

풍화토 지반에서 구조물 하부 터널 시공사례

김주화, 김용준, 라윤순, 김선기 (대림산업)

1. 서론

도심지 터널공사는 터널의 안정성뿐만 아니라 터널 주변의 인접 구조물의 안정성을 고려하여 시공되어야 한다. 구조물의 안정성은 지층구조, 응력 및 지하수를 포함한 다양한 지반 조건과 터널 굴착시 발생하는 지반거동에 의해 영향을 받는다. 현재 터널굴착과 지보설계는 주로 특정한 조건들에 대한 경험으로부터 개발되어 있어 굴착대상 지반과 주변 조건을 기존의 몇 개의 일반화된 유형으로 분류하여 적용할 경우 종종 부적절한 사례를 남기기도 한다. 따라서 공학적인 타당성에 근거한 합리적인 시공은 현장여건에 유연하게 대처할 수 있는 현장 설계변경 및 시공방법 개선에 의해 이루어져야 한다.

본 연구에서는 토피고 10m 이내의 천층터널 구간에서 시공중 측정된 측정결과를 기초로 역해석을 수행하면서 시공중인 터널 굴착 및 보강공사에 대한 안정성 확인과 터널변위 예측에 따라 보강공법을 변경하여 시공한 사례를 제시하여 향후 당 현장과 유사한 터널공사시 참고가 되도록 소개하고자 한다.

2. 주변현황 및 지질특성

본 과업구간 중 터널은 양천길과 공항로를 연결하는 백석길 하부에 위치하고 있으며, 정거장과 연결되는 총연장 748m를 폭 12m의 복선터널로 계획되어 있다. 터널의 수직환기구구는 STA. 10K+185m 지점인 대동아파트 1차와 대동아파트 2차 사이 공원부지에 위치하고 있으며, 터널통과 구간은 지층상태와 구조물 특성을 고려하여 대동아파트, 백석길, 사유지 3구간으로 구분하였다. 본 공사에서는 수직 환기구를 시공기간중 토사 반출구 및 작업용으로 임시 활용하고 있으며, 수직구에서는 횡갱을 설치하고 양방향 굴착을 시행하여 공사기간을 단축하였다. 횡갱설치 구간과 대동아파트 구간의 굴착 보강 사례는 터널공학회(2004.9)에 소개된 바가 있다.

본 연구에서 주요 분석대상인 사유지 구간(L=173m)은 풍화토층으로 구성되어 있으며, 지상에 준공된지 20년 정도 지난 노후화된 3-4층 건물이 터널 직상부에 위치하고 있다. 본선 터널이 지나는 지역은 한강 유역 개발이전 능선 계곡부의 하천지역으로 충적층이 깊게 분포하고 있으며, 지표면은 매립층으로 구성되어 있다. 하부지반은 풍화토, 풍화암, 연암으로 구성되어 있으며, 기반암은 흑운모, 호상 편마암이다. 풍화토층은 N치가 9/30 ~ 50/11을 나타내어 느슨하거나 매우 조밀한 상태이며, 풍화암은 파쇄 및 절리가 발달되어 RQD는 0~17의 분포를 나타내고 있다. 그리고 터널구간의 지형은 북서방향에서 발달된 완



그림 1. 주변현황

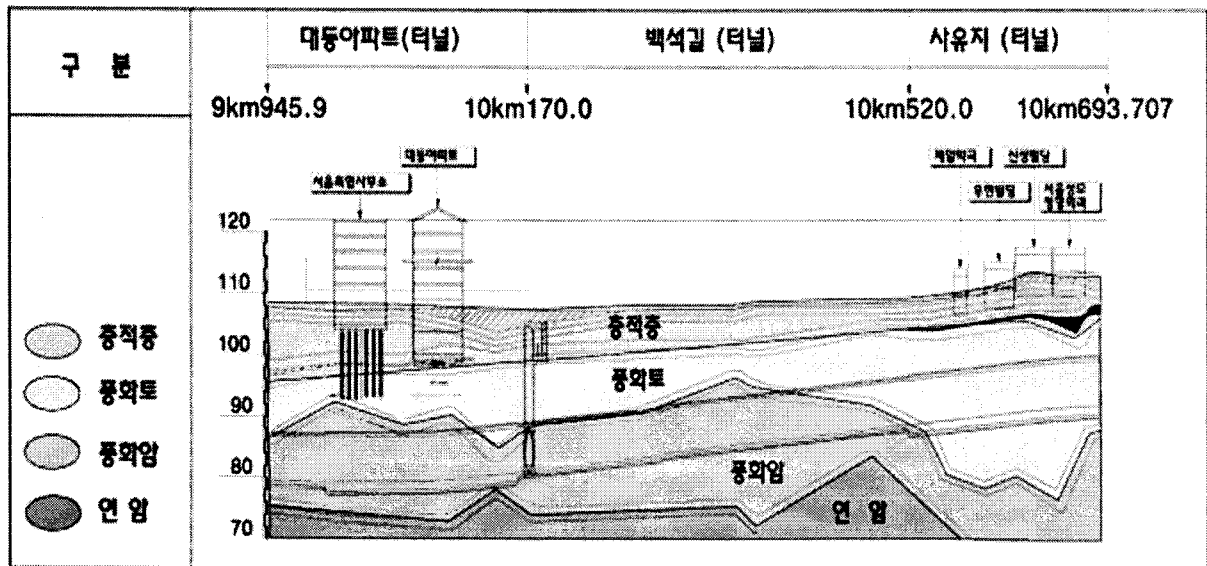


그림 2. 대상구간의 지층분포

만한 능선과 남에서 북으로 완경사로 발달된 능선이 서로 만나는 계곡부이며, 터널이 위치한 곳의 지하수위는 GL(-)3.3~7.3m로 충적층 구간에 분포하고 있다.

터널이 위치한 구간의 지층현황을 보면 대동아파트와 백석길 구간은 풍화토와 풍화암의 경계부로 터널 천단부는 풍화토이고 하부는 풍화암으로 형성되어 있다. 그리고 상가하부를 지나는 사유지 구간(L= 173m)은 천단면이 풍화토층을 통과하여 앞구간과는 다른 지층분포를 나타내고 있다. 터널 통과구간의 지층상태를 그림 2에 나타내었다.

표 1. 과업구간 지층특성

구 간	지 층 현 황	조 사 결 과		
		구 분	분포심도 (GL.-m)	N 치 (TCR/RQD)
사유지 (터 널)	<ul style="list-style-type: none"> • 사유지 구간 지층현황은 매립층, 충적층, 풍화대, 연암으로 구성 • 지하수위 분포현황은 GL(-)3.3~7.3m로 충적층 구간에 분포 • 옛 하천 제방구간에 근접하여 풍화대가 매우 두텁게 발달하여 있음 	매립층	1.3~5.8	2/30~11/30
		충적층	4.8~10.7	4/30~25/30
		풍화토	26.0~34.5	9/30~50/11
		풍화암	28.8~34.5	50/10~50/3
		연 암	30.8~33.0	(68~78/0~17)

3. 구조물하부 통과구간 시공계획

3.1 굴착공법

터널굴착 방법은 링컷(Ring Cut)굴착을 수행하여 막장 주변의 지반이완을 최소화하고 안정성을 확보하였다. 그리고 H-beam(H125mm)의 강지보재를 0.8m 간격으로 설치하고 강섬유보강 슛크리트를 1, 2차로 구분하여 두께 250mm로 타설하였다. 또한 굴착시 막장의 안정과 주변지반의 강성을 증대시키기 위하여 상반 굴착시 천단부와 측벽부에 $\phi 114$ mm의 대구경 자천공 강관다단 그라우팅을 실시하고 막장부에는 GRP 그라우팅을 실시하였다. 그리고 응력해방에 따른 바닥부의 융기와 하반굴착시 예상되는 지반변위를 최소화하기 위하여 터널바닥 하부 7~8m까지 시멘트 그라우팅을 11공 시공하였다.

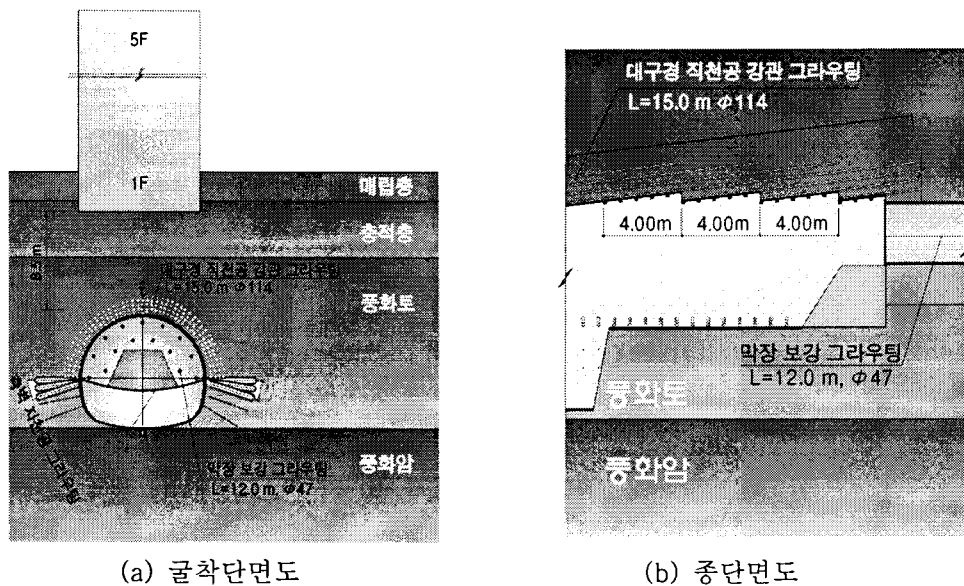


그림 3. 풍화토구간 터널 중단면도

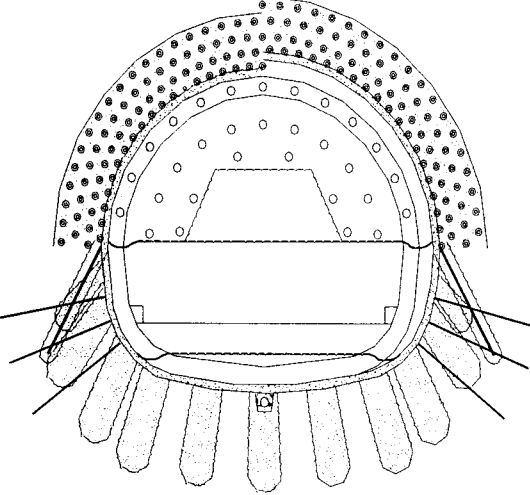
터널단면(PD-2C)	보강내용
	굴착 : Ring Cut + 기계굴착 천단부 : 직천공 강관 다단 (Φ114mm × 15m × 37공@4m) 측벽부 : 직천공 강관다단(상반) (Φ73mm × 4m × 6공@0.8m) 락볼트(하반) (Φ29mm × 4m × 3공@0.8m) 막장부 : GRP (Φ47mm × 12m × 30공@8m) 하반부 : 시멘트 그라우팅 (L=7~8M × 11공 @ 1.6m) 슛크리트 : 강섬유보강 슛크리트(250mm) 강지보 : H-beam(H125mm) 라이닝 : 철근콘크리트 600mm

그림 4. 터널 보강단면

하반굴착시 벤치길이는 30m로 유지하였으며, 굴착후 락볼트(L=4m)를 좌우 측벽부에 각각 3공씩 설치하고 하반굴착 완료후 인버트를 설치하여 지반변위를 최소화 하였다. 사유지 구간 구조물 하부 통과구간의 종단면도와 터널단면을 각각 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

3.2 터널계측 계획

도심지 지하철공사의 터널계측은 터널뿐만 아니라 주변 구조물의 안정성을 확인할 수 있는 계측도 동시에 수반되어야 한다. 그리고 계측간격과 계측빈도를 축소하여 이상변위에 대해서 즉시 대응할 수 있는 보강대책도 사전에 수립하여야 한다. 이에 당 공사에서는 터널 천단침하 측정개소를 당초 10m 간격에서 4m 간격으로 축소하였으며, 터널 굴착에 의한 영향범위를 정밀하게 확인하기 위하여 당초 17개에서 40개로 확대하였다. 그리고 계측결과의 신뢰성은 주로 계측기 설치의 정확도가 영향을 미친다. 그러나 계측기 설치시기가 지연되거나 초기치 확보시기가 늦어지면 측정된 결과는 실제 발생한 변위나 응력값 보다 작게 되어 구조물의 안정성을 과대 평가하게 된다. 이에 당 공사에서는 굴착후 1시간 내에 계측편을 설치하고 슛크리트 양생시간을 고려하여 5시간 이내에 초기치를 확보하여 실제 발생된 변위가 계측치와의 차이를 최소화 하고자 하였다. 당 공사의 계측현황은 표 2에 나타내었으며 건물의 안정성을 측정하기 위하여 설치한 지표침하계 설치현황을 그림 5에 나타내었다.

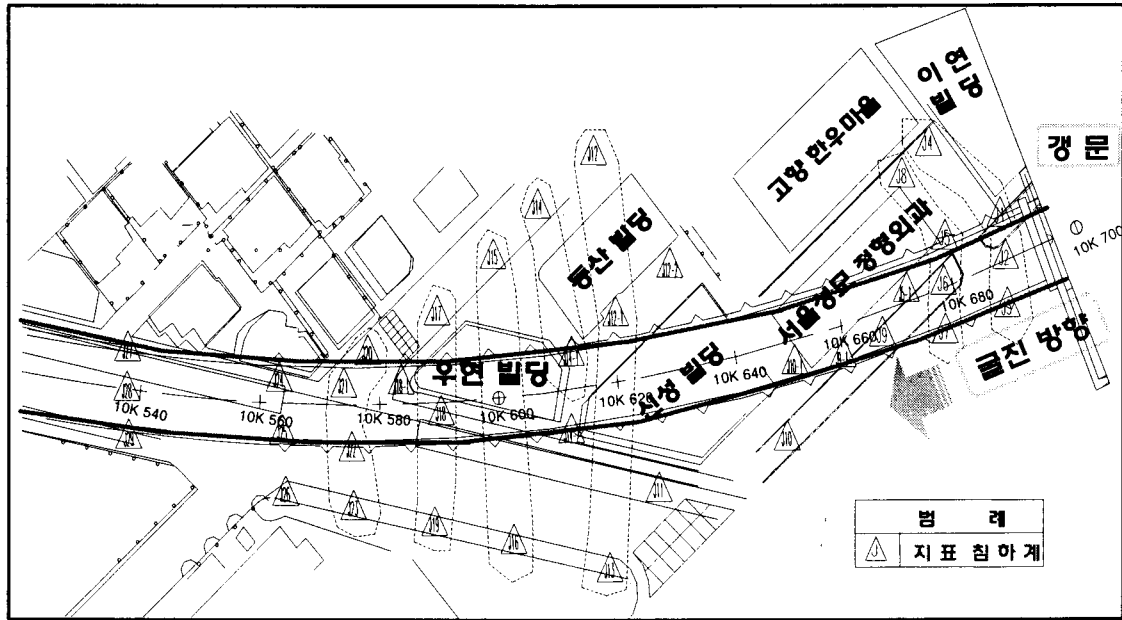


그림 5. 지표침하계 설치현황

표 2. 계측현황

계측 분류	계측기 종류	설계수량	설치수량	종료 시 예상수량
일상 계측 (S.M.S)	지표 침하계	17	40	40
	건물 침하계	-	12	12
	천단 침하계	16	20	31
	내공 변위계	36	52	94
대표 계측 (M.M.S)	록볼트 축력계	8	4	8
	샷크리트 응력계	20	13	20
	지중 변위계	8	4	8
	건물 경사계	7	9	9
	강지보 응력계	72	25	72
	수평 경사계	4	4	4
	지중 경사계	2	2	2
	층별 침하계	2	2	2

3.3 시공관리 계획

구조물 근접 공사시 터널공의 주요 시공관리는 계측결과를 토대로 수행된다. 이를 위해 당 현장에서는 일일계측보고 이외에도 주 1회 계측회의를 실시하고, 전문 연구자에 의해 계

측결과를 이용한 역해석(Back analysis)을 통해 실시간 현장 시공관리 계획을 수립하였다. 당 현장의 시공관리 현황은 그림 6에 나타내었다. 그리고 주간계측 데이터와 수평경사계를 통한 선행변위를 계측하여 터널의 안정성과 천단침하, 내공변위의 수렴시기를 예측하고 계측치와 비교 분석한 후 터널보강 적정성 여부를 판단하였다. 그리고 추가 변위가 예상될 경우는 추가보강을 실시하고 시공방법을 수정 보완하였다.

또한 시공의 중요성을 모든 작업자가 알 수 있도록 하기 위하여 현장작업자, 기능공, 장비 운영자들에게 천공장의 여굴발생 최소화, 그라우트재의 주입속도 유지 등을 강조하였다. 그 결과 그라우트재가 설계량의 110%까지 주입되었다. 그리고 계측을 1일 1회로 수행하나, 변위 과다발생 지점에서는 2시간간격으로 측정하여 경시변화를 주의깊게 관찰하였다. 그리고 변위가 수렴한 이후에도 측정점의 빈도를 1일 1회로 계속 유지하여 현장관리에 만전을 기하고 있다.

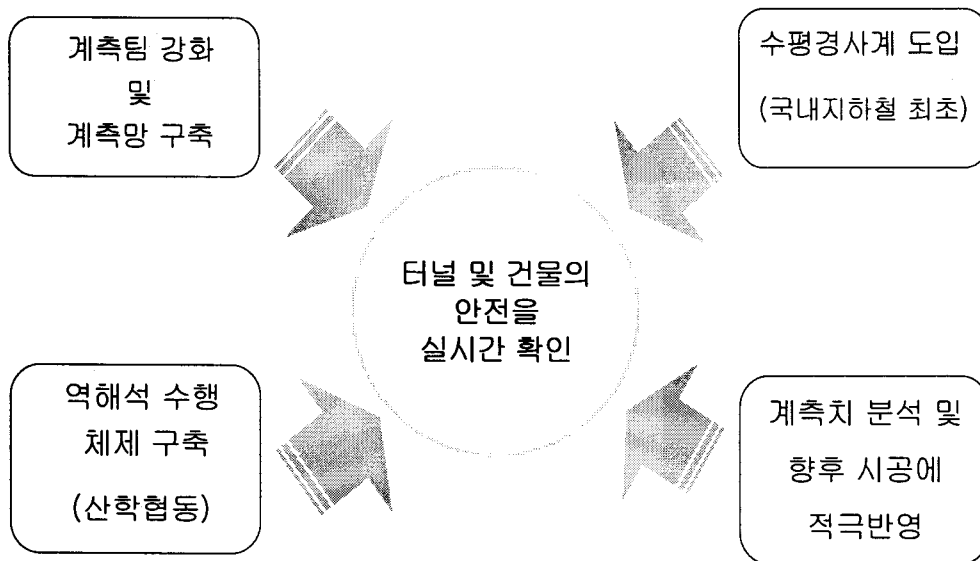
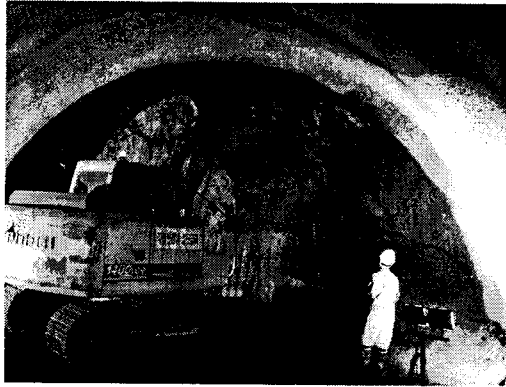


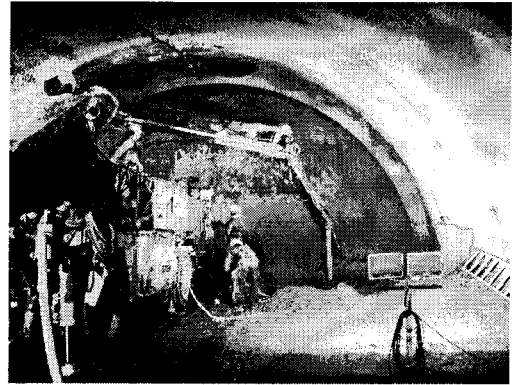
그림 6. 터널공 시공관리 현황도

3.4 터널 시공현황

터널 시공은 상부 굴착 및 보강을 수행한 이후 측벽과 하반 선행보강을 실시하였다. 하반 굴착은 벤치길이를 30m 유지하였다. 상하반 굴착 및 보강 순서를 각 단계별로 그림 7과 8에 나타내었다.



a) 상부굴착



b) 1차 슛크리트



c) 강지보 설치



d) 2차 슛크리트

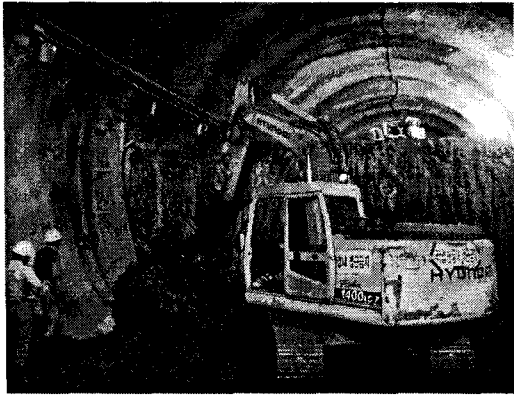


e) 자천공 강관다단 천공/주입

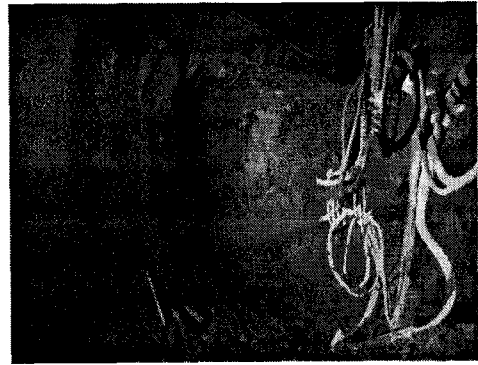


f) 막장면 GRP 보강

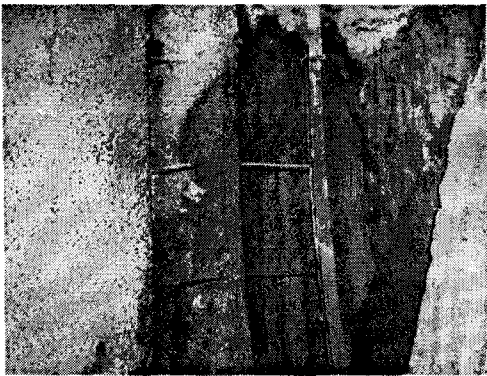
그림 7. 터널 상부공 시공전경



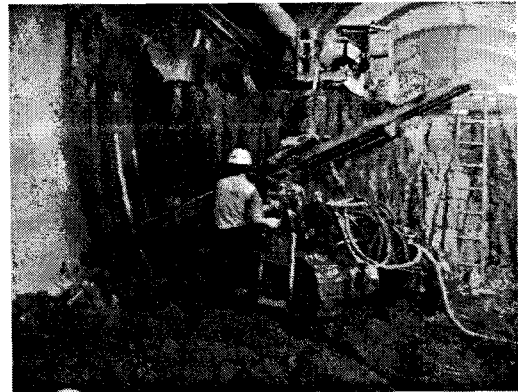
a) 하부 기계굴착



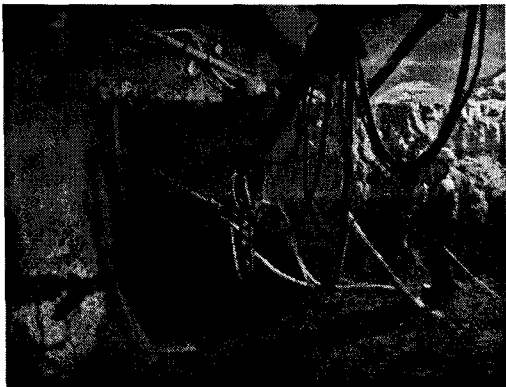
b) 1차 숏크리트



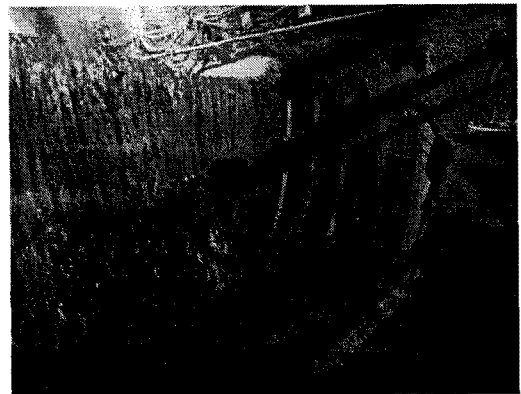
c) 강지보 설치



d) 락볼트 천공 및 주입



e) 2차 숏크리트



f) 인버터 숏크리트

그림 8. 터널 하부공 시공전경

4. 현장계측 개선

일반적으로 계측기 설치후 측정되는 터널변위는 측정시기의 차이로 인하여 실제 발생된 변위보다 작게 측정된다. 이를 보완하기 위해 측정된 데이터의 경시변화도를 이용하여 굴착 직후의 변위를 예측하는 방법이 제안되어 있으나, 아직 실용성에 있어 그 평가가 제대로 이루어지고 있지는 않다. 이에 본 공사에서는 굴착 이전 막장 전방에서 발생하는 변위 뿐만 아니라 굴착직후에 발생한 변위량을 측정할 수 있는 수평경사계를 막장전방에 설치하였다.

수평경사계의 장점은 아칭작용에 의해 굴착 이전 막장 전반부에서 발생하는 침하량과 굴착직후 발생하는 침하량을 측정할 수 있다. 수평경사계를 통해 측정된 자료는 역해석에 필요한 실제 지반변위를 제공하여 주므로 기존의 현장시공 관리수준 보다 개선된 결과를 줄 수 있다. 수평경사계 설치는 그림 9에서 보는 바와 같이 건물하부 통과 사유지 구간(L=120m)에서 터널중앙부 정점에 강관 천공 각도와 동일한 경사로 30m 천공한 후 3m 간격으로 센서를 삽입하였으며, 4개의 수평경사계를 설치하였다.

수평경사계 설치는 그림 10에서 보는 바와 같이 $\phi 135\text{mm}$ 의 비트로 천공한 후 PVC 케이싱 튜브를 공내에 삽입한다. 그리고 공벽과 튜브 사이 공극이 발생하지 않도록 그라우팅 호스를 통하여 시멘트 그라우트재를 주입한다. 그라우트재가 양생된 후 튜브 속에 설치된 wire rope를 당겨서 수평경사계를 삽입한다. 수평경사계 센서에서 측정된 계측값은 자료 집적장치와 무선 전송시스템에 의해 실시간으로 현장과 자료 분석실로 전송되어지며, 역해석 결과 재산정된 현장관리 기준치와 비교 되어졌다.

수평 경사계에서 측정되는 변위는 굴착전 선행변위와 굴착직후의 초기변위 그리고 시간 경과에 따라 측정되는 변위 등이 연속적으로 측정되어지며, 이를 이용하여 막장면과 막장전방에서 발생한 선행침하량을 측정할 수 있다. 수평경사계를 이용한 변위량의 측정원리를 그림 11에 나타내었다.

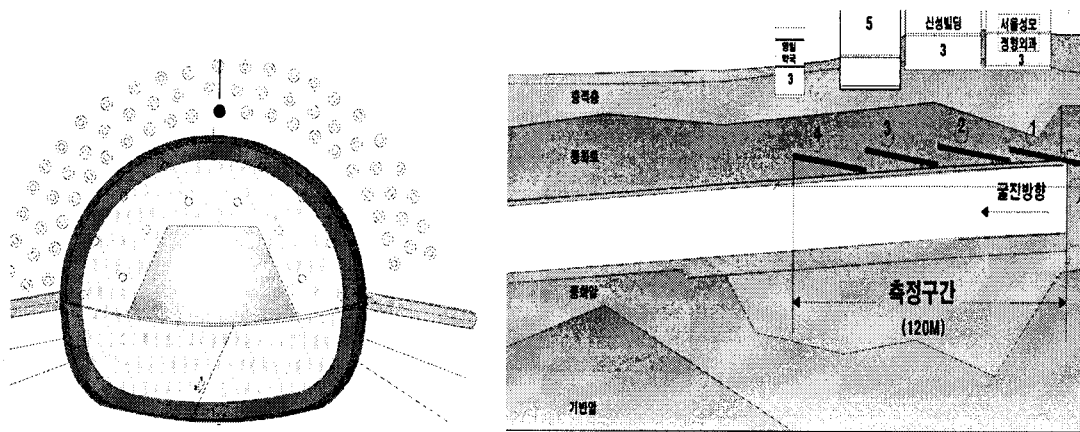


그림 9. 수평경사계 설치현황도

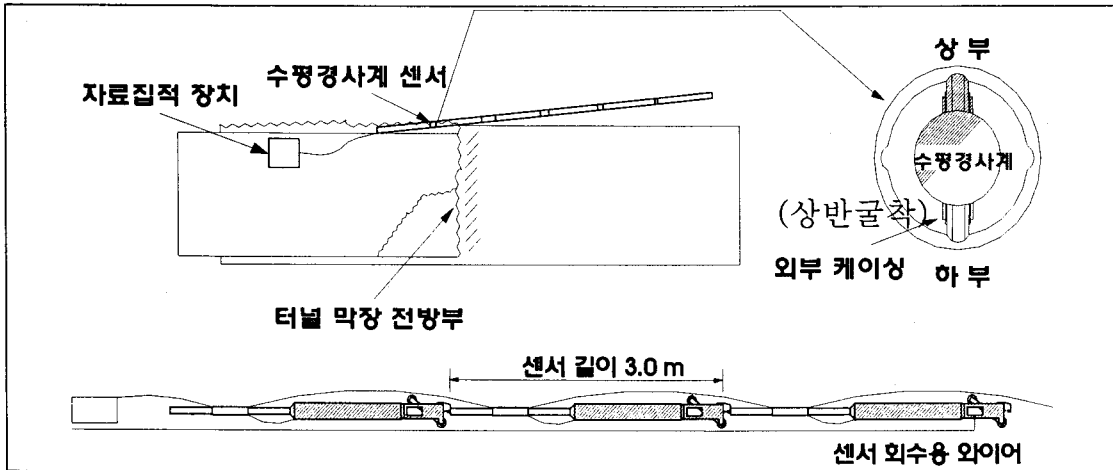


그림 10. 수평경사계 설치방법

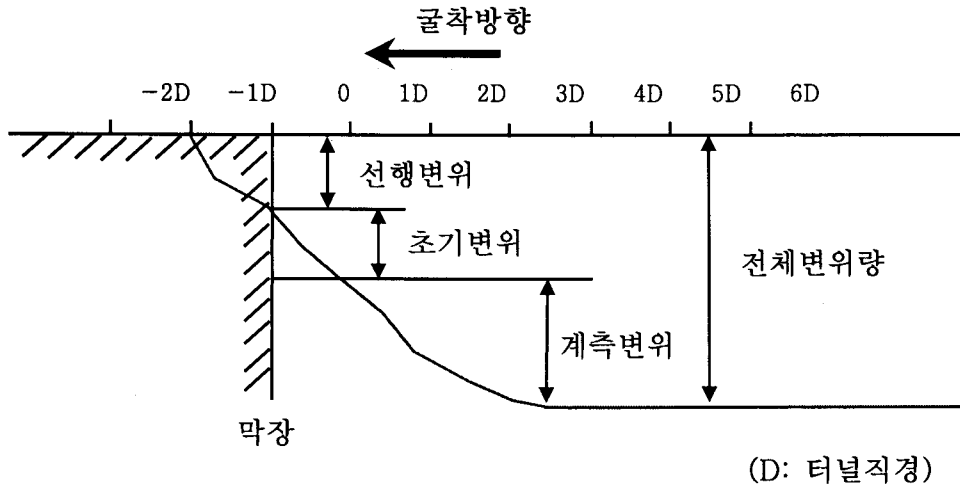


그림 11. 선행변위 측정원리

STA. 10K+648에서 수평경사계를 설치하고 6월 29일부터 8월 9일까지 측정한 천단변위의 경시변화를 그림 12에 나타내었다. 8월 9일 STA.10K+627지점에 막장이 위치할 경우 막장면에서 발생한 선행변위량은 약 20mm로 측정되었다. 그리고 막장 전방 4m 지점 (STA. 10K+623)에서의 천단침하가 약 10mm 정도 발생하였으며, 막장전방 0.8D 지점인 STA. 10K+620에서의 천단변위는 0로 나타났다. STA. 10K+645 ~ STA. 10K+627 구간에서 수평경사계에서 측정된 선행침하량과 전체변위량을 그림 13에 나타내었다. 수평경사계로 측정된 선행침하량과 전체침하량의 평균값은 각각 21.35mm와 40.95mm을 나타내어 선행침하 비율은 평균 52.2%인 것으로 나타났다. 이와 같이 굴착이후 측정되는 천단변위는 실제 발생하는 변위량의 절반정도 임을 알 수 있으며, 지반조건과 보강단면이 변하면 선행침하 비율도 달라질 것으로 예상된다.

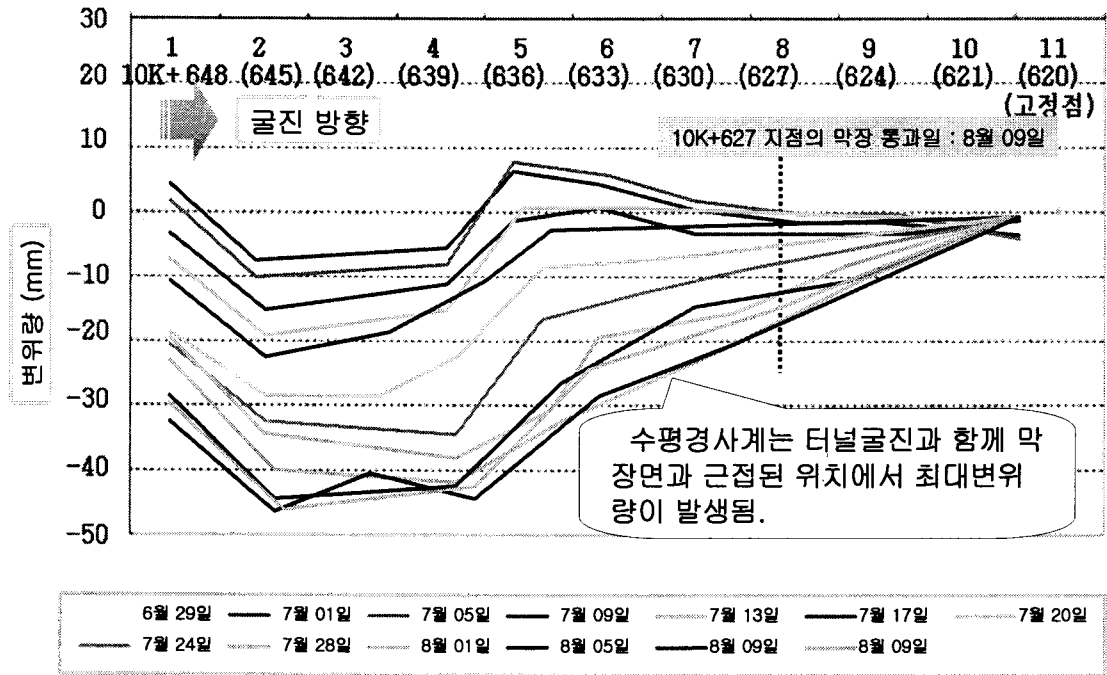


그림 12. 수평경사계 측정된 천단변위의 경시변화

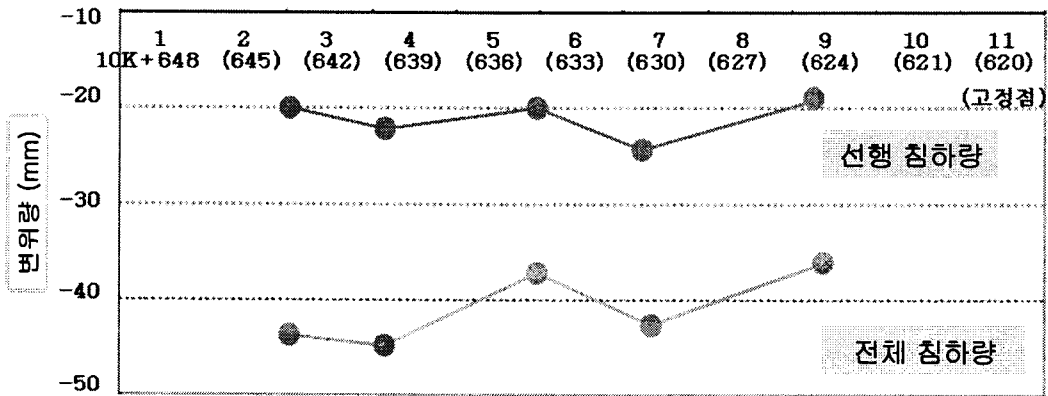


그림 13. 수평경사계로 측정한 선행침하 특성

표 3. 수평경사계로 측정된 침하량

설 치 위 치	10K+645	10K+642	10K+636	10K+633	10K+627	평 균
선행 침하량	(-) 20.058	(-) 22.848	(-) 20.075	(-) 25.603	(-) 18.167	(-) 21.350
전체 침하량	(-) 45.058	(-) 45.848	(-) 36.075	(-) 43.603	(-) 34.167	(-) 40.950
선행침하비율	44.52 %	49.83 %	55.63 %	58.72 %	53.17 %	52.2 %

5. 시공중 계측 및 역해석

5.1 역해석 방법

역해석(Back analysis) 방법은 여러 가지로 분류할 수 있으며, 그 중 수치해석적 방법을 이용한 직접법과 역순법이 주로 많이 적용되고 있다. 직접법(direct calibration approach)은 시산적 방법을 사용하는 것으로 입력자료를 변경하며 해석을 반복하여 해석결과와 계측값의 오차가 최소화 될 때 까지 수행하는 방법으로 반복계산에 의해 최적치를 구해야하므로 시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

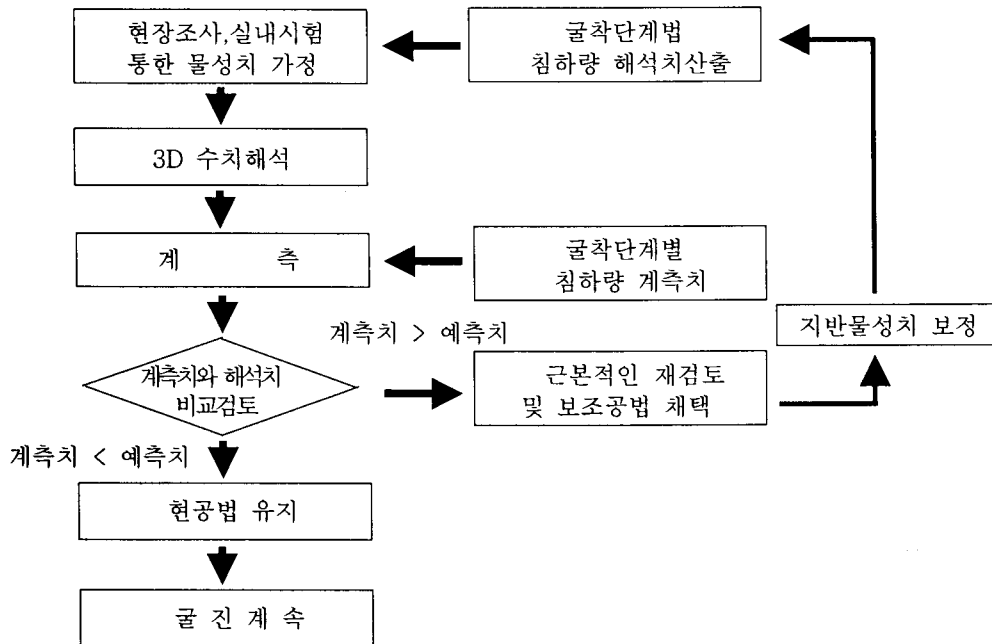


그림 14. 역해석 흐름도

그러나 역순법(inverse approach)은 해석시 사용된 입력자료들이 미지수가 되고 변위 및 응력 등을 입력자료로 하는 방법이다. 따라서 구성방정식을 역으로 하여 계산 프로그램을 다시 만들어야 하므로 초기 투자비용이 많이 소요되나 프로그램이 완성되면 계산시간을 절약할 수 있다. 금번 해석에서는 이미 6개 현장에서 적용되어 소프트웨어의 정확성이 검증된 소프트웨어를 이용하여 역순법으로 역해석을 실시하였다. 그리고 역해석을 위해 사용된 계측종류는 천단침하와 내공변위로 하였다.

5.2 계측 및 역해석

당 현장의 지반특성과 같이 조밀한 실트질 풍화토의 경우 강관다단그라우팅으로 지반을 보강해도 침투 주입이 되지 않아 보강된 지반의 물성치가 설계시 반영된 물성치와 차이가 발생할 수 밖에 없었던 것으로 판단되며, 이로 인해 상부건물의 침하가 설계시 예상했던 침

하보다 크게 발생하였다. 역해석 지점은 STA. 10K+667이며, 현재까지 터널 굴착현황을 그림 15에 나타내었다.

STA. 10K+667지점에서 측정된 계측결과를 그림 16에 나타내었다. 굴착후 경과일수 15일 경과한 시점까지는 내공변위가 천단변위 보다 크게 나타났다. 그러나 굴착이 계속 진행되면서 천단침하가 더 커지는 현상을 나타내었다. 이에 본 해석에서는 터널변형 특성을 고려하여 2차례에 걸쳐 역해석을 수행하였다. 상부 굴진장이 1D이하인 시점에서 측정된 변위값을 이용하여 1차 역해석을 수행한 결과 측압계수는 설계치 1.0보다 큰 1.32으로 나타나고 변형계수는 설계치 20,000t/m²보다 작은 5,000t/m²으로 나타났다. 그리고 설계단면으로 시공 할 경우 측벽부에서 변위가 약 100mm 까지 발생할 수 있을 것으로 예측되었다.

그러나 상부 굴진장이 1D 이상 진행한 시점부터 천단침하가 내공변위 보다 더 크게 발생되었으며, 이때 측정된 변위값을 이용하여 역해석을 실시한 결과 측압계수는 설계치와 유사한 1.08로 나타나고 변형계수는 설계치 20,000t/m²보다 작은 3,663t/m²으로 나타났다. 그리고 역해석 결과 재산정된 물성치를 이용하여 수치해석을 수행한 결과 측벽부 내공변위 억제 보다 천단침하를 감소시키는 시공방안이 수립되어야 할 것으로 분석되었다. 1, 2차 역해석 결과를 그림 17과 18에 나타내었다. 그리고 역해석을 수행한 결과 변화된 물성치를 표 4에 나타내었다.

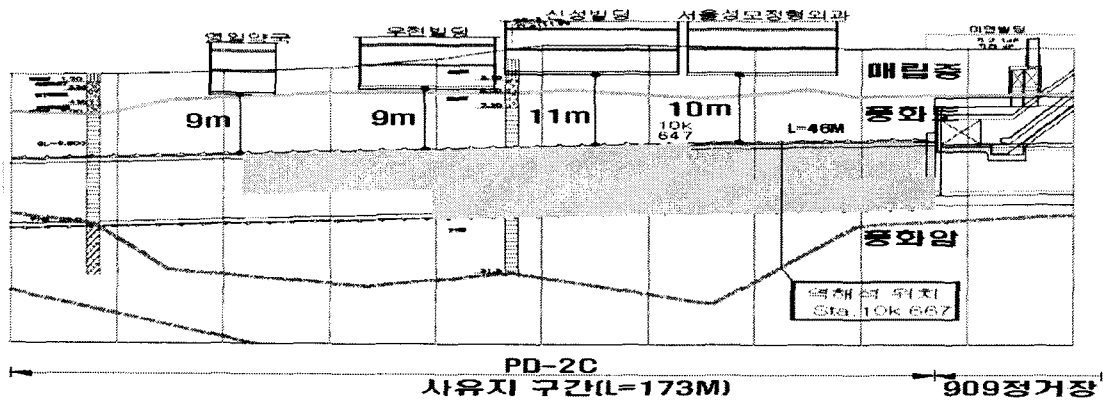


그림 15. 역해석 위치 및 굴착현황

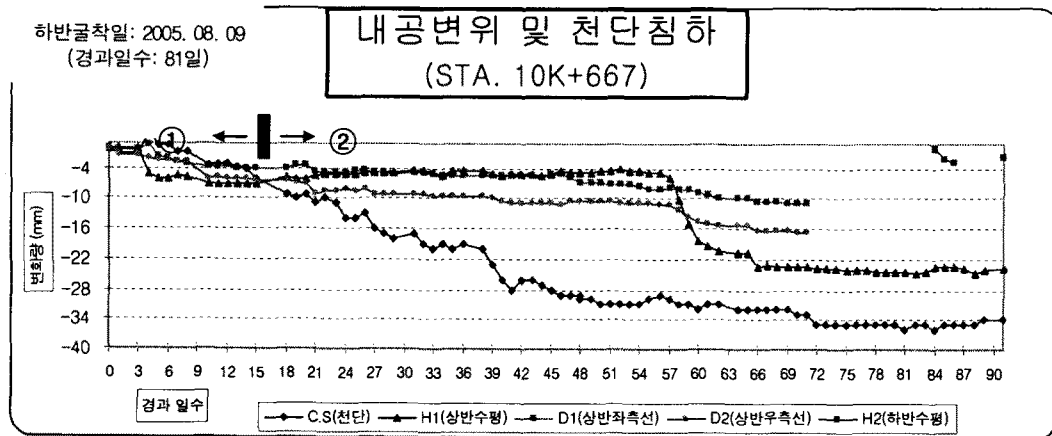


그림 16. 계측결과

표 4. 역해석 결과 물성치 변화

		측압계수(K)	변형계수(E, t/m ²)	비고
설계시		1.00	20,000	
역해석	1차	1.32	5,000	굴착후 15일 이전
	2차	1.08	3,663	굴착후 15일 이후

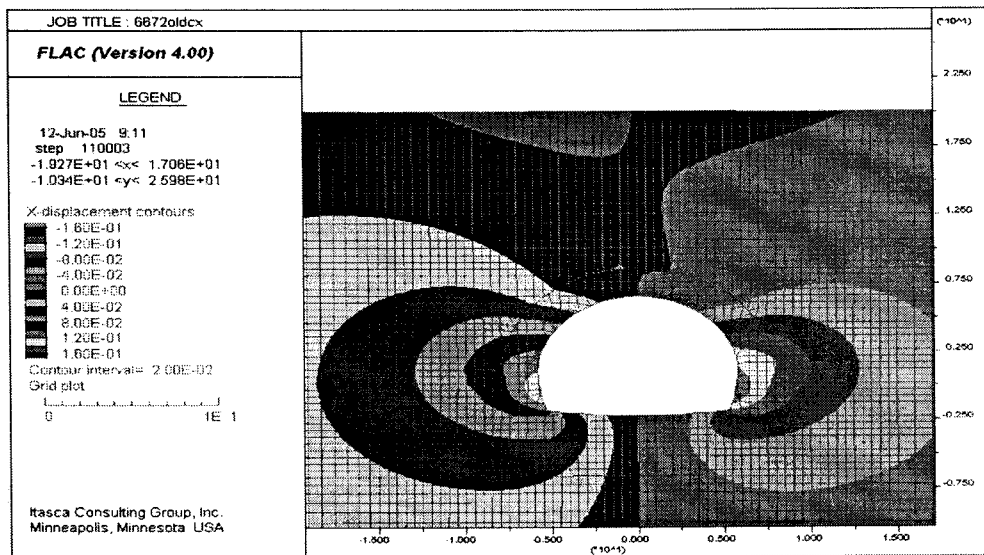


그림 17. 1차 역해석결과(내공변위)

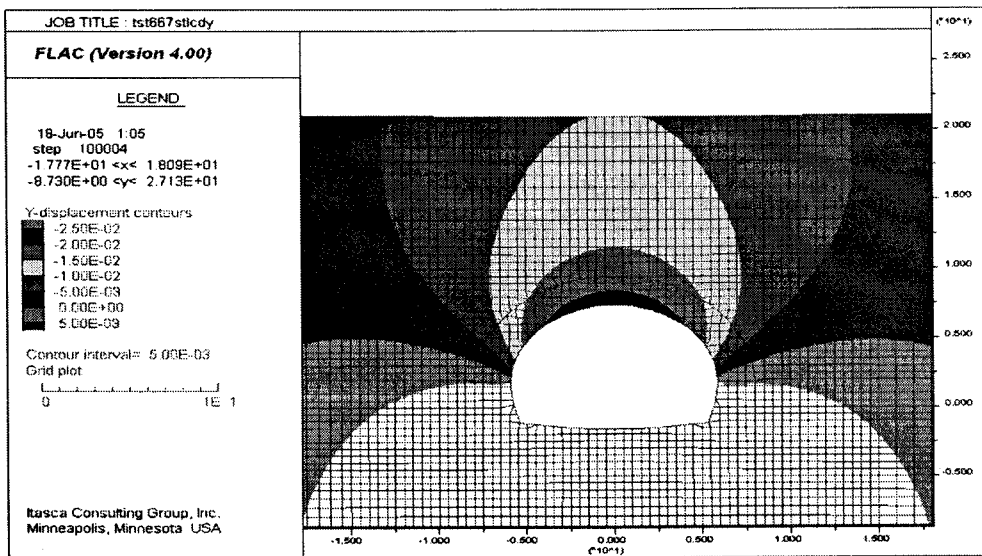


그림 18. 2차 해석결과(수직변위)

5.3 역해석 결과를 반영한 시공계획 변경

역해석 결과 산정된 물성치를 이용하여 수치해석을 수행한 결과 터널 굴착시 예상되는 천단침하와 내공변위는 각각 (-)62mm와 (-)95mm로 나타났다. 이에 시공중 발생할 수 있는 천단침하를 억제하기 위하여 강관다단 시공방법을 개선하였다. 상부 굴착후 천단부 보강은 3개 zone으로 분할하고 아치부 120°구간은 격공으로 2회 나누어서 매공 천공시 즉시 주입하여 공극이 발생하지 않도록 하였다. 아치부 보강이 완료된후 상부 측벽부도 동일하게 격공 천공후 즉시 주입하였다. 그리고 강지보 하부를 인력 굴착한 후 Con'c Block을 설치하여 지지력 부족에 의한 침하를 억제하였다. 굴진속도를 1일 2막장(0.8m×2)으로 제한하였다. 그리고 천단침하를 최소화하기 위해서 터널상반 굴착시 터널 측벽하반부에 막장 전방으로 GRP 선행 그라우팅(그림 19)을 실시하여 상반부 시공후 발생하는 터널전체 침하를 감소시켰으며, 터널 상반 굴착 후 측벽 하부를 강관그라우팅(φ73mm ×4m)으로 보강하여 하반굴착시 발생하는 터널의 천단 침하를 줄였다. 그리고 하반 굴착시 벤치 길이는 30m 이내로 제한하였으며, 하반 굴착후 즉시 슛크리트를 타설하여 인버트부를 폐합하였다.

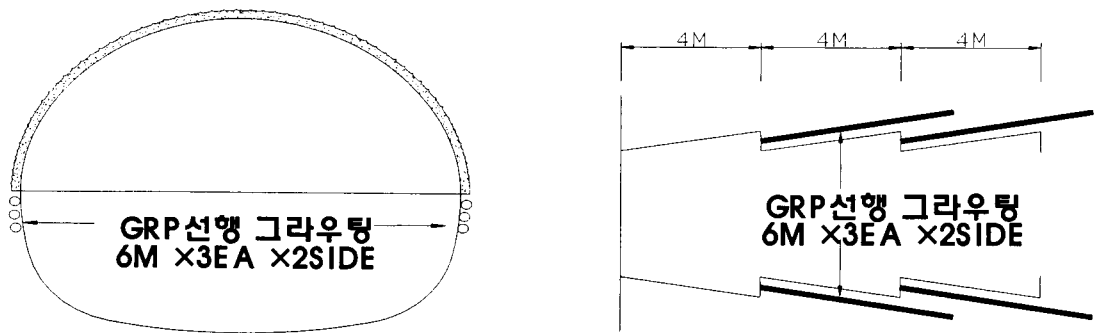


그림 19. GRP 선행그라우팅

6. 추가보강 이후 계측결과

굴착단면에 대한 추가보강 한 이후 예상되는 터널 변위량에 대해서 수치해석한 결과와 실제 굴착후 수렴시 까지 발생한 터널의 총 변위량을 표 6에 나타내었다. 측벽부 추가보강에 의해 발생한 변위량은 수치해석 결과보다 작거나 유사하게 나타났다. 그리고 내공변위가 천단변위보다 작게 발생하여 측벽부 보강에 의한 터널 주변 강성이 다소 변화된 것으로 판단된다. 보강 이후 측정된 STA 10K+628의 계측결과를 그림 20에 나타내었다. 시공중 측정된 변위는 김치환(1990)이 제시한 방법을 이용하여 예상되는 변위를 사전 예측하여 시공방법의 적정성을 판단하였다. STA 10K+628의 계측치 양상은 하반굴착 폐합후 천단침하 변화는 상반굴착시 56mm로 나타났으나 하반굴착후 역해석시 3차 관리기준치 62mm 보다 증가된 64mm까지 발생한 후 수렴되었다. 3차 관리치에 근접한 시점에 법면단부에 φ32mm 철근 보강과 슛크리트 15cm를 추가 타설하여 터널의 강성을 증가시켜 천단침하 증가를 억제하였으며, 현재 수렴 한 이후 안정된 상태를 나타내고 있다.

표. 6 추가보강 이후 계측결과

측정위치	변위	수치해석		계측치		비 고
		천단침하	내공변위	천단침하	내공변위	
STA. 10+628		62 mm	95 mm	64 mm	48 mm	추가보강

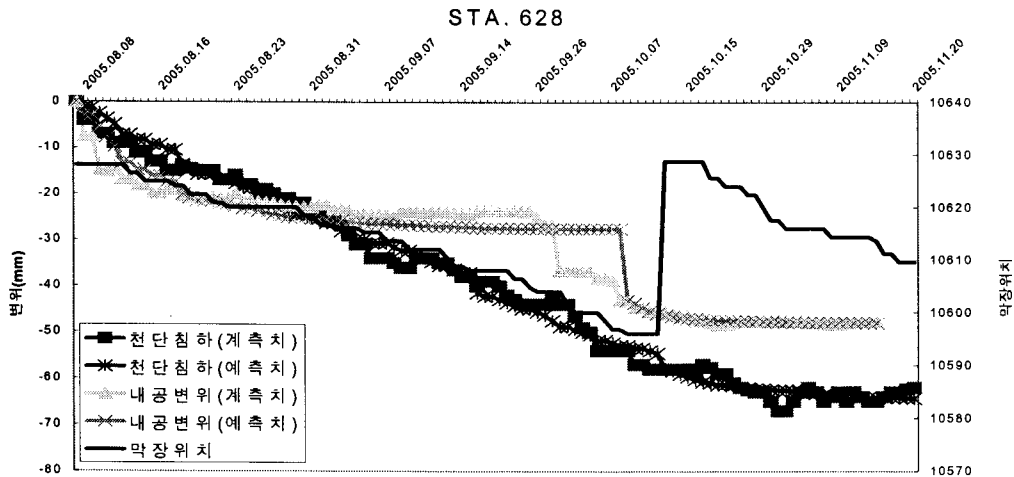


그림 20. 계측결과

7. 제언

지하철 9호선 906공구 본선구간 중 토피고 10m 이내의 토사층 구간에서 대단면 복선터널을 건설하기 위하여 수행한 시공사례를 통해 계측결과 활용에 대한 중요성과 모든 작업자가 각자의 역할을 충분히 이해할 수 있도록 교육과 회의를 통한 공감대 형성의 필요성을 알 수 있었다. 당 현장의 시공사례를 통해 얻은 시사점을 아래에 나타내었으며, 향후 유사한 조건의 터널공사시 참고자료가 되었으면 한다.

- 1) 터널 굴착시 계측기 설치 이후 측정되는 침하량은 실제 터널에서 발생한 침하량을 간파하는 특성이 있다. 본 공사에서 적용한 수평경사계를 이용하여 아칭작용에 의해 굴착 이전 막장 전반부에서 발생하는 침하량과 굴착직후 발생하는 침하량을 측정할 수 있었으며, 계측기 설치 이전 막장면에서 발생하는 침하량은 터널 굴착시 상반에서 발생될 수 있는 전체 침하량의 52.2%로 나타났다.
- 2) 토피고 10m 이내의 토사터널의 경우 수평변위 보다 수직변위(천단변위)가 크게 나타남을 알 수 있으며, 상하반 벤치 굴착시 하반굴착이 완료되면 수평변위가 급격히 증가하면서 수직변위가 수렴되는 양상을 보였다.

- 3) 역해석 결과 하반 굴착시 예상되는 천단침하를 억제하기 위하여 측벽부에 추가보강을 실시하였으나, 보강후 계측결과 STA 10K+628 지점은 3차 관리치에 근접한 64mm까지 천단변위가 발생하였다. 이에 변단면부에 $\phi 32\text{mm}$ 철근을 보강한 후 슛크리트 15cm를 추가 타설하고 터널의 강성을 증가시켜 천단침하 증가를 억제하였으며, 현재 수렴 한 이후 안정된 상태를 나타내고 있다.

참고문헌

1. 강석기, 권형중(2004), “지하철 수직구 횡갱과 본선터널 연결부 시공사례”, 한국터널 공학회지, Vol. 6, No. 3, 한국터널공학회, pp. 39 ~ 50.
2. 강석기, 김연기, 권형중(2004), “지하철 906공구 횡갱/본선 접속부 특수보강사례”, 제 4차 터널시공기술향상토론회, 대한토목학회, pp. 125 ~ 148.
3. 김치환(1990), “현장계측치의 역해석에 의한 지하공동 주위 암반의 응력해석 및 변형 거동에 관한 연구”, 박사학위논문, 서울대학교.