

기존터널 건전도 평가를 반영한 터널 안정성 평가

김석재, 김민석, 김준철, 유영일, 오정배 ((주)삼보기술단 지반공학부)

1. 서 론

최근 국토의 효율적인 이용을 위해 기존 구조물 근접시공 사례가 급증하여 그 영향예측이나 대책공 등의 기술적인 검토에 보다 높은 정밀도가 요구된다. 즉, 기존터널에 근접해서 신설공사가 계획·실시된 경우에 상호의 안정성을 확보할 수 있는 합리적인 사전조사·영향예측·대책공·안전감시가 필요하다.

본 논문에서는 ○○○ 인입철도 건설공사 구간 중 ○○ 인입도로 개설공사로 인한 대절토 사면과 기존터널 사이를 근접 통과하는 구간에 있어 기존 터널의 안정성 확보를 최우선하기 위해 건전도 평가 결과를 반영한 안정성 검토 수행 및 터널의 안전확보를 위해 검토·반영된 사례 분석을 통해 그 내용을 기술하고자 한다.

2. 주변현황 및 지질

본 구간은 ○○○ 서측배후철도 구간으로 기존에 재래식 단선 철도터널이 위치하고 있으며 우측으로 서측배후도로가 시공중에 있다. 기존터널과 서측배후도로 사이로 증가되는 교통량의 확보를 위하여 신설터널이 기존터널과 약 16~28m 이격하여 시공된다. 시점부 기존터널과 신설터널의 최단거리는 9~12m로 근접하여 있고 터널 종점부는 기존터널과 26~28m 이격되어 있으며 15m 이격하여 상부에 민가가 위치하고 있다. 또한 신설터널의 공사가 완료될 때까지 기존 터널을 통하여 열차운행이 계속되므로 터널공사시 진동, 소음에 의한 인근 횃집 등에 피해를 최소화할 수 있는 방안과 기존 터널의 구조적 안정성 확보로 기존 열차운행에 장애를 주지 않아야 한다.

분포암층은 사암과 세일이 호층을 이루는 층리가 발달한 퇴적암 지대로 터널통과시 주의를 요하고 그림 1은 터널 평면으로 주변현황을 보여주며 표 1은 주요 지점별 횡단현황이다.

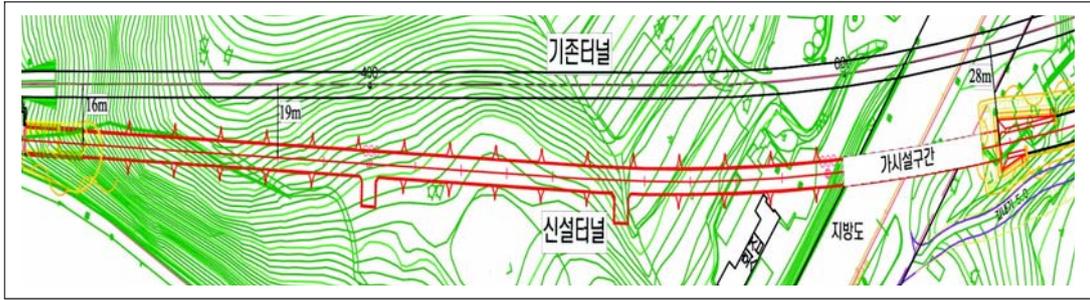


그림 1. 터널평면 현황

표 1. 주요지점별 횡단 현황

구분	터널 시점부	터널 종점부
횡단	<p>암반등급 IV 기존터널 신설터널 16m 9m STA. 0km 480</p>	<p>암반등급 III 기존터널 신설터널 26m 19m 1.5m STA. 0km 780</p>
고려 사항	<ul style="list-style-type: none"> 터널은 암반등급 IV에 위치 기존터널과 신설터널이 최단거리가 9m로 발파진동 제어대책 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 터널은 양호한 암반등급 III에 위치 횡단통과구간으로 발파진동 제어대책 필요

3. 기존터널 건전도 평가

3.1 외관조사 현황 및 조사결과

기존 터널의 라이닝은 구조적 위험성을 내포하는 종방향 균열은 없으며 건조수축에 의한 횡방향 균열이 다수 발견되고, 횡방향 균열은 누수를 동반한 경우가 많다. 이는 라이닝의 구조적 안정성에 큰 문제가 없는 것으로 판단되지만 횡방향 균열들이 누수를 동반한 경우가 많아 장기간 사용을 위한 유지관리 측면에서 보수보강이 요구되며 그림 2는 기존터널 외관조사 결과를 나타낸다.

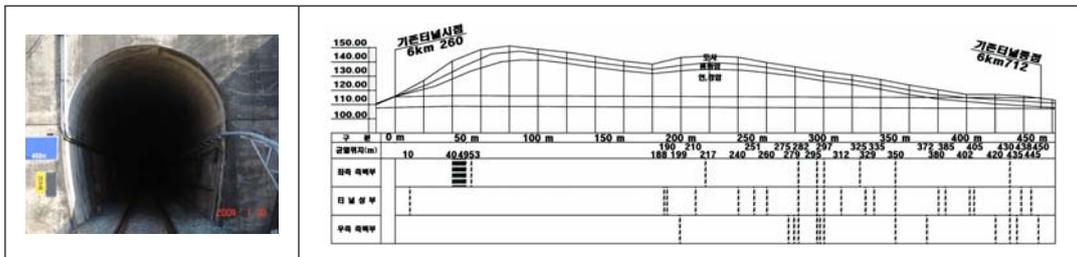


그림 2. 외관조사결과도

3.2 콘크리트 강도 조사 결과

슈미트 햄머를 이용하여 비파괴 압축강도를 추정한 결과 설계기준강도 160kgf/cm²을 초과한 188~200kgf/cm² 강도를 보여주었고 콘크리트 라이닝에서 코어를 채취하여 압축강도를 측정된 결과 또한 178kgf/cm²으로 설계기준강도를 초과하여 콘크리트 라이닝은 강도측면에서 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

3.3 콘크리트 중성화 분석 결과

채취한 시료와 드릴링한 구멍에 페놀프탈레인 용액을 뿌려 중성화가 진행된 깊이를 확인한 결과 최대 1cm 이하로 중성화는 거의 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있었다.

3.4 콘크리트 염분량 조사 결과

채취된 시료에 포함된 염소이온량은 콘크리트 설계기준에서 제시된 허용염소이온량 0.3 kg/m³보다 높은 0.85~1.09kg/m³(산가용성염소이온 1.21~1.56kg/m³) 정도로 콘크리트 설계기준의 허용염소이온량(허용염소이온량은 시공직후 해사 사용등에 의해서 콘크리트 내부에 존재해도 되는 자유염소이온량 값이다)을 초과하나 이것은 해안으로부터 500m이내의 구조물이기 때문에 비래염분의 영향을 받아 표면부 콘크리트의 염소이온량이 커진 것으로 판단된다.

한편 철근의 부식과 관련한 내구성 측면을 살펴보면 부식이 시작될 위험이 큰 임계염소이온량 1.2kg/m³보다 작아 염해에 의한 부식은 발생하지 않았을 것으로 평가되었다. 그러나, 장기적으로는 비래 염분에 의한 철근부식이 진행될 가능성이 크므로 향후 이에 대한 적절한 대책이 필요하다고 사료되며, 표 2은 라이닝의 염소이온 분석결과를 보여준다.

표 2. 라이닝의 염소이온 분석결과

채취깊이 (cm)	산가용성염소이온 (kg/m ³)	자유염소이온량 (kg/m ³)	허용염소이온량 (자유염소이온)(kg/m ³)	허용임계염소이온량 (자유염소이온)(kg/m ³)
0~1	1.56	1.09	0.3	1.2
1~2	1.21	0.85	0.3	1.2
2~3	1.40	0.98	0.3	1.2

3.5 균열깊이 측정 결과

라이닝 두께 30cm에 비해 균열의 깊이는 9.1~12.5cm 정도로 작은 편이어서 라이닝의 구조적 안전성에는 큰 문제가 없는 것으로 사료된다.

3.6 건전도 평가결과

라이닝의 안정성에서 중요한 종방향 균열이 없고 비파괴 조사 결과 요구되는 강도를 발휘하고 있어, 구조적 안전성을 충분히 확보하고 있는 것으로 판단되며 표 3을 참조하여 C등급으로 판정되었다.

표 3. 건전도 판정구분

판정구분	운전보안등에 대한 영향	형상의 정도	조치
AA	검증	중대	바르게 조치
A1	조기에 위협 이상외력의 존재시 위협	형상의 변형이 진행하고, 기능저하도 진행	지급 조치
A2	장래에 위협	형상의 변형이 진행하고, 기능 저하의 우려	필요한 기간에 조치
B	진행하면 A랭크로 된다.	진행하면 A랭크로 된다	감시(필요에 따라 조치)
C	형상에서는 영향 없음	경미	중점적으로 검사
S	영향없음	없음	-

4. 근접시공시 검토사항

근접시공이 계획된 경우에는 근접도의 구분에 응해서 현장조사, 영향예측, 대책공, 안전감시에 대해서 충분히 검토하여 적절한 조치가 필요하며 근접시공대책의 순서는 그림 3과 같으며 표 4는 근접도의 구분 기준을 나타낸다.

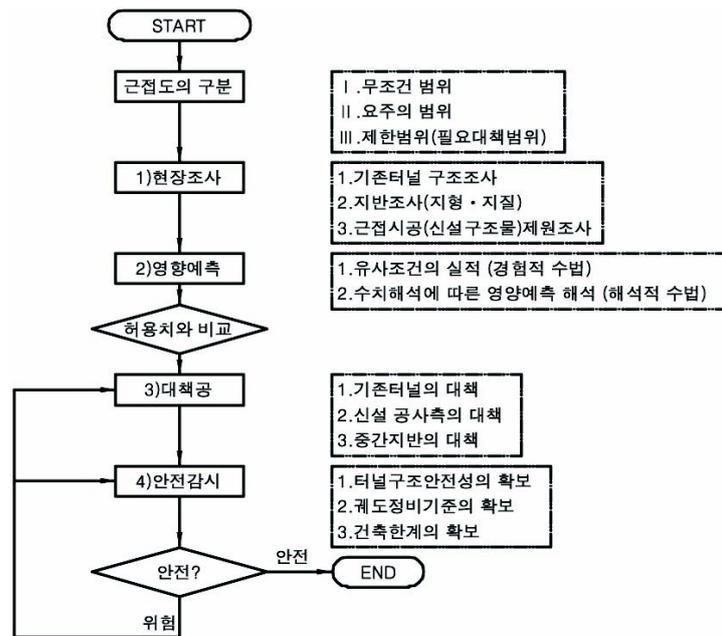


그림 3. 근접시공대책의 순서

표 4. 근접도의 구분(D':신설터널 외경)

양 터널의 위치관계	터널의 이격	근접도의 구분
신설터널이 기존터널보다 위에 위치	1D'미만 1 ~ 2.5D' 2.5D' 이상	제한범위(필요대책범위) 요주위 범위 무조건 범위
신설터널이 기존터널보다 밑에 위치	1.5D'미만 1.5 ~ 2.5D' 2.5D' 이상	제한범위(필요대책범위) 요주위 범위 무조건 범위

본 설계구간의 터널제원을 살펴보면 기존터널의 폭 6.9m, 높이 7.5m이고 신설터널의 경우 폭 7.4m, 높이 8.0m로 계획하였다. 또한 터널간 최단거리는 9~20m(1.1D'~2.5D')로 근접도 분류상 요주의 범위에 속한다.

5. 기존터널 안정성 검토

영향 예측 방법으로 유사시공 실적을 이용한 경험적 방법과 영향예측의 참고가 되는 비슷한 예가 없는 경우 또는 기존 터널에 악영향이 예측되는 경우 해석적 방법에 의한 영향 예측 방법이 있다. 본 연구는 건전도 평가보고서를 바탕으로 후자의 방법을 이용하여 기존 터널의 안정성을 검토하였다.

5.1 변위 및 응력기준

국내외 문헌을 참조하여 변위기준을 정하였고 기존터널의 설계기준강도 160kgf/cm^2 을 고려하여 표 5.1.1과 같은 허용변위 및 응력 기준을 정하였다.

표 5. 허용변위 및 응력

구 분	경암지반	연암지반
천단변위(mm)	10	20
내공변위(mm)	20	
허용휨압축응력(kgf/cm ²)	64	

5.2 신설터널 굴착에 따른 영향

기존터널의 건전도 평가결과 시점부인 6km290 지점에서 건조수축에 의한 횡방향 균열들이 다수 군집해 있으며, 중점부 6km585~6km665 구간에서는 신설터널의 개착에 의한 영향 검토를 위하여 3차원 유한소요해석 프로그램인 VisualFEA를 이용한 연속체 해석을 수행하였으며 사용된 물성은 표 6과 같다.

표 6. 입력물성

구 분	탄성계수(t/m ²)	단위중량(t/m ³)	포아송비(v)	내부마찰각(°)	점착력(t/m ²)
토 사	1,500	1.8	0.35	25	1
암반등급V	1,000	2.0	0.30	28	10
암반등급IV	45,000	2.1	0.28	30	30

표 7. 해석결과도

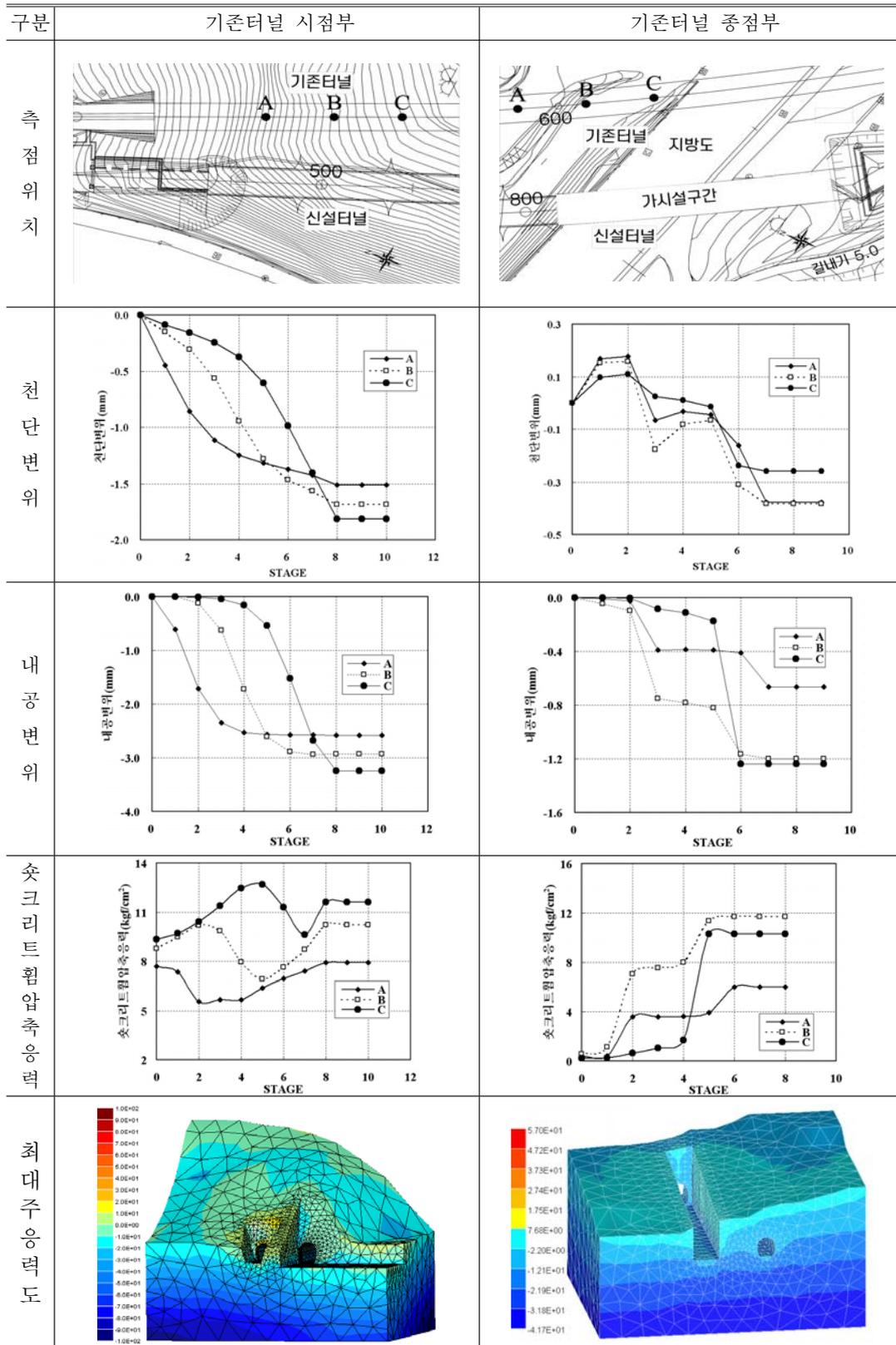


표 7은 신설터널 시공단계에 따른 기존터널의 측점별 결과를 나타내고 있다. 시점부 해석결과 천단침하량 1.8mm, 내공변위량 3.2mm, 라이닝 최대 휨압축응력은 12.6kgf/cm²로 허용치 이내로 안정하게 나타났으며 종점부 해석결과 천단침하량 0.4mm, 내공변위량 1.2mm, 라이닝 최대 휨압축응력은 11.7kgf/cm²로 허용치 이내로 안정하게 나타나 신설터널의 시공에 따른 기존터널의 안정성에는 이상이 없는 것으로 나타났다.

6. 기존터널 발파에 따른 영향

기존터널과 신설터널의 최단거리는 시점부에서 9~12m로 근접도 구분상 요주위 범위에 속하며 종점부는 민가와 인접하여 진동과 소음을 허용치 이내로 제어할 필요가 있다.

6.1 발파진동식 결정 및 진동 규제기준선정

경험식에 의한 발파진동식은 현장 여건을 반영하지 못하므로 시추공 시험발파(2개소) 실시 후 진동식을 산정하고 인접, 현장자료와 비교분석 수행하였으며 암석물성치를 고려하여 발파진동식을 재산출 하였다.

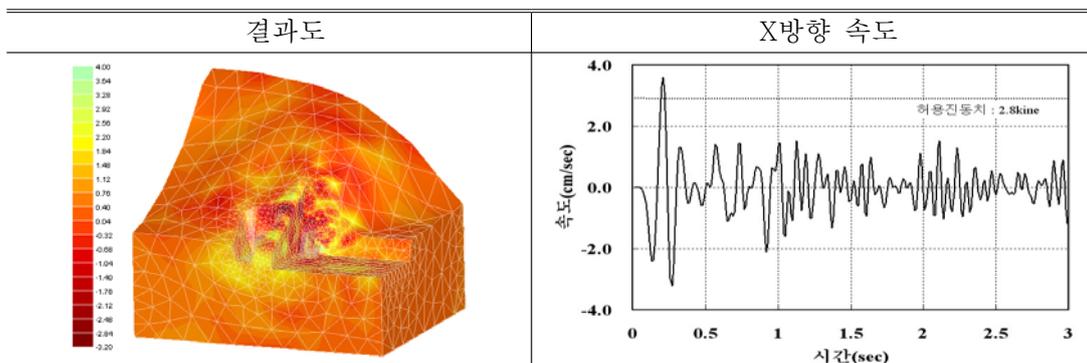
국내외 진동 허용기준 및 법원판례를 참조하여 콘크리트 균열한계를 검토한 결과 기존터널의 경우 2.8kine, 민가 구조물(횃집)은 0.3kine으로 규제기준을 설정하였다.

6.2 발파영향 평가 및 대책

신설터널의 발파에 의한 영향 검토를 위하여 3차원 유한요소해석 프로그램인 VisualFEA를 이용한 발파동해석을 수행하였으며 표 8은 신설터널 발파시 터널시점부 인접구간에 대한 발파영향평가 결과를 보여주고 있다. 시점부 해석결과 기존터널 측벽부에서 최대지반진동치가 3.6kine으로 허용치 2.8kine을 초과하므로 대개 30% 방진효과가 예측되는 라인드릴링을 적용하였으며 진동최소화를 위해 선대구경 수평심발을 병용하였다.

종점부 민가 구간은 기존터널 천단부에서 진동치가 3.2kine으로 라인드릴링 적용으로 진동제어가 가능하지만 민가의 진동치가 2.4kine으로 허용치 0.3kine을 과대하게 초과하므로 무진동 압파쇄공법을 적용하였다.

표 8. 시점부 해석결과도



7. 대책방안

본 설계구간은 근접도 분류상 요주의 범위에 속하므로 터널굴착시 현장조사나 영향예측을 통하여 신설터널의 영향이 최소화 되도록 배려하여야 하며 기존 터널의 변형이 현저한 경우에 기존 터널에 대한 대책 또한 강구하여야 한다.

7.1 기존터널의 대책

기존터널 건전도 평가결과 구조적 안전성을 충분히 확보하고 있고 근접도를 고려하면 대책공은 필요하지 않지만 신설터널의 발파 등에 의한 진동의 영향을 받아 구조적 문제가 발생할 수 있으므로 터널 시공시에 정밀 계측을 통한 안전성 확보가 요구된다.

계측은 근접공사에 따른 영향을 감시하고 관리기준치를 체크하는 것과 동시에 사전단계에 대한 영향예측의 타당성을 검증할 목적으로 시행되며 근접공사는 사전에 영향을 예측하는 것이 곤란하기 때문에 안전감시의 실시는 지극히 중요한 의미를 가지고 있다.



그림 4. Basset System
설치도

따라서 신설터널 시공중에 발생할 수 있는 기존구조물에 대한 영향을 평가하여 열차의 운행과 사용중인 구조물의 안정성의 확보를 위하여 그림 4와 같이 Basset System을 계획하였다. 유지관리 계측항목으로는 터널내 열차 운행에 지장이 없도록 기존터널 구간에 라이닝응력계, 내공변위계, 간극수압계 등을 설치하여 향후 신설터널 굴착시 기존터널의 변위 및 응력을 측정하도록 계획하였다.

또한 기존터널과 같은 ASSM 터널에서 라이닝 두께 부족이나 뒷채움 부족 등에 의한 배면공동이 존재할 경우에 라이닝의 응력상태가 불균등하게 되고 라이닝의 변형에 기인하는 표면의 균열, 박리·박락이 생길 위험성에 대비해서 시공에 앞서 뒷채움주입공을 실시하고 붕락과 라이닝의 내력이 현저하게 저하할 우려가 있는 경우 미리 낙하방지공을 시행해 둘 필요가 있다.

근접공사의 영향에 따라 라이닝이 변형, 응력 증가가 우려되는 경우에 터널 내공측에 H형강 등을 이용한 새들보강공을 실시하거나 라이닝 두께가 부족한 경우나 균열 등의 변상이 현저한 경우에는 내부 라이닝보강을 추가할 필요가 있으며 표 9는 병설터널의 경우에 근접대책공의 종류와 선택의 기준을 나타낸다.

표 9. 근접대책공의 종류와 선택의 기준

대책공사		터널의 병설	비고
기본공	뒷채움주입공	효과가 기대	
	라이닝조각낙하방지공	효과가 기대	
보강공	새들보강공	효과가 기대	
	내부라이닝보강공	효과가 기대	
	내면보강공	효과가 기대	
	록볼트보강공	효과가 기대	
	스트러트공	-	
보수공	깨어내기	효과가 기대	
	표면청소	경우에 따라서 효과를 기대	
	배수구정비	-	
	누수방지공	-	

7.2 신설 터널측의 대책

본 과업구간의 수치해석 결과 터널의 안정성에는 이상이 없지만 터널 시점부 근접구간과 종점부 민가 인접구간에서 허용 진동치를 초과하므로 이에 대한 대책공으로 시점부 근접구간에 라인드릴링 및 선대구경 수평심발을 적용하였고 종점부 민가 인접구간에 대해서는 무진동 압쇄공법을 적용하여 신설터널의 굴착으로 인한 영향을 최대한 경감시켰다.

7.3 중간지반의 대책

기존터널이나 근접공사측의 대책공사가 불충분한 경우, 또는 각각의 제약조건에 의해 대책공사가 곤란한 경우 약액주입공법 및 동결공법등으로 지반의 강도를 강화하기도 하고 재질 그 자체를 개량해서 영향을 경감하는 방법과 지하연속벽공법, 파이프루프공법, 강관갱공법등을 이용하여 공사의 영향을 차단하는 방법이 있다.

8. 결 론

- 본 설계사례는 기존 채래식 단선터널에 근접하여 터널을 건설하는 과업이며 기존 단선터널을 통하여 열차의 운행이 계속 이루어진다. 따라서 신설터널이 근접하여 시공되는 과정에서 발생할 수 있는 기존 구조물의 안정성 저해 및 이로 인한 열차 운행시의 안전성을 고려하여 기존터널의 건전도 평가를 반영한 터널안정성 검토 및 대책공법을 검토하였다.
- 기존터널의 건전도 평가 결과를 종합해 볼 때 라이닝의 안정성에서 중요한 종방향 균열이 없고 비파괴 조사 결과 요구되는 강도를 발휘하고 있어, 구조적 안전성을 충분히 확보

하고 있는 것으로 판단되지만, 기존터널에 근접하여 새로운 터널이 시공될 때, 발파 등에 의한 진동의 영향을 받아 구조적 문제가 발생할 수 있으므로 새로운 터널 시공시에 정밀 계측을 통한 균열폭, 변위량 변화에 대한 세심한 주의를 통한 안전성 확보가 요구된다.

- 터널이 신설될 경우 기존터널은 신설터널 쪽에 당겨지듯 변위·변형하고, 근접도가 두드러진 경우에는 기존터널 주변지반이 완만하게 되어 기존터널 라이닝에 작용하는 지압이 증대하므로 터널의 이격, 터널의 상대적인 높이의 위치관계, 신설터널의 크기, 신설터널의 시공법(특히 굴착방식), 지형·지질조건, 기존터널 라이닝의 구조와 건전도 등을 고려하여 대책공법을 선정하여야 한다.
- 기존터널의 안정성을 확보하기 위해 과업 전구간에 대해 선대구경 수평발파공법을 적용하여 막장 전방지질도 파악하고 기존터널에 미치는 영향을 최소화하도록 하였으며 시점부 근접구간에 대해서는 Line Drilling을 병용하여 진동과 소음을 허용치 이내로 제어하도록 계획하였다.
- 신설터널 종점부 민가 구간은 Line Drilling으로 기존터널의 진동제어가 가능하나 민가 허용기준을 만족시키지 못하므로 무진동 암파쇄공법을 적용하여 진동과 소음을 허용치 이내로 제어하고 민원 발생의 소지를 제거하였다.
- 근접된 기존 재래식터널의 라이닝이 원지반과 완전히 밀착되어 있다면 진동에 대한 안전도가 높지만, 천단부의 배면에 공동이 존재하여 라이닝이 독립적으로 진동하거나 큰 편차응력이 작용하는 경우에는 진동으로 인하여 라이닝에 균열이 발생하거나 붕락이 발생할 수 있으므로 기존 구조물에 대한 사전조사를 철저히 하여야 한다. 또한, 근접터널의 시공이 진행되는 동안 기존터널의 구조물변위와 라이닝 응력, 발파진동치 등의 유지관리계측을 실시하여 이상이 발생할 경우는 즉시 대책을 강구하여야 할 것이다.

■ 참고문헌 ■

1. ○○○ 서측인입철도 건설공사 설계보고서, 2005, 대우건설
2. 기존터널 근접시공 매뉴얼, 2000, 시설안전기술공단
3. 중앙선 ○○-○○○간 복선전철 건설공사 설계보고서, 2000, (주)유신코퍼레이션
4. 국내 재래식 터널의 변상현황과 배면공동 보강 사례연구, 2005, 한국지반공학회