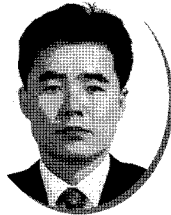


기존터널 근접시공 영향평가와 대책공법 설계사례



이 호
(주)에스코아이에스티
부 장
geotun@escoist.com



박 치 먼
(주)에스코컨설턴트
상무이사



황 제 돈
(주)에스코컨설턴트
사 장

1. 서론

최근 기간시설의 확충과 교통체증의 해소 및 지상 건축물과의 간섭을 최소화하기 위해 각종 시설물의 지하화 계획이 활발히 이루어지고 있다. 이에 따라 지상 시설물과 지하 시설물 또는 지하 시설물 상호간에 근접시공으로 인한 구조물 간섭이 빈번히 발생하고 있다. 이러한 근접시공의 영향을 고려한 적극적인 대책수립이 미흡할 경우에는 신설 구조물의 시공에 따라 기설 구조물에 균열, 누수, 박리 등이 발생하여 구조물의 안정성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 근접시공 조건에 있어서는 신설 구조물과 기설 구조물의 구조적 특징과 지반특성 등을 상세히 고려하여 설계 및 시공에 적용함으로써 근접 구조물간의 상호 간섭을 최대한 배제할 수 있는 대책공법을 계획하고 시공중 발생할 수 있는 예상 문제점을 사전에 충분

히 검토하여 설계에 반영하여야 한다. 본고에서는 다양한 시공조건에 따른 근접시공의 안정성 평가기준과 국내·외 사례를 분석하여 근접시공 및 지반공학적 특성을 고려한 시공영향을 검토하였으며, 상부 개착시공에 따른 하부 근접터널의 안정성 평가 내용 및 대책공법 사례를 고찰하였다.

2. 근접시공 평가기준

2.1 근접시공 분류

기존에 시공된 기설 구조물의 영향구간에 신설 구조물이 근접되어 시공되는 조건에 대한 일반적인 분류는 다음과 같다.(도시철도인접굴착공사 관리실무, 서울특별시 도시철도공사, 2001)

- ① 터널의 병설
- ② 터널의 교차

- ③ 터널상부의 개착
- ④ 터널상부의 성토
- ⑤ 터널상부의 구조물기초
- ⑥ 터널측부의 굴착
- ⑦ 터널근방의 앵커
- ⑧ 터널상부의 담수
- ⑨ 지반진동(발파작업 등)

이러한 근접시공 조건에 의한 외력의 변화는 안정한 상태에 있는 주변지반 및 기설 구조물에 추가적인 변위(특히 부(-)방향의 변위) 및 응력의 집중을 유발시켜 구조물의 손상을 발생시킬 수 있으며, 장기적인 측면에서 내구성의 저하로 인한 시설물의 공용기간을 단축시킬 수 있다. 근접 정도에 따른 시공가능 범위에 대해서는 국내·외 여러 기관에서 경험적으로 제시하고 있으며, 특히 신설 구조물과 기설 구조물의 규모와 위치관계를 고려하여 안전영역(Safety Zone)의 범위를 규정하고 있다.

2.2 근접시공에 따른 안전영역의 평가

근접시공의 분류 중 최근 빈번하게 발생하는 조건은 ① 터널의 병설, ② 터널의 교차, ③ 터널상부의 개착, ④ 터널상부의 성토, ⑤ 터널상부의 구조물기초의 경우이며, 각 경우에 따른 근접 정도별 안전영역의 정량적 평가를 살펴 보면 다음과 같다.(서울특별시 도시철도공사, 2001)(표 1~3)

근접시공의 근접도 구분은 크게 제한범위, 요주의 범위, 무조건 범위로 구분되며, 제한범위는 신설 구조물의 시공 시 적극적인 대책수립이 필요한 영역으로 구분하고 특히 제한범위와 기설 구조물 사이 공간은 보호층으로 규정하여 이 범위에는 신설 구조물의 침범을 적극적으로 제한하고 있다. 그러나 현실적으로 신설 구조물의 평면 및 종단 계획을 수립함에 있어서 피치 못하게 보호층을 침범하는 경우가 종종 발생하고 있으며, 이와 같은 경우는 경험적

표 1. 터널의 병설에 따른 안전영역

위치관계	터널이격	근접도 구분
신설터널이	1D' 미만	제한범위(필요대책범위)
기설터널 보다	1~2.5D'	요주의 범위
위에 존재	2.5D' 이상	무조건 범위
신설터널이	1.5D' 미만	제한범위(필요대책범위)
기설터널 보다	1.5~2.5D'	요주의 범위
아래에 존재	2.5D' 이상	무조건 범위

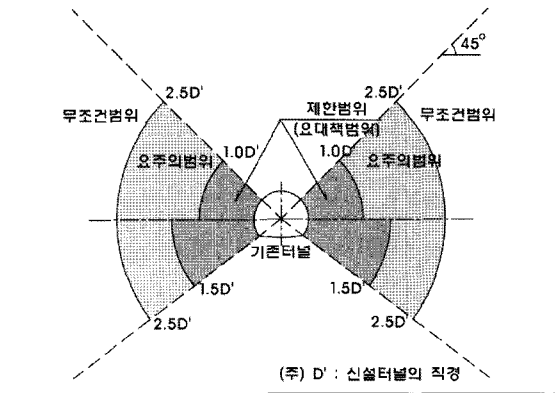
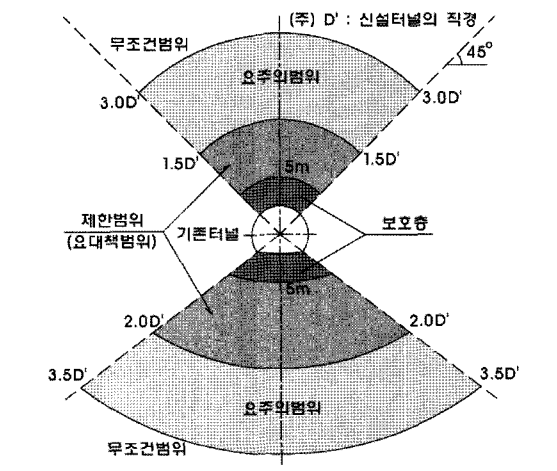


표 2. 터널의 교차에 따른 안전영역

위치관계	터널이격	근접도 구분
신설터널이	1.5D' 미만	제한범위(필요대책범위)
기설터널 보다	1.5~3D'	요주의 범위
위에 존재	3D' 이상	무조건 범위
신설터널이	2D' 미만	제한범위(필요대책범위)
기설터널 보다	2~3.5D'	요주의 범위
아래에 존재	3.5D' 이상	무조건 범위



기술기사1

표 3. 터널상부의 개착에 따른 안전영역

진재 토피비(γ/H)	근접도 구분
0.25 미만	제한범위(필요대책범위)
0.25~0.5	요주의 범위
0.5 이상	무조건 범위

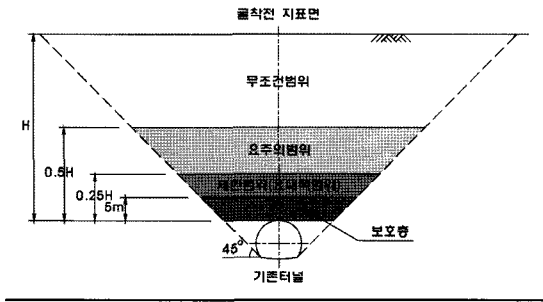
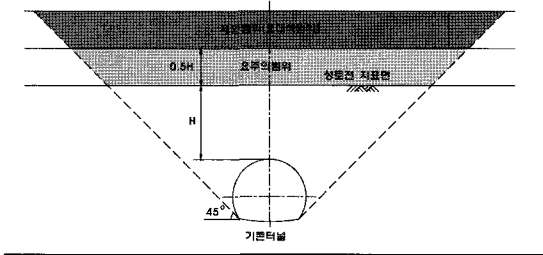


표 4. 터널상부의 성토에 따른 안전영역

본래의 토피비(γ/H)	성토높이비($\Delta H/H$)	근접도 구분
1D 미만	0.5 이상	제한범위(필요대책범위)
	0.5 미만	요주의 범위
1~3D	1.0 이상	제한범위(필요대책범위)
	0.5~1.0	요주의 범위
3D 이상	1.0 이상	요주의 범위
	1.0 미만	무조건 범위



안전영역 평가기준에만 국한하지 않고 지층 및 지반특성, 구조물 형식, 보강조건, 시공조건, 노후상태 등을 종합적으로 고려하여 설계 및 시공에 반영함으로써 시설 구조물의 안정성에 대한 현실적인 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3. 국내·외 사례 분석

표 5. 터널상부의 구조물 기초에 따른 안전영역

터널상단 보다 5m 위로의 예상 증가하중	근접도 구분
1ton/m ² 미만	무조건 범위
1~4ton/m ²	요주의 범위
4ton/m ² 이상	제한범위(필요대책범위)

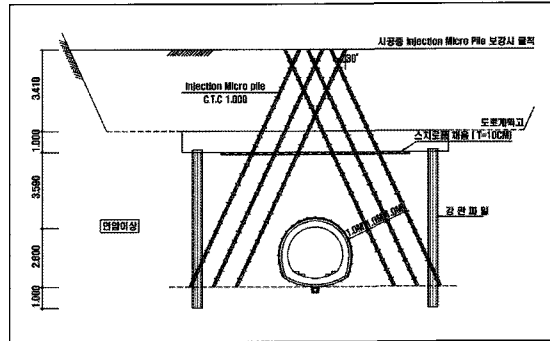
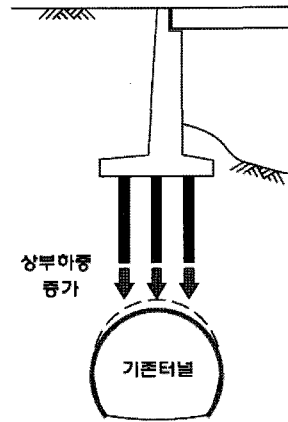


그림 1. 부산~울산 고속도로 제0공구 시공사례

근접시공에 대한 국내·외 시공사례 중 기준에 시공된 기설터널상부에 개착이 시공되는 경우에 대해 살펴보았다.

3.1 부산~울산 고속도로 제0공구 사례

그림 1은 부산~울산 고속도로 제0공구내 JCT의 각 램프(RAMP)가 수자원공사의 공업용수로 도수터널의 상부를 최소 이격거리 4.1m로 통과하는 사례를 보여주고 있으며, 상부 개착시공에 따른 도수터널의 안정성을 검토한 결

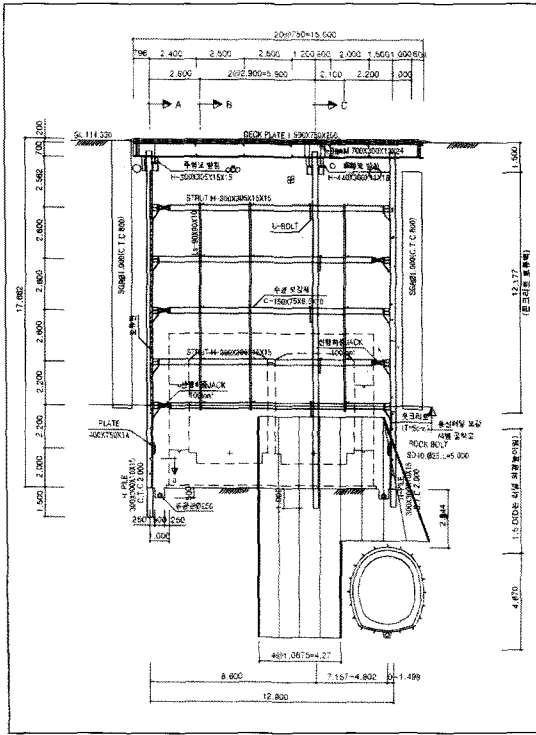


그림 2. 서울지하철 제2공구 시공사례

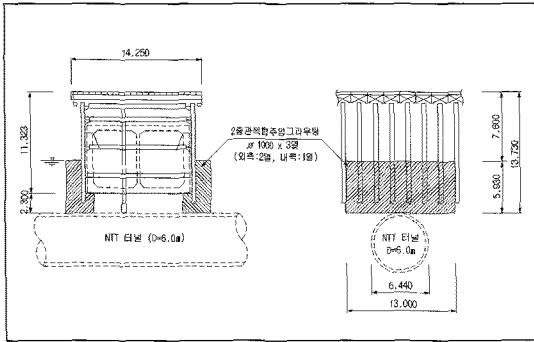


그림 3. 일본 JR 仙石線 〇〇~〇〇간 공사 시공사례

과 도수터널 주변지반의 보강이 필요한 것으로 평가되었다. 도수터널 상부에 지반을 소구경($\phi 100\sim 200$) 천공 후 마이크로파일을 삽입하고 그라우팅을 실시함으로써 시설 도수터널의 안정성 확보가 가능한 것으로 조사되었다.

3.2 서울지하철 제2공구 사례

그림 2는 서울지하철 제2공구 중 신설되는 개착구조물 하부에 운영중인 통신구가 최소 이격거리 2.9m로 존재하는 경우를 보여주고 있으며, 통신구 통과구간 지반조건은 풍화암~연암층으로 구성되어 있으며 현장조사 결과 통신구 콘크리트라이닝에 인장균열이 발생한 상태였다. 개착시공중 통신구의 안정성을 확보하기 위해 지반보강공법으로 강관보강그라우팅을 적용하였으며, 통신구 구조물의 내구성 확보 및 균열확장을 방지하게 위해 내부보강공법으로 에폭시 주입에 따른 균열부 보강과 통신구 내측면에 탄소섬유시트 보강을 적용하였다.

3.3 일본 JR 仙石線 〇〇~〇〇간 공사 사례

그림 3은 상부 개착구간과 시설 터널의 최소 이격거리가 2.3m로 존재하는 사례를 보여주고 있으며, 지표면 이하 15m까지 N치가 약 27~50정도인 토사층이 분포하고 지하수위는 GL(-)7.6m 정도로 비교적 높아 굴착전에 2중관 복합주입 그라우팅($\phi 1,000\text{mm}$, 3열 : 외측2열, 내측1열) 적용으로 지하수 유입을 억제하고 상부 구조물 하중분산 및 하부 터널 변위발생을 제어하였다.

4. 설계사례

4.1 검토개요

본고에서는 시공이 완료되어 운영중인 전력구 터널상부에 최소 이격거리 약 4.4m(경험적인 근접시공 평가기준으로 보호층 영역에 해당)로 지하차도가 개착 시공되는 경우를 예로 살펴보았으며, 굴착영향 범위를 평가하기 위한 예비 검토와 개착 시공조건을 고려한 검토를 수행하여 터널의 안정성을 평가하였다. 또한 하부 전력구 터널의 안정성 확보를 위한 대책공법과 보강 및 보수공법의 종류 및 적용 범위를 검토하였다. 표 6과 7은 설계구간 횡단면도 및 터널단면 현황과 안정성 검토에 적용된 입력특성치를 보여

기술기사1

표 6. 검토구간 횡단면도 및 터널단면 현황

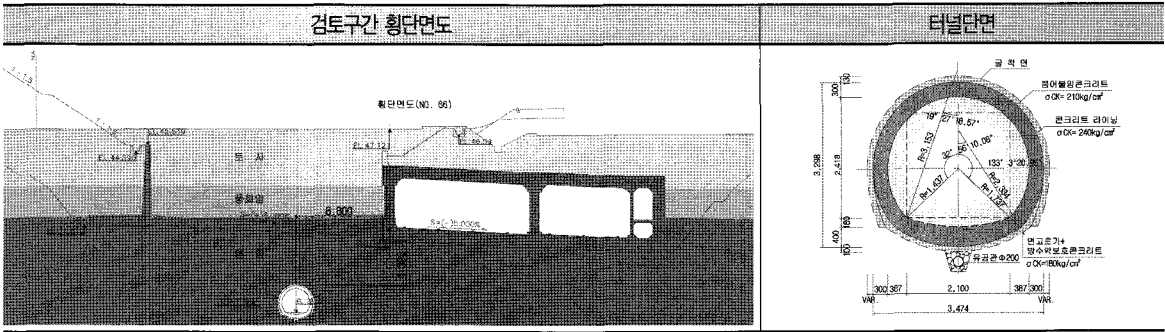


표 7. 안정성해석 적용 지반특성치

구분	단위중량(ton/m³)	점착력(ton/m²)	내부마찰각(°)	변형계수(ton/m)	포아송비(α)
토사층	1.8	5	20	5,000	0.33
풍화암	2.2	25	25	30,000	0.30
연암	2.4	35	35	100,000	0.27

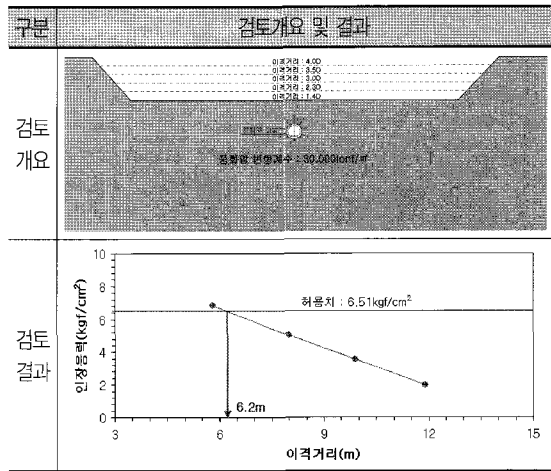
주고 있다.

4.2 굴착영향 범위 예비 검토

터널상부의 개착시공 조건에 따른 경험적인 근접시공 평가기준은 지층조건, 지반특성, 구조물 규모 등을 적절히 고려하지 못하는 단점이 있다. 따라서 풍화암 조건에 대해 굴착저면과 기설 터널의 이격거리를 변수로 하는 예비 검토를 수행하여 굴착영향 범위를 개략적으로 평가하였다.

기설 터널상부에 개착 시공시 개착구간의 직하부에 기설 터널이 존재하는 경우가 가장 직접적으로 영향을 받을 것으로 판단되어 이 조건에 대한 검토를 수행하였으며, 검토결과 상부 굴착저면이 기설 터널 상부로 약 1.8D(= 6.2m) 이내로 접근하는 경우 기설 터널의 콘크리트라이닝 상부에 인장응력이 허용치를 초과하여 터널의 안정성 확보가 어려울 것으로 판단되었다. 이러한 결과는 원지반 토 피고 15.7m, 잔재 토피고가 6.2m인 경우로 잔재 토피 비(h/H)가 0.4로 산정되어 근접시공의 경험적 평가기준 중 요주의 범위(h/H : 0.25~0.5)에 해당되었으며, 기설 터널의 안정성 확보를 위해서는 잔재 토피고 6.2m 이내에

표 8. 굴착영향 범위 예비 검토



서 대책공법을 적용하여 터널의 안정성을 확보하여야 할 것으로 판단되었다.

4.3 상부개착에 따른 안정성 검토

기설 전력구터널 상부 지하차도 굴착에 따라 굴착 시공 순서를 고려한 안정성 검토를 수행하여 전력구 터널의 콘크리트라이닝 변위 및 응력발생 경향을 평가하였다. 안정

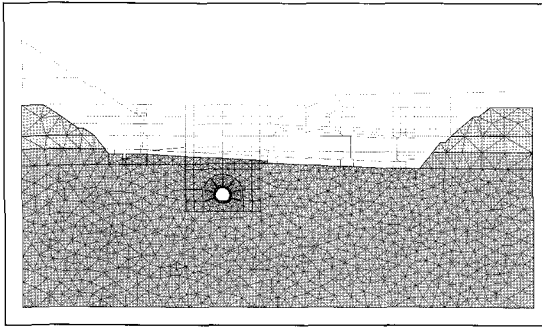


그림 4. 안정성 검토 적용 모델링

수치해석 결과 터널 발생변위는 최대 약 2mm 이내로 미소하게 발생하였으며, 콘크리트라이닝 응력도 허용치 이내로 전력구 터널의 안정성 확보가 가능한 것으로 평가되었다. 그러나 상부 개착시공으로 인한 굴착저부의 상향 변위 발생으로 천단부에 휨인장응력이 비교적 크게 발생하여 허용치에 근접하는 것으로 나타나 구조물의 장기적인 내구성 확보를 위해서는 지속적인 안정성 확인이 필요할 것으로 판단되었다.

성 검토에 적용한 수치해석 프로그램은 Plaxis-2D이며, 수치해석 모델링은 그림 4와 같다.

4.4 대책공법 검토

안정성 검토결과 콘크리트라이닝에 발생하는 응력은 허

표 9. 안정성 검토 결과

구 분	변위 발생경향		지보재 응력 발생경향	
변위/응력 발생경향				
	천단변위(mm)	1.88	휨축응력(kgf/cm ²)	5.48 < 96.0
	내공변위(mm)	0.15	휨인장응력(kgf/cm ²)	6.31 < 6.51
검토결과	바닥변위(mm)	1.72	전단응력(kgf/cm ²)	0.52 < 3.87

표 10. 터널 상부 개착시 시공영향 최소화를 위한 적용가능 대책공법

구 분	콘크리트 말뚝 (마이크로파일 등)	강관보강 그라우팅	치환공법 (제트 그라우팅 등)
개 요 도			
공법개요	• 천공후 강제삽입, 몰탈 충전	• 강관삽입 후 주입재의 저압주입	• 고압분사에 의한 지반절삭 후 충전
공법특징	• 지반천공 후 고강도 강제 삽입으로 확실한 보강 가능	• 강관 및 주입재의 보강효과 양호 • 시공성 우수	• 지반절삭 후 개량재 충전으로 확실한 보강 가능

기술기사1

표 11. 터널 상부가 개착되는 경우의 보강 및 보수공법 적용 범위

기 본 공		보 강 공					보 수 공			
배면 주입공	라이닝 낙하방지공	센터 보강공	라이닝 보강공	내면 보강공	록볼트 보강공	Stru공	라이닝 보수	라이닝 표면청 소	배수구 정비	누수 방지공
○	○	△	○	○	△	○	○	△	×	×
비 고		○ : 효과가 기대됨, △ : 조건에 따라 효과가 기대됨, × : 효과없음								

표 12. 터널 내부보강 공법 특징

구 분	주입공법 (에폭시 등)	탄소섬유시트	철근콘크리트 단면증대	강판접착
공법개요	• 이미 발생한 균열이 더 이상 발달이 없을 것으로 판단되는 구간에 적용	• 기존 콘크리트 표면에 에폭시 수지를 이용하여 탄소섬유시트 접착 보강	• 콘크리트면에 철근 콘크리트 추가타설 보강	• 콘크리트 표면에 앵커철근을 이용한 강판보강
공법특징	• 중장비 불필요 • 시공전 면처리 필요 • 시공기간 최소	• 중장비 불필요 • 시공전 면처리 필요 • 시공기간 최소	• 중장비 필요 • 시공중 소음, 분진발생 • 시공장소 제한	• 중장비 필요 • 현장용접, 앵커필요 • 시공장소 제한

용치 이내로 안정성 확보가 가능한 것으로 평가되었으나 기설 구조물의 노후상태를 고려하고 굴착 시공중 영향을 최소화하기 위해서는 다음과 같은 적용 가능한 대책공법에 대해 검토하였다(표 10). 지반보강공법을 대책공법으로 적용하는 경우에는 구조물의 노후정도, 평가등급, 현장여건, 시공조건, 경제성 등을 종합적으로 고려하여 적용해야 할 것으로 판단된다.

4.5 터널 내부보강 방안

터널상부가 개착 시공되는 경우 시공중 영향을 최소화 하기 위해 대책공법으로 적용되는 지반보강공법 이외에도 기설 구조물에 직접적으로 적용 가능한 보강 및 보수공법의 적용 범위는 표 11과 같다. 특히 기설 구조물에 이미 균열이 발생하여 신설 구조물의 시공으로 인한 균열의 확장, 박리 및 박락의 급작스러운 발달이 예상되는 경우는 콘크리트라이닝 내부보강공법의 적극적인 적용이 유리하며, 주로 적용하는 내부보강 공법의 특징은 표 12와 같다.

5. 결 론

- 1) 근접시공 조건에 의한 외력의 변화는 주변지반 및 기 설 구조물에 추가적인 변위 및 응력집중을 유발시킬 수 있으므로 상세한 검토가 필요하다.
- 2) 경험적인 안전영역의 평가기준은 초기검토 단계에서 는 유용하나 상세한 검토를 위해서는 지반특성, 구조 물 형식, 보강조건, 시공조건, 노후상태 등을 종합적 으로 고려하여 평가하여야 한다.
- 3) 상부 개착시공에 따른 국내·외 사례 검토결과 근접 정도가 클 경우 지반보강 공법을 적극적인 대책공법 으로 적용하고 있다.
- 4) 설계사례 검토결과와 근접시공에 따른 기설 터널의 안 정성 확보가 가능하였으나 시공중 영향 최소화와 장 기적인 안정성을 고려할 때 지반보강공법 적용이 가 능할 것으로 판단된다.
- 5) 기설 터널 상부의 근접시공으로 인한 대책공법으로 지반보강 공법 및 터널 내부보강 공법 적용시 구조물 의 노후화, 평가등급, 현장여건, 시공조건, 경제성 등 을 종합적으로 고려하여 적용하는 것이 바람직할 것 으로 사료된다.

[참고문헌]

- 1) 도시철도인접굴착공사 관리실무, 서울특별시 도시철도공사(2001)
- 2) 근접교대교각의 설계시공지침, 일본 국유철도(1967)
- 3) 기설구조물에 근접되는 기초구조물의 설계시공, 일본 국유철도(1970)
- 4) 근접기초설계 시공요령, 일본 건설성(1983)
- 5) 김상균(2008), 확률유한요소 해석에 의한 근접터널 안정성 분석, 한국터널공학회 논문집
- 6) 김상환(2003), 근접터널의 설계개념 및 해석기법에 대한 연구, 한국터널공학회 논문집
- 7) 신중호, 문훈기 등(2009), 터널라이닝 안전관리를 위한 발파제한영역 평가, 터널기술 논문집
- 8) 안현호, 최정인 등(2008), 축소모형실험을 통한 이격거리에 따른 근접터널의 거동, 한국지반공학회 논문집
- 9) 유충식, 송아란(2006), 터널 근접시공이 기존터널 라이닝에 미치는 영향에 관한 연구, 한국터널공학회 논문집