

# 역해석 기법에 의한 연약지반 NATM터널 굴착사례 연구

## A Case Study on the NATM Tunnel Excavation under the Soft Soil Ground Condition by Back Analysis Method



조 현\*<sup>1</sup>  
JO, Hyun



박종인\*<sup>2</sup>  
PARK, Jong-In



이기환\*<sup>3</sup>  
LEE, Ki-Hwan

### Abstract

For the construction of NATM tunnel, it is required a design based on the accurate soil condition from soil investigation. However, in practice, it often designs tunnels without fully understanding the condition. Especially, when soft soil comes up, or ground water breaks out suddenly on the construction, it needs to secure the stability of tunnel by appropriate reinforcing construction according to the results of measurements on field superlatively reflecting the faced situation. This report reviews the most suitable stability of tunnel in the construction of soft soil of tunnel by numerical analysis using FDM after re-evaluated the soil properties through back analysis using the results of measurements to simulate abruptly occurred deformation. And applying steel pipe grouting row by row on the wall and the low part of tunnel and also applying the construction method of temporary invert after excavation of the upper part of tunnel, the excavation of soft soil tunnel secured the structural stability of tunnel has been completed.

**Keywords** : NATM, Railway tunnel, soft Soil ground, Feed back method, Computer simulation, Ground reinforcement

\*<sup>1</sup> 정회원, 쌍용건설(주) 토목기술부 부장

\*<sup>2</sup> 정회원, 쌍용건설(주) 토목본부 이사

\*<sup>3</sup> 쌍용건설(주) 토목기술부 과장

## 요 지

NATM 터널을 시공함에 있어서 정확한 지반조사 결과에 의한 설계가 요구되나, 현실적으로 완벽하게 지반조건을 파악하지 못하고 설계가 진행되는 경우가 많다. 특히 연약지반 또는 지하수의 유입이 급격히 진행되는 등의 열악한 지반과 조우하였을 때에는 현황을 최적으로 반영할 수 있는 계측결과에 기준한 적절한 보강공사 등의 터널의 안정성 확보가 요구된다. 본 보고서에서는 토사 터널 구간의 시공에 있어서, 발생한 변위량을 재현할 수 있도록 터널 계측결과를 이용한 역해석(back analysis)을 통해 지반의 공학적 제상수를 재평가 한 후, 유한차분법을 이용한 수치해석을 이용하여 최적의 터널 안정성을 검토하였다. 또한 수치해석 결과 및 시공 현황 등을 고려하여 터널 측벽 및 하반부에 강관 일단식 그라우팅과 상반 굴착 후에 가인버트 공법 등을 적용하여 터널의 역학적 안정성을 확보한 토사구간의 굴착을 완료하였다.

**주요어 :** NATM, 철도터널, 연약지반, 역해석, 수치해석, 지반보강

## 1. 개요

경전선 효천구 송정리간 철도이설 및 개량공사 중, 화방터널 NATM 시점부 토사구간 굴착 시 계곡부에 의한 지하수 유입에 따른 지반강도 손실과 이로 인한 지반 자립성 및 지지력 저하 등으로 터널 천단 침하 및 내공변위가 상당량 발생되었고, 막장의 밀림현상이 발생하는 등 붕괴의 위험성이 있었다. 이에 따라 계측결과를 기준으로 한 직접법에 의한 역해석을 실시하여 실제 지반의 역학적 물성을 산정한 후 수치해석에 의한 터널의 안정성을 파악하였다. 또한 수치해석 결과 및 시공 현황을 고려하여 기 시공된 터널의 안정성 검토 및 보강공사를 수행, 안전하게 토사구간을 굴진할 수 있었으며 장기적인 안정성을 확보할 수 있었다.

## 2. 지층 및 시공현황

### 2.1 지층 현황

터널 상부 지층은 점토질 실트층이고 그 하부는 20M 까지 점토섞인 실트질 모래층으로서 원지반에서는 치밀한 구조를 보이고 있다. 그러나 굴착으로 응력이 해방되

고 지하수 유입 등으로 인하여 포화되면 급격히 강도를 잃게 되는 지질적 특성으로서 터널 자립에 가장 취약한 지층이다. 지하수위는 S.L.부근에 분포하고 있다.

### 2.2 시공 현황

그림 1에 터널 보강 단면도 및 정면도를 나타내었고, 터널의 하반굴착 시 천단변위 및 내공변위가 급격히 발생하고 막장의 밀림현상 등이 확인된 시점에서의 시공현황은 다음과 같다.

- 터널굴착 : 상반-29.0M, 하반-17.4M(굴진장: 0.6M)
- 굴착공법 : 상반-Ring Cut & Mini Bench 공법 (Bench 길이 = 8 ~ 12 m), 하반- 좌우 분할굴착
- Steel Rib : 125×125×6.5×9
- Shotcrete : T = 20cm (1차: 5 cm, 2차: 10 cm, 3차: 5 cm)
- Wire Mesh : 1, 2차(5?100?100), Rock Bolt:  $\phi$  25mm, L=3.0m, C.T.C.= 0.6 m
- 보조공법 : 지상보강-시멘트 현탁액 그라우팅, 주입 폭 = 3.5 m, 갱내보강-강관 다단 그라우팅, 주입폭 = 2.5 m

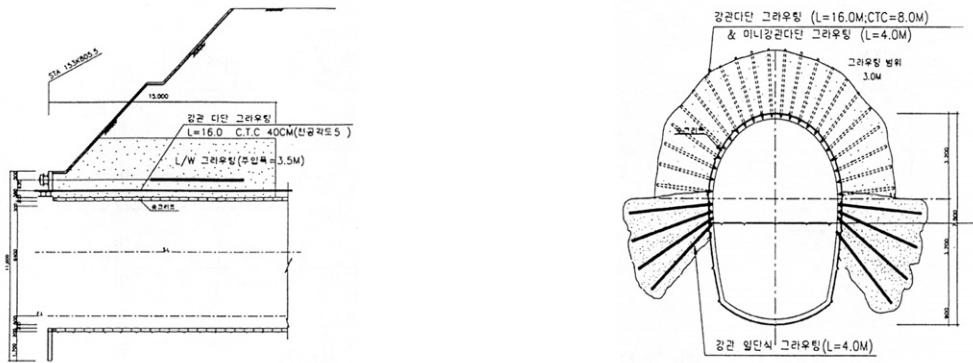


그림 1. 터널 보강 단면도 및 정면도

### 3. 계측결과 분석

본 현장의 STA. 153+810~820 지점에서의 천단침하 및 내공변위의 발생 현황 및 원인 등은 다음과 같다. 그림 2에 STA.153+810 에서의 천단침하 및 내공변위를, 그림 3에 STA.153+820 지점에서의 천단침하 및 내공변위를 나타내었다.

#### 3.1 1차 변위 (동구 153K 810지점)

계측기간 6일간 천단침하량은  $\Delta C = 24$  mm,  $C_{max} = 42$  mm 이었고, 내공변위량은  $\Delta W = 7.6$  mm,  $W_{max} = -10.1$  mm 발생하였다. 이 기간동안의 터널 작업은 갱문 입구 하반굴착 및 invert 폐합공사가 진행 중이었다. 일반적으로 토사 터널에서 하반을 굴착하게 되면 터널의 직경은 상반 굴착시 직경의 2배에 이르게 되어 이완중고 가 커짐으로 인해 터널 변위는 증대된다. 또한 상·하반 Slope가 1:0.5로 시공됨에 따라 노출된 상반부분의 지지층이 없어짐으로 막장의 밀림 현상이 발생하였고 이로 인한 천단 침하 및 내공 변위가 하반 폐합 전에 크게 발생하였다. 그리고 하반 작업시 측벽부의 지하수 유입 및 지반 자립도의 부족으로 여굴이 상당량 발생되었고, invert부의 지층이 상당히 연화되어 지반 지지력 저하 및 측벽부

이완 등으로 내공 변위 및 천단 침하가 크게 발생된 것으로 사료된다.

#### 3.2 2차 변위 (동구 153K 820지점)

1차변위 발생 35일 후, 계측기간 7일간의 천단침하량은  $\Delta C = 20$  mm,  $C_{max} = 20$  mm, 내공변위량은  $\Delta W = 17.32$  mm,  $W_{max} = -31.01$  mm 발생하였다. 2차변위의 발생 원인은 1차변위의 경우와 동일한 것으로 판단된다.

#### 3.3 3차 변위 (동구 153K 820지점)

2차변위 발생직 후 4일간의 계측기간 동안 천단침하는 수렴하였으나, 내공변위는  $\Delta W = 76$  mm,  $W_{max} = -107$  mm 발생하였다. 이 기간 동안 상반8.4 m 구간에 측벽 보강 강관 일단식 그라우팅 112공 공사를 실시하였고 공사 중 내공변위는 상당량 발생되었다. 그러나 천단 침하는 수렴된 상태인점을 고려할 때, 단기간의 터널 측벽 천공 및 주입 작업으로 측벽 교란에 의한 영향과 주입시 back pressure 에 의해 터널 측벽이 막장 안으로 상당량 밀린 상태로 판단되었다. 그리고 shotcrete의 햄머 측정결과 3차 shotcrete 부가 부풀은 상태로 이 부분에 내공변위 핀이 설치되어 있어 이 또한 내공변위 증가량에 영향이 있었다. 그 후 주입재가 고결되어 전체적으로 변위가 수렴된 상태이었다.

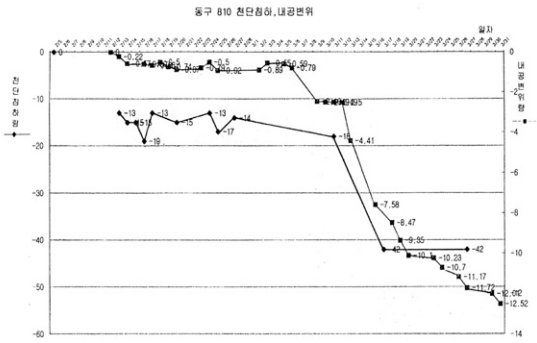


그림 2. STA.153+810 지점에서의 천단침하 및 내공변위

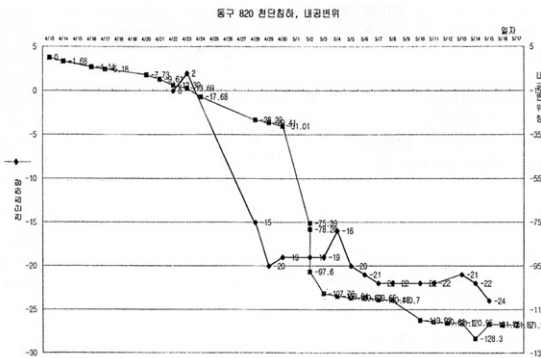


그림 3. STA.153+820 지점에서의 천단침하 및 내공변위

## 4. 수치해석에 의한 역해석

최근 지하구조물의 안정성을 파악하기 위하여 경험적, 해석적 여러방법(Bieniawski,1984)중 유한요소법에 의한 해석이 많이 이용되고 있으나, 현장 실측치와 계산치와는 많은 오차를 나타낸다. 한편, 변위나 응력 등을 시공 현장에서 계측한 경우, 이를 입력치로 하여 암반의 탄성계수 등의 역학적 물성을 구하는 방법을 역해석(back analysis)이라 한다(이정인, 1991). 역해석 기법으로는 해석적 방법과 수치해석적 방법을 이용한 직접법(direct calibration approach)과 역순법(inverse approach)이

많이 연구되어 왔고, 그 외에도 통계적인 방법인 Bayesian method 와 Kalman Filter method가 연구되고 있다.

직접법은 시산적 방법을 이용하는 것으로, 입력자료를 변경하며 해석을 반복하여 해석결과와 계측값과의 오차가 최소화될 때까지 수행하는 방법이다. 따라서 직접법은 적용성이 광범위하며 비선형 문제에도 적용이 가능하나, 반복계산에 의해 최적치를 구해야 하므로 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 역순법은 일반적인 응력해석 방법을 역으로, 해석 시 사용된 입력자료들이 미지수가 되고 변위 및 응력 등을 입력자료로 이용하는 방법이다. 따라서, 구성방정식을 역으로 하여 계산 프로그램을 다시 만들어야 하므로 초기 투자 비용이 많이 소요되나 프로그램이 완성되면 계산시간을 절약할 수 있다. 그러나, 이론해가 선형문제(탄성해석)에만 적용이 가능한 제한성을 가지고 있다.

본 현장의 경우 연약지반에 터널에 터널을 굴착하므로 되므로 발생 변위 및 응력은 대부분 소성 흐름(plastic flow) 중에 발생된 것으로 추측되어 비선형 문제에도 적용이 가능한 직접법으로 역해석을 시도하였다.

### 4.1 역해석을 위한 기준값 선정

터널 역해석 시 가장 중요한 관건은 정확한 계측결과와 수집이라고 할 수 있다. 따라서, 역해석 시 초기 기준값 선정은 계측항목 중 비교적 신뢰할 수 있으리라 판단되는 변위값으로 하였다.

본 현장의 경우 변위 계측은 5월 3일 현재 STA.153K810 지점과 STA.153K820 지점에서 진행되고 있다. 그러나 STA.153K820 지점의 경우 아직 하반 굴착이 계측점까지 진행되지 않았으며, 하반부 Grouting 작업 시 주입압에 의한 내공핀의 이상 거동이 예견되었다. 따라서, 현재 하반굴착이 +7.6m 진행되었고, 비교적 양호한 계측치로 예상되는 STA.153K810 지점의 계측치를 기준값으로 이용하였다. 2차원 수치 해석시 오차를 최소화하기 위하여

총 6단계의 굴착단계 중 계측치의 변화폭이 가장 큰 4단계(하반 굴착이 진행되는 단계)의 변위값을 지반 물성치 산정을 위한 초기값으로 이용하였다.

### 4.2 해석영역 및 방법

본 검토서에서는 하중분담율의 경우 장석부(1998)가 제시한 회귀분석식을 사용하여, 시공순서에 따라 표1과 같이 하중분담율을 고려하여 해석단계를 선정하였다. 또한 본 해석에서 하중조건은 매 굴착단계에서 지보재 설치 시 까지를 100% 재하한 후, 굴착부 주변의 구조체가 안정을 찾은 후부터 다시 하중이 재하되는 경우로 하였으며, 2차원 평면변형율을 가정하여 해석을 실시하였다. 해석단면을 그림 4, 그라우팅 보강영역을 그림 5에 나타내었다.

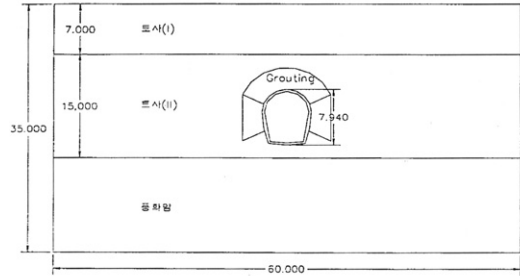


그림 4. 수치해석 단면

### 4.3 입력 지반물성치 산정

역해석을 위한 초기값으로 산정한 굴착 4단계의 변위값 (내공변위 11 mm, 천단침하 35 mm)을 재현하기 위해, 입력 물성치를 조정하며 반복계산을 수행하였다. 일반적으로 역순법에 의한 해석시 입력 물성치(단위중량,

표 1. 해석단계 및 하중분배율

해석단계	STEP	시공단계	하중분배율(%)
단계 1 (상반굴착)	1	Zone A Grouting + 상반 Excavation	31
	2	Soft Shotcrete + Rockbolt	47
	3	Hard Shotcrete	22
단계 2 (하반굴착)	4	하반 Excavation	31
	5	Zone B Grouting + Soft S/c + R/B	47
	6	Hard Shotcrete	22

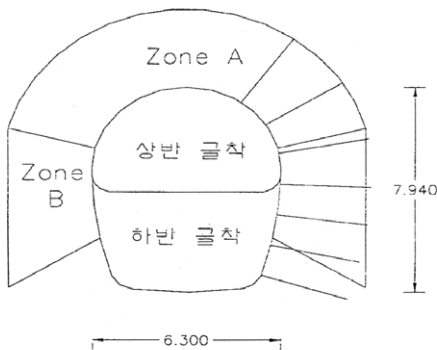


그림 5. 수치해석 시 그라우팅 보강 영역

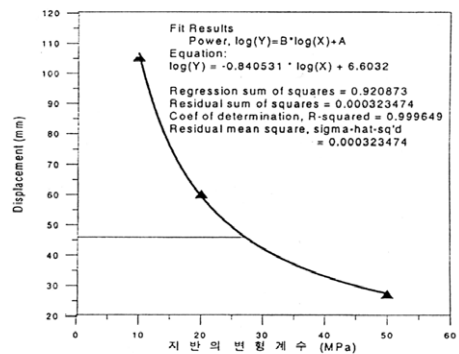


그림 6. 반복계산에 의한 탄성계수 산정

총 6단계의 굴착단계 중 계측치의 변화폭이 가장 큰 4단계(하반 굴착이 진행되는 단계)의 변위값을 지반 물성치 산정을 위한 초기값으로 이용하였다.

### 4.2 해석영역 및 방법

본 검토서에서는 하중분담율의 경우 장석부(1998)가 제시한 회귀분석식을 사용하여, 시공순서에 따라 표1과 같이 하중분담율을 고려하여 해석단계를 선정하였다. 또한 본 해석에서 하중조건은 매 굴착단계에서 지보재 설치 시 까지를 100% 재하한 후, 굴착부 주변의 구조체가 안정을 찾은 후부터 다시 하중이 재하되는 경우로 하였으며, 2차원 평면변형율을 가정하여 해석을 실시하였다. 해석단면을 그림 4, 그라우팅 보강영역을 그림 5에 나타내었다.

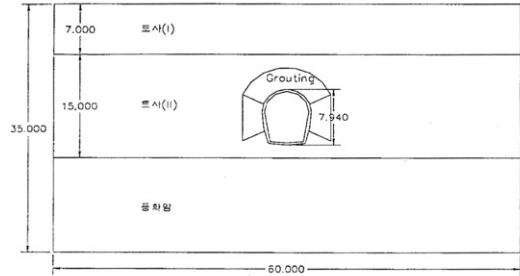


그림 4. 수치해석 단면

### 4.3 입력 지반물성치 산정

역해석을 위한 초기값으로 산정한 굴착 4단계의 변위값 (내공변위 11 mm, 천단침하 35 mm)을 재현하기 위해, 입력 물성치를 조정하며 반복계산을 수행하였다. 일반적으로 역순법에 의한 해석시 입력 물성치(단위중량,

표 1. 해석단계 및 하중분배율

해석단계	STEP	시공단계	하중분배율(%)
단계 1 (상반굴착)	1	Zone A Grouting + 상반 Excavation	31
	2	Soft Shotcrete + Rockbolt	47
	3	Hard Shotcrete	22
단계 2 (하반굴착)	4	하반 Excavation	31
	5	Zone B Grouting + Soft S/c + R/B	47
	6	Hard Shotcrete	22

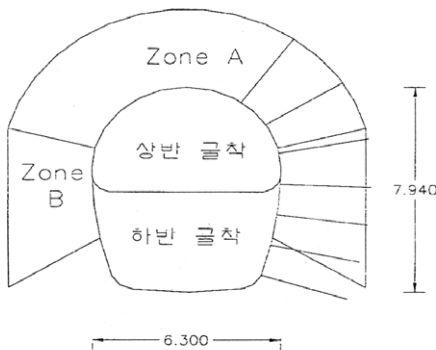


그림 5. 수치해석 시 그라우팅 보강 영역

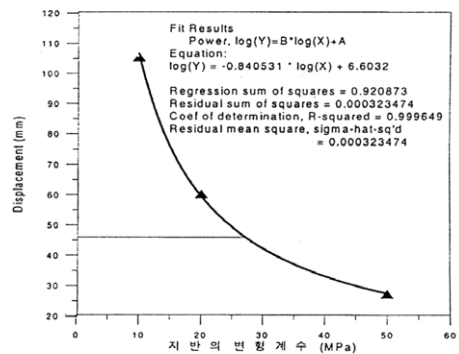


그림 6. 반복계산에 의한 탄성계수 산정



표 2. 역해석을 위한 입력 지반물성치

물성	층구분	토사(I)	토사(II)	풍화암	Grouting
심도 (m)		0.0 ~ GL-7.0	GL-7.0 ~ -22.0	GL-22이하	
단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )		1,700	1,800	2,100	1,900
탄성계수 (GPa)		13.57	27.14	135.7	54.28
포아송비		0.35	0.35	0.30	0.35
내부마찰각(degree)		20	30	35	32
점착강도 (MPa)		10	20	100	80x10 <sup>3</sup>
인장강도 (MPa)		5	10	50	40

탄성계수, 포아송비, 내부마찰각, 점착력, 측압계수 등) 중 변수값으로 탄성계수와 측압계수를 사용하나, 이는 지반을 탄성해석으로만 재현하는데 따른 측압계수의 왜곡

된 적용으로 볼 수 있다. 이 경우 결정된 입력물성치로 역 해석을 시도할 경우, 특히 소성변위가 다량 발생하는 토사 터널에서는 지보재의 거동을 왜곡되게 해석할 수 있다.

따라서 본 보고서에서는 직접법에 의한 입력물성치 산정을 시도하였으므로, 반복계산을 통해 합리적이라 판단되는 거동양상을 보여주는 강도정수를 먼저 결정하였다. 그 후 변위의 절대치에 가장 큰 입력변수라 알려진 탄성계수를 터널이 굴착된 주변 지반인 토사(II)층을 대상으로 10 MPa, 20 MPa, 50 MPa로 변화시키며 4단계까지 해석을 수행한 후 그림 6과 같은 회귀분석에 의해 입력 탄성계수를 최종 결정하였다.

이와 같은 반복수행의 결과로 얻은 수치해석에 의한 역

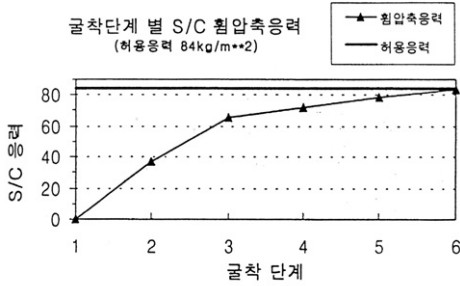


그림 7. 굴착단계별 Shotcrete의 최대 침입속응력

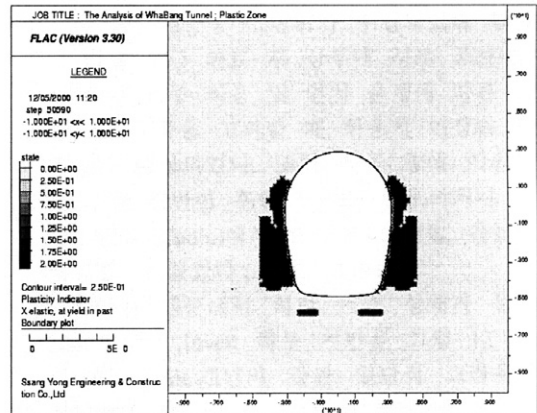
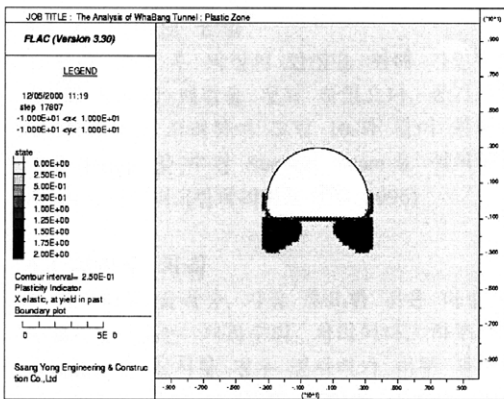


그림 8. 상반 및 하반 굴착 완료시의 이완영역대

해석 시 입력 지반 물성치는 다음 표2와 같으며, 이 경우 굴착 4단계까지의 수치해석 결과와 계측결과간의 오차는 1.13%로 계산되었다.

#### 4.4 해석결과

직접법에 의해 지반의 공학적 제상수를 도출한 후 수치 해석을 수행하여 터널의 역학적 안정성을 검토한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 굴착과 지보가 완료된 시점(굴착 6단계)에서 예상되는 변위는 천단침하 37.55mm, 내공변위 32.82mm 이다. 또한 대부분의 변위는 하반굴착 시에 발생되며, 총 변위의 약 73%에 해당된다.
- (2) Shotcrete의 휨압축응력 최대 83.24 kg/cm<sup>2</sup>, 전단응력 3.00 kg/cm<sup>2</sup>, 록 볼트 축력 3.08 ton으로 모두 허용응력 내에 분포하였다. 그러나, 이는 하반굴착이 진행되는 굴착 4단계에서 다량의 소성영역대가 형성되므로 지보재에 상대적으로 적은 응력이 발생하였으며, 그림 7과 같이 하반굴착 완료시 Shotcrete 휨 압축응력의 경우 허용응력(84kg/cm<sup>2</sup>)의 99.1 %인 83.24 kg/cm<sup>2</sup>까지 예상되므로, 하반보강 작업 및 하반굴착시 각별한 주의가 요망된다.
- (3) 파괴기준으로서 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 가정한 이완영역대는 그림 8과 같이 상반 및 하반 굴착완료 시점에서의 분포를 나타내었다. 그림 8로부터 이완영역대가 상반 굴착시는 우각부에 한정적으로 나타나지만, 하반굴착이 진행되면서 터널 측벽부에 2.0 m넓이로 넓게 분포하게 된다. 그러나 이는 하반굴착 단계(step 4)에서 발생한 것으로, 그림 5의 zone B에 추가 그라우팅 및 shotcrete 등의 보강재 타설 후에는 이완 영역대가 확대되지 않는 것으로 보아 지보 설치 후 터널은 역학적으로 안정화를 유지할 것으로 예상된다.

## 5. 시공시 문제점 및 대책

### 5.1 측벽 여굴 방지 대책

계측 결과 분석에서 알 수 있듯이, 당 현장이 터널 굴착 과정 중 주로 하반 굴착시 천단 및 내공 변위량이 크게 발생하였고, 이는 하반 굴착 시 지하수 유입에 따른 지반 연화와 측벽 여굴의 과다발생에 기인 하는 것으로 판단된다. 당초 하반 보강을 위하여 상반 굴착 후 측벽 강관 일단식 그라우팅을 실시하였으나, 시공각도로 인하여 지반 개량이 되지 않는 부분에 계속적으로 여굴이 발생하여 이에 대한 보강이 필요할 것으로 판단되었다.

따라서 이 부분에 하반 굴착 전 Fore poling 개념의 강관 일단식 보강 그라우팅을 그림 9와 같이 실시하여 측벽 여굴을 방지, 안전한 시공이 되도록 하였다.

### 5.2 Mini Bench 공법

당초 설계시 막장의 조기폐합을 목적으로 Mini Bench(L = 8~12 m)공법으로 굴착 하였으나, 하반 굴착 시 지하수의 유입에 따른 지반 연화로 Face Shotcrete를 실시에도 불구하고 막장의 밀림현상이 발생하였으며, 따라서 긴급히 버력으로 막장을 폐쇄하였다. 이와 같은 시공 현황을 고려하여 변위 수렴 후 재 굴착시 Bench 길이를 상반 20 m굴착, 하반 8 m 굴착의 순으로 조정하여 수행하였다.

### 5.3 가 인버트 공법

상반 굴착 후 막장의 안정을 위해 가인버트에 의한 막장 폐합을 계획 하였으나, 공기지연 및 시공성을 고려하여 그림 10과 같이 침하방지용 Beam 및 수평 Support Beam을 설치하면서 시공하였다. (한국지반공학회, 1996)



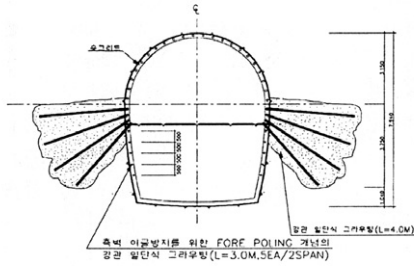


그림 9. 측벽 여굴방지를 위한 강관 일단식 그라우팅

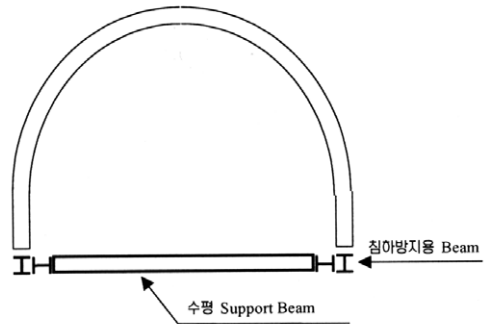


그림 10. H-BEAM에 의한 가인버트

### 5.4 지하수 처리

토사터널 굴착중, 가장 중요한 것은 터널 내부로 들어오는 지하수의 처리이다. 하부까지 Grouting을 실시할 경우 공사비가 너무 과다하기 때문에 그림 10과 같이 터널 내에서 10m 간격으로 집수정을 설치 지하수를 외부로 처리하여 추후 하반 공사시 지하수로 인한 지반 연화현상을 상당히 방지하였다.

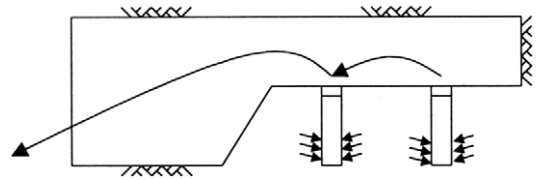


그림 11. 지하수 처리 방안

## 6. 터널 장기 안정 문제

### 6.1 공사완료 후 장기 침하

일반적으로 NATM 터널에서 인버트 굴착 후 링폐합이 이루어지면 내공 변위는 일정한 값에 수렴되고 안정된 상태에 이르게 된다. 이러한 점을 고려하여 Mini Bench시공으로 조기 폐합이 되도록 설계·시공 되었다. 그러나 시공 과정에서 나타난 문제점 중, 인버트 하부 지반은 지반개량이 되지 않은 상태로서 굴착시의 응력해방 및 하부 지반을 통한 지하수의 흐름으로 인해 곤죽처럼 상당히 연화되었고, 하반 막장면의 밀림이 일부 발생하는 등 시공에 어려움이 많았다.

따라서 시공중에 변위가 수렴되었다 할지라도 터널 시

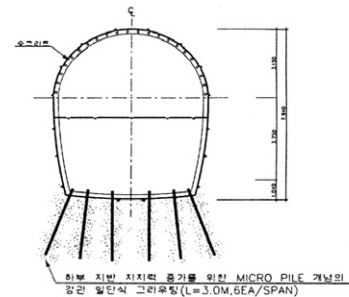


그림 12. 터널 하반부 지지력 보강 방안

공 완료 후 상부에 성토 공사에 따른 추가 하중 작용 및 열차 운행에 따른 진동과 교통하중을 고려할 때 허용치 이상의 부등 침하가 예상되었다. 또한 시공 중에 이완되었던 주변 지반이 후속 변형을 일으키거나 터널 내 (Lining Con'c)에서 변형이 발생할 가능성도 배제할 수 없었다.(조충봉, 1994)

따라서 갯문에서 하반 지층 상태가 불량한 30m정도의

Invert 하부 지반을 그림 12와 같이 Micro Pile개념의 강관 일단식 그라우팅을 실시하여 장기적인 안정성을 확보하였다.

## 6.2 라이닝 보강

회방터널 시점(동구)부는 토사구간으로 지반이 상당히 이완된 상태였고 성토공사가 추가로 이루어져야 하며 열차운행에 따른 진동의 영향으로 터널 상부 토피는 라이닝 구조체에 직접적으로 하중으로 작용하게 된다. 앞 절에서와 같이 터널 인버트 하부지반을 개량, 지내력을 확보한다 하여도 라이닝 구조체에 작용하는 하중으로 발생하는 응력이 허용응력 이내여야 한다.

일반적으로 라이닝 검토시 (1) 1차 지보를 영구 지보재로 간주하여 모든 지반하중을 1차 지보가 지탱하도록 하고 내부 라이닝은 자중 외에는 외력을 받지 않는 구조물로 설계하는 방식과, (2) 1차 지보재는 시공중의 품질과 주변환경 등 여러 가지 요인들의 영향으로 인해 내구성이 감소하고 굴착주변 지반의 내력이 감소하여 1차 지보에 의해 지탱되었던 하중이 궁극적으로 내부 라이닝으로 전이된다는 점을 감안하여 구조물로 설계하는 방식이 있다.

본 현장의 경우 터널의 영구적인 안정성을 확보하기 위하여, 최근의 설계 추세인 후자의 개념(철근보강)으로 검토하였으며, 또한 잔류 수압로 0.5H를 고려하였고, 성토공를 이완고로 검토하여 충분한 안정성을 확보하였다.

## 6.3 계 측

회방터널 동구 성토공사에 의한 추가하중 작용 및 시점부 토사 터널구간 약 50m에 대한 계측수행방법을 제시하여 시공 중 및 시공 후 열차운행에 따른 진동과 교통하중 등에 의해 발생 가능한 내부변형과 구조물의 거동파악을 신속, 정확하게 하여 효과적으로 대응할 수 있는 안전관리System을 구축하였다.

### (1) 터널 시공중 안정성 평가

- 터널 굴진시 막장관찰 자료를 활용하여 지질의 분포 및 변화형태를 예측하고 패턴별로 적용가능한 보조공법을 신속히 검토, 적용하여 터널의 안정성을 확보하였다.

- 사면 경사계 자료 및 갱구부의 터널 계측자료로 절취 사면의 안정성을 확보하며, 사면활동을 억제할 수 있는 보조공법을 채택, 적용하여 터널 갱구부의 안정성을 확보하였다.

당초의 일상 계측 형태는 설계시의 지반조건만을 고려한 계측으로, 지반조건이 설계시 적용한토질과 상이한 경우, 갱구부 및 연약대의 계측계획을 수정하여 위험단면에 대한 추가 보강 계측을 수행하여 터널의 안정을 평가하는 자료로 활용하였다.

### (2) 터널 시공후 안정성 평가

터널이 완공된 후 터널 구조물의 후속변형이 발생하거나 Lining Con'c 내부응력 변화 또는 거동을 신속하고 정확하게 제공 받을 수 있는 관리 System을 구축하여 터널이 장기간 안전하게 유지될 수 있도록 하였다.

## 7. 결 언

NATM 공법의 기본원리는 굴착 후 굴착면 주위에 지보를 적절히 실시함으로써 굴착면 주변의 지반에 지반아치를 형성시켜 터널을 안정시키는 것이다.

어떤 요인에 의해서 굴착면 주변지층에 아치를 형성시키지 못하거나 자립시간 이내에 지보 설치가 불가능한 지반에서는 연약 지반을 인위적으로 보강하거나 추가의 지보재를 설치함으로써 NATM 개념의 적용이 가능한 지반으로 개량한 후 터널을 굴진해야 한다. 그러나 실제로는 적절한 대책 없이 굴착하거나 계측관리를 소홀히 함으로써 붕괴의 위험에 직면하게 되는 경우가 종종 발생한다.

본 현장의 경우 초기 굴착단계부터 자동계측을 수행함으로써 굴착에 따른 터널의 거동을 즉시 판단할 수 있었다. 따라서 신뢰도 높은 계측결과를 기준으로 수치해석에 의한 역해석을 통해 지반의 역학적 물성을 재평가 하여 터널 안정성을 검토 하였다. 또한 수치해석 결과 및 시공 현황 등의 굴착 중 나타난 터널의 거동 및 지반상황에 따라 적절히 대처하고, 지반보강및 설계변경을 수행하여 시공함으로써 연약 구간을 안정되게 굴착할 수 있었다.

## 참고 문헌

1. 이정인, 김치환 (1991), "현장계측치의 역해석에 의한 지하공동 주위 암반의 응력해석 및 변형거동에 관한 연구", 터널과 지하공간, 제1권, pp. 75-90.
2. 장석부 (1998), "터널 설계조건을 고려한 하중분담율의 정량적 산정에 관한 연구", 한국지반공학회, 제14권, 제5호, pp. 5-15.
3. 조충봉 (1994), 응용토질 기초공학 (상), pp. 137-142.
4. 한국지반공학회 (1996), 지반공학시리즈 터널, pp. 604.
5. Z.T. Bieniawski (1984), Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A.A.Balkema, Rotterdam/Boston.