

공용중인 터널의 변상에 대한 보강 및 자동화계측 사례 Case Studies of Automatic Measurement and strength for Damage in the Public Tunnel

한자중¹⁾, Ja-Jung Han, 김영호²⁾, Young-Ho Kim, 장기수³⁾, Gi-Soo Jang,
권영정⁴⁾, Young-Jung Kweon, 안상로⁵⁾, Sang-Ro Ahn,

- 1) 한국시설안전기술공단, 진단1본부 부장 (Team Manager, P/E, Korea Infrastructure Safety & Technology Co)
- 2) 한국시설안전기술공단, 진단1본부 직원 (Korea Infrastructure Safety & Technology Co)
- 3) 한국시설안전기술공단, 진단1본부 과장 (Manager, P/E, Korea Infrastructure Safety & Technology Co)
- 4) 한국시설안전기술공단, 진단1본부 대리 (Assistant Manager, Korea Infrastructure Safety & Technology Co)
- 5) 한국시설안전기술공단, 진단1본부 실장 (Director, P/E, Korea Infrastructure Safety & Technology Co)

SYNOPSIS : An especial attention for old tunnel safety is required on increasing of The various tunnel recently. Specially, the lining investigation method of the old tunnel will be able to presume condition of concrete lining indirectly. Because it is many restriction thought of environment and ground condition investigation method of tunnel lining rear.

This study carried out section & convergence measurement of part which was deformed in tunnel lining. It had been observed for the change of tunnel behavior with a continuous measurement. It has been analyzed for a cause of tunnel deformation and inspected for the effect after a repair-reinforcement to tunnel compared with the effect before those by structure analysis. By establishing automatic measurement system after repair-reinforcement to tunnel, it would be accomplished to convergence measurement continually.

As a result, it was observed that deflection and deformation of tunnel was convergent. but it should be followed to a continuous maintenance because of unstable ground condition, cause of inner tunnel, environment. The railroad tunnel which was executed a reinforcement of the tunnel lining must investigate the close condition of reinforcement lining and concrete lining

Key words : Convergence measurement, Reinforcement lining, Automatic measurement system

1. 서론

근래에 사회간접시설의 다량확충과 함께 다양한 터널이 매년 증가하면서 유지관리에 대한 시각이 새로운 관점으로 제기되고 있다. 특히 공용연수가 점점 증가함에 따라 터널의 주변지반과 지보공의 장기 거동에 대한 터널의 안전관리에 실무차원의 노력을 배가하고 있으나, 터널의 특성상 라이닝 배면의 원지반 상태 조사방법과 환경에 따른 많은 제약 사항이 있어 라이닝의 상태로부터 터널의 안전성을 간접적으로 추정할 수밖에 없는게 현실이다.

본 연구에서는 공용중인 터널 라이닝의 변상에 대하여 외관조사, 터널내 보링조사, 내공변위 계측 및 단면측량 등을 실시하여 터널에 발생한 변상을 조사 및 분석하였으며, 구조해석을 통해 안전성 검토와

보수·보강을 검토하였고, 보수·보강이후 자동계측을 실시하여 터널의 거동 변화 추이를 관찰하고 보수·보강 효과를 검증하였다.

일정한 기간의 조사기간과 제한적인 조사방법으로 인해 변상의 원인과 정도, 진행속도 등을 파악하는 데는 제한이 많았으나 재래식터널에서 지반조건에 상응하는 설계 및 시공이 이루어 지질 않을 경우 공용중에 변상이 발생하게 되는 경우를 확인 할 수 있었다. 따라서 향후에 터널의 변상원인 분석과 보수·보강시 참고자료가 될 수 있도록 사례를 소개하고자 한다.

2. 터널 현황

터널은 연장이 4,505m인 단선터널로서 형식은 말굽형이며, 인버트 콘크리트는 일부구간에서 설치되었고, 라이닝 두께는 지반조건에 따라 30~60cm로 조사되었으며 입구부에서 중앙부로 갈수록 라이닝 두께는 줄어드는 경향을 보이나 습곡추정 구간에서는 라이닝 두께를 증가시킨 것으로 조사되어 시공여건과 지반상태 등을 감안하여 시공하였던 것으로 분석되었다.

대상 터널은 1973년도에 준공되어 32년이 경과한 터널이며, 콘크리트강도는 철근콘크리트 라이닝 구간에서는 측벽부와 아치부에서 150kgf/cm²이며, 무근 콘크리트 라이닝 구간에서는 측벽부는 100kgf/cm², 아치부는 120kgf/cm²를 적용하여 시공하였다.

준공이후 정밀안전진단은 2회(1997년, 2002년) 실시되었으며 보수·보강은 주로 누수부에 대한 액체방수공과 라이닝 콘크리트의 박리, 박락 부위에 대한 철근콘크리트 보강공을 실시(준공후 5년이후)한 것으로 조사되었으며 특히 일부구간은 보수·보강이 수차례 이루어진 구간으로 조사되어 결함 및 손상이 계속적으로 발생하였던 것으로 추정된다.

표 1. 터널 제원

연 장	4,505m	형 식	말굽형
배수형식	중심 하수	구배	30, 3/1000
단·복선	단 선	준공년도	1973. 8. 25

3. 현장조사 결과

3.1 외관 조사

정밀안전진단구간에서 발생한 균열은 주로 시공이음부 균열, 측벽부에서는 횡·사방향 균열, 아치부에서는 천단부 종방향 균열(일부 단차균열 포함)이 박리, 박락을 동반하여 발생하였으며 균열폭은 0.3mm 이상인 개소가 많은 것으로 조사되었다.

보강라이닝 아치부에 발생한 박리, 박락은 보강라이닝과 원라이닝 사이가 대부분 층분리 또는 들떠있는 부위에서 발생하였고 압축 또는 전단력에 의해 발생한 종방향 균열(일부 단차균열 포함) 주변에 발생하였고, 현재 일부 구간에서는 박리, 박락이 진행중인 콘크리트 라이닝 블록들이 낙하할 가능성이 높은 상태인 것으로 조사되었다.

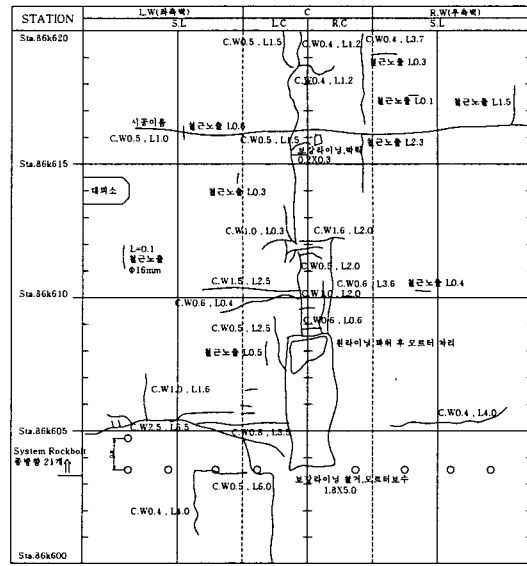
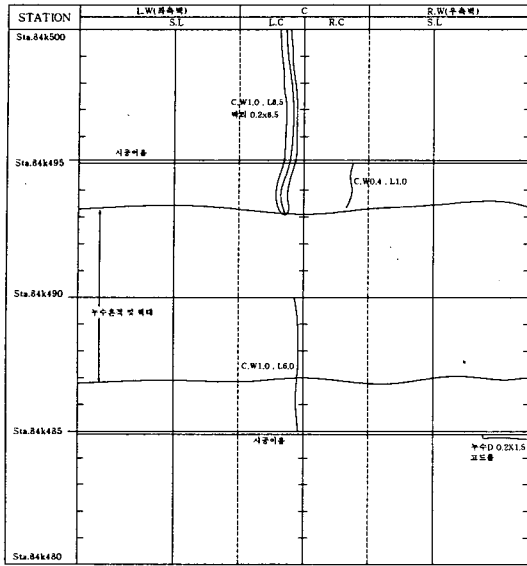


그림 1. 천단부 증균열 외관망도

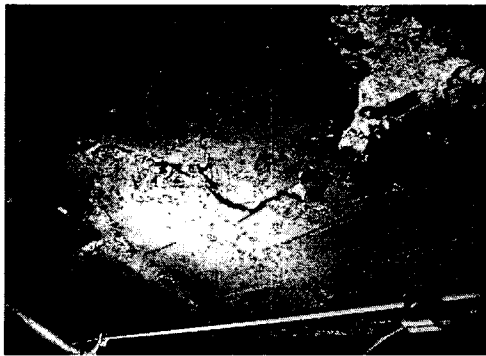


그림 2. 보강라이닝의 단차균열 및 박락전경

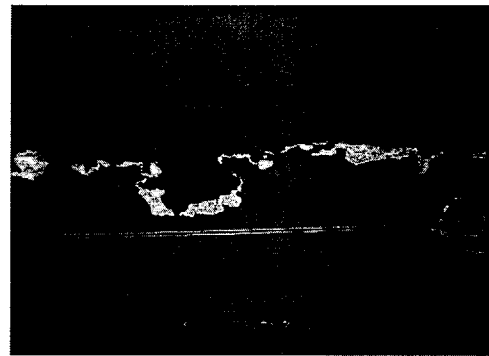


그림 3. 천단부 증균열

3.2 비파괴 조사

비파괴 조사는 내구성 조사, 수질 조사, 염분 함유량 분석등을 실시하였고 주요 비파괴 조사결과는 표 2와 같이 조사되었다. 콘크리트 강도는 설계기준을 상회하였으며, 라이닝 두께는 30~60cm로 조사되었으며, 일부 구간에서는 아치부에 공동이 존재하는 것으로 조사되었다.

표 2. 비파괴조사결과

구 분	내 용	조사결과	비 고
설계 기준강도 (kgf/cm ²)	아치부	120	
	측벽부	100	
코 어 채 취 (평 균 치)	압축강도	144 kgf/cm ²	Φ100×200mm
비 파 괴 강 도 (초음파 및 반발경도)	아치부	171 kgf/cm ²	
	측벽부	159 kgf/cm ²	
GPR탐사에 의한 라이닝 두께	중단탐사	30 ~ 60 cm	

3.3 내공변위 측정

보강라이닝을 설치한 구간중 아치부에서 박리, 박락을 동반한 종방향 단차균열들이 밀집되어 발생한 구간중 31개소를 선정하여 유지관리 계측을 위한 내공변위를 측정하였다. 내공변위 측정은 그림 4와 같이 좌·우측벽부에 앵커핀을 설치하여 2점법으로 실시하였다. 짧은 진단기간으로 변위발생 여부를 확인하기에는 곤란할 것으로 판단되었으나 계절적요인 등은 확인이 가능할 것으로 판단되어 동절기에서 하절기까지 측정하였다.

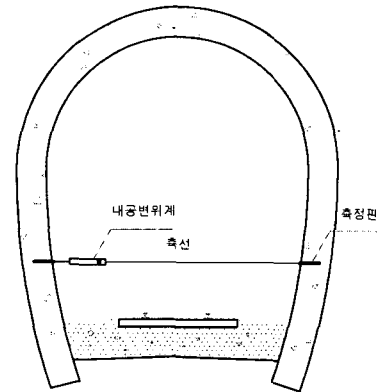


그림 4. 내공변위측정 모식도

그 결과 1mm미만의 변위량이 발생한 지점은 20개소, 1mm이상 변위량이 발생한 지점은 11개소로 측정되었다. 내공변위 계측기간이 짧아(7개월) 계절적요인 등을 고려한 변위여부를 정확하게 판단하기는 곤란하였으나 현재 일부구간에서 변위가 발생하고 있는 것으로 판단되었다. 이런 구간은 대부분 원라이닝과 보강라이닝에 결합 및 손상이 많이 발생한 것으로 조사되었으며 단면측량 및 단면폭 측정하여 준공단면의 형상과 비교해 볼 필요가 있다고 판단되었다.

변위량이 1mm이상인 11개소의 내공변위 측정결과는 그림 5와 같이 1.08~4.05mm 정도로 조사되었고 시간이 경과됨에 따라 증가하는 경향이 있는 것으로 조사되었다. 변위의 발생여부를 결론 짓기에는 여러면에서 곤란한 것으로 사료되나 변상이 심한 구간임을 감안할 때 유지관리 계측이 필요한 상태로 판단되어 자동화 계측 시스템의 장기적인 계측이 필요한 것으로 판단되었다.

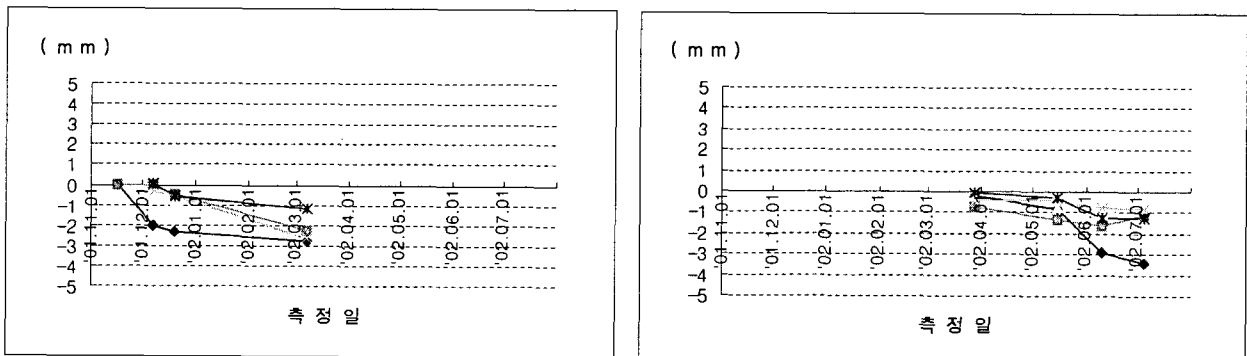


그림 5. 내공변위 측정 결과도

3.4 단면 및 단면폭 측량

보강라이닝 구간중 단차균열 등이 발생한 구간에 대하여 현재의 단면형상을 확인하여 변형 여부 등 확인 하기 위하여 그림 6과 같이 라이닝 내면의 13점에 대해 프리즘을 폴대를 연결하여 각각의 측점에 대해 광파측정기(ELTA50)을 사용하여 측정하였다. 이 때 측정의 결과값은 프리즘의 반경을 고려하여 보정하였다. 그리고 전구간에 대하여 건축한계(4.2m) 저축여부를 확인하기 위하여 10m간격으로 그림 7과 같이 레일 상단면에서 1.1m 높이에서 단면폭을 측정하였다.

외관조사 결과 종방향 균열(단차 균열), 박리, 박락등의 변상이 심하게 발생한 20개소를 선정하여 내공 단면을 측정한 결과 준공단면과 비교시 폭과 높이의 변화가 큰 것으로 조사된 부위는 6개소로 보수·보강이 실시된 구간으로서 대부분 아치부에 변상이 심하게 발생되어 변위 및 변형의 가능성이 높은 것으로 검토되었다.

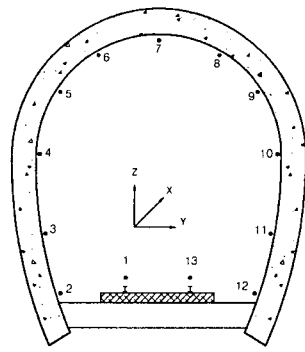


그림 6. 내공단면 측점 현황

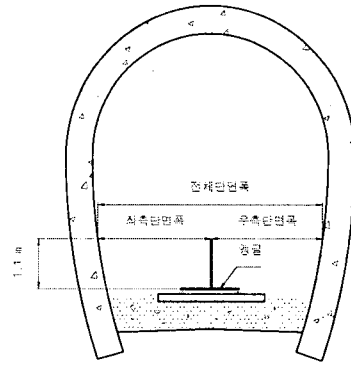


그림 7. 단면폭 측정 현황도

대부분 건축한계에 저촉되는 구간은 터널내부에서 보수·보강을 실시한 구간으로 조사되었으며, 보수·보강을 실시하지 않은 원라이닝 구간 중 한쪽 측벽에서 건축한계에 저촉되는 부위는 3개구간이며, 전체 단면폭이 건축한계에 저촉된 구간은 4개구간으로 조사되었으며, 조사된 단면폭은 3.924~4.160m(설계 단면폭 : 4.4m)로 단면폭의 변화가 심한 것으로 조사되었다.

내공단면 측량결과와 단면폭 측정결과값(그림10참조)을 준공단면과 비교시 폭과 높이의 변화가 큰 것으로 조사되었다. 대부분 건축한계에 저촉되는 구간으로 터널 내부는 보수·보강이 실시된 구간이고, 보강라이닝과 인접한 원라이닝 구간 중 다른 구간에 비해 단면폭이 비교적 적은 구간에 대해서 종방향 균열이 발생한 상태이고, 아치부에서 단차균열, 박리, 박락이 발생한 것으로 조사되었다.

그림 9은 결함 및 손상이 심하게 발생한 구간과 양호한 구간의 단면폭을 비교하기 위해 양호한 구간에 대해 평균폭(4.71m)을 산정하고 그 평균폭과 측정한 단면폭과 비교하였다.

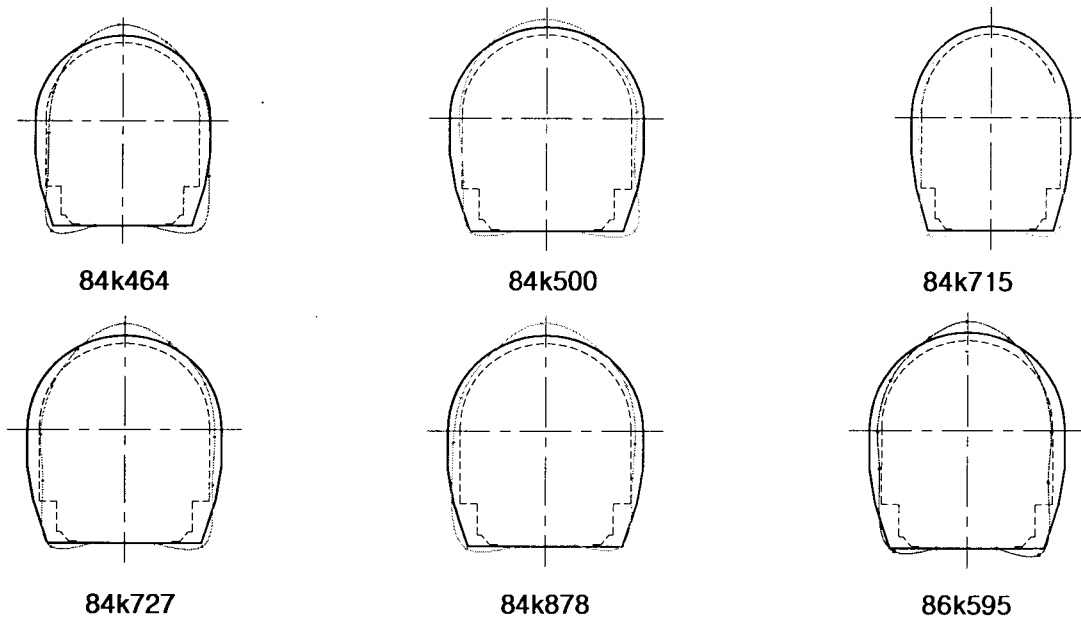


그림 8. 내공단면 측량결과

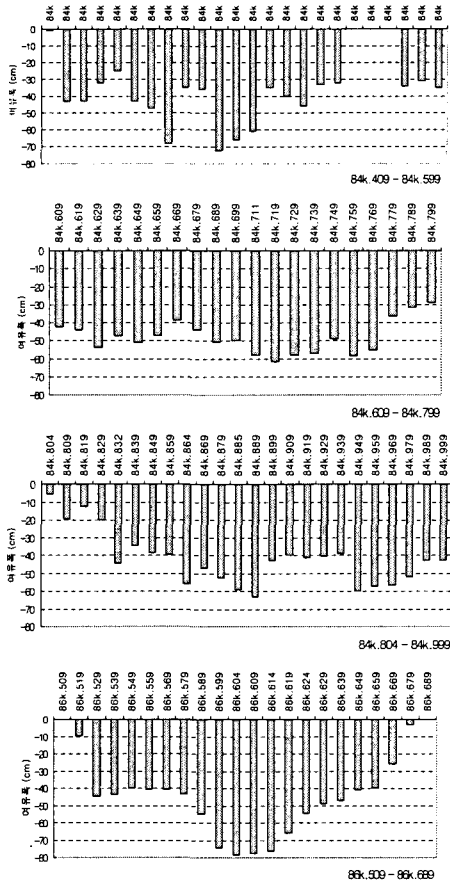


그림 9. 여유폭 현황(양호구간과의 차이)

- 88k039
- 87k939
- 87k839
- 87k739
- 87k649
- 87k569
- 87k469
- 87k369
- 87k267
- 87k169
- 87k069
- 86k979
- 86k879
- 86k779
- 86k679
- 86k604
- 86k509
- 86k409
- 86k309
- 86k219
- 86k129
- 86k049
- 951040

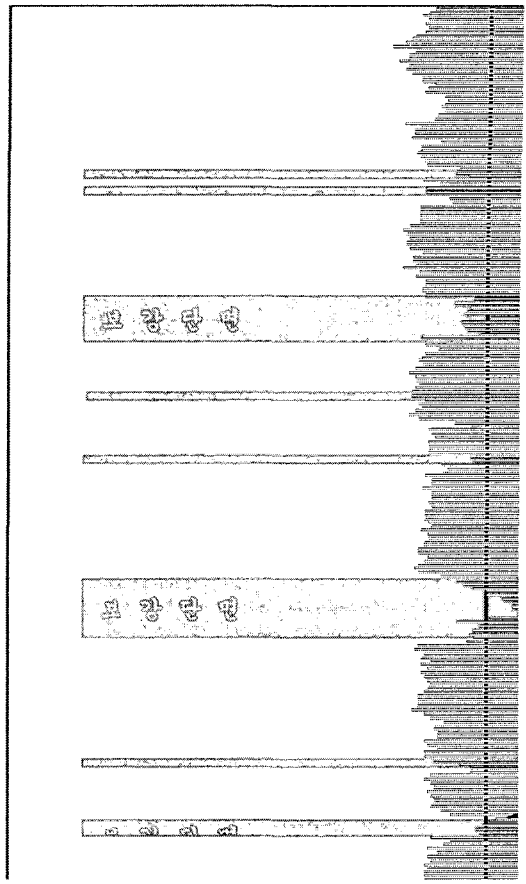


그림 10. 단면폭 측정 결과도

3.5 터널내 지질조사

터널주변 지반은 평안계 녹암통의 중상부층, 홍점통과 사동통을 통과하고 있으며 퇴적암지역으로 습곡현상이 있고 주로 사암 및 세일지층이 형성되어 있는 지역으로 조사되었으며, 층리와 경사는 습곡구조로 인하여 변화가 많은 상태이고, 터널의 지질단면에 의하면 터널내 지층구조는 전체적으로 큰 향사구조를 보이고 세분하면 3개의 배사구조와 4개의 향사구조의 소규모 습곡이 발달한 것으로 조사되었다(그림 12, 13참조).

터널 굴착시 작성된 지질 단면도에 의하면 배사 및 향사구조의 습곡이 발달되어있는 구간으로 지층의 교란이 심하며, 습곡 작용에 의한 퇴적 지층의 파괴현상으로 절리 및 파쇄대가 발달하여 암반등급이 불량한 것으로 조사되었다. 또한 터널을 횡단하는 폐광이 5개소로 조사되었다.

지표지질 조사에 의한 지질구조는 슈라기 대보조산활동으로 지반의 습곡, 단층작용으로 층의 교란현상이 발생하였으며 대표적인 지질구조로 서측은 습곡이 발달하고 동측인 추진역 일대는 트리스트 단층인 동고단층, 어룡단층과 소규모의 역단층, 습곡이 발달하고 있다. 특히 동고단층은 터널 동측부에서 터널과 나란하게 터널북측에 발달하였다.

터널 내의 지층구성, 상태 및 암반등의 공학적 특성을 파악하고 터널의 구조 안전성 평가에 적용하기 위한 공학적 자료를 제공하기 위해 변상이 심한 구간중 4개 구간(그림 12참조)에 대해 터널내에서의 시

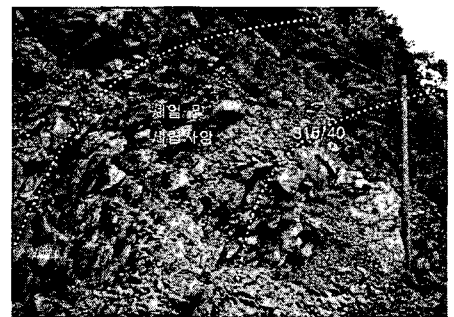


그림 11. 터널 중점부의 습곡

추조사, 수압시험, 공내재하시험, 지표지질조사와 같은 현장조사와 실내시험을 병행하였다.

시추조사 결과 표 3과 그림 14와 같이 TB-1, TB-2는 라이닝 콘크리트와 암반면이 밀착되어 있으며 콘크리트는 철근(D13)보강된 상태이다. 터널내 지층은 동고층의 세일의 연암층으로 구성되어 있으며 배사와 향사 구조의 습곡이 반복되는 지역으로 구조적으로 매우 불안정한 구간으로 조사되었으며, TCR은 23~92%, RQD는 0%로서 매우불량한 것으로 조사되었다.

그리고 TB-3, TB-4의 시추조사 결과는 라이닝 콘크리트와 암반 굴착면은 틈이 없이 밀착되어 있으며 콘크리트는 철근(D15, D22)으로 보강된 상태로 조사되었다. 터널내 지층은 동고층의 세일층 및 역질 사암으로 구성된 연~경암층이며 배사구조의 우측 날개부(Wing)지역에 해당되는 것으로 조사되었고 시추조사에서 확인된 시추 코어의 TCR은 35~100%, RQD는 0~83%로서 습곡구조에 의한 절리가 많이 발달된 상태로 조사되었다.

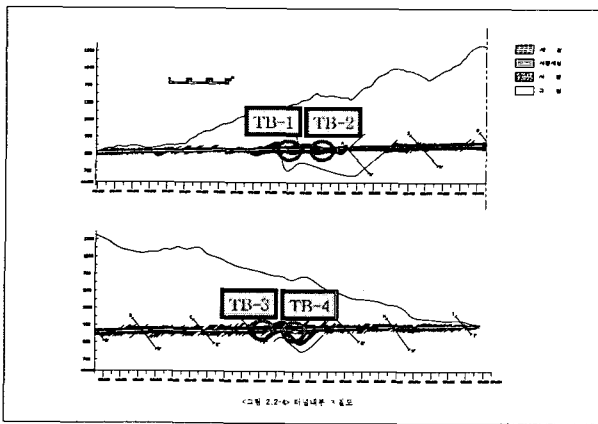


그림 12. 터널내부 지질도

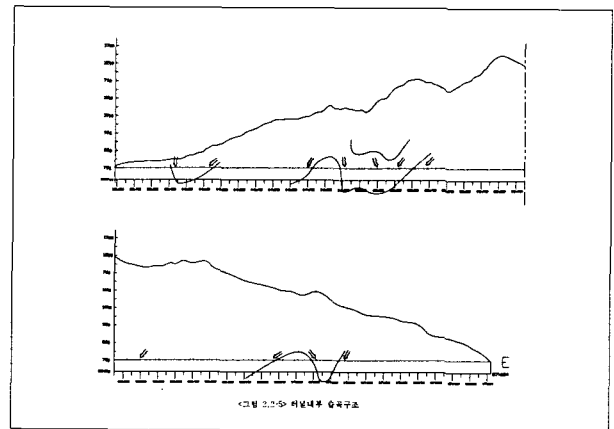
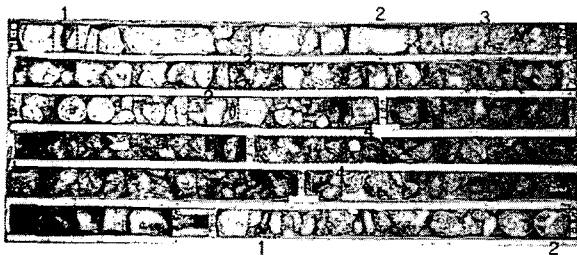
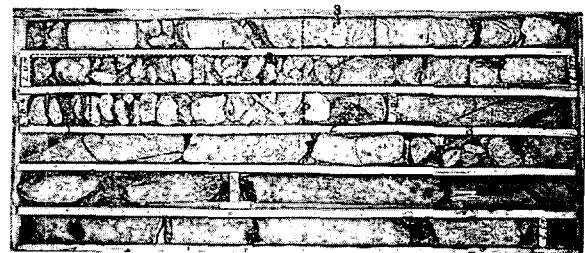


그림 13. 터널내부 습곡구조

시추 코어를 대상으로한 암반 분류 결과(표3, 그림 14참조) RQD에 의한 분류는 시추공 TB-1, TB-2, TB-3은 매우 불량(V등급)하고, 시추공 TB-4는 보통(III등급)의 암질지수를 나타냈고 RMR 분류법에 의한 암반 분류는 TB-1, TB-2, TB-3은 불량(IV등급), TB-4는 보통(III등급)인 상태로 조사되었다. 터널 굴착시 작성된 지질 단면에 의하면 배사 및 향사구조의 습곡이 발달하는 구간으로 지층의 교란이 심하며, 습곡작용에 의한 퇴적 지층의 파괴현상으로 절리 및 파쇄대가 발달하므로 인하여 암반등급이 불량한 것으로 추정되었다.



(a) TB-1, TB-2, TB-3



(a) TB-3, TB-4

그림 14. 시추코어 사진

표 3. 시추코어 결과

TB-1, TB-2				TB-3, TB-4			
번호	내용	번호	내용	번호	내용	번호	내용
①	철근 (D13, D16)	②	Lining과 암반접합부 상태 양호	①	철근 (D22)	②	Lining과 암반접합부 상태 양호
③	암반 파쇄대	④	Grouting 흔적	③	파쇄대(단층, 파쇄대)		

4. 안전성검토

터널 주변이 불안정하고 터널 천단부에 보강라이닝을 시공한 구간중 아치부에 종방향 균열 및 박리, 박락이 심한 구간에 대해 터널의 구조 안전성을 검토하였다. 안전성 검토를 위하여 보편적으로 사용하고 있는 지반해석 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis Continua) 3D를 이용하였으며 지반의 배면공동(20cm)을 고려한 해석을 수행하였다.

본 해석의 물성치 및 기초자료를 활용하기 위해 각종 현장시험과 시추조사, 실내시험등 지반조사를 실시하여 수치해석에 반영하였다. 대상 터널의 지반은 습곡이 매우 발달한 지형임으로 측면 토압과 수직 토압의 비가 상대적으로 크게 나타날 수 있으므로 이를 고려하여 K(토압계수)값을 다르게 구조 검토를 수행하였다. 또한 보수·보강 효과를 검증하기 위해 인버트 부위에 버팀빔 설치, 아치부 라이닝 배면의 공동충전, 라이닝 배면 3m구간을 그라우팅하는 것으로 모델링(표 5참조)하였고, 지반보강효과와 시추조사결과를 고려하여 물성치를 적용하였다.

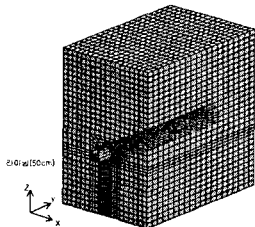


그림 15. 터널의 모델링과 배면공동의 상세

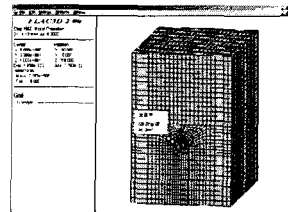
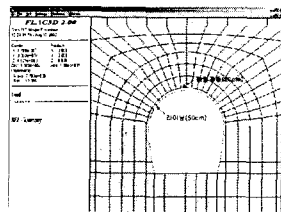


그림 16. 라이닝 주변 지반 보강부의 모형

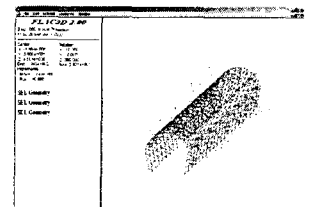


표 4. 적용 물성치

구 분	토 사	연 압	터널 인접부 TB-3	라이닝 콘크리트	비 고
γ (tf/m ³)	1.8	2.3	2.3	2.35	
E ($\times 10^3$ tf/m ²)	2.5	60	22	1,500	
ν	0.35	0.3	0.3	0.23	
C (tf/m ²)	5.0	15.0	-	-	
ϕ (°)	30	24	-	-	

표 5. 보강구간 물성치

구 분	보강부 지반(라이닝 반경 3m)	인장볼트	버팀빔	경량기포 콘크리트
γ (tf/m ³)	2.2	7.8	7.8	1.80
E ($\times 10^3$ tf/m ²)	50	2.1×10^6	2.1×10^6	500
ν	0.3	0.3	0.3	0.3
C (tf/m ²)	15.0	-	-	-
ϕ (°)	24	-	-	-

수치해석 결과에서 K값이 0.5인 경우 보다 1.0인 경우에 수평토압이 크게 작용하게 되면 터널의 수평 변위가 증가하는 것을 알 수 있고, 아치부의 수직 변위보다 측벽부가 위로 들리는 양상을 보이는데 이는 횡방향 토압의 작용으로 인해 배면공동쪽으로 터널 라이닝이 운동하고 있는 것으로 판단되었다.

천단부 라이닝 배면에 약 20cm의 공동이 존재할 경우를 고려하여 해석한 결과 콘크리트 라이닝에 작용하는 전단응력 및 압축응력은 K값이 0.5와 1.0인 경우 모두 콘크리트 허용응력 이내로 근접함을 알 수 있었다. 그러나, 보강효과 미고려시 K=1.0일 경우에는 최대 압축응력이 허용압축응력과 거의 동일하게 나타나 충분한 안전을 확보하기에는 미흡한 것으로 분석되었다. 또한, 최종 수직 및 수평변위는 k=0.5인 경우 20mm와 24mm로 나타나고 있으며 K=1.0인 경우 수직 및 수평변위가 25mm와 30mm의 값을 나타내고 있으므로 გადა변위에 대한 대책이 필요하다고 판단되었다. 사용된 두가지의 K값을 비교하여 보면 주변 지반이 불량한 상태와 습곡지형을 반영하기에는 K=1.0정도가 적당하다고 판단되었다.

보수·보강을 실시한 후의 터널 응력상태는 양호한 것으로 분석되었다. 특히 아치형태의 라이닝부에서 보강전과 국부적으로 발생되었던 라이닝 인장응력이 해소되어 모두 양호한 압축응력의 형태로 나타났다.

표 6. 수치 해석 결과

구 분	보강효과 미고려		보강효과 고려		비 고
	K=0.5	K=1.0	K=0.5	K=1.0	
최대전단응력(kgf/cm ²)	2.1	2.4	2.0	2.1	허용전단응력 (kgf/cm ²) $\tau_{ca} = 2.5$ 허용 휨압축응력 (kgf/cm ²) $\sigma_{ca} = 40.00$ 허용 휨인장응력 (kgf/cm ²) $\sigma_{ta} = 4.2$ (측벽부 $f_{ck} = 100$ 기준)
최대휨압축응력(kgf/cm ²)	35.4	40.2	28.2	32.4	
최대인장응력(kgf/cm ²)	2.6	3.1	0.0	0.0	
최대변위	수직(mm)	20.0	25.0	10.0	
	수평(mm)	24.0	30.0	12.0	24.0

* $\tau_{ca} = 0.25\sqrt{f_{ck}}$ (무근콘크리트), $\tau_{ca} = 1.15\sqrt{f_{ck}}$ (철근콘크리트), $\sigma_{ca} = 0.4f_{ck}$, $\sigma_{ta} = 0.42\sqrt{f_{ck}}$

5. 변상 원인 대책

결함 및 손상(단차균열, 박리, 박락으로 동반한 아치부 종방향 균열등)이 심하게 발생한 구간에 대한 결함과 손상의 이력관리와 내공변위 측정자료는 현재 거의 없는 상태이기 때문에 결함 및 손상의 원인

과 진행성 여부등에 대한 정확한 판단은 곤란한 상태이다. 그러나 금번 정밀안전진단 기간동안 실시한 내공변위 계측은 비록 기간이 짧은 상태이나 단면폭 측정 및 단면측량 결과, 외관조사 결과, 갱내 지질 조사 결과 등과 종합적으로 분석할 때 일부 구간에서 변위 및 변형 발생가능성이 높은 것으로 판단되었다.

결함 및 손상의 원인으로는 터널 주변지반이 퇴적암의 습곡현상 지역이며 주로 사암과 세일층이 형성되어 있는 상태로 입·출구부는 계곡부에 위치해 있는 터널의 입지 조건상 지반조건이 매우 불리한 곳에 위치하고 있다. 결함 및 손상이 심하게 발생한 구간은 대부분 보강라이닝이 설치된 구간으로 원라이닝 상태를 세밀하게 확인할 수 없지만 라이닝 부위 천공결과, 보강라이닝 파손부위 배면에 원라이닝 파손된 상태, 1998년부터 2001년 사이에 보수·보강시 보강라이닝 철거후 원라이닝의 상태를 확인(2개소)한 결과 원라이닝이 파손되면서 상부로 변형된 점들을 고려할 때 원라이닝 배면에 공동 및 공극이 있는 상태에서 터널 주변의 취약한 지반상태로 인해 소성압 등에 의한 측압이 크게 작용되어 취약한 아치부 라이닝 콘크리트가 손상된 것으로 판단되었다.

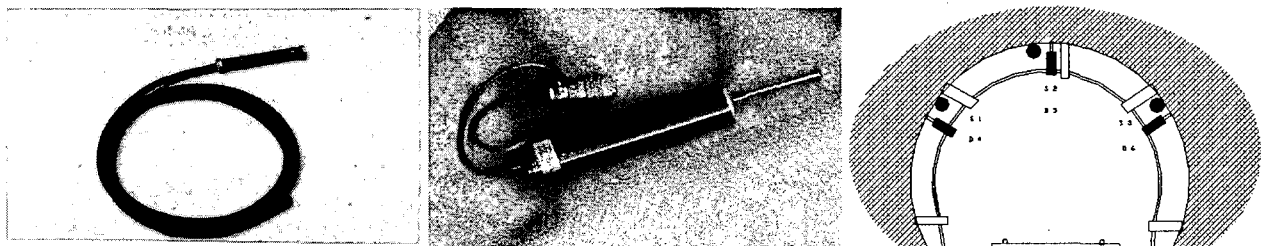
따라서 변위 및 변형 진행여부를 확인후 보수·보강 방안을 수립하여야 하나 아치부 종방향균열(단차, 박리, 박락 병행)이 심하게 발생한 구간은 콘크리트의 박리 및 박락 등으로 인해 열차의 안전운행에 악영향을 미칠 수 있으므로 신속한 보수·보강을 실시하고 정밀안전진단시 실시한 계측을 지속적으로 실시하고 필요시 계측위치를 증가하여 터널의 변형 및 변위의 진행여부와 보강공사시 보수·보강효과를 확인하여야 할 것으로 판단되었다.

보강은 결함 및 손상정도에 따라 4등급으로 분류하여 시공하였으며 주요공정은 버팀빔설치, 단면복원 공법, 자천공 압입볼트설치, 뒷채움 주입공법, 배면 그라우팅 등으로 시공하였다.

6. 자동화 계측

금번 진단시 변상이 발생하고 내공변위 측정결과 변위량이 1mm이상 발생한 구간 11개 단면에 대하여 보수·보강을 실시한 후 계측을 통한 지속적인 유지관리로 예상치 못한 문제점등을 조기에 발견하고 효율적인 대처를 하고자 자동화 계측시스템을 설치하였다. 자동화 계측은 관리사무실의 원거리 위치, 주기적인 접근 및 계측곤란, 계측시 전기 차단 및 단전, 실시간계측 및 계측빈도 등을 고려하여 원격지에서 실시간으로 data를 측정할 수 있도록 시스템을 구성하였으며 1차 측정(2001.12~2002.7)을 실시하였다. 표7과 그림 18은 11개 단면중 대표적인 3개단면에 대한 내공변위 및 변형률 조사결과로 현재까지는 측정값이 크게 변화하는 양상은 없는 상태로 지속적인 측정이 이루어지고 있다.

대부분의 구간에서 수렴하는 것으로 조사 되었으나 몇 개소에 대해서는 일시적인 변형이 생기다가 수렴하는 것으로 조사되었다.



(a) 변형률계

(b) 변위계

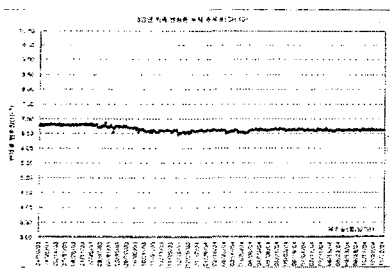
(c) 단면도

그림 17. 내공변위 계측 시스템 기기 및 단면도

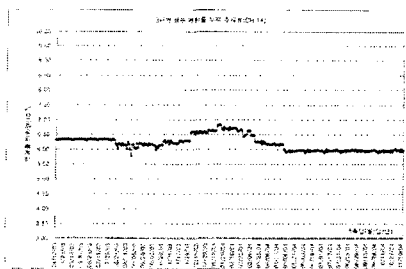
표 7. 내공변위 및 변형률 조사결과

(단위: 변형률 100×10^{-6} , 터널내공변위mm)

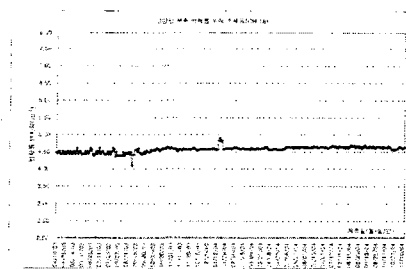
단 면	위 치	계 측 기 명	최대변화량	최종변화량	비 고
1 단 면 (SRO)	좌측(CH01)	변 형 률	-1.084	-0.634	안쪽으로 변화
	상부(CH02)	변 형 률	-0.752	-0.396	안쪽으로 변화
	우측(CH03)	변 형 률	0.551	-0.120	안쪽으로 변화
	좌측(CH04)	터널내공변위	0.841	0.074	안쪽으로 변화
	상부(CH05)	터널내공변위	1.079	0.262	안쪽으로 변화
	우측(CH06)	터널내공변위	-1.222	-0.182	바깥쪽으로 변화
2 단 면 (SRO)	좌측(CH07)	변 형 률	1.153	0.786	바깥쪽으로 변화
	상부(CH08)	변 형 률	1.860	0.173	바깥쪽으로 변화
	우측(CH09)	변 형 률	0.972	0.073	바깥쪽으로 변화
	좌측(CH10)	터널내공변위	0.618	0.326	안쪽으로 변화
	상부(CH11)	터널내공변위	-0.635	-0.309	바깥쪽으로 변화
	우측(CH12)	터널내공변위	-0.524	-0.043	바깥쪽으로 변화
3 단 면 (SRO)	좌측(CH13)	변 형 률	-0.327	-0.173	안쪽으로 변화
	상부(CH14)	변 형 률	-0.547	-0.349	안쪽으로 변화
	우측(CH15)	변 형 률	0.430	0.175	바깥쪽으로 변화
	좌측(CH16)	터널내공변위	-0.460	0.167	안쪽으로 변화
	상부(CH17)	터널내공변위	0.761	0.256	안쪽으로 변화
	우측(CH18)	터널내공변위	-0.655	-0.141	바깥쪽으로 변화



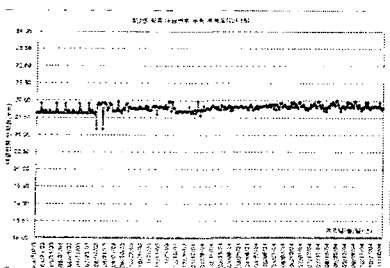
(a) 좌측 변형률



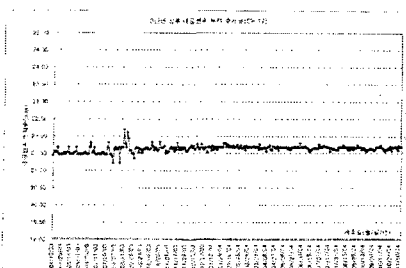
(b) 상부 변형률



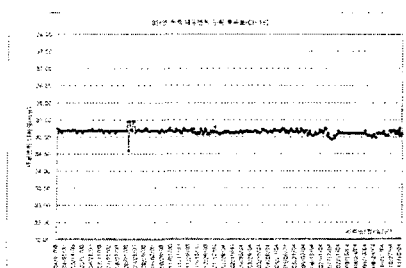
(c) 우측 변형률



(e) 좌측 내공변위



(f) 상부 내공변위



(g) 우측 내공변위

그림 18. 자동계측 시스템을 이용한 내공변위 측정 결과도(3단면)

7. 결론

본 연구에서는 재래식 공법에 의해 설계된 철도터널에 대해 터널 라이닝 콘크리트에 발생한 변상구간에 대해서 내공변위 계측 및 단면측량 등의 비파괴 조사와 외관조사를 실시하여 그 원인을 분석하였고 보수·보강이 실시되기 전과 실시된 후의 터널양상을 분석하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 또한 보수·보강후에 터널의 내공변위 등의 변화여부를 조사·분석하기위해 자동계측시스템을 설치하여 유지관리를 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 정밀안전진단 조사결과 주요한 결함 및 손상, 변상내용은 균열(중·사·횡방향 균열 및 단차균열), 누수, 박리, 박락, 압좌파손, 아치부 보강라이닝 파손 및 들뜸, 재료분리, 액체방수 모르타 들뜸, 라이닝 배면공동 등과 보수·보강으로 인해 많은 구간에서 건축한계가 저축되는 것으로 조사되었다.
- (2) 이러한 결함, 손상, 변상들은 주로 내적인 요인(시공불량 등)과 환경적인 요인에 의해 발생되었으나 아치부 종방향균열(단차, 박리, 박락 포함)이 심하게 발생한 구간은 토피고가 비교적 큰 구간중 터널주변의 지반강도가 부족하여 발생하는 소성압 등이 작용하여 발생한 것으로 판단되었다.
- (3) 재래식 터널의 경우 천단부 압축균열 및 아치부 단차균열에 대한 조사를 면밀히 검토해야하고 특히 토피고에 비해 현저히 터널주변 지반의 강도가 적은 경우는 변상조사를 철저히 하여야 한다.
- (4) 철도터널의 경우 보강라이닝을 실시한 구간은 보강라이닝 시공의 원인을 확인하여야 하고 보강라이닝과 원라이닝과의 밀착상태, 보강라이닝 배면의 원라이닝의 변상상태 등을 조사하여야 한다.
- (5) 본 터널과 같은 조건의 지반상태의 경우에는 변상의 조사, 원인분석과 보수·보강공법 선정시 터널관련 자료를 충분히 분석하여 주변지반의 상태를 분석하여 실시하여야 한다.
- (6) 공용중인 터널에서 변상이 심한 경우 교통처리의 어려움, 접근곤란, 계측을 위한 전기차단 등을 고려하여 자동화 계측을 추천하며 공용중의 장기계측이 이루어지지 않은 경우는 양호한 단면과 변상이 발생한 단면을 측정 분석하여 현재상태의 변위발생 유무와 속도등을 추정하여야 한다.

참고 문헌

1. 건설교통부, 한국시설안전기술공단(2003), “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침”
2. 한국 터널공학회(2002), “터널의 이론과 실무”
3. ○○터널 내공변위 계측 종합보고서(2001,1), 철도청
4. 변상터널 대책공설계매뉴얼 :(재)철도종합 기술연구소(일본,1999)
5. 한국 콘크리트학회(1993), “콘크리트 구조물의 비파괴 검사 및 안전진단”
6. 삼척탄좌 지질도(1979), 자원개발 연구원
7. 화전지역 지반안정성 조사보고서, 석탄산업 합리와 사업단
8. 日本道路公団(1998), 設計要領 第3集 “トンネル本体工 施工編”
9. Itasca Consulting Group(1991), Flac-2D Manual, Inc., Minesota, U.S.A.