

서울 지하철 터널의 설계 및 시공  
현황과 평가

김 승 렬<sup>1)</sup>

An Evaluation of Design and Construction Technology  
of Seoul Subway Tunnels

Seung-Ryull Kim

ABSTRACT

More than sixty percentages of tunnels in the second phase of Seoul subway project have the ground coverages less than twenty meters. Majority of ground conditions encountered during tunnelling, therefore, are weathered rocks or weathered soils. Substantial lengths of tunnels are being constructed and designed running through the alluvial deposits as well.

A comprehensive evaluation of current design and construction technology of Seoul subway tunnels is made with four categories such as site investigations, design concepts and methods, auxiliary measures and quality controls. Critical comments are given and some suggestions for the improvement of technology are presented.

1. 서론

대부분의 도시는 강이나 하천을 중심으로 발달해 오면서 이들의 직접 혹은 간접적인 영향을 받아왔다. 인구가 집중되고 도시가 팽창하면서 범람 등으로 형성된 연약지반 상에도 고층빌딩이나 기반시설을 건설하지 않으면 안되게 되었다. 이러한 시대적인 요구는 지반굴착에 따른 지반붕괴 및 지반 침하 등과 관련한 여러가지 사

---

1)정회원, 대우엔지니어링 토목사업본부

화경제적인 문제점들을 자주 일으키게 하였다. 더우기 최근에는 지하철 건설과 지하공간 활용이 활발해지면서 연약지반에 대한 문제가 빈번히 발생되고 대처방안 또한 다양하게 강구되고 있다.

층적층이나 풍화토 등의 지반에 적용되어온 과거의 국내 터널 공법은 개착 터널 공법(cut and cover tunnel)이 주를 이루었다. 그러나, 이 공법은 심도가 깊은 지역에 적용이 어렵고, 교통량이 많은 도로를 따라 건설되어야 하기 때문에 교통 소통에 막대한 지장을 초래하게 될 뿐 아니라 노선선정에도 많은 제약을 주게 된다. 여건상 이러한 상황을 허용하는 것이 점점 어렵게되자 주변환경과 시설물에 미치는 영향이 적은 터널공법(mined tunnel)으로 그 공법이 전환되고 있는 실정이다.

도심지 지하철 터널은 그 기능 특성상 지표면 가까이에 정거장이 건설되어야 하기 때문에 중단 선형이 연약지반중에 위치하게 되는 경우가 많다. 현재 국내에서 적용하고 있는 터널공법은 NATM 적용공법(이하 NATM 공법)으로 지반과 지보재가 조화를 이루어 지반자체가 가장 유효한 지보재가 되도록 하는 공법이다. 재래식 터널 공법과 비교하여 이 공법의 장점은 연약지반에서도 터널을 합리적으로 시공할 수 있고 수반되는 지반변위도 줄일 수 있다는 점이다. NATM 공법은 서울 지하철 3,4 호선 건설을 기점으로 국내에 활발히 보급되었고 지난 10여년 동안의 시공실적은 이 공법의 우수성을 입증하였다고 할 수 있다. 여기에는 도입 초기 단계의 설계, 시공 및 감리에 종사하는 기술자들의 경각심과 비교적 양호한 지반의 도움이 있었음을 잊어서는 안될 것이다. 근래에 와서 터널 공사가 대량으로 발주되고 대상지반도 종전보다 불량해지는 경우가 많아지자 우리 기술의 미약성이 노출되기 시작하였다. 이러한 시점에서 현재의 설계 및 시공상의 문제점들을 분석해 본다는 것은 기술 발전을 위해 의의가 있는 일이라 하겠다.

## 2. 지하철 설계 및 시공 현황 (제2기 서울 지하철 건설 중심)

서울을 비롯하여 부산, 대구, 인천 등의 대도시에는 지하철 건설이 한창 진행중이며 광주, 대전 등의 도시에도 타당성 조사가 완료된 시점이어서 머지않아 지하철 건설은 더 확장될 전망이다. 도심지 지하철 건설 공사중 규모가 가장 큰 제2기 서울 지하철 건설(연장 167.1km)의 설계 및 시공 현황은 다음과 같다.

### 2.1 지반의 분류와 터널 지보 패턴

지하철 설계를 위한 기존의 지반분류는 <표1>과 같이 크게 풍화토, 풍화암, 연암, 경암의 4가지로 구분되어 있다. 대부분 정성적 분류기준에 의존하고 있으며 정량적인 기준으로는 RQD, N치와 지반 변형계수 등 3가지가 있다. 따라서, RQD 획득이 불가능한 풍화암에서는 N치와 지반 변형계수만이 정량적인 분류기준이 된다.

〈표 1〉 지반분류와 분류된 지반의 특성

분류	정 성 적 성 질	RQD(%)	변형계수 (kg/cm <sup>2</sup> )
경암 2	극히 신선하거나 신선하여 망치타격에 맑은 소리가 나며 강한 타격에 깨어진다. 절리는 잘 밀착되어 있거나 일부 열려있음.	50이상	20,000 이상
경암 1		30-50	
연 암	절리면을 따라 풍화가 진행중이며 조암광물의 일부도 풍화되어서 망치타격에 다소 둔한 소리가 나지만 암석은 견고한 편임. 절리는 가끔 점토 등으로 채워져 있음. 절리가 많이 발달되어 있으며 절리가 다소적이고 간격이 넓더라도 암석강도가 낮으면 이 분류에 속함. 또 암석이 아주 강하더라도 절리가 많으면 역시 이 분류에 속함. 강한 망치 타격에 쉽게 부수어짐.	30이하	10,000 - 20,000
풍화암	절리가 아주 많고 조암광물이 상당히 풍화되어 암석 자체가 일반적으로 변색됨. 망치 타격에 쉽게 부수어지며 절리는 보통 점토 등으로 채워져있음. 일반적으로 시추시 core를 형성하지 못하고 작은 암편동만이 회수되므로 N치가 100회이상일 때 풍화암으로함	-	2,000 - 10,000
풍화토	조암광물의 대부분이 풍화되어 암석의 결합력은 상실되었음. 망치로 쉽게 굽힘. N치 100회이하를 이 분류에 포함시킴.	-	2,000이하

주: 변형계수는 공내 지하시험에 의한 값을 기준으로 한 것임

6호선 실시설계를 시작하면서 지반분류는 Bieniawski의 지반 분류안을 토대로 하여 정성적인 분류에서 정량적인 분류방안으로의 전환을 시도하고 있다(표2참조).

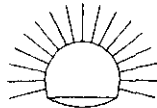
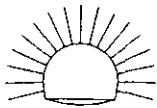
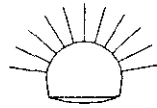

〈표1,2〉에 분류된 각 지반에 적용되는 표준 지보패턴도 〈표3〉과 같이 4 가지로 구분되어 설계되어 있다. 이 표준 지보패턴은 해당 지반이 균질하게 분포된 것으로 가정하고 있다. 단선 터널의 지보 패턴은 풍화암에 적용되는 표준패턴(PS-2)의 슛크리트 두께가 15 cm 로서 복선 표준패턴(PD-2)의 두께보다 5 cm 작다는 것과 굴착 주변장이 복선의 경우의 굴착 주변장보다 적기 때문에 전체적으로 록볼트의 개수가 복선패턴보다 적은 것을 제외하고는 근본적으로 복선의 지보 패턴과 동일하다. 지반은 연약할수록 강한 시간 의존 특성을 보이게 되기 때문에 굴착이 진행되면서 지반 별로 터널 종방향으로 어떻게 지보를 실시해야 하는가 하는 문제는 대단히 중요한 기술적인 사항이지만 표준지보 패턴에는 이러한 사항에 대한 고려가 미흡하다.

<표 2> 서울 지하철 지반분류 수정안과 표준지보 패턴안

지반명 및 특징	지질조사시의 지반분류 기준	RMR-System				예비 설계안	RMR-System		적용예상 보조공법
		R1	R2	R3	R4		R5	R6	
풍화토층 : 조암광물이 대부분 완전히 풍화되어 암석으로서의 결합력을 상실한 풍화산물로 충진되어 혼적만 보이고 함수포화시에 전단강도가 현저히 저하되기도 하며, 손으로 쉽게 부수어 지고 SPT의 N치는 100회/30cm 미만인 지반	TCR = 0 % RQD = 0 % N < 100회/30cm qu < 10 kg/cm <sup>2</sup>	≤0 ≤3 ≤5 ≤10  RMR* < 19	P-2  RMR* < 19	≤4 >-10	>4 ≤-10	용수저감대책 봉락방지대책	총적층은 특수패턴 P-1 적용고려		
풍화암층 : 조암광물이 상당히 풍화되어 암석자체의 색조가 변색되었으며, 충진물이 채워지거나 열린 절리가 많고 암석은 가벼운 망치 타격에 쉽게 부수어지고 절리빈도가 아주 높으며, NX 시추시 암편만 회수되어 코아 회수율이 30% 미만이고 N치가 100회/30cm 이상인 지반	TCR < 30 % RQD < 10 % N ≥ 100회/30cm qu < 100 kg/cm <sup>2</sup>	≤1 ≤3 ≤10 ≤20  19 ≤ RMR* < 35	RMR* ≥ 19	≤4 >-10	>4 ≤-10	용수저감대책 봉락방지대책			
			P-3	>-10					
연암층 : 절리면 주변의 암석강도는 풍화되어 변색되었으나 암석내부는 부분적으로 풍화가 진행중이며 망치 타격에 둔탁한 소리가 나면서 파괴되고, 일부 열린 절리가 있으며 절리간격은 100cm 미만이고 NX 시추시에 코아 회수율이 30 - 60 % (RQD 25 % 미만)의 범위인 지반	TCR ≥ 30 % RQD < 25 % qu < 250 kg/cm <sup>2</sup> Js < 100 cm	≤2 ≤3 ≤15 ≤25  35 ≤ RMR* < 46	RMR* < 41	≤4 ≤-10	>4 ≤-10	봉락방지대책 여굴저감대책			
			RMR* ≥ 41	>-10					
보통암층 : 절리면에서 풍화가 진행되어 일부 변색되었으나 암석은 강한 망치 타격에 다소 맑은 소리가 나면서 깨어지고, 절리면은 대부분 밀착되어 있고 절리간격은 보통 200cm 미만이며 NX 시추시에 코아 회수율은 60 - 80 % (RQD 25 - 50 %)의 범위인 지반	TCR ≥ 60 % RQD ≥ 25 % qu ≥ 250 kg/cm <sup>2</sup> Js < 200 cm	≤4 ≤8 ≤15 ≤25  47 ≤ RMR* < 53	P-4	≤-10	여굴저감대책				
			RMR* < 53						
경암층 : 조암광물이 거의 풍화되지 않았으며 암석은 강한 망치 타격에 맑은 소리를 내며 깨어지고, 절리면은 잘 밀착되어 있으며 절리간격은 300cm 미만이며 NX 시추시에 코아 회수율은 80% (RQD 50 - 75 %) 이상의 지반	TCR ≥ 80 % RQD ≥ 50 % qu ≥ 500 kg/cm <sup>2</sup> Js < 300 cm	≤12 ≤13 ≤15 ≤30  53 ≤ RMR* < 71	RMR* ≥ 53	≤-10	여굴저감대책				
			P-5						
극경암층 : 경암층과 같은특징을 가지나 절리 간격이 300cm 이상이거나 RQD가 75 % 이상인 지반	TCR ≥ 80 % RQD ≥ 75 % qu ≥ 1000kg/cm <sup>2</sup> Js ≥ 300 cm	≥12 ≥17 ≥15 =30  71 ≤ RMR*							

- 주1) 본 분류는 Bieniawski(1974)의 RMR-System에 기초하였으며 서울지역의 화강암 및 편마암에서의 얇은 토피의 지하철 터널용으로 작성되었으므로 암종이나 토피가 다른 경우에는 적용시 주의가 요망됨.
- 주2) RMR\*는 Bieniawski 분류기준의 강도(R1), RQD(R2), 절리간격(R3) 및 절리상태(R4)의 평점합으로 동 기준의 지하수 상태(R5) 및 절리방위(R6)의 평점을 제외한 RMR 값을 나타냄.
- 주3) 총적층은 본 분류에서 제외되며 특수 설계안 P-1을 고려하여야 함.

<표 3> 지반별 지보 패턴 및 지보재 현황( 복선터널 )

구 분		Pattern	PD - 2	PD - 3	PD - 4	PD - 5
적 용 기 준			층적토 및 풍화토	풍화암	연암 및 경암 1	경암 2
굴 착 공 법			Ring cut, Short bench	Bench cut or Ring cut, Short bench	Bench cut	Full face
굴 진 장			1.0 - 1.5 m	1.2 - 1.8 m	1.35 - 2.0 m	1.5 - 2.5 m
1 차 복 공 (Shotcrete)	1차	5	20 cm	5	15 cm	10 cm
	2차	10		10		
	3차	5		5		
Mesh	1차(부착용)	φ 3-100x100	φ 3-100x100			
	2차(보강용)	φ 5-100x100	φ 5-100x100	φ 5-100x100		
Rock	제 원	SD35, D25 1=3	SD35, D25 1=3	SD35, D25 1=3	Random	
Bolt	개 수	16개/1m	17개/1.2m	11개/1.35m		
	타설 위치	Arch 및 wall	Arch 및 wall	Arch only		
Steel	제 원	H - 125	H - 125	H - 100		
Rib	설치 간격	1.0 - 1.5 m	1.2 - 1.8 m	1.35 - 2.0 m		
2차복공 Con'c			30 cm	30 cm	30 cm	30 cm
보조지보(필요시)			Forepoling Face Shot- creting	Forepoling		
지 보 패 턴 도						

## 2.2 터널의 심도 및 적용패턴 분포 현황

제2기 서울 지하철 총 연장은 167.1 km로서 각 노선별 터널 비율은 <표4>와 같다. 터널 구간에 대한 전 연장은 80.4 km로서 전체 노선 연장의 48%에 해당된다.

〈표 4〉 노선별 시공법 적용 현황

(단위 km)

호선	터널	개착	지상	계
5	35.4	21.9	0.6	57.9
6	15.6	18.5	0.3	34.4
7 (1단계)	21.9	21.7	2.0	45.6
8	4.2	14.0	1.5	19.7
3,4호선 연장	3.3	5.2	1.0	9.5
계	80.4	81.3	5.4	167.1

터널 구간중 표준패턴의 심도별 구성비를 보면 (표5) 토피가 20m 이하인 터널이 전체의 62.2%로서 천층터널이 전 터널 연장의 반을 훨씬 상회하고 있음을 알 수 있다. 풍화암과 풍화토 중에 건설되는 터널의 연장도 전체 터널의 55.3%나 차지하고 있음을 알 수 있다.

〈표 5〉 지보 패턴별 굴착 심도 구성비

(단위 %)

지반	지보 패턴	심도 비율 m	10 -	15 -	20 -	25 -	30 -	35 -	40 -	이상
			15	20	25	30	35	40		
풍화토	P-2	11.3	21.4	35.7	28.6	14.3	-	-	-	
풍화암	P-3	44.0	26.9	43.3	19.2	5.8	4.8	-	-	
연 암	P-4	24.8	36.8	42.1	14.2	7.0	-	-	-	
경 암	P-5	19.9	10.0	16.7	13.3	30.0	13.3	13.3	3.3	
계		100	25.3	36.8	17.8	11.9	4.7	2.6	0.8	

층적층에는 풍화토에 준한 표준패턴을 적용하도록 규정하고 있다. 그러나 층적 지반은 지하수 조건에 따라서 풍화토와는 전혀 다른 거동을 하기 때문에 설계 및 시공단계에서 각별한 주의를 하지 않으면 안된다. 〈표5〉에서 살펴본 대로 제2기 서울 지하철 노선중 풍화토에 해당하는 구간의 비율은 11.3%이다. 이중 5호선 노선상에 나타난 층적토 지반 현황을 〈표6〉에 정리하였다.

〈표 6〉 5 호선의 충적지반 분포 현황

충적지반 분포	SL까지 분포	천단부터 3 m상부이내	천단상부 3-8 m 분포
단 면			
길 이 (km)	0.99	2.3      0.70	4.65      2.45

\* 단선인 경우 총 터널 길이로 환산한 것임.

북선구간에서 충적토가 천단 혹은 천단상부에 근접하여 출현하는 연장이 약 3.3 km인 것으로 나타났다. 막장면에 충적토가 나타나는 구간도 1.0 km나 된다. 단선 구간을 포함하여 충적층이 천단부 3.0m이내에 출현하게되는 연장은 약 4.0 km에 이른다. 충적층이 터널 직경 이하의 토피에 나타나는 전 구간을 노선 연장상으로 합산하면 10.74 km로서 5호선 전 터널연장의 30%이다.

### 3. 국내 터널설계의 기본개념 고찰

#### 3.1 1차 지보재의 역할

NATM 공법에서는 슛크리트, 강지보재 및 록볼트로 구성된 가축성 1차 지보재가 지반에 밀착 시공되어 지반이 주지보재가 되도록 합리적으로 보조해주는 역할을 담당한다. 따라서, 굴착에 의해 교란된 지반은 이러한 1차 지보재의 도움을 받아 변위를 동반하면서 영구한 안정상태에 도달하게 된다. 지반 자체의 지보능력을 최대한 활용하기 위해서는 지반이 강도를 상실하지 않을 정도까지 변위를 허용한 상태에서 1차 지보재의 지보력과 지반응력이 평형을 이루도록 하여야 한다. 이때가 가장 Critical한 상태로서 (안전율이 1.0인 상태) 추가의 변위가 발생하면 지보재에 가해지는 하중이 증가하여 지보재 지지력과 지반응력이 균형을 잃고 결국 파괴에 이르게 된다. 따라서, 지보는 충분한 안전율을 확보한 상태, 즉 Critical한 상태에 이르기 전에 지보력을 발휘하여 지반응력과 평형상태에 이르도록 설계되고 있다.

#### 3.2 콘크리트 라이닝의 역할

콘크리트 라이닝은 토압이나 수압을 지지해주고 터널의 내공단면을 확보해주는 역학적 기능 혹은 교통운행중에 요구되는 부수적 기능을 제공해주는 역할을 담당한다. 1차 지보재 만으로 완전하게 안정된 터널에 설치되는 콘크리트 라이닝은 후자의

기능만을 감당하여 1)구조물의 수명기간동안 구조물로서의 기능유지 2)미관유지 3)터널내의 시설물 보호 4)방수기능등을 유지시켜 쾌적한 시설유지를 가능하도록 한다. 그러나, 1차 지보재에 의해 안정된 터널이라 할지라도 시간이 흐르면서 원지반 특성이 저하되거나 또는 지보재 재료의 약화 등에 의해 지보재의 지보능력이 저하된다면 지반은 다시 평형상태를 잃게 된다. 이때에는 콘크리트 라이닝이 구조적인 기능을 담당하게 되므로 토압을 안전하게 지탱할 수 있는 단면으로 설계되지 않으면 안된다. 방수터널인 경우에는 토압과 원지하수위에 해당하는 정수압에 저항할 수 있는 구조적 기능을 발휘하여야 하며, 배수형 터널이라 할지라도 배수시설의 능력이 유입수를 원활하게 처리하지 못하게되면 수압이 작용하게 되므로 이에 대해서도 저항하는 역할을 담당한다. 현행의 콘크리트 라이닝 설계개념은 특수한 경우를 제외하고는 토압에 대한 지지 기능을 보유하도록 설계되어 지지 않고 있다.

### 3.3 연약지반을 대상으로 하는 국내 터널 설계개념

현재 국내에서 수행되는 NATM 터널의 설계는 대부분 1차 지보재를 영구 구조물로 인정하고 있다. 따라서 터널은 어떠한 형태로든지 1차 지보재에 의해서 안정되고 콘크리트 라이닝은 터널의 구조적 기능보다는 부수적 기능유지를 목적으로 하기 때문에 배수형 터널에서는 자중만 견딜 수 있는 구조로 만 설계된다. 특히 대상지반의 특성 과도 무관하여서 양호한 지반에서나 연약한 충적토사 지반에서도 동일한 개념이 적용되고 있는 실정이다. 하지만 NATM이 원래 산악터널을 대상으로 개발된 공법이고 이 공법의 성공적인 시공실적이 축적되면서 흩피복이 얇은 함수 미고결 지반을 대상으로 하는 공법으로까지 발전된 공법임을 상기하여야 한다.

현재 NATM에서 적용되는 1차 지보재(숏크리트, 강지보재, 록볼트)의 내구성이 확인되지 않는 상태이며 더군다나 국내의 열악한 시공수준에 비추어 볼 때 천층 토사지반 터널에서도 현 1차 지보재가 영구한 안전성을 확보해 줄 수 있을지는 의문이다. 도심지에는 끊임없이 공사가 진행중이고 지반에 전달되는 하중의 변화도 예측키 어려울 뿐 아니라 지하수 오염원들도 산재해 있기 때문에 지하수위 변동에 따른 지반특성의 저하 혹은 1차 지보재 등의 부식가능성이 높다. 이렇게 해서 1차 지보재가 제 기능을 유지하지 못하면 1차 지보재가 지지하고 있었던 토압이 콘크리트 라이닝으로 전이되게 된다. 그러므로, 충적토 지반을 비롯한 토사지반의 천층 터널에서는 콘크리트 라이닝이 장차 1차 지보재로 부터 전이되는 토압까지 지탱할 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다.

## 4. 터널 설계를 위한 지반조사법 고찰

터널은 연속적인 선형구조이고 지반은 불규칙적으로 변화한다. 서울시의 노선 현황에서 이미 언급된 대로 도심지 터널건설은 일반적으로 불량한 지반에서 수행되게 된다. 터널설계를 위해서는 우선 지층의 구조 및 분포와 각 지층별 지반특성이 정확



히 파악되어야 한다. 정확한 지반조사 없이는 최적의 설계를 기대할 수 없다. 지금까지의 지반 특성평가는 상당부분을 경험적 또는 정성적인 방법에 의존하여 실시되었다. 그 시험법 또한 신뢰성이 있는 설계상수 획득 측면에서 개선의 여지가 있다.

#### 4.1 현행 지반조사법의 개요

국내 지하철 건설을 위해 실시되는 대부분의 지반조사는 유압식 로타리형 수세 시추조사이다. 시추비트의 크기는 개착구간에는 BX-Size, 터널구간에는 NX-Size 을 사용하고 있다. 시추의 심도 및 간격규정은 원칙적으로 기본 설계단계와 실시 설계단계로 구분되어 실시되고 있지만 터널설계를 위한 조사로서는 그 밀도가 낮고 암반의 발달상태, 즉, 절리의 방향, 간격, 개방상태 등을 파악하기 위한 방안이 제시되어 있지 않다. 과업지시상에 주어진 조사내역을 정리하여 <표7>에 수록하였다.

<표 7> 지반조사 항목 요약

구 분	5 호 선	6 호 선	비 고
시추공 간 격 (m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기본설계 : 200</li> <li>○ 실시설계 : 100-200</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기본, 실시설계 : 100</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 5호선의 경우 기본설계 및 실시설계 조사공이 서로 중복되지 않도록 배치함</li> <li>○ 5호선 기본설계용 지반조사는 1개사에서 일괄 수행</li> </ul>
시추공 구 경	NX	NX	
시 추 심도(m)	터널바닥 + 2	터널바닥 + 터널직경	
시 료 채 취 방 법	-	Double or Triple Core Barrel with Diamond Bit	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 5호선의 경우 상세사항이 없으나 실제 시료 채취시는 D-3 또는 Double Core Barrel with Diamond Bit 를 사용함</li> <li>○ 6호선의 경우 암판정 기준제시(TCR, RQD, N, qu, Joint Spacing)등을 사용하여 풍화암, 연암, 경암등판정</li> </ul>
현 장 시 험	SPT, 투수시험, 공내 재하시험, 수압시험, 양수시험, Cross Hole시험	5호선 항목과 필요시 Hydrofracturing 시험, Fracture Imprint 시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 필요시 감독기관과 협의하여 추가 시험실시(5,6호선 공통)</li> <li>○ 5호선 한강 통과구간의 경우 전기 탐사 및 Sonic Test를 시행함</li> </ul>
실 내 시 험	<토사> 함수비, 비중, 입도, Atterberg Limit, 일축시험, 삼축시험, 전단시험, 압밀시험 <암석> 함수비, 비중, 흡수율, 일축시험, 직접 전단 및 기타 기본특성시험	<토사> 함수비, 비중, 입도, Atterberg Limit, 일축시험, 삼축시험, 전단시험, 압밀시험 <암석> 단위중량, 일축시험, 직접전단시험, 간접인장시험, 탄성파시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 필요시 감독기관과 협의하여 추가 시험실시(5,6호선공통: 실질적으로 토사 및 암석시료에 대하여 수행되어야 하는 시험이 대부분 수행됨)</li> </ul>

6호선 설계를 시작하면서 조사에 대한 과업들이 5호선 과업보다 개선되고 있는 것은 다행스런 일이다. 개선되어진 항목으로는 시료 채취방법, 암반정 기준 및 현장 시험 항목 등의 추가이다.

#### 4.2 지반조사상의 문제점 및 개선방향

지반조사는 노선계획 및 타당성 평가, 공법결정 등의 기본설계뿐만 아니라 지보 패턴 및 굴착공법 결정과 같은 실시설계 그리고 시공단계에까지 영향을 미치게 됨으로 터널공사의 전 과정을 고려하여 광범위하고 체계적이며 치밀한 계획을 수립하여 실시하여야 한다.

현행 지반 조사의 문제점으로는 첫째, 조사밀도가 낮고 간격이 일률적이며 둘째, 지반 판정기준이 너무 정성적이어서 시추 기능공의 숙련정도에 따라 지반분류가 다를 수 있고 셋째, 터널이 통과하는 지역의 암반 절리상태에 대한 종합적인 조사 부족 넷째, 열악한 재원 지원 등을 들 수 있다. 도심지 천층 터널에서는 터널 상부 지반 특성조사에 큰 비중을 두어야 하지만 이 부분에 대한 조사는 상대적으로 소홀시되는 경향이 있다. 풍화암으로 분류된 지반이 실제 터널 굴착시에는 풍화로 거동을 보이게 되는 경우가 이러한 현실을 뒷받침해 주고 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위한 몇 가지 제안사항을 열거하면 다음과 같다.

- 기존 조사자료의 적극활용 - 도심지에는 지하철 뿐만 아니라 대형빌딩들의 건설공사가 부단히 시행되어 왔으므로 엄청난 지반조사가 수행되었다. 이러한 조사 자료를 새로운 조사 및 결과치 분석에 활용하여야 한다 (제도적인 배려가 필요하다).
- 탄력적인 시추위치 결정 - 기존자료나 현장답사 자료를 분석하여 지층변화가 예상되고 주요 시설물이 있는 곳에는 중점적인 조사가 이루어지도록 배려해야 한다. 이러한 지역은 노선을 연하는 선형적인 조사에 국한되지 않아야하고 3차원적 지반 상태를 파악할 수 있도록 하여야 한다.
- 코아 회수율 증대 - 풍화토, 풍화암 지역에서는 시추공의 크기를 증가하고 이중 혹은 삼중 코아 채취기를 사용하여 지층의 구조 및 발달상태를 정확하게 파악할 수 있도록 하여야 한다. 특히 표준관입시험에 의존하여온 풍화토, 풍화암층의 판정기준은 개선되어야 한다.
- 굴착 영향권까지 조사실시 - 단층대 혹은 파쇄대등이 양호하게 판정된 암반 하부에서도 출현할 수 있으므로 굴착 심도는 터널 굴착 영향권까지 시행하여야 한다.
- 지하수위의 지속적인 관측시험 - 시추공의 일부를 보호하여 향후 공사 완료시까지 지하수위를 관측할 수 있도록 하는 제도적인 장치가 필요하다.
- 절리의 발달상태를 조사 - 정량적인 암반분류를 실시할 수 있도록 절리의 제반 공학적인 특성을 파악할 수 있는 조사를 실시할 수 있도록 배려하여야 한다.

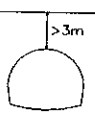
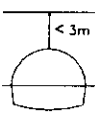
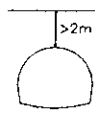
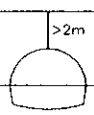
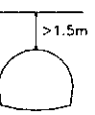
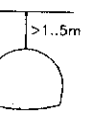
- 물리탐사법의 활용 - 물리탐사법을 부분적으로 적용하여 중요한 지역의 지반조사 정도를 높여야 한다.

지반은 그 구조와 특성이 위치에 따라 예측하기 어려울 정도로 다양하게 변화하기 때문에 전 노선에 걸친 실제의 조건을 부분적인 조사결과로 부터 완벽하게 알아내는 것은 거의 불가능하다. 조사밀도를 증가시키므로써 지반상태에 대한 정도가 어느 정도 증가될 수 있지만 경비가 많이 소요되고 기술적인 측면에서도 정도 증가에는 한계성이 있다. 따라서, 최선의 조사를 바탕으로 설계를 실시하고 시공단계에서 실지반과 조사치와의 분석 평가를 계속적으로 실시하여 조사와 실제와의 거리를 정립할 필요가 있다. 즉, 조사를 설계단계의 조사와 시공단계의 조사로 구분하여 실시하고 이 두 조사간의 상관관계를 확립하여 합리적인 시공이 되도록 이를 지속적으로 개선해 나가는 노력이 필요하다.

### 5. 표준 지보패턴 고찰

<표3>에 나타나 있는 표준 지보패턴은 적용대상 지반이 균질하게 분포된 상태를 가정하고 있다. 그러나 지표부근의 지반은 특성이 각각 다른 여러 지층이 교호하고 있고 그의 양상도 다양하여 패턴적용이 불합리한 경우가 종종 있게 된다. 현행 지보패턴 설계는 막장의 지반상태를 기준으로 지보패턴을 선택하고 해석을 실시하여 적부를 판정한 후 최종 지보패턴을 결정한다. 해석단계에서 입력치를 지층별로 구분하여 적용함으로써 지층의 구조상태가 고려되었다고 볼 수 있겠으나 저보재 지지부의 지반상태와 굴착후의 지보순서 및 지하수의 영향 등이 해석에 정확하게 반영될 수 없다. 예를 들면 상반 슛크리트 기초부가 풍화가 심한 풍화암에 놓이고 지하수유입이 있는 경우와 연암위에 놓이는 경우와는 지보재의 거동이 상이하게 된다. 또한 PD-3 (풍화암)에서 천단부 상부 1.0m 이내에 충적층이 나타나게 될 경우 PD-3의 적용을 이 상적인 지보설계라고 할 수 없다. 특히, 표준 지보패턴에는 굴착방법까지를 포함시켜야 하기 때문에 지층의 층상구조를 고려하여 현행 표준 지보패턴에 2개의 패턴을 추가하여 다음의 형태로 세분된 표준패턴을 마련해두는 것이 바람직할 것이다.

<표 8> 수정표준 패턴제안

PD - 2	PD - 2A*	PD - 3	PD - 3A*	PD - 4	PD - 5
충적토  >3m 풍화토	충적토  < 3m 풍화토 풍화암	풍화토  >2m 풍화암	풍화암  >2m 연암	풍화암  >1.5m 연암	연암  >1.5m 경암

더 나아가, 토사지반에 설치되는 록볼트의 효과가 그다지 크지 않다는 보고 사례가 있으므로 굴착형상과 지반과 록볼트의 효과를 굴착 방법에 따라 평가하여 기술적으로 타당한 지보형태를 정립할 필요가 있다고 판단된다.

## 6. 수치해석 현황고찰

NATM 적용 터널은 지반자체가 가장 유효한 지보재이지만 이의 특성을 합리적으로 계수화 하기 어려운 지반변화의 다양성과 시공단계에서의 시간적 변화에 따른 지반거동 변화를 설계시에 정확히 반영하기 어렵기 때문에 최종설계의 성격을 가지지 못하고 사전설계 또는 예비설계의 성격을 갖게 된다. 그러나, 설계단계의 해석은 터널 굴착으로 인한 지반의 거동 및 터널 주변에의 영향을 예측하고, 설계 구조물의 안전성 및 적합성을 평가하며, 시공단계에서 실시하게 될 현장계측의 관리 기준치를 산정하는데 유효한 방법이다. 수치해석에서 사용되는 전산 프로그램 별로 대상지반을 모델화하는 방법이 다르기 때문에 동일한 입력치를 사용하여도 그 결과치들은 사용 프로그램 별로 서로 다르게 됨을 염두해 두어야 한다.

### 6.1 해석 방법 및 지반특성치 분석

막장의 지지효과는 막장을 전후하여 터널 직경의 약 3배 거리까지 나타나는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 지반거동을 정확하게 해석하는 3차원 해석은 많은 노력과 시간을 필요로 하기 때문에 입력특성치의 변화성을 고려해 볼 때 특별한 경우를 제외한 일반 터널 해석으로는 비경제적이다. 따라서, 응력 분배법(stress distribution method) 또는 강성 변화법(stiffness variation method)등을 사용하여 2차원 해석을 실시하는 것이 보편화 되어있다.

현재 서울 지하철 설계에 참여한 용역사들의 해석방법들은 하중 분담율을 적용하여 굴착에 의해 발생하는 하중을 적절히 분할하여 굴착단계별로 재하한다. 용역사별로 적용하고 있는 하중 분담율은 <표9>에 나타난 바와같이 50-25-25와 40-30-30의 두가지로 대별된다. 이는 동일한 지반조건임에도 불구하고 설계자에 의해서 각기 다른 구조물이 설계될 수 있음을 의미한다. 보다 정확한 3차원 거동 해석을 위한 하중 분담율 세분화 방안이 연구되고 있다. 합리적인 하중 분담율은 실제 계측결과를 적용한 역해석으로부터 부단히 보완해 나아가야 하나 신뢰할만한 계측 결과가 없어서 안타까운 실정이다.

입력지반 특성치의 결정에 있어서도 그 적용기준이 명백하지 않고 용역사별로

차이가 많다. <표9>에 나타나있는 탄성계수의 상한치와 하한치의 비율이 동일한 지반인 경우에도 4~7인 일례를 보더라도 입력특성치 결정의 임의성을 알 수 있다. 특히 할 만한 사항으로는 이러한 입력 특성치들이 현장 및 실내시험 결과치 보다는 기존 설계자료에 의존하여 선정되고 있다는 것이다.

<표 9> 주요해석 입력 특성치 및 하중 분담율

설계사	탄 성 계 수 (t/m <sup>2</sup> )					축압계수 (K <sub>0</sub> )	하 중 분담율 (%)	비 고	
	매립토/토사	풍화토	풍화암	연 압	경 압				
6호선 기 본 설 계	1	2,000			200,000	250,000 ~500,000	0.5	50-25-25	
	2	1,904		6,703	144,024	479,400 ~573,546	경 압 : 1.0 기 타 : 0.5	40-30-30	
	3			19,000	92,000 ~200,000	380,000 ~400,000		40-30-30	
	4	2,000			100,000	360,000	연.경압:0.5 토 사:0.54	40-30-30	
	5	1,000		5,000	30,000	80,000 ~150,000		40-30-30	
	6	2,000		8,000	100,000	409,000 ~490,000	토 사: 0.5 풍화암: 0.41 연 압: 0.3 경 압: 0.28 /0.35	50-25-25	$K_0 = \frac{v}{1-v}$
	7	2,000			50,000	250,000 ~300,000	0.5		
	8		4,000	20,000	40,000 ~50,000	120,000 ~200,000	0.7, 1.0	50-25-25	
7호선 실 시 설 계	1	1,000	5,000	20,000	50,000 ~100,000	200,000 ~300,000	0.5	40-30-30	
	2	5,000	20,000 (충격토)	68,600~ 237,000	750,000	3,000,000	0.5	40-30-30	
8호선 실 시 설 계			3,000 (충격토)	20,000	50,000 ~80,000	130,000	토사, 충격토, 풍화암:0.539 파쇄대:0.7 연 압:0.429 경 압:0.333	50-25-25	$K_0 = \frac{v}{1-v}$

또한 해석에서 실제의 시공순서가 고려되지 않은 경우가 많고 터널굴착 영향권 내에 위치하고 있는 주요 구조물이나 지하 시설물에 대한 영향 평가가 실시되지 않고 있다.

## 6.2 콘크리트 라이닝 해석

콘크리트 라이닝이 구조체의 역할을 수행하게 되는지 여부는 이견이 있지만 앞에서 이미 언급한 대로 이의 해답은 지반과 1차 지보재의 거동에 의해서 결정되게 된다. 현재 서울 지하철 설계에서는 모든 터널은 1차 지보재에 의해 안정되는 것으로 고려하기 때문에 일부 구조물 하부 통과구간을 제외한 배수형 터널의 콘크리트 라이닝은 자중만을 지탱하도록 설계되어 있다. 따라서 터널의 수명기간동안 1차 지보재의 기능이나 지반강도가 저하될 경우에는 콘크리트 라이닝에 지반하중이 전이되게 되고 전이되는 하중의 크기에 따라 터널의 안전에 문제를 야기시킬 수 있다. 특히 풍화토 혹은 미고결 토사지반을 약액으로 보강하여 시공한 천층의 터널은 장기적인 관점에서 볼 때 콘크리트 라이닝에도 하중이 전이되는 것으로 고려하는 것이 타당할 것이다.

콘크리트 라이닝은 완전히 교란된 지반중에 되메움하여 설치한 구조물이나 지상 구조물과는 달리 작용하는 외력을 명확히 규명하기가 어렵다. 따라서 일반 토목 구조물의 설계개념을 터널 구조물에 적용할 때는 신중을 기해야 한다. 현행 콘크리트 라이닝의 구조 해석은 강도 설계법과 허용응력 설계법이 동시에 허용되고 있다. 그러나 강도 설계법을 적용할 경우 콘크리트 라이닝에 작용하는 토압산정과 하중계수를 어떻게 적용하여야하는 것에 대해서는 세부적인 규정이 없다. 다만 서울 지하철에서는 콘크리트 시방서에 의해서 콘크리트 라이닝을 설계 하도록 규정하고 있다.

설계에서 적용되는 토압에 대한 하중계수는 <표10> 같이 정리된다.

<표 10> 터널설계에 적용되는 하중계수

종 류	사 하 중 ( D )	토 압 ( H )
콘크리트 시방서	1.2 ( 1.5* )	1.8
도로교 시방서	1.3	1.7
A C I	1.4	1.7

( \* ) 사하중이 지배적인 경우

콘크리트 라이닝 해석을 위해서는 토압 산정방안이 확립되어야 한다. 현재 서울 지하철 건설 자문기술자 (오스트리아의 Geoconsult)들이 제시한 콘크리트 라이닝 설계개념을 소개하면 다음과 같다.

○ 설계개념

지반 상태가 좋지 않을 경우 1차 라이닝의 내구연한은 터널 구조물의 내구연한보다 짧기 때문에 시간이 경과함에 따라 1차 라이닝이 그 기능을 완전히 상실하여 1차 라이닝으로 부터 전이되는 하중을 콘크리트 라이닝이 받는 것으로 가정한다. 따라서 방수형 터널의 경우 라이닝자중 + 토압 + 수압을 고려한 콘크리트 라이닝을 설계 하여야 한다.

○ 설계방법

하중계수를 고려하지 않는 실하중으로 해석을 수행하고 그 결과치에 하중계수를 적용하여 설계 하중효과를 얻는다.

○ 설계적용(예)

자중, 토압, 수압을 고려할 경우

(자중 + 토압 + 수압)을 고려하여 산정된 단면력 - (1)

(자중 + 토압) " - (2)

(자중) " - (3)

수압만에 의한 단면력(4) : (1) - (2)

토압만에 의한 단면력(5) : (2) - (3)

a) 하중조합 1 : 자중만 고려

$$1.2 \times (3)$$

b) 하중조합 2 : 자중 + 수압고려

$$1.2 \times (3) + 1.4 \times (4)$$

c) 하중조합 3 : 자중 + 수압 + 토압고려

$$1.2 \times (3) + 1.4 \times (4) + 1.8 \times (5)$$

영국에서 적용하고 있는 NATM 특별시방서에서도 다음과 같이 언급되어 있다.

" Thus, in a finite element soil structure interaction study, the analysis shall be carried out using nominal soil density and water table depths to determine the nominal load effects on the buried structures. These effects shall then be factored appropriately to determine the design load effects."

## 7. 굴착설계 고찰

지반이 불량할수록 조기에 링폐합을 실시하여야 안전한 터널시공이 가능하다. 현재 적용하도록 계획되어 있는 표준패턴에는 표준 굴착방법만을 제시하고 있을 뿐 실지반조건에 따라 변경하고 조정해야하는 대응 굴착공법이 제시되어있지 않다. 더욱이 종방향에 대한 굴착방법은 대부분 미흡하여 기술적으로 보완되어야 할 여지가 많다. 토사 지반에서 적용하도록 되어있는 링컷트(ring cut)공법은 지지코아로 하여금 막장의 안정을 도모하고자 하는 방안이나 그 크기가 너무커서 슛크리트 록볼트 등의 지

보재를 적절히 시공할 수 없기 때문에 막장안정을 해치지 않는 범위에서 축소하여야 한다. 굴착공법도 지반조건이나 주변여건을 고려하여 종방향으로의 상세한 시공순서를 도면화하여 제시하여야 한다. 또한 기계화 시공방안도 설계에 적극 수용되어야 한다.

## 8. 방배수 체계에 대한 고찰

현재 운영중이거나 건설중인 지하철 터널은 하천 하부나 용수 다량지역을 제외하고는 대부분 인버트 부분을 제외한 상부 부분만을 방수막으로 둘러싸고 터널 바닥을 통하여 배수시키는 부분 방수형 배수 터널이다. 이 형태의 터널에서는 콘크리트 라이닝에 수압이 전혀 작용하지 않는 것으로 간주하고 있다.

본 배수형 터널이 구축되는 지역에는 지하수위가 저하되기 마련이어서 지하수원 고갈을 비롯한 지하 환경영향 문제를 야기시킬 수 있고, 점토성 지반이 있는 곳에서는 장기침하를 초래하여 지하 및 지상 시설물등에 영향을 미치게 된다. 선진국들에서는 도심지 터널은 대부분 방수형으로 시공하는 추세인 점을 눈여겨 보아야 할 것이다. 국내에서도 도심지 지하철은 방수형으로 전환되어 가고 있는 과정에 있다. 배수형 터널에서는 배수 기능을 원활하게 유지시키기 위하여 현행 축방향 배수관의 크기를 확대하고 일정한 간격마다 청소구를 두도록 하여야 한다. 콘크리트 라이닝이 이러한 축방향 배수관에 의해 두께가 감소되지 않도록 굴착단면을 조정하여야 하며 층적층과 같이 지하수가 지하수위 저하없이 공급되는 지역에서는 배수시설의 배수능력을 면밀히 검토하고 콘크리트 라이닝에 예기치 않은 수압이 작용되지 않도록 배려하여야 한다. 또한 지하수위가 지상이나 지하시설물 등에 영향을 미치게 될 경우에는 적절한 보호대책을 강구하거나 방수터널로의 전환을 피하여야 한다. 비록 시공상의 어려움이 있다 할지라도 도심지 터널은 방수형 터널로 구축하는 것이 바람직하다. 그러나 도심이라 할지라도 산이나 피복이 큰 암반지역을 통과하는 구간은 부분적으로 배수형을 채택하도록 하는 것이 경제적이고 타당하다.

## 9. 기타 세부 설계에 대한 고찰

### 9.1 단면 및 접속부 설계

설계에는 시공시 유발될 수 있는 오차나 굴착에 따른 내공 변위량 등이 반영되지 않아 정밀시공이 이루어지지 않을 경우 설계 단면 확보가 어렵게 된다. 개착 구조물이 터널과 접속되는 지점에서도 설계 및 상세처리가 미흡하여 균열 및 누수 등의 문제를 야기시킨다. 특히 2아치 및 3아치 터널에서는 순차적으로 구조물을 완성해가도록 설계되어 있으나 접속부에 대한 시공성(철근조립, 방수막 연결등)이 고려되지 않아 완성후 이 부분에서 구조적인 결함을 초래할 수 있다. 그러므로, 설계 단면은 피할 수 없는 시공상의 오차와 지반 변형이 합리적으로 수용된 단면이 되어야 하며 강성이 아주 다른 두가지 구조물은 분리구조로 시공할 것과 구조물 간의 연결부는 불량시공이 되지 않도록 충분한 시공 공간을 제공할 수 있도록 설계하여야 한다. 또한 동



일한 공사공구 구간에서는 단면을 평면 선형의 곡률에 너무 의존하여 여러가지로 계획하는 것 보다는 큰 단면을 기준 단면으로 하여 계획 단면수를 최소화 하면 시공성을 증진시키게 될 것이다.

## 9.2 시설물 보호대책

대체로 현행 설계는 충분한 시설물 보호대책이 제시되어 있지 않다. 제시되어 있는 보강대책도 목적, 시공법 등이 부적합할 경우가 많다. 시설물 보호대책은 설계 단계에서 면밀히 분석하고 검토하여 경제적이고 기술적으로 타당한 방안을 수립 제시하여야 한다. 특히 계측 관리치를 명시하여 시공단계별 안정성을 검토할 수 있도록 설계되지 않고 있다. 또한 진동, 소음 등에 대한 환경영향을 설계 단계에서 충분히 분석하여 대책을 수립하여야 하지만 무시되고 있는 실정이다. 따라서, 기술적으로 뒷받침되는 시설물 보호 대책방안이 반드시 설계에 포함되도록 하여야 한다.

## 9.3 계측계획과 시공관리 기준치

제한된 조사와 수치해석 기법에 의해서 예측된 지반의 거동은 지반 변화의 임의성과 다양성 때문에 실제의 지반거동과 동 떨어진 경우가 발생할 수 있다. 이러한 공학적인 한계를 극복할 수 있는 유일한 수단이 계측이다. 계측 계획은 시공중 지반 거동을 종합적으로 파악할 수 있도록 수립하고 그 결과에 대한 관리 기준치 및 대책을 미리 설정해 두어야 한다. 현행 설계에서는 계측 계획이 형식적이고 관리기준도 제대로 마련되어 있지 않을 뿐 만 아니라 시공사에서도 계측이 임하는 자세가 미온적이어서 계측전반에 대한 검토가 시급히 요망된다. 실용화된 계측을 위해서는 종래의 측정 방법을 지양하고 신속하고 정확한 측정이 가능한 기기를 사용하도록 하여야 하며, 이를 분석하고 적용하는 기술이 보급되어야 한다.

계측 관리 기준치는 터널의 안전 시공과 주변 시설물 보호측면의 두 측면에서 검토되어야 한다. 즉, 터널이 일정량 변위를 동반하며 안정 상태에 도달한 경우라도 그 변위량이 주위에 파급되어 시설물에 유해한 요인으로 작용하게 될 때는 주위 시설물을 우선적으로 고려하는 관리치를 설정하여야 한다. 이때에는 지반변위가 관리치 이내에서 수렴되도록 지보 및 굴착, 보강 등을 실시하여야 한다. 굴착면적은 작을수록 지보재가 강할수록 지반변위는 감소한다.

## 10. 보조공법의 현황과 문제점 분석

지반이 연약하여 자립시간이 짧고 용수가 다량 유출되는 곳 또는 진행성 붕락이 발생하는 지역에는 보조공법 적용이 필수적이다. 보조공법은 그 적용목적에 따라 굴착대상 지반을 물리적 혹은 화학적인 방법으로 강화시키는 것과 지반의 차수성을 증대시켜주는 두가지로 대별된다.

### 10.1 대상 지반별 그라우팅 현황

제 2기 서울 지하철 노선중 5호선과 7호선 1단계 구간인 터널 총 연장 57.3 km 구간에 적용된 그라우팅 현황은 <표 11, 11A, 11B> 와 같다.

<표 11> 5호선, 7호선(1단계) 터널구간 그라우팅 현황

호선 실적	5 호 선			7 호 선		
	총 연장 (m)	그라우트 적용장(m)	비 율 (%)	총 연장 (m)	그라우트 적용장(m)	비 율 (%)
계 획	35,400	8,767	24.8	21,900	158	0.7
시 공		9,778	27.6		742	3.4

<표 11A> 5호선 그라우트 연장에 대한 지반별 비율

지 반 비 율 (%)		충적토	풍화토	풍화암	연 압	경 압	그 라 우 텅 적 용 장(m)
		계 획	8.0	14.7	46.0	23.8	
시 행		10.4	29.7	45.4	7.8	6.7	9,778

<표 11B> 7호선 그라우트 연장에 대한 지반별 비율

지 반 비 율 (%)		충적토	풍화토	풍화암	연 압	경 압	그 라 우 텅 적 용 장(m)
		계 획	-	-	100	-	
시 행		-	26.6	73.4	-	-	742

5호선에서는 그라우팅 적용구간이 터널 총 연장의 27.6%로서 당초 계획보다 약 3%가 증가되었다. 7호선에서는 시행량이 계획량의 약 5배나 된다. 대상지반별 적용 현황을 살펴보면 풍화암 지반에 가장 많이 적용되었고 풍화토 충적토 순이다. 5호선

에서 연암이상의 지반에 적용된 양이 터널연장의 14.5%로 나타난 것은 노선의 일부가 하천을 통과하기 때문인 것으로 판단된다.

적용공법을 살펴보면 (표 12참조) 계획 당시에는 풍화암 이하의 지반은 SGR 공법이, 연암이나 경암은 LW 공법이 주로 계획 되었으며 실시공 단계에서도 이러한 추세는 비슷하게 나타났다. 가장 많이 적용된 공법은 SGR 공법이며, 충적토사나 토사구간에서 상당부분이 고압분사 주입으로 변경 되었음을 알 수 있다. 지반별 적용 공법 선호도는 충적토에서 SGR, 고압분사 그라우팅 순이고, 풍화토에서는 SGR, 고압분사, 우레탄 순이다. 풍화암에서 연암 구간에서는 SGR, LW, 고압분사, 우레탄 순이며 경암 구간에는 LW 공법만 적용되었다. LW 공법은 지반이 좋아지면서 적용비율이 증가하고 JET 그라우팅 공법은 이와 정반대 현상을 뚜렷이 보여주고 있으나 SGR이나 우레탄에서는 이러한 경향이 나타나고 있지 않다.

그라우팅의 효과는 지반과 주입재의 특성 및 주입공법에 의존하므로 반드시 시험시공을 실시하도록 규정하고 있으나 그의 효과에 대해서는 체계적으로 검증되지 않은 채 시행되는 경우가 많아 그라우팅을 실시하지 않아도 될 지반에 그라우팅하는 경우가 발생하고 있다. 그라우팅을 실시한다고 해서 시공을 소홀시 할 수 없음을 명심하여야 한다.

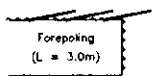
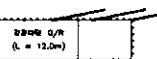
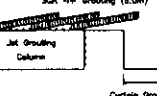

<표 12> 그라우팅 적용장대비 적용공법 현황(5호선, 7호선(1단계))

지반		충적토	풍화토	풍화암	연 암	경 암
공법						
계	SGR (%)	100	100	76.1	63.6	-
	LW (%)	-	-	23.9	27.8	100
	URETHANE (%)	-	-	-	8.6	-
획	그라우팅 적용장 (m)	705	1287	4190	2083	660
시	SGR (%)	71.6	58.6	70.9	20.9	-
	LW (%)	-	6.0	21.6	66.0	100
	URETHANE (%)	-	15.5	2.4	13.1	-
	JET (%)	26.9	17.4	0.6	-	-
행	CEMENT (%)	1.5	1.9	-	-	-
	JSP (%)	-	0.6	4.5	-	-
	그라우팅 적용장 (m)	1014	3101	4982	763	660

## 10.2 보조공법의 적용현황 및 평가

국내에서 적용중인 보조공법을 막장안정 확보 목적과 용수처리 목적으로 구분하여 <표 13>에 정리하였다. 본 장에서는 보조공법의 적용상의 개선 방향을 언급함으로써 현행공법들과의 대비를 이루도록 하였다.

<표 13> 국내 보조공법 적용 현황

목적	국내 적용 공법	공 법 개 요
막	Forepoling 	<ul style="list-style-type: none"> <li>경사각도 : 15° - 20°</li> <li>횡방향 간격 : 40 - 60 cm</li> <li>길이 : 2 - 3 m</li> <li>재질 : 철근(D25), 강파이프(φ32 mm)</li> <li>형식 : 모르타르 주입형</li> <li>매 두막장마다 시공</li> </ul>
	Pipe roof 	<ul style="list-style-type: none"> <li>경사각도 : 15° - 20°</li> <li>횡방향 간격 : 40 - 60 cm</li> <li>길이 : 6 - 12 m</li> <li>재질 : 강파이프(φ50 - 100 mm)</li> <li>중첩길이 : 3 - 4 m</li> </ul>
장	일단 그라우팅 다단 그라우팅	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cement milk를 전장에 걸쳐 단회주입하여 단층 파쇄대 봉합</li> <li>- Cement milk를 깊이별로 수회에 나누어 주입하여 단층 파쇄대 적극 봉합(packer 사용)</li> </ul>
	수평 고압 분사 그라우팅 	<ul style="list-style-type: none"> <li>경사각도 : 6°</li> <li>횡방향 간격 : 40 - 60 cm</li> <li>길이 : 12 m</li> <li>초 고압분사로 미고결 원지반 토사를 시멘트와 교반하여 콘크리트 구근 형성</li> <li>중첩길이 : 4 m 정도</li> </ul>
정	수직 고압 분사 그라우팅	<ul style="list-style-type: none"> <li>수직으로 시공</li> <li>간격 : 0.6 - 1.0 m</li> <li>크라운 상부 2.5 - 5.0 m 두께로 주입</li> </ul>
	Root milk 시공 (시험 시공중)	<ul style="list-style-type: none"> <li>소정의 깊이까지 천공한 후 공내에 철근(D25)을 삽입하고 packer, casing 혹은 강관 등을 이용하여 cement milk를 압력주입하여 철근과 지반이 일체로 작용하도록하여 지반강도 증가</li> <li>공 간격 : 1.0m</li> </ul>
법	막장면 슛크리트 	<ul style="list-style-type: none"> <li>막장 지반 자립이 어려운 경우 슛크리트 타설로 보강</li> <li>두께 : &gt; 3 cm</li> <li>조건에 따라 록볼트와 함께 시공</li> </ul>
	차수공법	<ul style="list-style-type: none"> <li>SGR 그라우팅</li> <li>LW 그라우팅</li> <li>크라운 상부에 2.5 - 5.0 m 의 차수층 형성</li> <li>터널 좌우에 차수벽을 지중에 설치하여 지하수 유입을 차단하고 차수벽 바깥쪽에 지하수 위 보존</li> </ul>

막장의 안정을 도모하기 위해 실시하는 Forepoling은 설치 각도가 수평에 가까울수록 효과적이다. 현행 설치 경사는 너무 급하므로 경사를 5°까지 완만하게 낮추는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 강지보재의 간격이 너무 좁거나 강지보재의 크기가 크면 곤란하다. 횡방향 간격도 지질이 나뉠수록 좁게 하여야 하며 일반적으로 Forepoling이 요구되는 지반이라면 그 설치간격이 40 cm을 넘지않아야 한다. 길이에 있어서도 지반중에 충분한 지지점이 형성되도록 굴진장의 2.5배 이상이 되도록 해야 하며 철근보다는 강파이프를 사용하여 강성을 높여 주는 것이 좋다.

Pipe roof 시공에 있어서도 대부분 경사각도가 급하여 여굴을 촉진시키게 되기 때문에 pipe 설치부 후방 천단부를 미리 확대 굴착하여 설치각도를 가능한 한 완만하게 시공할 수 있도록 하는 것이 효과적이다. 부득이 이러한 시공이 불가능할 때에는 Forepoling과 병용하여야 효과적이다. 또한 pipe 간의 중첩장도 최소한 막장 굴진높이 이상이 되도록 하여야 막장의 안정에 효과적이다.

고압 수평분사인 경우는 대상지반을 선별하여 시공하여야 효과적이다. 풍화토나 풍화암 지반에서는 그 효과가 크게 저감되고 충적층에서는 확실한 보강효과가 있음이 시공을 통하여 증명 되었다.

국내에서 차수 목적으로 적용되는 공법은 SGR이 주류를 이루고 있다. 그 시공실적을 통하여 이 공법의 우수성이 인정되고 있지만 초기의 무성의한 시공이 공사가 진척되면서 엄청난 경제적 손실과 공기지연을 초래케한 사례가 많았다. 특히 건물하부에 터널이 지나가게되어 터널 측부에 차수벽을 경사지게 설치하게 되는 경우는 수직 차수벽 시공에 비해 그 효과가 크게 떨어지게 되어 피해를 주게 되는 경우가 종종 발생하였다. 충적지반이라 할지라도 지하수위를 저감시키면 지반의 일시적인 자립이 가능하기 때문에 안전한 터널 시공이 가능하다. 터널 주위에 일정한 두께의 차수층을 인위적으로 형성시켜 차수를 도모하면 안전한 시공이 가능한 것은 사실이지만 시공의 정도를 고려해 볼 때 균질한 차수층 형성을 기대할 수 없으므로 배수에 의한 지하수위 저하공법을 적용하거나 차수벽과 지하수위 저하 방법을 병용하여 안전성을 증대시키는 방안을 적극적으로 검토할 필요가 있다. 지역 특성상 지하수위 저하법은 여러가지 제약이 따르겠지만 이러한 문제점만 극복된다면 경제적이고 안정된 시공을 가능케 할 것이다.

### 10.3 보조공법의 기대효과

보조공법을 선정하기 위해서는 보조공법 적용상의 목적이 분명해야 하고 대상지반의 특성을 명확히 파악하여 어느 보조공법이 요구되는 목적을 달성해 줄 수 있을 것인가를 면밀히 검토하여야 한다. 현재 그라우팅을 실시하도록 계획되어 있는 경우를 살펴보면 그라우팅의 목적이 불분명하고 계획된 공법 적용에 대한 타당성을 기술적으로 뒷받침해 줄 수 없는 경우가 대다수이다. 이러한 무분별한 그라우팅은 경제적인 손실을 가져올 뿐만 아니라 지반을 오히려 교란시키는 결과를 초래하여 안전시공에도 유해한 결과를 가져올 수 있음을 정확히 인식하여야 할 것이다.

일부 용역사에서는 지반에 그라우팅을 실시하여 원지반의 강도를 해석에서 요구되는 강도까지 증가시켜 주도록 시방을 정하고 있으나 이는 비현실적인 접근 방법이

다. 즉, 풍화암에 LW를 주입하여 강도를 크게 개량할 수 없으며, Forepoling을 실시하여 풍화암 탄성계수를 연암정도의 탄성계수로 만들 수 있다고는 생각하기 어렵다. 따라서, 터널 해석 과정에서 그라우팅이나 보조공법 적용의 효과를 과대평가하여 적용하기 보다는 단순히 안전을 증가 차원으로 고려하는 것이 오히려 현실적으로 타당할 것이다.

## 11. 시공상의 문제점 분석 및 개선방향

굴착면 주변의 지반은 시간 의존성 거동특성을 가지고 있기 때문에 굴착방법, 지보시기, 지보순서 및 지보재 특성에 따라 안정성과 변위량 등이 결정된다. 아무리 좋은 설계라 할지라도 설계에서 요구되는 사항들이 시공과정에서 무시된다면 설계는 무의미하게 되기 때문에 터널 시공상의 문제점을 점검해 본다는 것은 의의 있는 일이다.

### 11.1 지반평가와 지보재 결정

굴착면에 노출된 지반을 관찰하여 설계시 예측된 지반의 특성과 비교하여 설계 지보패턴의 적합성을 판단해야 한다. 현행의 시공 체계는 막장 관찰기록의 신뢰성이 떨어질 뿐만 아니라 기록 유지에만 치중할 뿐 이를 통한 지보재의 적합성 여부를 평가하는 작업은 이루어지지 않고 있다. 더우기, 조사단계에서 결정된 지보패턴이 너무 경직되게 적용되고 있어 현장 여건에 따라 유연성 있게 대처하는 터널시공 원리가 지켜지고 있지 않다. 따라서, 시공중에 적용될 표준화된 지반 분류안이 설정 되어야 하고 이를 신뢰성 있게 평가할 자격을 갖춘 기술자가 현장에 상주하여 현장 여건을 분석 평가하여 합리적인 지보를 실시할 수 있도록 하여야 한다. 지보패턴 변경조정에 있어서도 정형화된 패턴으로의 조정보다는 현장여건에 맞게 패턴을 수정하고 보완해서 적용할 수 있는 유연성이 있어야 한다. 이러한 시공원리는 발주처와 시공사간의 상호신뢰와 기술적인 뒷받침 없이는 실현이 불가능하므로 제도적인 장치 마련이 시급히 요구된다.

### 11.2 품질관리

설계에서 요구하는 품질을 달성하기 위해서는 시공 자체에 결함이 없어야 할 뿐만 아니라 공사의 준비 단계에서 종료시까지 지속적인 품질 관리가 시행 되어져야 한다. 본 장에서는 1차지보재의 시공상의 문제점을 항목별로 살펴보고 콘크리트 라이닝 시공사항도 아울러 살펴 보도록 한다.

#### 11.2.1 1차 지보재 시공

터널시공에 있어서 가장 중요한 1차 지보부재는 슛크리트이다. 슛크리트는 지반의 이완을 방지하고 지반내의 응력 재분배 과정이 유연하게 진행될 수 있도록 지반을

도와주어야 한다. 이를 위해서는 충분한 사전준비와 양질의 슛크리트 배합 장비 및 높은 작업수준과 철저한 품질관리가 수행되어야 한다. 현행 슛크리트 타설 공정의 문제점으로는 첫째, 타설시기의 지연 둘째, 타설 슛크리트와 지반과의 사이에 공극 발생 셋째, 강도가 요구되는 수준에 미달되는 경우 등을 들 수 있다. 이러한 사항들은 슛크리트가 정량으로 배합 되도록 하고 1차 철망을 지반에 밀착 시킨 후 시방에서 요구하는 사항을 준수 함으로써 개선 될 수 있는 사항들이다.

스�크리트중에 묻히는 철망은 슛크리트의 후속파괴 거동의 유연성 및 부착성을 증대시키고 크랙을 방지 하도록하여 슛크리트가 구조체로서의 기능을 잘 감당하도록 도와주는 역할을 한다. 현 설계에서는 철망이 구조적으로 주기능을 감당하도록 고려하지 않고 다만 추가적인 보강재 개념으로 배치하고 있다. 따라서 철망의 배치 및 연결방안이 소홀시 되어 있는 실정이다. 이중 철망을 두는 경우 내측 철망은 강지보재가 설치되는 지점에서 절단되도록 설계된 경우가 많고 철망의 상하반 연결부의 설계 및 시공이 취약하다. 상하반 분할 굴착시 철망이 원래의 기능을 잘 발휘하기 위해서는 연결부 시공에 정성을 기울려야 하며 철망은 가능한 한 슛크리트의 외측에 위치하여 충분한 겹이음이 되도록 하여야 한다. 시공의 편의를 위해 철망을 겹쳐서 강지보재에 고정된 후 슛크리트를 타설하게 되면 슛크리트와 지반과의 접촉이 어렵게 되고 리바온드량도 증가하며 철망의 효과를 크게 저하시키게 된다.

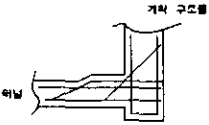

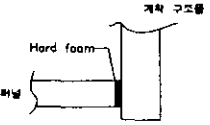
록볼트가 영구 구조물이나 임시 구조물이나 하는 것은 논란의 대상이 되고 있지만 시공의 정도와 지하수의 영향에 의해서 해답이 결정된다고 볼 수 있다. 국내에서 시행되고 있는 설계는 록볼트를 영구 구조물로 간주하고 있기 때문에 이에 상응한 시공이 될 수 있도록 시공 방법을 개선하여야 한다. 록볼트의 설치시기 또한 지연되는 경우가 많고 길이가 내공단면의 크기 및 지반조건에 관계없이 일정하다. 설치각도가 굴착면에 직각이 되지 않고 지반과 록볼트간의 접촉이 양호하지 못한 경우가 많이 노출되고 있다. 따라서 록볼트의 길이는 단면의 크기 및 지반조건에 따라 3~6m의 길이를 선택적으로 사용할 수 있도록 하여야 한다. 아울러 시간이 지나면서 록볼트의 기능이 저하될 것으로 예상된다면 이에 대한 대책이 강구되어야 할 것이다. 록볼트의 인발 내력 결정도 두직선 교차법에만 의존하지 말고 허용 한계 변위량에 대한 규정도 추가하여야 한다.

### 11.2.2 콘크리트라이닝 시공

지하철 터널의 평면선형은 도로나 기타 터널에 비해 엄격하기 때문에 콘크리트 라이닝의 소요두께를 유지하기 위해서는 굴착 단계에서 많은 노력을 기울여야 한다. 만약 굴착을 완료하고 콘크리트 라이닝을 치는 시점에서 요구되는 라이닝 단면이 확보되지 않을 때는 시기적으로 보아 심각한 문제가 된다. 이를 방지하기 위해서는 매막장 시공마다 선형과 내공단면을 측정하여야 한다. 콘크리트 타설시에도 천단부에 공극이 형성될 수 있으므로 반드시 충분한 접촉 그라우팅을 실시하여야 한다. 콘크리트 이어치기면도 라이닝에 직각이 되도록 하고 철근을 두는 경우에는 철근 거치를 위한 틀을 일정 구간마다 설치하여 천단부 철근이 처지지 않도록 하여야 할 것이다.

특히 철근 조립시 방수막에 손상이 가지 않도록 하여야 한다.

터널이 개착부 구조물과 접속되는 구간에는 다음의 세가지 타입의 설계가 수행되어왔다.

강결 접속	힌지 접속	분리형 접속
		

시공실적을 보면 강결이나 힌지 접속이 주류를 이루어 왔고 누수 등의 문제도 이 부분에서 많이 발생하고 있다. 개착 구조물과 터널 구조물은 강성이 서로 달라 거동이 다르기 때문에 두 구조물을 분리시키는 접속방안이 적합할 것으로 판단된다. 접속부에는 재질이 다른 방수막끼리 연결되어야 하고 터널 방수막도 절개되어야 한다. 이러한 절개는 방수 기능을 해칠 가능성이 있으므로 접속부용 방수막을 별도로 제작하여 사용할 수 있도록 하면 방수기능 유지에 도움이 될 것이다.

## 12. 결 론

NATM은 국내에 도입된 이래 도심지 지하철 뿐만 아니라 철도, 도로 및 수로터널 등 광범위한 터널 공사에서 적용되고 있다. 특히 시공이 어려운 연약지반에서의 천층 터널 시공이 성공을 거두면서 이 공법은 국내의 터널 공법으로서 독보적인 위치를 차지하게 되었다. 그러나, 공사가 일시에 대량으로 발주되고, 불량한 지반도 예전보다 많아지자 우리 기술이 편중되어 있고 그것마저 기초가 튼튼하지 못함을 드러내게 되었다. 새로운 기술이 도입되어 활발하게 적용되어온 지난 10여년 동안 기술자료의 축적을 바탕으로 시공법을 개선해 가면서 우리의 환경에 맞는 기술로서 발전시키려는 의지와 노력이 없었던 결과라 하겠다. 제2기 서울 지하철 터널 구간중 토피가 20m이 하인 터널은 62.2%로서 비교적 천층터널로 구성되어 있다. 본고에서는 현행 터널공법의 전반에 대한 사항을 이러한 연약지반 천층터널을 중심으로 살펴보았다. 이것들을 조사, 설계, 보조공법 및 시공분야로 요약하면 다음과 같다.

- ° 지반조사는 대체로 밀도가 낮고 지층의 구조 및 각 층별 특성 파악이 불충분하다. 정성적인 조사보다는 정량적인 조사가 될 수 있도록 개선이 필요하다. 특히 지반 분류는 조사와 시공단계별로 구분하여 규정하고 이 두분류간의 상관 관계를 확립하면 합리적인 설계와 시공이 가능하게 될 것이다. 그리고 부분적으로 실시하는 조사자료들도 사장되지 않도록 수집, 분석하여 활용할 수 있는 체계 확립이 필요하다.



- ° 현행 표준 지보패턴을 지층의 구조와 굴착방법을 고려하여 세분화하고 각 패턴에는 상세한 종방향 지보방법이 제시되어야 한다. 또한 패턴별로 지반변화에 대응하는 방법도 제시되어야 한다. 연약지반 (충적토, 풍화토, 풍화암)의 천층터널에서는 1차 지보재에 가해지는 지반응력이 장차 콘크리트 라이닝에 전이되는 것으로 고려하여야 할 것이다. 도심지 터널은 방수형 터널로 전환하는 것이 바람직하며 배수형 터널에서는 지반조건에 따라 반드시 배수시설의 기능 검토가 이루어져야 한다. 각종 시설물 보호대책 및 계측관리에 대한 기준치가 설계단계에서 면밀히 분석 제시되어야 한다.
- ° 그라우팅이 가장 많이 적용된 지반은 풍화암이며, SGR, LW, 고압분사공법이 주류를 이루고 있다. 대체로 신중한 사전 검토 없이 공법을 채택하는 경향이 많다. 지하수 유출이 다량으로 예상되는 구간은 차수공법에만 너무 의존하지 말고 지하수위 저하공법 겸용 방안도 적극 검토할 필요가 있다. 막장 천단부 안정용 Forepoling이나 Pipe roof는 설치 각도를 가능한 한 수평에 가깝게 되도록 하여야 효과적이다.
- ° 시공중 지반평가를 정확히 실시할 수 있는 체계 확립이 필요하며, 계측은 그 결과가 시공에 즉시 반영될 수 있도록 운영되어야 한다. 무엇보다도 품질관리에 신경을 기해야 할 것이다.

지금은 신뢰할 만한 시공 데이터를 바탕으로 기존 문제점들을 심층분석하여 우리의 터널 기술이 확고하게 정착될 수 있는 계기를 마련하여야 할 때이다.

### 13. 감사의 글

본 논문을 위해 자료 정리와 타자에 헌신적으로 협조해준 후배 동료들에 감사의 뜻을 표한다.

### 참고문헌

1. 서울특별시 지하철 건설본부(1991), 서울지하철 5호선 기본 설계 보고서
2. 서울특별시 지하철 건설본부(1992), 지하철 터널의 설계 및 시공 자료집(1)
3. 서울특별시 지하철 건설본부(1993), 서울지하철 6호선 기본 설계 보고서
4. 서울특별시 지하철 건설본부(1993), 지하철 터널의 설계 및 시공 자료집(2)
5. 서울특별시 지하철 건설본부(1993), 서울지하철 건설 현황