면에 충적층이 존재하더라도 하부에 암반이 나타날 경우 암반의 정보를 입력하였으며 시추 결과 암반을 발견할 수 없는 충적층의 경우에만 충적층으로 입력하였다. 시추구경은 BX와 NX로 나누어지는데 BX 구경이 1212개, NX 구경이 825개이다. 지하수위는 지표면을 기준으

2. 자료입력

2.1 자료입력방법

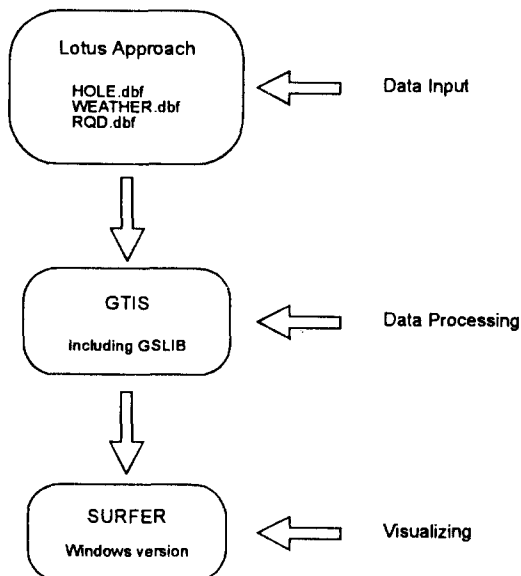


Fig. 1. Flowchart of data processing.

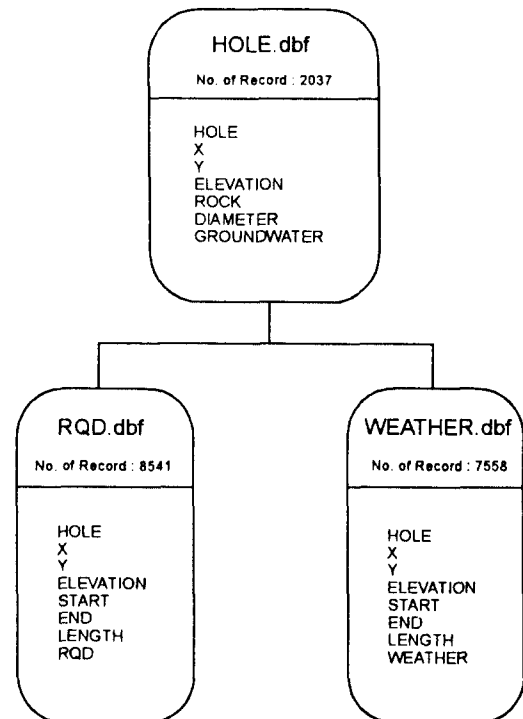


Fig. 2. Structure of the Lotus Approach database files.

Table 1. Number of boreholes classified according to rock types

	Seoul Metropolitan Subway							Kyungbu Highspeed Railway	Total
	Line 1	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8		
Gneiss	0	156	89	178	124	314	231	155	1247
Granite	148	154	149	74	83	152	0	6	766
others	0	4	11	9	0	0	0	0	24
Total	148	314	249	261	207	466	231	161	2037

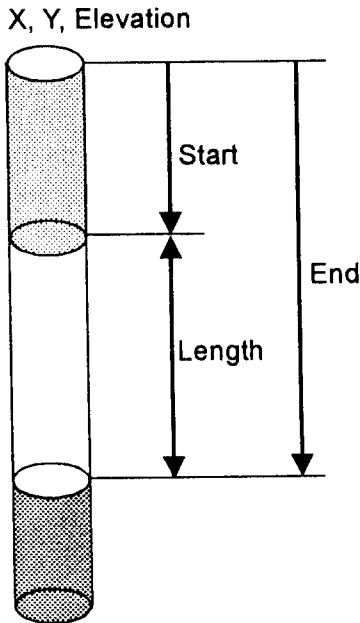


Fig. 3. Definition of input variables.

로 몇 m 하부에 지하수면이 존재하는가를 입력하였다.

WEATHER.dbf와 RQD.dbf는 시추공의 명칭 필드를 매개로 하여 HOLE.dbf의 모든 필드를 공유하며, 자체적으로 암석의 풍화등급에 대한 정보와 RQD (Rock Quality Designation)에 대한 정보를 7558개와 8541개의 레코드에 각각 담고 있다(Fig. 2). RQD와 풍화등급에 대한 정보는 HOLE.dbf에 연결되어 있는 레코드의 표고를 기준으로 지하 몇 m로부터 (START field) 몇 m까지 (END field) 하나의 속성을 갖고 있다는 방식으로 자료를 입력하였으며 이후 GTIS에서의 자료처리를 위하여 자동으로 해당 구간의 길이 (LENGTH field) 를 계산하였다(Fig. 3).

풍화등급은 ISRM의 기준에 의하여²³⁾ fresh로부터 residual soil에 이르기까지의 6단계를 사용하였으며

풍화 6단계에 포함되지 않는 충적층, 매립층 등은 residual soil과 같은 풍화등급인 6등급으로 입력하였다. 따라서 GTIS를 이용하여 작성된 풍화정도를 나타내는 지질공학도의 soil은 residual soil과 매립층, 충적층을 포함한다.

3. 기존 시추공자료의 문제점 및 해결방안

3.1 자료의 보존상태

기존에 발행된 지반조사보고서의 체계적인 관리가 이루어지고 있지 않아 기존의 자료가 다시 활용되기 힘든 상태이다. 특히 수도권 지하철 2호선의 지반조사보고서는 이미 소실되어 GTIS에 입력하지 못하였으며, 지하철 1호선의 지반조사보고서는 훼손 정도가 심하였다. 지하철, 고속철도와 같은 대규모 사업의 지반조사보고서는 어느 정도 보존이 되고 있지만, 기타 소규모의 지반조사보고서는 관리 체계가 전혀 없어 이에 대한 대책이 필요하다고 판단된다. 이와 같은 자료의 손실을 막기 위해서는 각 지방정부에 시추공자료의 제출을 의무화하는 방안을 고려할 수 있다.

3.2 측량

수도권 지하철 3호선이후의 대규모 사업에서는 측량을 실시하여 좌표 및 표고를 기재하고 있다. 그러나 지하철 1호선 전구간, 3호선의 일부 구간, 경부고속전철의 일부구간에서는 측량이 실시되지 않아 GTIS로의 입력이 곤란하였다. 또한 대부분의 소규모 지반조사보고서에는 측량을 실시하지 않아 자료로서 활용할 수 없었다. 이에 따라 일부의 자료는 1:10000 지형도와 비교하여 좌표를 결정하였으나 이 과정에서 지도상의 1 mm의 오차가 발생하여도 실체는 10 m의 오차가 발생할 수 있다. 따라서 추후 자료의 활용을 위해서는 시추시 측량을 의무화하는 방안이 필요하다 할 수 있다.

3.3 풍화정도 및 암반분류

시추코아의 풍화정도를 기재할 때에는 ISRM의 기준²³⁾을 따르는 것이 가장 일반적이라 할 수 있다. 그러나 지반조사보고서에 풍화등급을 기재하는 용어는 Table 2와 같이 지반조사를 수행한 기관별로 달라서 용어상의 혼란을 일으키고 있다. 특히 '심한 풍화'라는 용어는 A사가 highly weathered를 의미하는 반면,⁸⁾ B사와 C사는 completely weathered를 의미하고 있어^{13,14)} 문제점을 낳고 있다. 아직 용어상의 표준화가 이루어지지 않은 상태이므로 명확한 결정은 내릴 수 없지만 A사의 용어가 더 적합한 것으로 판단된다.

일부의 지반조사보고서는 보고서의 도입부에서는 풍화 6단계에 의하여 분류하였다고 기재하고 있으나, 시추주상도에는 이와 같은 분류를 하지 않고 지질조사 표준품셈에 의한 풍화암, 연암, 경암의 기재만을 한 경우도 있었다.¹³⁾ 이러한 지반조사보고서에 실려 있는 지질 단면도에는 풍화암을 completely weathered로, 연암을 highly weathered~moderately weathered로, 경암을 moderately weathered~fresh로 기재하고 있다. 이에 따라 풍화등급을 GTIS에 입력할 때에는 풍화 6단계에 의한 경우에는 이를 등급으로 넣었으며, 지질 품셈만을 기재한 경우에는 풍화암을 5등급으로, 연암을 3.5등급으로, 경암을 2.5등급으로 입력하였다. 따라서 fresh로부터 moderately weathered에 이르기까지의 폭넓은 범위를 말하는 경암대의 입력에서 많은 오차가 발생하였을 것으로 예상된다.

현재 국내에는 풍화암-연암-경암의 3단계 암반 (rock mass) 분류법과 풍화암-연암-보통암(또는 중경

암)-경암-극경암의 5단계 암석(rock material) 분류법이 혼용되고 있으며 사용용어 또한 풍화정도를 묘사하는 것과(예: 풍화암) 암석의 경도를 나타내는 것(예: 연암, 경암)이 혼용되고 있어 용어상의 혼란을 가중시키고 있다. 암석의 5단계 분류법은 암석시편의 탄성과 속도나 단축압축강도에 의해 구분하는 것으로서, 암석의 풍화변질상태, 절리면 등의 균열상태, RQD, 지하수의 영향 등을 모두 고려하여 판단하는 암반의 3단계 분류와는 다른 것임에도 불구하고 암석의 분류기준을 암반의 분류기준으로 잘못 소개하는 경우도 있다.²⁴⁾ 또한 풍화암-연암-경암의 3단계 암반분류 용어를 사용한다 할 지라도 조사단계에서 조사기술자의 분류 기준이 설계, 시공 및 감리시 사용하는 터널을 위한 암반분류와 서로 다른 의미를 갖는 오류를 범하고 있다.²⁵⁾ 국내 시공현장에서 가장 많이 쓰이는 지질품셈에서는 풍화대를, 1) 완전 점토화되고 토립자들의 재구성이 이루어진 잔류토층, 2) 부분적으로 점토화되고 암석들이 완전 분해는 되었으나 원위치에서 매우 굳고 치밀하며 모암의 원구조를 지니는 풍화토층, 3) 암석 조직의 분해는 완료되지 않았으나 암석 내부까지 풍화가 진행되어 타격에 의하여 쉽게 부서지는 풍화암층으로 구분한다.¹⁴⁾ 잔류토는 국내에서는 발달상태가 매우 드물며,²⁶⁾ 풍화 6단계의 residual soil과 완전히 같은 의미로서 용어상의 혼란은 없다고 판단된다. 한편 일부의 지반조사보고서에는 풍화토를 residual soil로 기재한 경우가 있는데,¹⁴⁾ residual soil이란 잔류토에 해당하는 용어로서 풍화토에는 사용하지 말아야 한다.

풍화토와 풍화암은 지질품셈의 정의에 의한다면 각각 completely weathered와 highly weathered에 대응되는 용어이다. 그러나 시추주상도에는 풍화암이 completely weathered로 기재되어 있는 경우가 많다. 이러한 현상은 지반조사기술자가 풍화토와 풍화암을 시추주상도에 기재할 때 위의 지질품셈상의 기준을 따르지 않고, 풍화토와 풍화암이 풍화정도나 토질특성상 유사성을 갖고 있으나 굴착시공시 야기되는 문제점을 보완하기 위하여 ripper 시공 가능여부에 대한 경험적 임의성을 가지고 분류한 층이라는 가정하에 표준관입 시험 N치가 100회/30 cm 미만인 층을 풍화토, 그 이상인 층을 풍화암으로 구분하고 있기 때문이다.¹²⁾ 그러나, highly weathered 상태의 지반은 암석과 토양의 중간 단계로서 기전상태에서 35~55 MPa 정도의 단축압축 강도를 갖는²⁷⁾ 암석 시추코아가 나올 수 있는 상태이므

Table 2. Comparison of the terms for weathering grade used in Korea and the international

ISRM	국내 A사	국내 B사	지질품셈 (시추주상도)	지질품셈 (개정안)
Fresh	신선	신선		
Slightly Weathered	약간 풍화	약간 풍화	경암	경암
Moderately Weathered	보통 풍화	어느정도 풍화		연암
Highly Weathered	심한 풍화	상당히 풍화	연암	풍화암
Completely Weathered	완전 풍화	심한 풍화	풍화암 풍화토	풍화토
Residual Soil			잔류토	잔류토

로 표준관입시험은 가능하지 않을 것으로 추정되며 따라서 표준관입시험 100회/30 cm는 completely weathered와 highly weathered의 정확한 경계를 나타내지 못하는 것으로 추정된다. 따라서 지반조사기술자가 의미하는 풍화토와 풍화암은 completely weathered를 세분한 용어가 되며, 이에 따라 풍화암은 터널기술자의 입장에서는 highly weathered를, 지반조사기술자의 입장에서는 completely weathered를 의미하는 차이를 낳게 된다. 또한 풍화암의 정의가 서로 다르기 때문에 연암의 경우 터널기술자의 입장에서는 moderately weathered를, 지반조사기술자의 입장에서는 highly weathered~moderately weathered를 의미하며, 경암의 경우 터널기술자의 입장에서는 slightly weathered~fresh를, 지반조사기술자의 입장에서는 moderately weathered~fresh를 의미하게 된다.

Fresh로부터 residual soil까지의 풍화 6단계중 fresh, slightly weathered, moderately weathered는 암석, highly weathered는 암석과 토양의 전이단계, completely weathered와 residual soil은 토양의 개념이므로,²⁸⁾ 토양층에 해당하는 completely weathered의 일부를 풍화암으로 부르는 것은 잘못된 것이며 completely weathered 단계의 전부를 풍화토(또는 마사토)로 명명해야 한다고 판단된다. 또한 풍화암은 암석과 토양의 전이단계인 highly weathered를, 연암은 moderately weathered를, 경암은 fresh와 slightly weathered에 대응되는 것으로 판단된다(Table 2).

이상과 같은 용어상의 혼란으로 설계시에 터널의 지보패턴이 잘못 결정될 수 있으며, 이러한 예는 과천선 제7공구 9 km 682.5 지점부터 10 km 240.0 지점에 이르는 복선 터널 구간에서 잘 나타난다. 이 구간은 원래 PD-4(pattern double, 복선터널 표준단면)와 PD-5인 표준단면을 적용한 NATM 공법으로 설계되어 있었다. 설계에서 결정한 PD-4 및 PD-5 표준단면에서의 지보패턴은 연암 이상의 강도를 가지는 지반에서의 NATM 터널에 적합하며, 당초 지반조사보고서에도 본 터널이 풍화암 및 약간의 연암지역을 통과하는 것으로 판단하였다(Fig.4 (a)). 그러나 시공 중 매우 열악한 지질조건으로 인하여 재실시된 지질조사로부터 본 터널의 상부 지반은 토사층이며, 터널 하부에 비로소 심하게 풍화된 암반층이 나타나는 것으로 판명되었다.²⁹⁾ GTIS를 이용하여 이 지역의 풍화정도와 RQD를 나타내는 단면도를 작성하여 본 결과(Fig.4 (b), (c)), 터널구

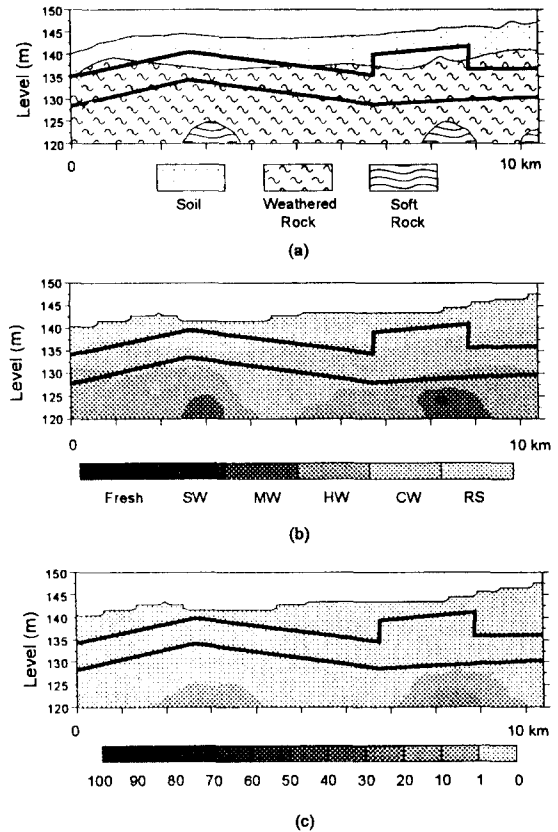


Fig. 4. Geotechnical profile of Kwachon area (a) Rock classification according to geologic investigation report, (b) Weathering grade map made by GTIS, (c) RQD map made by GTIS.

간의 거의 대부분은 completely weathered 상태이며 터널 하부에 highly weathered 상태의 풍화암층이 나타나고 있어 적절한 지보패턴은 PD-3, 또는 일부 열악한 구간에서 PD-2로 판단된다. 따라서 당초의 지반조사가 잘못되었다기보다는 지반조사 결과를 지질단면에 도시할 때 표준관입시험치 100회/30 cm 기준에 의하여 completely weathered에 해당하는 구간의 상당부분을 풍화암으로 기재하였기 때문에 이와 같은 문제점이 발생한 것으로 추정된다.

풍화암-연암-경암의 암반분류 용어는 풍화의 정도와 암석의 연·경을 나타내는 용어를 함께 사용한다는 측면에서 바람직하지 않지만 이미 현장기술자들에게 확립되어 있기 때문에 다른 용어를 사용하는 것은 곤란하며, 따라서 새로운 용어를 사용하기보다는 이를 위에서 언급한 바와 같이 보완하는 것이 바람직하고 판단된다.

한편 농어촌진흥공사에서는 RMR을 변형하여 풍화도사-풍화암-연암-보통암-경암-극경암의 6단계 분류를 제시하기도 하였는데³⁰⁾ 이러한 분류체계는 공학적 성질이 다른 잔류토와 풍화토를 합쳐서 풍화토사로 명명하는 문제점이 있고, 암반을 너무 세분화하여 분류하는 경향이 있으며, 또한 객관성을 보장할만큼 충분한 양의 경험적 데이터가 부족하다. Highly weathered로부터 fresh에 이르는 암반의 상태는 풍화암(highly weathered)-연암(moderately weathered)-경암(lightly weathered~fresh)의 3단 분류로도 큰 문제는 없으며, 경암을 RQD에 따라 RQD 50이상을 경암 II, 50 이하를 경암 I로 구분하는 제2기 지하철 건설의 지보패턴 결정에 사용된 기준²⁶⁾이 추가된다면 터널공사를 위한 암반분류는 충분할 것으로 판단된다.

3.4 RQD

RQD는 암반의 상태가 좋지 않은 부분을 잘 나타내 주는 효과적인 지표이며³¹⁾ 터널 설계에 RQD가 대단히 중요한 가치가 있으며 RQD에 따라 지보설계를 할 수 있는 것으로 제안되었다.³²⁾ 그러나 RQD가 간단하면서도 효과적인 측정치이기는 하지만 절리의 방향, 절리 충전물질, 절리면의 거칠기 등에 대하여 전혀 정보를 주지 못하기 때문에 암체에 대하여 완전한 정보가 될 수는 없다. RQD를 측정하기 위해서는 최소한 NX 규격(54.7 mm) 이상의 double-tube core barrel로 시추할 것을 ISRM은 추천하고 있으며, 길이 10 cm 이상의 시편이더라도 highly weathered 이상의 풍화단계일 때에는 RQD의 계산에 넣지 않아야 한다.³³⁾

GTIS에 입력된 시추공은 BX 구경이 1212개, NX 구경이 825개로서 RQD의 측정에 필요한 NX 구경 이상을 만족시키지 못하는 시추공이 전체의 59.5%를 차지한다. 지하철 1호선 148개공, 지하철 3호선 10개공, 지하철 4호선 22개공에서는 RQD가 측정되지 않았으며 지하철 1호선을 제외한 모든 시추공은 기록상으로도 double-tube core barrel로 시추되었다. Bieniawski에 의하면 주의깊게 드릴링작업이 수행된다면 BQ(36.5 mm)~PQ(85 mm)의 시추공에서의 RQD도 의미가 있다고 하였다.³³⁾ 국내에서 이루어진 시추가 모두 주의깊게 드릴링작업이 수행되었는지는 알 수 없지만 GTIS에서는 NX, BX 구경 모두를 자료로서 활용하였으며 이에 따라 오차가 발생할 가능성이 있다. 따라서 GTIS는 추후 NX 구경의 자료가 충분히 더 많

아진다면 BX 구경의 자료를 모두 제외하고 자료를 처리할 수 있도록 향후 개발 가능성을 남겨 두었다.

RQD란 일정한 길이의 시추코어에 대한 평균적인 개념이지만 굴진길이에 대한 명확한 정의는 없다. 이에 따라 GTIS에 입력된 지반조사보고서에서 RQD는 최소 0.2 m로부터 최대 24.9 m에 이르는 구간을 하나의 구간으로 설정하여 측정이 되었다. GTIS에서는 이러한 RQD의 측정치를 1.0 m 간격으로 추출하여 처리하였다. RQD의 측정이 너무 긴 구간에 대하여 결정되면 수직적으로 암반의 상태가 변화하는 양상을 충분히 나타낼 수 없다. 따라서 추후의 지반조사보고서에는 1~3 m 정도의 길이에 대하여 RQD를 측정하는 것이 바람직하다고 판단된다. 한편 일부의 지반조사보고서에는 RQD를 측정하지 않고 '코어회수율 불량', '코어회수율 매우불량' 등의 단순한 용어로 기재한 경우가 있어³⁴⁾ 이에 대한 적절한 규제가 있어야 할 것으로 판단된다.

3.5 시추공의 구경

개착식 시공이 대부분이었던 제1기 지하철 지반조사에서는 거의 대부분의 시추공이 BX 규격이었으나 제2기 지하철 지반조사에서는 개착 구간에서는 BX 규격을, 터널구간에서는 NX 규격을 사용하고 있다. 시추공의 구경은 채취 시료의 품질을 좌우하는 매우 중요한 요소로서 동일한 암반이라도 구경이 커질수록 TCR(Total Core Recovery) 및 RQD 등의 수치가 높아진다.³⁵⁾ '3.4 RQD'에서 언급한 바와 같이 RQD를 효과적으로 측정하기 위해서는 개착구간이라 하더라도 NX 규격으로 하여야 한다. 풍화대 또는 연암 등에서는 코어회수율이 극히 저조하기 때문에 HX(100 mm) 구경의 시추를 시행하는 것이 바람직하다고 한 경우도 있지만³⁶⁾ 시추 비용을 대폭 상승시키면서 HX 구경으로 할 필요는 없다고 판단되며 이보다는 NX 구경의 시추공 수를 늘려서 시추공 간격을 좁힌다거나, 3차원적 해석을 위해 노선의 횡방향으로도 시추하는 것이 암반의 상태를 명확히 파악하는데 도움이 되리라 판단된다.

3.6 시추공의 심도

지하철 6호선의 기본설계시에는 개착 계획 구간에서는 경암 1 m까지 시추하는 것을 원칙으로 하되, 암층이 확인되지 않을 경우 계획고 하부 5 m까지 시추하며 주변지역과 비교하여 지층변화가 심할 경우 서울시의 승인을 얻어 계획고 하부 10 m까지 시추하되 조사 도중

에 암층이 확인되면 종료하였다. 터널 계획 구간에서는 계획고 하부 1 m까지 시추하며, 이 때 터널 계획고 하부의 지질상태가 미고결층이거나 주변지질상태와 비교하여 변화가 심할 경우 서울시의 승인을 얻어 계획고 하부 10 m까지 시추하되, 도중에 암층이 확인되면 종료하였다.¹⁴⁾

우리나라 대부분에서 핵풍화양상은 드문 편이지만,²⁸⁾ 서울 홍제동 지역 및 상봉동 용마공원 지역에서 직경 2 m에까지 이르는 핵석을 포함하는 핵풍화가 관찰되었으며,^{26,28)} 영동고속도로 확장공사시에도 일부구간에서 핵풍화현상이 관찰되었다.³⁷⁾ 따라서 시추를 할 때 개착 예상구간에서 경암층이 판단되었더라도 핵풍화 현상에 의하여 하부에 다시 암질이 좋지 않은 암반이 나타날 가능성이 있으므로 경암 1 m까지만 시추하는 것은 재고되어야 한다.

터널구간은 지하철 5호선에서는 터널 인버트 심도보다 2 m 깊게, 6호선에서는 터널직경만큼 깊게 시추하도록 되어 있다. 터널 주변의 지반 거동을 고려할 때, 최소한 터널굴착으로 인한 응력 개방 영향권 이내 지반상태의 확인이 필요하므로 최소 시추 심도는 개념적으로 (터널 인버트 심도)+(영향권 거리)가 되어야 할 것이다. 따라서 일반적으로 터널 굴착으로 인한 응력 개방의 영향권이 터널의 직경 정도인 것을 감안하면 최소 시추심도를 (터널 인버트 심도)+(터널 직경)으로 하는 것이 타당할 것으로 판단된다.^{35,37)}

4. 지구통계학적 자료처리

4.1 Semivariogram 분석

Lotus Approach를 이용하여 입력된 자료는 자료변환 과정을 거쳐 GTIS에서 Kriging 기법으로 처리된다. Kriging은 공간상에 분포되어 있는 속성값을 추정하는 기법으로서 Kriging에서 다루는 변수는 regionalized 변수이다. Region-ized 변수란 공간적으로 연속적이면서, 완전히 무작위적이지도 않고 또한 기하학적 함수로 정확히 추정할 수도 없는 변수를 의미한다.³⁸⁾ GTIS에서 다루는 암석의 풍화도와 RQD는 regionalized 변수의 특성을 갖고 있다고 판단되어 기존의 자료로부터 미지의 값을 추정하는 기법으로 Kriging을 이용하였다.

Kriging을 적용하기 위해서는 semivariogram 분석이 선행되어야 한다. Semivariogram이란 regionalized 변수의 특성을 나타내주는 그래프로서, 좌표공간

상의 미지의 점에서 속성값을 추정할 때 주변의 이미 알고 있는 여러 속성값들의 가중치를 결정할 때 사용된다. Semivariance γ_h 는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_h = \frac{\sum_{i=1}^{n-h} (z_i - z_{i+h})^2}{2(n-h)}$$

γ_h 는 거리 h에서의 semivariance이며 n은 횡단선을 따른 점의 개수, z_i 는 횡단선을 따른 i번째 점의 속성값으로 거리 h에 따른 semivariance를 나타낸 그래프가 semivariogram이다.^{39,40)}

입력된 자료가 수직적으로 같은 길이에 대하여 각각 측정된 값이라면 각 측정구간의 중앙을 좌표로 하여 통계처리할 수 있지만, '3.4. RQD'에서 언급한 바와 같이 RQD의 경우 최소 0.2 m에서 최대 24.9 m에 이르는 구간에서 측정되었기 때문에 이와 같은 방법은 곤란하다. 이에 따라 입력된 자료를 지표면으로부터 z축을 따라 1.0 m 간격으로 추출하여 semivariogram을 작성하였다. 그러나, 이러한 방법은 추정된 구간 내에서는 속성값이 완전히 균일하다는 가정을 하여야 하므로 semivariogram을 작성하는 과정에서 오차가 발생할 가능성이 있다. 또한 풍화단계는 일종의 순위자료이기

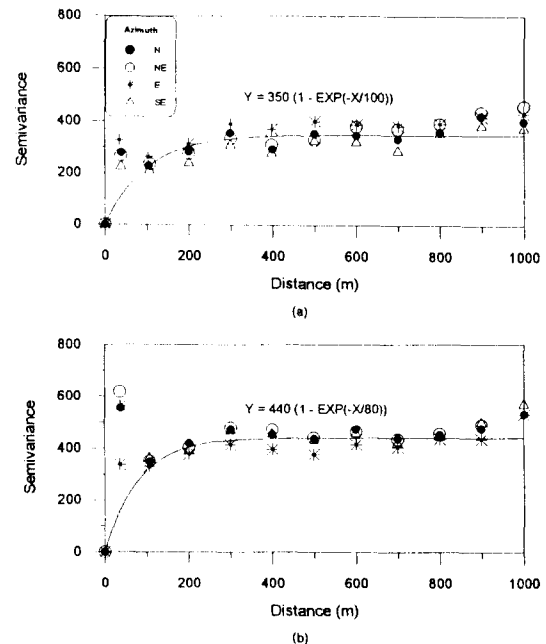


Fig. 5. Semivariograms of RQD (a) granite, horizontal, (b) gneiss, horizontal.

때문에 Kriging을 적용하기 곤란한 점이 있으나, 허훈 등³⁰⁾은 새로운 암반분류법을 제시하면서 풍화단계별의 직선적으로 점수화시켰으므로 (Fresh 15점, SW 11점, MW 7.5점, HW 4점, CW 1.5점, RS 0점) 풍화 단계를 Kriging하는 것은 큰 문제점이 없는 것으로 추정된다.

RQD와 풍화단계에 대하여 semivariogram을 작성한 결과(Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7) 수평방향으로는 두 번 수 모두 약 300 m 정도에서 sill에 도달하는 것으로 판단된다. 반면 수직방향으로는 sill에 수렴하지 못하고 semivariance가 계속 커지는 양상을 보이는데 이는 수직방향의 drift가 충분히 제거되지 못했기 때문으로 추정된다. 수평적인 이방성을 찾기 위해서 북-남, 북동-남서, 동-서, 남동-북서 4방향으로 semivariogram을 작성하여 본 결과 RQD는 sill이 방향에 따라 다르게 나타나는 어느 정도의 이방성을 보여 주고 있다(Fig. 5, Fig. 6). 특히 방향에 따른 sill의 경향은 화강암과 편마암이 정반대의 모습을 보여주고 있어 화강암체의 관입에 따른 상관관계를 추정할 수도 있지만, 입력된 자료들은 공간상에 균일하게 분포하는 것이 아니라 선을 따라 집중적으로 분포하기 때문에 특정방향의 semivariance가 전 구간에서 측정되지 못하고 특정 구간에

서 계산되었을 가능성이 크므로 이를 전체적인 이방성으로 단정짓기 곤란하며, 이에 따라 자료처리과정에서는 수평적으로는 등방성으로 가정하였다.

편마암과 화강암의 semivariogram을 비교할 경우 RQD와 풍화등급 모두 편마암은 화강암보다 sill이 크게 나온다. 이러한 현상은 서울지역의 화강암체가 단일 암체인 서울화강암체인 반면, 편마암 자료는 경기편마암복합체로서 복합적인 성격을 갖는 여러 암체가 하나로 취급되었기 때문으로 추정된다. 서울 지역의 화강암체로는 강북지역의 서울화강암체 이외에도 관악산 일대의 안양화강암체와 강서구 일대의 소규모 관입암체가 있지만 GTIS에 입력된 자료 중 이들에 해당하는 자료는 극히 소수이며 거의 대부분의 자료는 서울 강북지역의 서울화강암체에 해당한다. 따라서 화강암지역의 자료는 중생대 주라기에 관입한 하나의 암체를 대상으로 하는 반면, 편마암지역의 자료는 약 10억 년에 이르는 오랜 지질학적인 시간에 걸쳐 이루어진 편마암체를 대상으로 하면서 이를 단일 암체로 가정하고 자료를 처리하게 되므로 화강암체의 분산이 편마암체보다 작게 나오는 것으로 판단된다.

4.2 GTIS의 자료처리과정

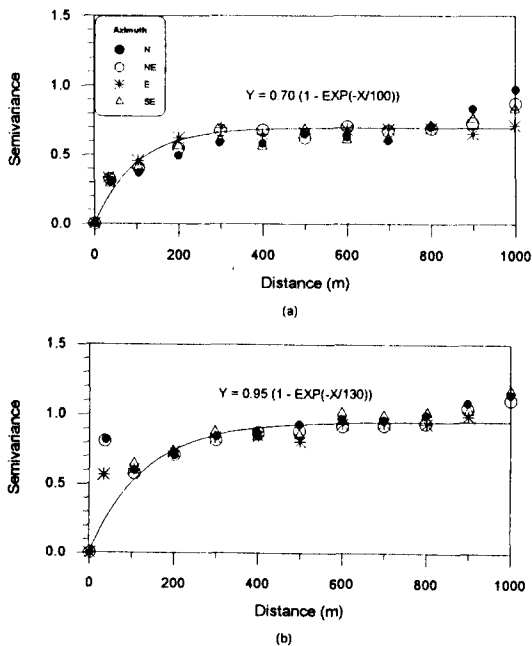


Fig. 6. Semivariograms of weathering grade (a) granite, horizontal, (b) gneiss, horizontal.

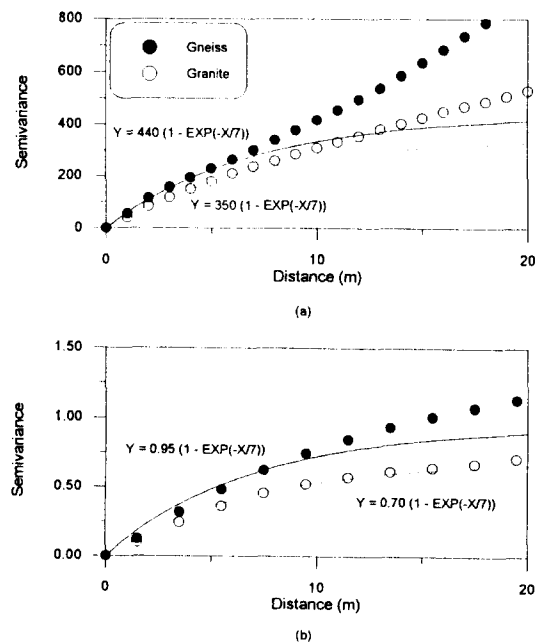


Fig. 7. Semivariograms of (a) RQD, vertical, (b) Weathering grade, vertical.

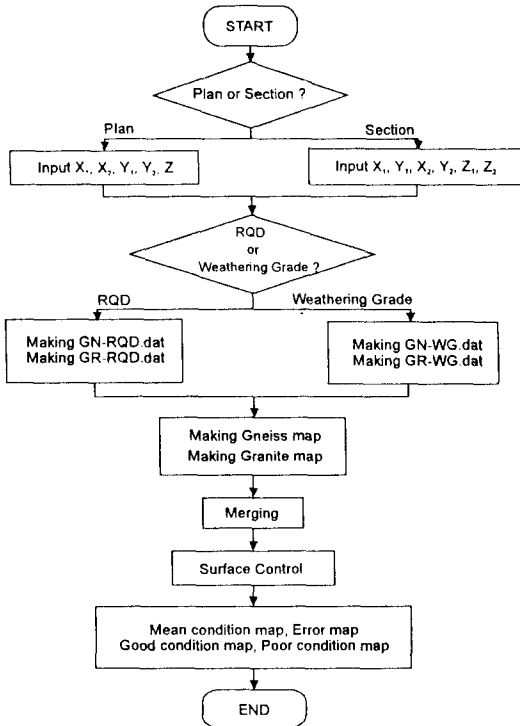


Fig 8. Flowchart of data processing in GTIS.

GTIS의 최종 목적은 임의의 단면 또는 임의의 평면에서 풍화단계와 RQD에 대한 지질공학도를 작성하는 것이다. GTIS를 실행하면 다음과 같은 순서로 작업이 진행된다(Fig. 8).

(1) 단면도를 작성할 것인지, 평면도를 작성할 것인지 결정한다. 평면도를 작성할 때에는 x좌표상의 양끝점과 y좌표상의 양끝점, 그리고 높이가 필요하므로 이를 x_1, x_2, y_1, y_2, z 라는 변수를 이용하여 사용자가 입력한다. 단면도를 작성할 때에는 xy 평면상의 두 점과 두 개의 높이가 필요하므로 이를 $x_1, y_1, x_2, y_2, z_1, z_2$ 라는 변수를 이용하여 사용자가 입력한다.

(2) RQD에 대한 지질공학도를 작성할 것인지, 풍화단계에 대한 지질공학도를 작성할 것인지 결정한다. '3. 1. Semivariogram 분석'에서 밝힌 바와 같이 편마암과 화강암은 지구통계학적인 특성이 다르므로, 해당 지역의 RQD 또는 풍화단계에 대한 자료를 담고 있는 파일을 편마암과 화강암에 대하여 각각 만든다. GTIS에서는 Kriging을 할 때 자료처리 속도를 증진시키기 위해서 모든 자료를 다 Kriging하지 않으며 지도를 작성하고자 하는 해당지역에 필요한 자료만을 추출하여 파일

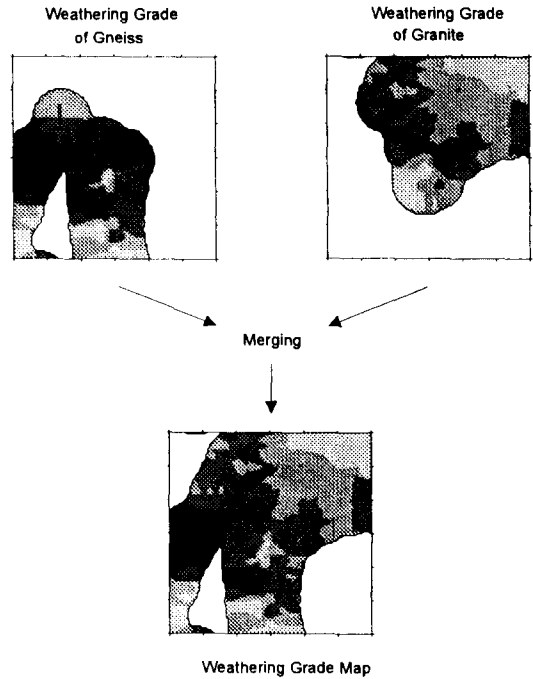


Fig. 9. Merging procedure.

을 만들고 이를 처리한다.

(3) 편마암과 화강암에 대하여 각각 지도를 작성한다. 지도를 작성하고자 하는 지역에 화강암과 편마암이 함께 존재할 수 있으며, 이 두 암종은 지구통계학적 특성이 다르므로, 편마암 자료만으로 이루어진 지도와 화강암 자료만으로 이루어진 지도를 각각 작성한 뒤 이를 하나로 합친다(Fig. 9).

(4) 표면처리를 한다. 작성된 지도에는 실제 지표면보다 높은 점에서도 속성값이 추정될 수 있다. 따라서 지표면의 고도를 나타내는 파일을 작성하여 주어진 x, y 좌표에서 표고보다 높은 지점은 추정치가 있더라도 이를 제거하는 과정을 거쳐야 한다.

(5) 이상과 같은 과정을 거치면 주어진 평면 또는 단면에 대하여 추정치를 담고 있는 파일과 각 추정점에서의 추정치 에러인 표준편차를 담고 있는 파일이 작성된다. 추정치에서 표준편차를 더하거나 뺀 값은 68.3%에 해당하는 신뢰구간이다. 이러한 연산과정으로 good condition map과 poor condition map을 작성한다(Fig. 10).

(6) Windows 3.1용 그래픽 프로그램인 Surfer를 이용하여 출력한다. 이 과정은 GTIS에 포함시키지 못하

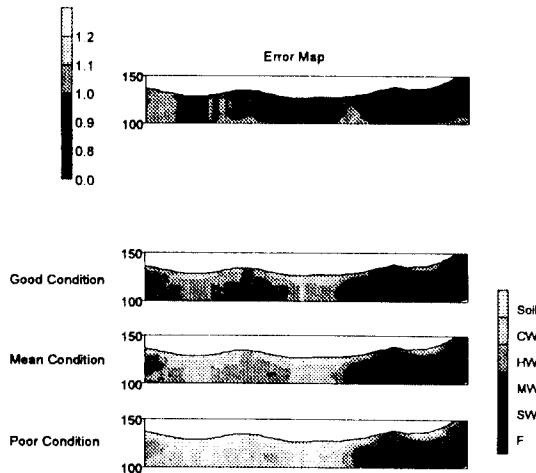


Fig. 10. Plot procedure of good and poor condition maps.

였으며 사용자가 Surfer로 직접 출력하여야 한다.

5. 결 론

1. 기존의 지반조사보고서에는 풍화정도에 따른 암반분류를 할 때 여러 분류기준이 혼용되고 있다. 기존의 풍화토와 풍화암의 분류기준인 표준관입시험 100회/30 cm는 적합하지 않은 것으로 판단되며, completely weathered를 풍화토, highly weathered를 풍화암, moderately weathered를 연암, slightly weathered~fresh를 경암으로 분류하여야 한다.

2. RQD를 지나치게 긴 길이에 대해 측정하는 것은 국지적인 특성에 대한 자료의 손실이 발생하므로 1~3 m 정도의 일정한 간격으로 측정하는 것이 향후의 자료 활용을 위해 바람직하다.

3. 지반조사를 위한 시추공의 구경은 신뢰성 있는 RQD의 측정을 위하여 모든 구간에서 NX 규격으로 하여야 한다.

4. 경암 1 m까지만 시추하는 기존의 시추심도는 핵 풍화에 의한 오판의 가능성이 있으므로 지양하여야 하며, 터널구간에서는 응력개방에 의한 영향권을 고려하여(터널 인버트 심도)+(터널 직경) 정도까지 시추하여야 한다.

5. 풍화등급과 RQD에 대해 지구통계학적 분석을 실시한 결과 semivariogram의 range는 약 300 m이며, 편마암이 화강암보다 sill이 크게 나온다. 이는 화강암

지역의 자료는 중생대 류라기에 관입한 하나의 암체를 대상으로 하는 반면, 편마암지역의 자료는 오랜 지질학적인 시간에 걸쳐 이루어진 편마암체를 단일 암체로 가정하고 자료를 처리하게 되므로 화강암체의 분산이 편마암체보다 작게 나오기 때문으로 판단된다.

사 사

이 연구는 에너지 지하저장 및 암반공학 연구센터와 전략광물자원연구센터의 후원으로 수행되었으며 이에 감사드린다. 보고서를 제공해 주신 서울특별시 지하철 건설본부의 신종호 과장, 지효선씨께 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 서울특별시 지하철건설본부, 1971, 수도권 고속전철 제1호선(서울역-종로5가) 지질조사보고서
2. 서울특별시 지하철건설본부, 1971, 수도권 고속전철 제1호선(종로5가-청량리) 지질조사보고서
3. Turner, A.K., 1992, Three-dimensional modeling with geoscientific information system, Kluwer Academic Publishers, 443p.
4. 대우개발주식회사, 대우엔지니어링, 1979, 서울특별시 지하철 3.4호선 지질조사보고서(실시설계)
5. 서울지하철건설주식회사, 대우엔지니어링, 1980, 지하철 3.4호선 지질조사보고서(1차)
6. 서울지하철건설주식회사, 대우엔지니어링, 1980, 지하철 3.4호선 지질조사보고서(2차)
7. 서울특별시 지하철건설본부, 1990, 지하철 3호선 수서차량기지 측량 및 지질조사 보고서
8. 서울특별시 지하철건설본부, 1990, 지하철 5호선 기본설계 지질조사보고서
9. 서울특별시 지하철건설본부, 1990, 지하철 5호선 실시설계(5-15, 5-16, 5-17 공구) 지질조사보고서
10. 서울특별시 지하철건설본부, 1990, 지하철 5호선 실시설계(5-53, 5-54, 5-55 공구) 지질조사보고서
11. 서울특별시 지하철건설본부, 1990, 지하철 5호선 차량기지(고덕) 실시설계 지질조사보고서
12. 서울특별시 지하철건설본부, 1991, 서울시 지하철 7호선 기본설계 지반조사보고서
13. 서울특별시 지하철건설본부, 1991, 서울 지하철 8호선 기본설계보고서(토질조사)
14. 서울특별시 지하철건설본부, 1992, 서울 지하철 6호선 기본설계보고서(지질조사)
15. 서울특별시 지하철건설본부, 1994, 지하철 6호선 실

- 시설계 6-4공구(토목)(시공공구 6-7) 지반조사보고서
16. 서울특별시 지하철공사, 1982, 지하철 4호선 지질조사보고서(4차)
 17. 서울특별시 지하철공사, 대우엔지니어링, 1981, 지하철 3호선 일부노선변경 지질조사보고서(3차)
 18. 서울특별시 지하철공사, 대우엔지니어링, 1982, 지하철 3.4호선 도십지 NATM구간 지질조사보고서(5차)
 19. 서울특별시 지하철공사, 삼우기술단, 1983, 지하철 3호선 연장선 지질조사보고서(6차)
 20. 서울특별시 지하철공사, 한양엔지니어링, 1982, 지하철 3호선 지질조사보고서(4차)
 21. 한국철도기술협력회, 1993, 서울-부산간 경부고속전철 제1공구 실시설계 지질조사 보고서
 22. 대우지하철건설본부, 1979, 지하철 3·4호선 건설 기본계획서, 제2차 중간보고서
 23. ISRM, 1981, Rock characterization: testing and monitoring, ISRM suggested methods, 211p.
 24. 대한지질공학회, 1994, 지질공학(1. 터널편)
 25. 서울특별시 지하철건설본부, 1992, 도시 지하철 터널의 암반분류(서울지역 중심), 52p.
 26. 박형동, 1990, Engineering Geology and Geotechnical Properties of Seoul Granite, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 80p.
 27. Goodman, R.E., 1993, Engineering geology : Rock in engineering construction, 412p.
 28. Lee, S.G. and de Freitas, M.H., 1989, A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granite in Korea, Quaterly Journal of Engineering Geology, vol.22, p.31-48
 29. 서영호, 1993, 연약암반에 굴착되는 NATM 터널의 변형거동과 보강설계, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 166p.
 30. 허훈, 이재찬, 1995, 토목구조물 시공현장 암질 분류 기준에 대한 제안, 한국암반역학회 및 대한지질공학회 학술발표회 논문집, p.186-201
 31. Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D. and Cording, E.J., 1967, Design of surface and near surface construction in rock, Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mech., AIME, pp.237-302
 32. Merrit, A.H., 1972, Geologic prediction for underground excavation, Proc. Rapid Excav. Tunneling Conf., AIME, pp.11-132
 33. Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications, John Wiley & Sons, 251p.
 34. 한국철도기술협력회, 1990, 盆唐線 往十里-益唐間 複線電鐵 新設 實測 其他(2차) 地盤調査報告書(車輛基地分)
 35. 서울특별시 지하철건설본부, 1994, 제2기 서울 지하철 터널 설계 및 시공감리 종합보고서, 452p.
 36. 서울시 지하철건설본부, 1992, 지하철 터널 설계와 시공 자료집(1)
 37. 이수근, 1992, 서울 지질특성에 따른 터널의 설계시 공현황 및 개선방안, 서울특별시 지하철 건설본부
 38. Davis, J.C., 1986, Statistics and data analysis in geology, John Wiley & Sons, 646p.
 39. Swan, A.R.H. and Sandilands, M., 1995, Introduction to geological data analysis, Blackwell Science, 446p.
 40. Clark, I., 1979, Practical geostatistics, Applied Science Publishers Ltd., 129p.