

## 도심지구간 저토피 토사터널의 보강사례



**양재원**  
도담이앤씨  
지반터널부 부장



**최병석**  
도담이앤씨  
지반터널부 과장



**윤일병**  
도담이앤씨  
지반터널부 상무



**임현철**  
고려개발  
차장

### 1. 서론

NATM 터널은 록볼트와 슛크리트를 중요한 지보 부재로 하여 지반의 강도 약화를 최대한 억제하며, 지반이 원래 가지고 있는 내하능력 즉 지지력을 적극적으로 활용하면서 현장계측 및 관리를 바탕으로 터널을 굴진하는 공법이라고 할 수 있다. 본 사업 구간은 최저토피고가 1.0D 내외의 저토피 구간이며, 매립층과 붕적층 하부에 풍화토층이 깊게 분포하는 지층으로 지반의 아칭효과와 터널의 안정성을 확보하기 어려운 구간으로 적절한 보조, 보강공법 설계 및 터널 시공에 주의가 요구된다.

### 2. 노선현황 및 지질개요

#### 2.1 노선현황

부산광역시의 도시교통망 구축의 일환으로 사하구 지역을 연결하기 위해 계획된 기존 지하철 1호선 연장(다대

구간) 구간 중 장림2동 장림초등학교~한성기업 구간으로 총연장 1.163km이다. 그 현황은 그림 1과 같다.

당사업구간의 본선은 다대로(2,500대/hr) 하부에 계획되어, 개착공법으로 시공할 경우에 다대로의 기능유지를 위해서는 기존도로면을 제거하고 가설 복공판 설치가 필요한데 이는 극심한 민원과 비용이 발생될 우려가 있으므로, 기존도로를 그대로 존치시키고 그 하부에 터널을 계획하였다(그림 2).

또한, 터널 시공을 통해 지반손실을 최소화하여 하부에 위치하는 공동구 터널에 미치는 영향을 감소시켰다.

#### 2.2 지층 현황

지층현황은 그림 3에서 알 수 있듯이 터널 폭에 대한 토피고의 비가 1.0D ~ 2.0D 내외의 도심지 저토피 구간으로 지표는 매립층 및 붕적층으로 이루어져 있으며, 터널 통과구간은 풍화토층, 풍화암, 연암으로 구성되어 있다. 특히 B구간은 풍화토가 터널 통과구간까지 깊게 분포하여 지반조건이 상당히 불량하나, 지하수위는 계획고하

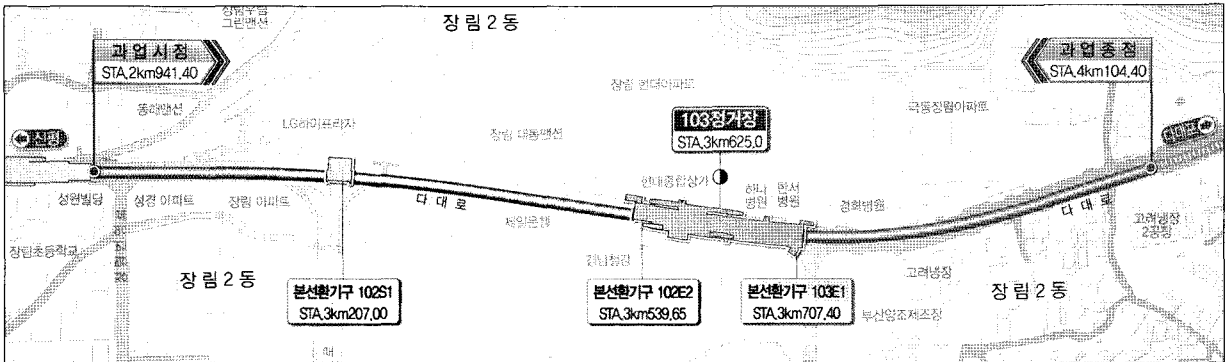


그림 1. 노선현황

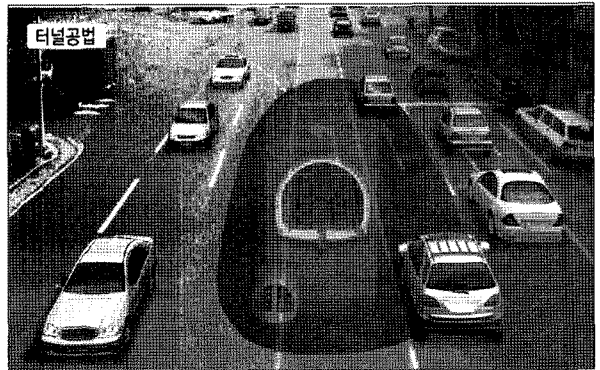
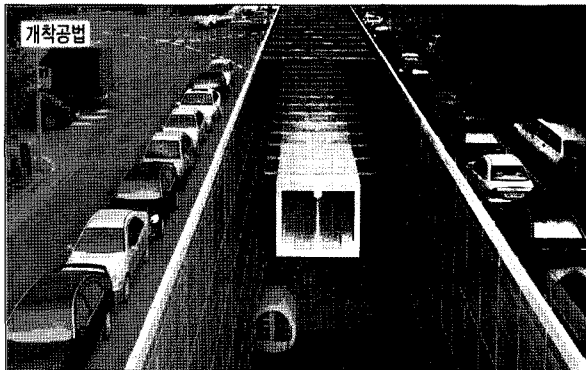
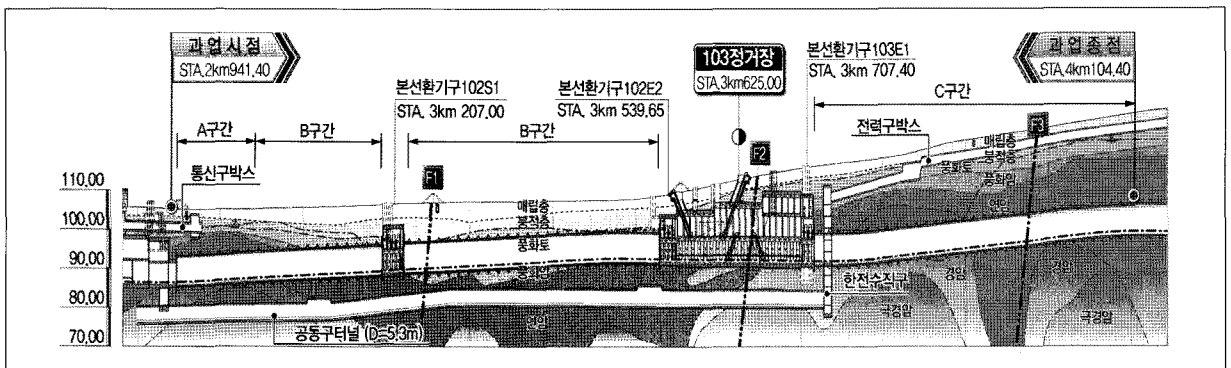


그림 2. 다대로의 원활한 기능유지를 위해 본선구간 터널 공법 계획



구 분	A구간	B구간	C구간
지반조건	연암	풍화토/풍화암	연암이상
토 피 고	10~15m	10m내외	15m이상
굴착(보조공법)	상하분할(포어폴링)	링컷분할(대구경강관)	상하분할(포어폴링)

그림 3. 지층현황

에 분포되는 것으로 조사되어 시공 중 침투수에 의한 큰 피해는 우려되지 않았다.

## 4. 실내모형실험 수행

### 4.1 실험개요

앞 절에서 살펴본 바와 같이 토사 및 연약대를 통과하는 터널의 경우 강관으로 천단을 보강하는 사례가 대다수이다. 이 때 보강재의 최적 분리 간격은 보강재의 휨 특성, 그라우트의 주입범위 등 여러가지 요소들을 고려하여 결정하여야 한다. 보강재의 휨량은 재질에 따라서 달라질 수 있으나 일반구조용강관과 최근 보링형 장비를 이용하여 추진할 경우 1/600~1/250으로 보고 있으며, 가압 그라우팅에 의한 주입범위는 풍화토 지반에서 실시된 현장 시험(한국건설기술연구원, 1995)에 의하면 직경 50mm 강관의 경우, 강관 주변에 직경 150mm 정도의 구근을 형성하고 있으며 그 주변 약 300mm까지는 주입재가 비교적 조밀하게 분포하여 주변지반을 결속하고 있다고 한다.

상기의 이유로 보강재 간격은 보통 토사 및 풍화암층에 서 30~50cm, 파쇄대층 40~60cm로 적용하고 있다.

## 3. 설계 및 시공사례 분석

본 사업구간의 터널설계를 위해 유사한 조건으로 계획된 터널 설계 및 시공사례를 조사하였다. 최근 지상의 주민 생활공간 및 편익시설에 피해가 없는 도로 및 철도 건설을 지향하는 사회적 요구로 인해 터널 시공기술의 비약적인 발전이 이루어졌다.

표 1은 본 사업구간과 제약조건이 유사한 서울 및 부산 지하철 터널 보강사례로서 최근에는 도심지에서 지상의 주민 생활공간 침범이 불가피한 개착공법 대신 저토퍼 터널 계획이 빈번히 이루어지며 대부분 대구경 강관다단(2열) 그라우팅과 차수 및 지반 보강 그라우팅으로 보강하였다.

표 1. 저토퍼 토사구간의 보강사례

구분	서울지하철 903공구	서울지하철906공구	서울지하철910공구	서울지하철706공구
개요도				
구분	서울지하철916공구	서울지하철917공구	부산지하철321공구	부산지하철322공구
개요도				

본 연구에서는 보강재의 적정 크기 및 분리간격 결정을 위해 실내모형실험을 수행하였다.

#### 4.2 실험장치의 구성

실내실험 장비는 모형지반이 형성되는 Trapdoor, 강관을 모사한 Pipe, 그라우트 주입 장치, 지중상태를 모사하기 위해 챔버에 수직 구속압을 주는 공기 가압 장치 (Air compressor)에서 공급되는 압력을 제어하는 Control 장치, 그리고 하중을 측정하기 위한 로드셀, 데이터를 기록하기 위한 데이터 로거, 노트북 등으로 구성되어 있다 (그림 4).

##### 4.2.1 Trapdoor

Trapdoor 상부에는 공압식 가압장치를 설치하였으며 Air compressor를 이용하여 모형지반에 수직 구속압을 가해줄 수 있도록 하였다. 하부에는 상하로 이동이 가능한 판넬을 설치하여 터널 천단부 침하를 모사할 수 있게 하였다.

##### 4.2.2 강관그라우팅 모사 장치

강관다단 그라우트 보강공법에 사용되는 강관을 모사하기 위해서 금속 Pipe를 대구경(직경 6cm)과 소구경(직

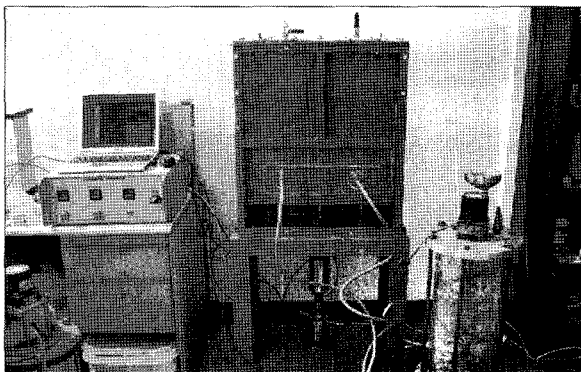


그림 4. 실험 전경

경 3cm)의 두 가지 종류로 제작하였다. 그림 6은 금속 Pipe 장치를 나타내며, 그라우트 주입이 가능하도록 Pipe 앞쪽에 주입구를 설치하였고, 그라우트가 지반으로 침투할 수 있도록 Pipe에 일정한 간격으로 구멍을 뚫었다.

Pipe를 Trapdoor에 고정시키기 위해서 Trapdoor 뒷면에 Pipe 고정 장치를 달고 앞면의 아크릴에는 구멍을 뚫어 강관을 고정하였다. 또한 강관의 간격에 따른 보강 효과를 확인하기 위하여 강관 간격을 200mm, 250mm, 300mm로 변화시킬 수 있도록 하였다. 이 때 뒷 판은 고정 장치를 이동할 수 있게 하였고, 앞판은 강관 간격별로 아크릴을 제작하여 각각의 실험마다 교체하였다.

##### 4.3.3 그라우트 주입장치

주입장치는 시멘트 그라우트를 넣을 수 있는 아크릴 탱크와 금속 Pipe 주입 장치로 이루어져 있다. 그라우트 탱크는 투명 아크릴로 이루어져 있으며, Air compressor로

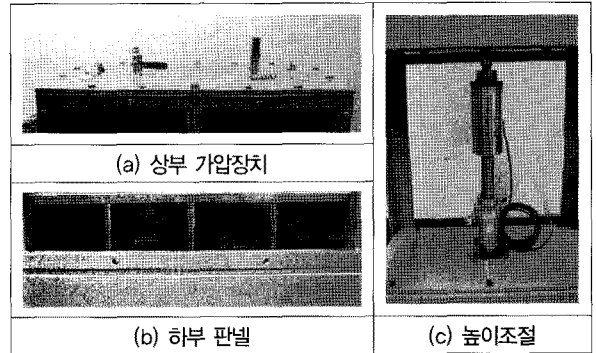


그림 5. Trapdoor

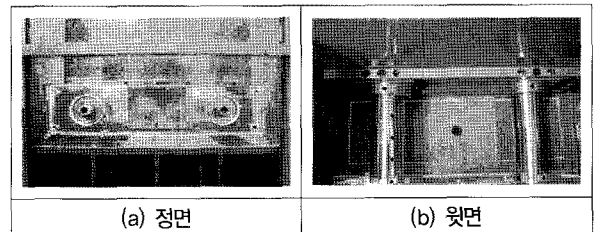


그림 6. 강관그라우팅 모사장치

부터 공기압을 공급받아 내부의 그라우트를 밖으로 밀어 내도록 설계되었다. 또한 그라우트의 재료분리를 방지하기 위해 내부에 전동 프로펠러를 설치하였다. Pipe 주입 장치는 그라우트 탱크에서 호스를 연결할 수 있는 밸브로 이루어져 있으며, 주입이 끝난 후에는 밸브를 막아 그라우트의 유출을 막았다.

#### 4.3.4 컨트롤 및 측정 장치

주동력원인 공기압은 Air compressor를 통해 발생되어 컨트롤 장치에 전달된다. 컨트롤 장치로 2개의 레귤레이터를 사용하였으며, 1번 레귤레이터는 Trapdoor의 구속압을, 2번 레귤레이터는 그라우트 탱크의 주입압을 각각 조절한다.

Trapdoor의 하부 판넬에 작용하는 하중은 높이조절장치 위에 설치된 로드셀을 통하여 측정되며, 그 값은 데이터 로거를 거쳐 노트북으로 저장된다.

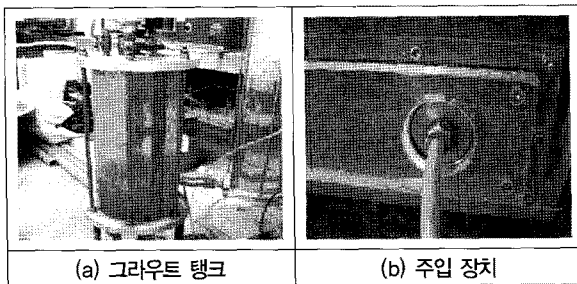


그림 7. 그라우트 주입장치

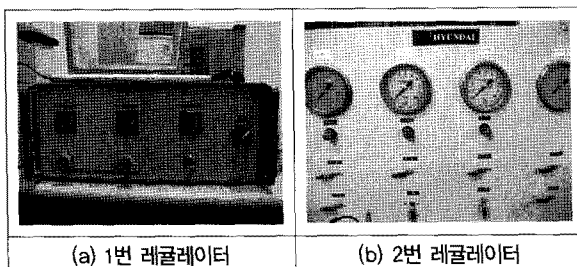


그림 8. 컨트롤 장치

## 4.4 실험 과정

### 4.4.1 지반조성

실험지반을 조성하기 위하여 일정한 양의 흙을 Trapdoor에 넣고 다짐을 실시하여 균질한 지반을 조성하였다. 조성한 시료의 단위중량은  $18.43\text{kN/m}^3$ 이었다.

### 4.4.2 구속압 장치 설치

지반조성이 끝난 후에는 구속압을 가하기 위하여 공압식 가압장치를 설치하였다. 구속압이 새는 것을 방지하기 위하여 윗면에 진공 그리스를 발라주었다.

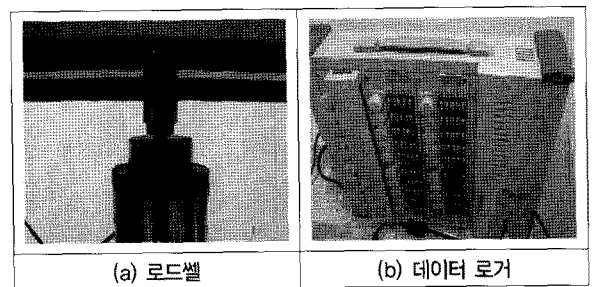


그림 9. 측정 장치

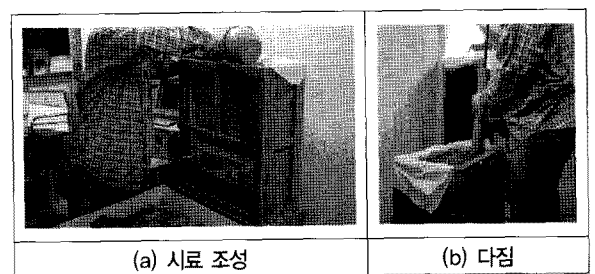


그림 10. 모형지반 조성

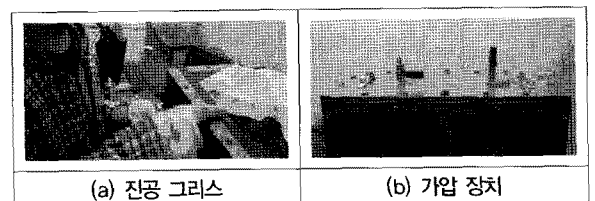


그림 11. 구속압 장치 설치

### 4.4.3 그라우트주입

구속압 장치 설치가 끝난 후에는 물과 시멘트를 교반하여 그라우트를 준비하고, 그라우트 탱크에 주입하였다. 그라우트 탱크와 Pipe 주입구를 연결한 후에, Air compressor를 이용하여 탱크에 압력을 가해 그라우트를 주입하였다.

일반 시멘트의 경우 강도가 발현되는데 오랜 시일이 걸리기 때문에 조속한 실험 진행을 위해서 초속경 시멘트(일반 시멘트의 7일강도가 3시간만에 발현됨)를 사용하였다.

### 4.4.4 구속압 설정과 변위 발생

그라우트 주입이 끝난 후에는 그라우트가 굳을 때까지 기다린 후에 구속압을 가해주었다. 구속압은 우선 터널 토피고 하중의 40%의 하중을 준 후에 추가적으로 30%의 하중(전체 하중의 70%)을 주었다. 그 후에 터널 천단변위의 30%의 변위를 주었다. 터널의 변위는 수치해석 결과를 참고하여 결정하였으며, 0.75mm~1.5mm정도로 여러 단계로 나누어 변위를 주고 변위에 따른 하중값을 측정하였다.

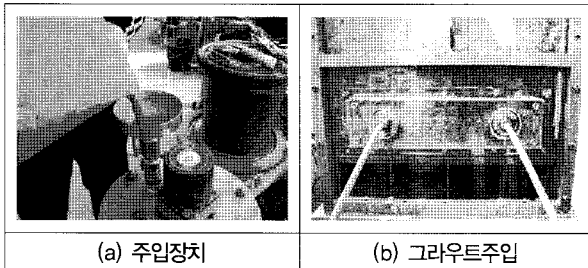


그림 12. 그라우트 주입 장치 설치

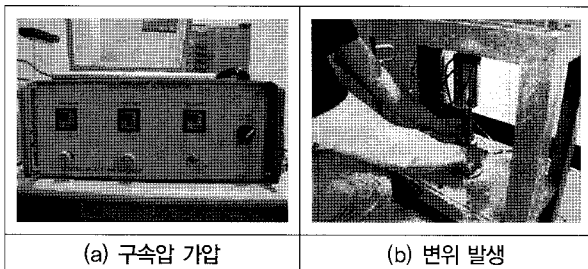


그림 13. 구속압 설정과 변위 발생

마지막으로 30%의 구속압을 가해주어 100%의 하중을 모두 가해주었으며, 그 후에 전체 변위의 30%를 주어 변위에 따른 하중값을 측정하였다.

## 4.5 실험 결과

### 4.5.1 보강재 규격

먼저 보강재의 적정규격 선정을 위해 일반강관과 대구경 강관에 따른 슛크리트 잔류응력을 비교 검토하였다.

스utsch리트에 전달되는 잔류응력은 대구경 강관의 경우가 일반강관의 경우보다 약 62%정도 감소하는 것으로 나타났다으며, 이를 통해 대구경 강관의 보강효과를 확인하였다(그림 14).

### 4.5.2 보강재 적정 간격

대구경 강관(직경 114mm)보강간격을 400mm, 500mm, 600mm로 변화하면서 실험한 경우 그림 15에 나타나듯이 슛크리트에 전달되는 잔류응력은 600mm에 비해 500mm의 경우 약 2.7배정도 감소하였으나, 400과 500mm의 경우에는 큰 차이를 보이지 않았다.

실내 모형실험 결과, 저토피 토사지반의 보강재는 일반강관보다는 대구경 강관이 안정적이고, 간격 500mm이하의 경우 보강 효과가 급감되어 강관의 설치 간격은 500mm로 계획하는 것이 효율적으로 분석되었다.

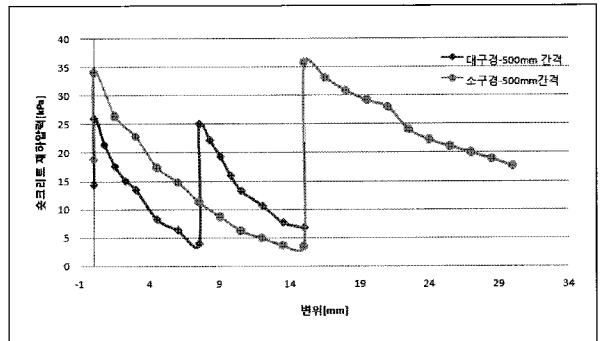


그림 14. 보강재의 규격 검토 결과

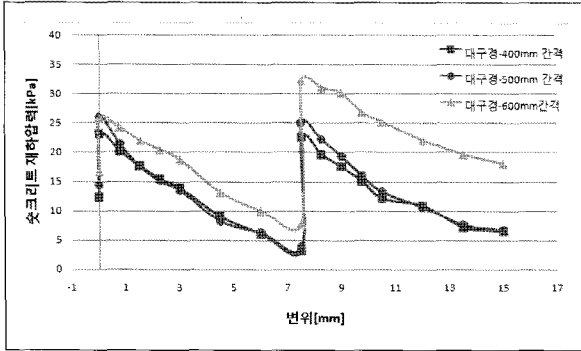


그림 15. 보강재의 분리 간격 검토 결과

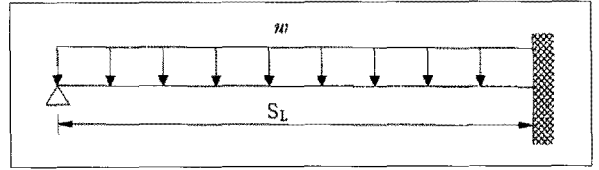


그림 17. 보강재 구조 해석 개요

산정하여 보강재가 상재압력에 견디도록 보강재 단면의 크기를 결정해야 한다. 터널 천단에 작용하는 연직압력  $P_v$ 의 크기는 여러 학자들에 의하여 제시된 방법을 통해 결정할 수 있으며, 보강재 1본당 부담하중은 연직하중과 보강재의 횡방향 간격으로 결정할 수 있다.

$$w = P_v \times \text{보강재 간격 (횡방향 } C.T.C)$$

보강재에 발생하는 부재력 검토는 한쪽 끝이 고정된 보 개념으로 보강재의 분담하중에 따른 구조해석을 실시한다. 그림 17에서 지간의 길이는 보강재의 종방향 설치 간격  $S_L$ 을 의미한다.

보강재를 의미하는 보에 작용하는 최대 휨응력  $\sigma_{max}$ 와 최대 전단응력  $\tau_{max}$ 은 아래 식과 같이 산정한 후, 보강재의 허용응력을 초과하지 않도록 보강재 단면을 결정한다.

$$\sigma_{max} = \frac{w(S_L)^2}{8Z}, \quad \tau_{max} = \frac{5wS_L}{8A}$$

## 5.2 강관다단그라우팅 설계

앞 절에 제시된 이론을 적용하여 사업구간 지도피 토사 구간(그림 18)에 대한 보강재 설계결과는 다음과 같다.

- ① 보강재 길이 : 12m
- ② 보강재 횡방향 간격 : 500mm  
(모형실험결과 반영)
- ③ 종방향 설치 간격 : 6.0m 적용

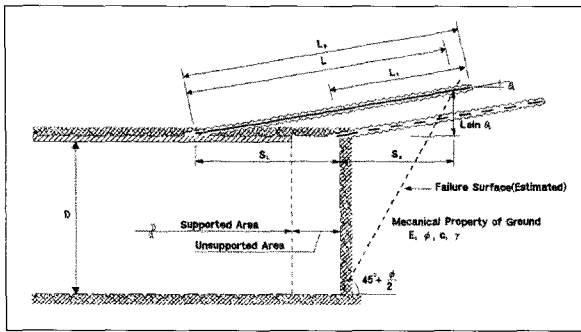


그림 16. 강관보강그라우팅 측면도

## 5. 굴착 및 보강공법

### 5.1 이론적 검토

천단보강은 기본적으로 기설치된 보강재가 굴진면 전방을 지지하는 범위 내에서 다음 보강재가 설치되어야 한다. 즉 그림 16에서와 같이 굴진면의 전단파괴 추정선은 항상 지반층의 보강재 선단 이내에 위치하여야 하며, 이를 만족할 수 있도록 보강재 길이, 종방향 간격( $S_L$ )을 결정하여 충분한 중첩효과를 발휘 할 수 있도록 하여야 한다.

$$S_L < L_p \cos \theta_L - (D + L_p \sin \theta_L) \tan \left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

또한 굴착으로 인해 터널 천단에 작용하는 연직압력을

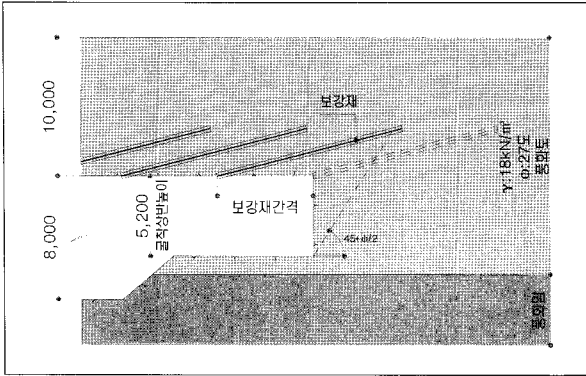


그림 18. 저토피 토사 터널 보강 개요

표 2. 보강재 단면 설계 결과

구분	발생응력 (MPa)	허용응력 (MPa)	판정	
φ60.5 t=4	인장	486	140	N.G
	전단	67	80	O.K
φ113.4 t=4.5	인장	59	140	O.K
	전단	14	80	O.K

$$S_L < L_p \cos \theta_L - (D + L_p \sin \theta_L) \tan \left(45 - \frac{\Phi}{2}\right)$$

$$S_L < 6.5m(L_p=12m, D=5.2m, \theta_L=15^\circ, \Phi=27^\circ)$$

④ 터널 천단에 작용하는 연직압력  
 $= 18kN/m^3 \times 10m$ (상부전토압하중)

표 2는 보강재 단면 설계 결과로 일반강관(φ60.5)의 경우 휨인장응력이 허용응력 이상으로 검토되어 허용응력을 만족하는 대구경강관(φ113.4)으로 천단보강을 계획하였다.

### 5.3 토사터널 6단계 보강대책

본 사업구간의 저토피 토사구간 터널 통과 시에는 앞 절의 연구결과를 토대로 대구경 강관다단그라우팅(2열)

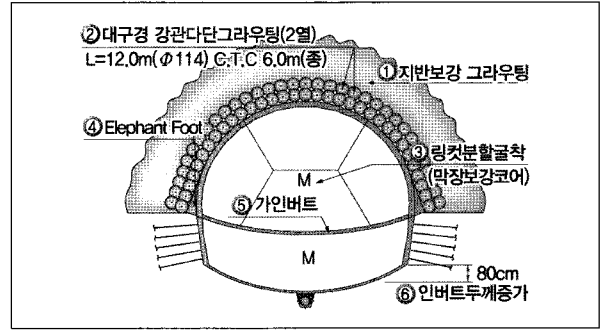


그림 19. 토사터널 6단계 보강대책

등 총 6단계 보강대책을 수립하였다.

강관다단그라우팅의 상세설계는 이론적 검토와 더불어 모형토조실험 결과를 반영하여 대구경 강관을 횡간격 500mm로 보강하였고, 종방향 간격은 2열 보강 효과를 발휘할 수 있도록 6.0m로 계획하였다. 이는 앞 절에서 조사된 유사 조건에서의 저토피 토사터널에 적용된 설계 및 시공사례와 유사한 결과를 보인다.

또한 토사지반의 강도 증가와 집중호우 발생시 차수를 목적으로 지반보강 그라우팅을 보강 하였고, 하부 지반조건이 불량한 것을 고려하여 가인버트 설치와 링컷분할굴착을 계획하여 지반이완을 최소화 하였다.

하부 지반이 토사인 경우 강지보재에 전달된 하중을 지지하기 어려운 점을 감안하여 Elephant Foot 시공을 통해 상부하중에 충분한 지지력을 확보하였으며, 안정적인 라이닝 구조물 형성을 위해 하부 인버트 두께를 80cm로 계획하였다.

## 6. 안정성 검토(수치예석)

### 6.1 안정성 검토 개요

저토피 토사터널 통과구간에 대한 안정성 확인을 위해 유한차분법(FDM) 해석 프로그램인 FLAC 2D (Ver. 4.0)



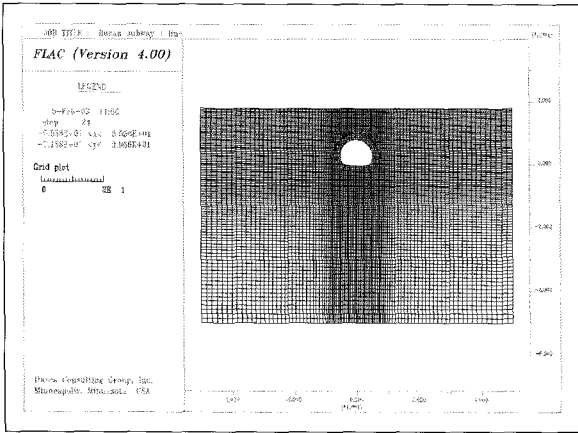


그림 20. 해석 모델링

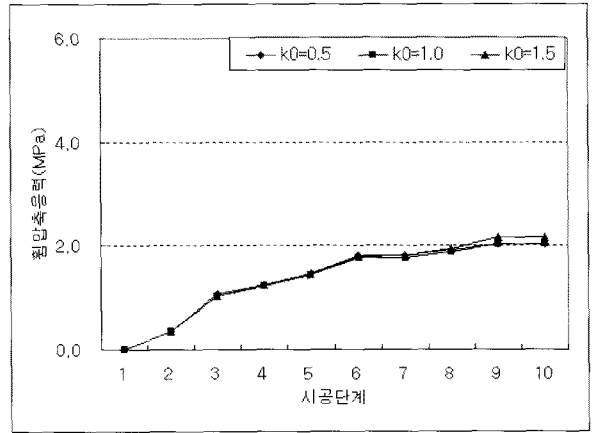


그림 22. 숏크리트 휨압축응력 발생 경향

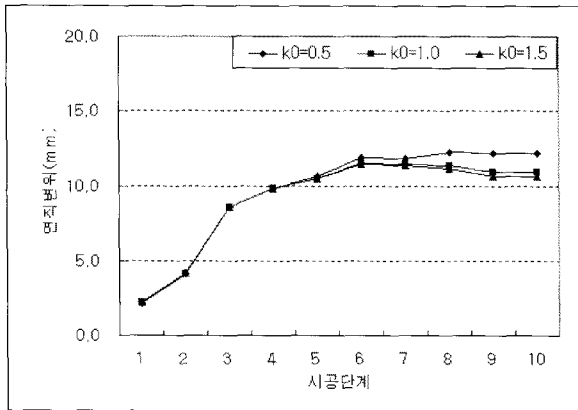


그림 21. 천단침하 발생 경향

고 이를 감안하여 축압계수 0.5, 1.0, 1.5에 대한 수치해석을 수행하였다.

터널 천단침하는 축압계수 0.5일 경우 최대 12.21mm, 내공변위는 축압계수 1.5에서 최대 4.42mm로 축압계수 증가에 따라 내공변위가 증가하지만 저토피 토사지반 특성상 천단침하가 크게 나타났다.

주요지보재인 숏크리트 휨압축응력은 최대 2.16MPa (<8.4MPa)로서 대구경관 및 천단보강으로 터널 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

를 이용하여 전산해석을 수행하고 천단, 내공변위 발생 경향 및 지보재 응력을 분석하였다.

안정성 검토대상 지층구성은 그림 18과 같이 토피고 10m이고, 터널 통과구간 대부분이 풍화토로서 대구경 강관 등 6단계 보강대책을 수립한 구간으로 선정하였다.

## 6.2 안정성 검토 결과

저토피 토사구간으로 축압계수는 크지 않을 것으로 판단되나, 과업구간의 축압계수분포는 1.0~1.5로 조사되었

## 7. 시공 중 안전 대책

설계에 적용된 지보 및 보강공법은 시공 전 확인 조사를 통해 재평가하는 것이 바람직하다. 이를 위해 토사로 예상되는 전방 지층확인을 위해 그림 23과 같이 선진수평 보링을 계획하여 지반 및 지하수 상태의 재평가를 통해 설계된 지보 및 보강공법을 변경할 수 있도록 계획하였다.

또한 시공 중, 지보 및 보강공법의 적정성 및 안전사고 발생 가능성을 확인하기 위한 적절한 계측을 수립할 필요가 있다. 본 사업에서는 도심지 저토피 구간임을 감안하

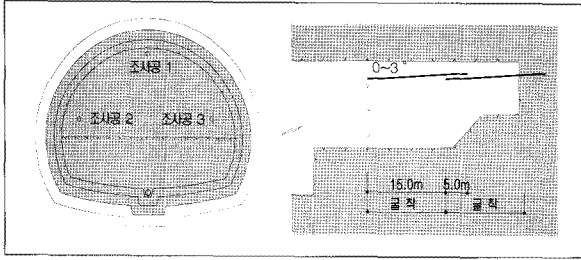


그림 23. 전방지층 확인 방안

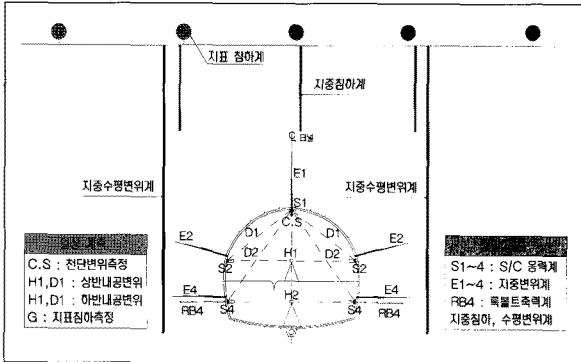


그림 24. 시공 중 계측 계획도

여 지표침하를 일상계측(A계측) 항목으로 추가 선정하여 사전에 침하계를 설치하고 시공 중 지표침하량 분석을 통해 안전사고를 미연에 방지 하고자 하였다.

또한 수치해석 결과를 1차 관리기준치로 정하고 해당 단면에 정밀계측(B계측)을 수행하여 지보 및 보강단면의 적정성을 확인할 수 있도록 계획하였다(그림 24).

## 8. 맺음말

본 연구는 도심지 저토피 토사구간을 통과하는 터널의 보강방안 수립을 위해 실내모형실험을 수행하였다.

- (1) 실내 실험을 통해 측정된 슛크리트에 작용하는 잔류 응력은 대구경 강관의 경우 보강간격 400, 500, 600mm에 따라 각각 약 6.48, 6.76, 18.09kPa로 나타났다. 보강간격이 400과 500mm에서는 잔류응력이 유사하나 600mm일 때, 약 2.7배정도 증는 것으로 보아 적절한 보강 간격은 500mm로 판단된다.
- (2) 같은 보강간격(500mm)에서 일반 강관과 대구경 강관의 잔류응력은 17.69kPa, 6.76kPa로서 대구경 강관의 경우 약 62% 정도 감소하였다. 이는 일반 강관이 보강간격을 400mm(11.91kPa)로 했을 경우보다 더 작은 결과로서 보강간격을 고려했을 때, 대구경 강관 그라우팅 공법이 보다 경제적인 것으로 판단된다.
- (3) 실내모형실험 결과를 토대로 대구경강관그라우팅(φ114)을 500mm 간격으로 보강 계획을 수립하였으며, 부산지하철 1호선 연장(다대구간) 현장조건을 반영한 검토 결과 종방향 간격 6m로 천단부 보강계획을 수립하였다.
- (4) 향후 현장 계측 결과와 종합 분석을 통해 모형실험 결과 및 설계의 적정성을 검증할 필요가 있을 것으로 판단된다.