

터널의 근접통과구간에서 수치해석을 통한 안정성 해석

추석연, 백승규, 이충호, 신동인, 이성호 ((주)단우기술단)

1. 서 론

최근에는 대도시의 교통시설이 증가하면서 지하철 뿐만 아니라 철도, 도로터널의 수도 늘어나고 있다. 이에 따라 기존터널과 신설터널이 상·하로 교차하여 시공하는 사례 또한 증가하고 있다. 이와 같이 기존 지하철이나 도로·철도터널에 상·하부로 교차하여 새로운 터널을 건설하는 경우 그 공사정도가 어렵고, 공사 진행에 따라 기존 구조물 및 각종 시설의 운행이나 안전이 지장을 받거나 시설물이 손상을 받지 않도록 해야 한다¹⁾. 교차구간에서의 영향을 최소화하기 위해서는 기존 구조물과 신설되는 구조물간의 터널 폭 이상의 이격거리를 유지하는 것이 중요하다. 그러나 현장마다 상황이 다르기 때문에 각 현장조건에 맞게 적정 이격거리를 산정 및 적절한 보강범위 결정 등 여러 가지 요인을 종합적으로 검토하여 결정하는 것이 바람직하다²⁾.

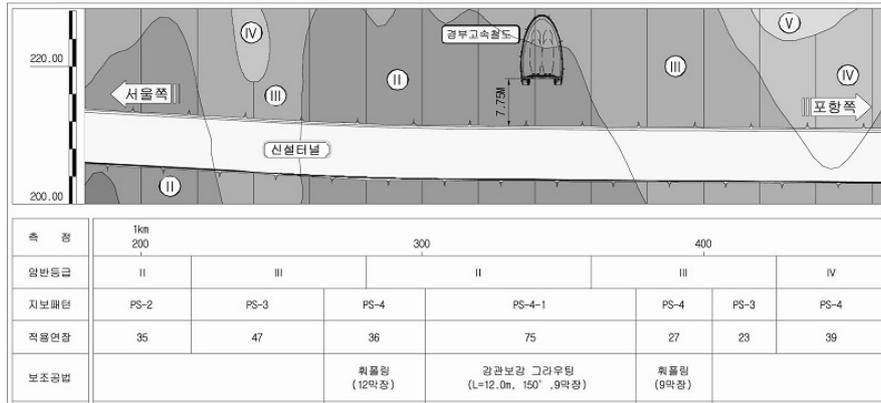
따라서 본 논문에서는 기존에 수행된 설계를 사례로 터널 교차시 하부터널의 굴착에 따른 상부터널에서의 변위량과 하부터널의 안정성 및 보강공법의 적정성을 검토하였다. 검토대상은 기존 철도터널(00터널)하부에 신설되는 철도 단선터널(00터널)로서 상부 기존터널과의 이격거리는 7.75m이고 교차 각도는 22°정도로서 교차구간은 약 50m이다.

2. 지질 및 지반

본 대상지역 일대의 지질은 중생대 백악기 건천리층으로 주로 암회색의 이암, 셰일이 주를 이루며 암회색의 실트암과 셰립사암, 그리고 응회질이암이 협재되어 나타난다. 층리의 발달이 좋으며, 주변의 안산암류 및 화강암류에 의해 비교적 저~중변성도의 접촉변성작용을 받아 혼펠스(hornfels)화 되어있다. 또한, 지반조사 결과 교차구간에서는 이상대가 발견되지 않고 암반등급 II~III등급의 양호한 상태를 보인다.

3. 터널현황

00터널은 갱문 및 개착 16m, NATM 1km 129m, 중간개착 205m로 총연장 1.350km의 철도 단선터널로서 상부의 경부고속철도와 7.75m이격되어 있으며 교차각도는 22°정도로 하부통과하고, 교차구간은 약 50m정도이다. 교차구간의 현황 및 표준지보패턴과 표준단면은 그림 3.1 및 표 3.1, 표 3.2와 같다.



암 반 등 급 도

그림 3.1 경부고속철도와 00터널의 교차구간 현황

표 3.1 경부고속철도와 신설터널의 교차구간 표준단면

	<ul style="list-style-type: none"> • 굴착 단면적 : 50.602 m² • 내공 단면적 : 40.696 m² • 대피로 폭 : 800 mm • 고속철도용 전차선 및 철근배근 조건에 만족하는 단선터널 최적단면 선정 • 터널 바닥부의 원활한 배수를 위하여 바닥부 배수구배 2% 적용 • 터널내 유지관리 및 대피성능 증대를 위하여 대피로 양측 설치
--	---

표 3.2 경부고속철도와 신설터널의 교차구간 지보패턴 적용 현황

구 분		신설터널	경부고속철도
지보패턴		PS-4, PS-4-1	PD-3
굴착공법		상·하 반단면 굴착	전단면 굴착
강섬유보강 슛크리트(cm)		12.0	8.0
교차구간 보강공법		강관보강 150°, 휨폴링 150°	-
굴진장(m)	상부/하부	1.5/1.5	2.0
	길이(m)	3.0	3.0
록볼트	간격(m)	개수	7.5
		종·횡방향	1.5/1.2

4. 근접시공 영향권 기준 고찰

기설 터널에 근접하여 새로운 터널을 계획하는 경우, 기설터널과 신설터널의 위치관계와 지반

조건에 따라 안전성 검토 여부를 판단하는 기준으로 경험적 근접도가 제시되어 있다. 기설 경부고속철도와 근접 교차하도록 계획된 00터널과의 안정성을 검토하고 보강대책을 수립하기 위해 경험적 근접도 평가 기준을 활용하였다.

4.1 기존터널 근접시공 관리 매뉴얼

기설 터널의 상·하에 신설터널이 횡단하는 경우 신설터널이 기설터널의 상부를 통과할 경우에는 기설터널이 위 방향으로 변위 및 변형이 발생하기도 하고 거꾸로 아치 작용을 할 수 없어 기설터널 라이닝에 작용하는 하중이 증가하며, 신설터널이 기설터널의 하부를 통과하는 경우에는 기설터널의 침하가 발생하는 문제점이 있다. 표 4.1은 교차터널에서의 근접도 평가 결과를 요약한 것이다. 이는 기설터널 안정성 확보를 위해 시공방법(굴착공법, 보강방법, 시공순서 등)의 영향을 고려하고 안전측인 "도시철도 인접굴착공사 관리실무"의 근접도 영역을 선정하였다.

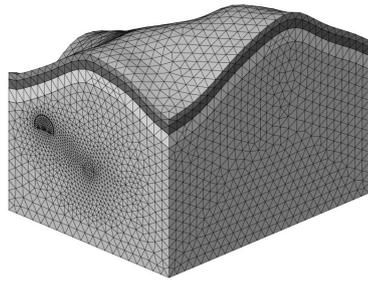
표 4.1 교차터널에서의 안전영역

분류기준	근접도	교차구간
		기설터널 하부통과 (경부고속철도)
도시철도 인접굴착공사 관리실무	대책시공	1.6 D 미만
	주의시공	1.6 ~ 2.8 D 미만
	일반시공	2.8 D 이상
R.B. Peck, D.U. Deere등의 경험적 평가방법	주의시공	2.0 D 미만
	일반시공	2.0 D 이상
수치해석	대책시공	1.0 D 미만
	주의시공	1.0 ~ 2.0 D 미만
	일반시공	2.0 D 이상

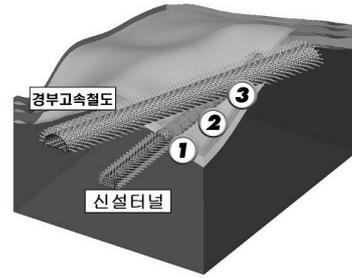
5. 경부고속철도 교차구간 안정성 검토

5.1 해석영역 및 모델링

본 해석에서는 3차원 유한요소해석 프로그램인 MIDAS-GTS Ver 3.0.0을 사용하였다. 해석영역은 경계조건의 영향을 최소화하기 위해 좌, 우측 약 5D, 하부 약 4D로 설정하였다. 이는 교차구간에서 경부고속철도의 바닥변위와 내공변위가 충분히 수렴할 수 있는 범위의 영역이다. 또한 터널의 단면형상, 지형 및 지층, 굴착시공 순서, 강관위치 등을 고려하여 모델링하였으며 그림 5.1과 같다.



a) 3-D 유한요소망



b) 교차구간 터널 모델링 및 측정위치

그림 5.1 교차구간 3-D 유한요소망 및 모델링

5.2 선로변형(틀림 또는 침하) 및 기설구조물 허용응력 기준

표 5.1은 경부고속철도의 선로변형 기준 및 기설구조물 허용응력 기준치를 선정한 표이다.

표 5.1 선로변형 기준 및 기설구조물 허용 응력 기준치

종 별	파장 또는 측정기선	허용한도 (mm)	구 분	인장응력 증분 (MPa)	압축응력 증분 (MPa)
수 평	-	≤ 2	허용치	1.0	5.0
고 저	10m	≤ 2		경부고속철도 라이닝 응력 기준	

5.3 해석결과

본 논문에서는 기설터널인 경부고속철도 구조물의 종횡방향 변위와 라이닝 응력 및 록볼트 축력을 검토하였다. 또한 교차구간에서 신설터널인 00터널의 천단 및 내공변위와 슛크리트 응력 및 록볼트 축력을 검토하였다. 표 5.2는 경부고속철도의 선로변형 해석결과를 나타낸 표이고, 그림 5.2는 기설터널인 경부고속철도에 근접하여 신설터널이 교차로 시공될 경우 발생하는 기설터널의 경부고속철도 바닥부에서의 종횡방향 변위와 경부고속철도의 라이닝 최대 응력 및 록볼트 최대 축력을 나타낸 것이다. 수치해석 결과, 교차구간의 경부고속철도 궤도 검토결과 수평틀림은 0.030mm, 고저틀림은 0.144mm로 선로변형 기준에 만족한다. 그리고 경부고속철도의 바닥부에서의 종방향 최대변위는 교차구간 직하부에서 발생하며 변위량은 0.314mm이고, 횡방향 최대변위는 교차구간 직하부에서 발생하며 변위량은 0.308mm이다. 또한 교차구간에서 경부고속철도의 라이닝 최대 응력은 0.516MPa로 나타났으며, 록볼트 최대 축력은 7.866kN로 나타났다.

표 5.2 선로변형 결과 및 경부고속철도 라이닝 응력 검토결과

종 별	해석결과(mm)	검토결과 (mm)	구 분	인장응력 증분 (MPa)	압축응력 증분 (MPa)
수 평	좌:0.107 / 우:0.137	0.030	인장응력 증분(MPa)	1.0	0.095
고 저	10m기준 0.169/0.314	0.144	압축응력 증분(MPa)	5.0	0.701

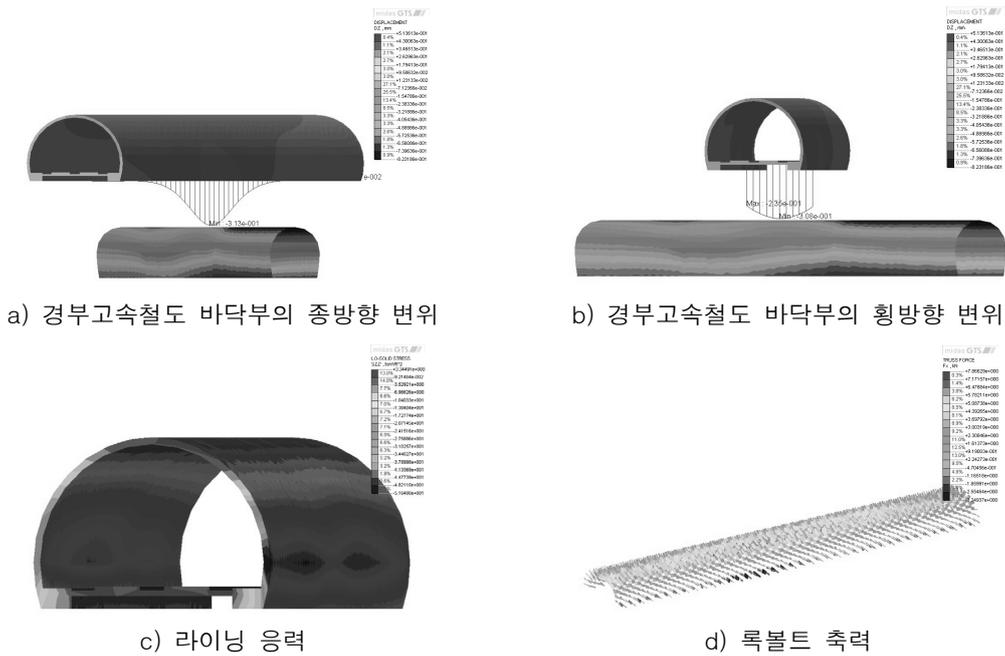


그림 5.2 교차구간에서 경부고속철도 구조물 바닥부의 변위 및 지보재 응력

그림 5.3은 기설터널인 경부고속철도에 근접하여 신설터널이 교차로 시공될 경우 신설터널에서 터널굴착에 따라 발생하는 천단변위와 내공변위 및 숏크리트 응력 변화 및 록볼트 축력 변화를 나타낸 것이다. 수치해석 결과, 교차구간에서 하부 신설터널인 00터널에서의 최대 천단 변위는 0.467mm이고, 최대 내공변위는 0.128mm이다. 또한 숏크리트 최대 압축력은 0.272MPa이고 록볼트 최대 축력은 37.398kN으로 허용치 이내로 안정한 것으로 판단된다.

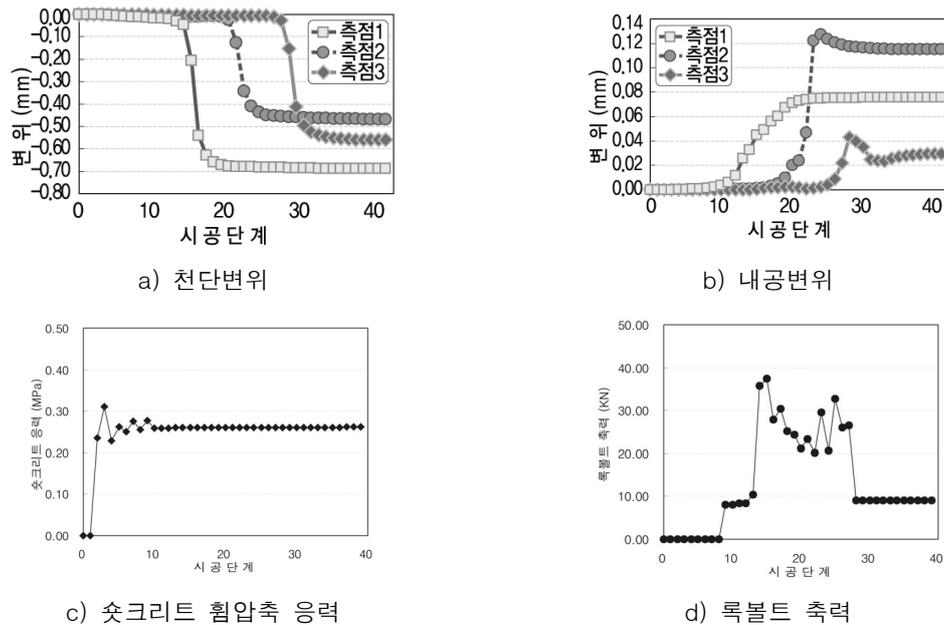


그림 5.3 교차구간에서 하부 터널의 구조물 변위 및 지보재 응력

6. 결 론

본 논문에서는 기설터널과 신설터널이 상·하로 교차하는 구간에서 경험적인 방법과 수치해석을 통하여 근접도 기준을 비교하고 안전측인 경험적인 방법의 결과를 채택하여 근접도 영역을 산정하였다. 기설터널 안정성 확보를 위해 시공방법(굴착공법, 보강방법, 시공순서 등)의 영향을 고려하고 안전측인 "도시철도 인접굴착공사 관리실무"의 근접도 영역을 선정하여 보강공법 및 굴착공법을 검토하여 설계에 반영하였고, 3차원 수치해석을 실시하여 하부터널 굴착에 따른 기설터널 및 신설터널의 안정성을 검토하였다.

경부고속철도 00터널의 라이닝 응력 검토결과 주의시공 구간에서의 인장응력 증분은 $0.095\text{MPa}(<1.0\text{MPa})$, 압축응력 증분은 $0.701\text{MPa}(<5.0\text{MPa})$ 로 기준치 이하로 신설터널의 굴착으로 인한 경부고속철도 00터널의 라이닝은 안전한 것으로 판단된다.

교차구간에서 경부고속철도 00터널의 라이닝 최대 응력은 $0.516\text{MPa}(<9.6\text{MPa})$, 록볼트 축력은 $7.866\text{kN}(<88.7\text{kN})$ 으로 안전한 것으로 판단되며, 교차구간에서 하부 신설터널의 슛크리트 최대 압축응력은 $0.272\text{MPa}(<8.4\text{MPa})$, 록볼트 축력은 $37.398\text{kN}(<88.7\text{kN})$ 으로 안전한 것으로 판단된다. 따라서 지보패턴과 상부보강에 대한 수치해석 결과, 경부고속철도 00터널의 안정성은 충분히 확보되었다고 판단된다. 또한 하부 신설터널의 지보재 응력은 허용치 이내로 안전한 것으로 판단되며 신설터널의 지보패턴과 상부보강의 효과는 적절한 것으로 판단된다. 이에 따라 하부에 위치한 신설터널의 교차구간 상부를 강관다단 그라우팅과 휘폴링으로 보강하는 것은 불확실한 지반요소를 배제할 수 있는 적절한 조치로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김우성 등, 2008, 교차터널에서의 지반거동 및 안전영역평가에 관한 연구, 한국암반공학회지 제18권 제6호, pp.491-502.
2. 김도식 등, 2004, 비대칭 근접병설터널의 안정성 및 보강공법 검토, 터널 시공 기술향상 대토론회 4회 논문집, 대한토목학회, pp.179-197.
3. 서울특별시도시철도공사, 2001, 도시철도인접굴착공사 관리실무.