

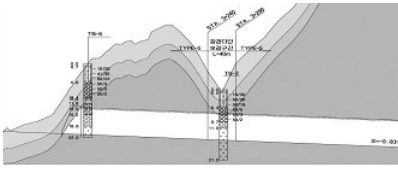
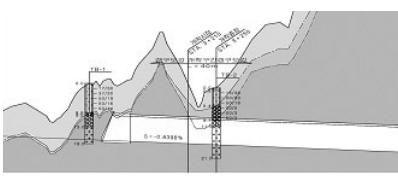
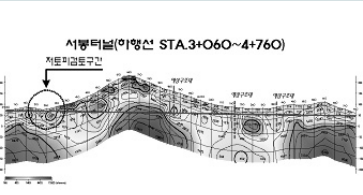
시공성 및 안정성, 경제성을 고려한 터널 저토피 구간들의 공법 비교 · 검토

00터널 설계사례를 중심으로

1 개요

최근 철도나 고속도로 건설시 선형, 종단구배 등의 제약으로 인해 피복 두께가 얇고 지질이 연약하다든지 지형적으로 편압을 받는 장소 등의 위치에서도 터널을 시공하는 사례가 증가하고 있다. 이와 같은 조건하의 터널굴착에 따르는 문제로서는 터널구조물 자체의 원인인 지보공, 복공의 지지력 부족에 의한 침하, 변형 또한 이것에 따르는 지표침하나 함몰 등이 있다. 본고에서는 터널 시공사례를 통해 터널 저토피 구간들의 시공시 안정성을 고려하고, 환경친화적이며 경제성 있는 공법을 비교 · 검토하고자 한다.

2 현황 분석

구분	종단면도	비고
무안 방향		도로중심선 기준
광주 방향		도로중심선 기준
전기 비저항 탐사		탐사선 기준

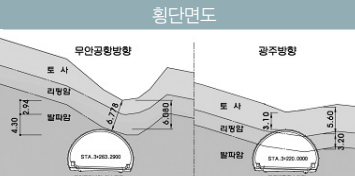
[그림 1] 저토피구간 현황도

2-1. 암질특성 분석

대상 구간은 화강 편마암질의 산악 계곡부에 위치하고 있으며 리핑암 구간은 풍화 정도가 심하고 습한 편이고 특히, 전기비저항 탐사결과 비저항치가 낮아 5등급의 암반등급으로 분류되는 연약대 지역을 통과하고 있다.

저토피 구간들의 최소 토피고는 무안공항 방향이 6.1m로서 Arch부 리핑암 구간에 보조공법 적용시 터널공법 적용이 가능한 것으로 판단되며, 광주방향은 최소 토피고가 3.1m로 막장 Arch부 토사 구간에 강제지지공법 적용성 검토 결과에 의거 최적공법을 선정해야 할 것으로 판단됨.

(표 1) 저토피구간 횡단면도

횡단면도	현황
	<ul style="list-style-type: none"> · 무안공항 방향 - 최소 토피고 : 6.1m · 광주 방향 - 최소 토피고 : 3.1m - 막장 Arch 붕괴 위험 예상

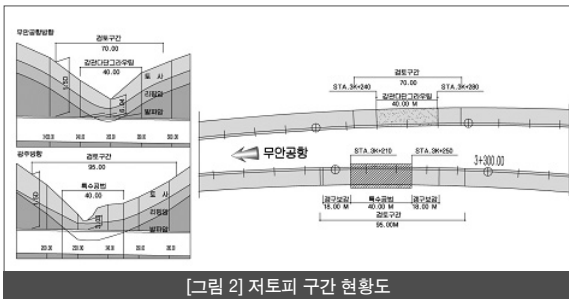
2-2. 보강구간 검토

토피고 1.5D 이하의 저토피 구간, 터널 크라운부가 토사층 또는 풍화암층으로 구성된 지반불량 구간, 계곡부에 위치하여 절리 및 파쇄대가 심한 구간에 대해서는 별도의 보강이 필요한 구간으로 (표 2)와 같이 보강구간으로 설정하였다.

(표 2) 구간별 보강방안

구분	무안공항 방향	광주방향
Crown부암질	· 리핑암 : H=3.0m	· 토사층 : H=3.1m
보강방안	· 리핑암 구간을 강관다단 Grouting으로 보강하고 Rock Bolt와 Shotcrete로 보강시 3.0m 정도의 Arching축 형성 가능	· 토사층 막장 붕괴를 예방해야 하므로 붕괴 방지방안을 Case별로 검토하여 안정성, 시공성 및 경제성을 고려한 보강 방안의 제시 필요
굴착방법	<ul style="list-style-type: none"> ① 강관다단 그라우팅 실시 ② 감지보 시공 ③ 분할굴착 ④ Shotcreting & 축벽부 Rock Bolting 	· 특수공법 비교 후 선정

최근 철도나 고속도로 건설시 선형, 종단구배 등의 제약으로 인해 피복 두께가 얇고 지질이 연약하다든지 지형적으로 편압을 받는 장소 등의 위치에서도 터널을 시공하는 사례가 증가하고 있다. 특히, 도심지 터널은 토피가 얇고 연약한 지반에 건설되는 경우가 많으며 지역적 특성상 지장물에 근접하여 시공되는 경우에는 터널의 안정성 측면뿐만 아니라 지장물의 안전성도 함께 고려해야 한다. 일반적으로 저토피 구간에 시공되는 터널은 지반자체의 아치효과(Archiving Effect)에 의한 지내력을 기대할 수 없으므로 적절한 차수 및 보강공법의 적용으로 터널의 안정성을 확보하여야 하며, 무지보 자립시간을 최소화 할 수 있도록 실링 슛크리트의 조기타설 및 지보작업의 연속성 등으로 진행성 여굴과 같은 저토피 구간 내 터널붕괴의 직접적인 원인이 될 수 있는 상황을 미연에 방지하여야 한다. 이와 같은 조건하의 터널굴착의 경우, 시공시 안정성 및 경제성, 환경성을 고려한 시공방법에 대해 살펴보고자 한다.



3 공법 검토 및 비교

터널주변 환경 및 시공성, 공사비를 고려하여 적용할 수 있는 공법 중 개착터널 공법 이외에 비교적 생소한 N.T.R 공법과 개착Roof 공법에 대하여 비교하면 다음과 같다.

3-1. 개착터널(토공)공법 검토

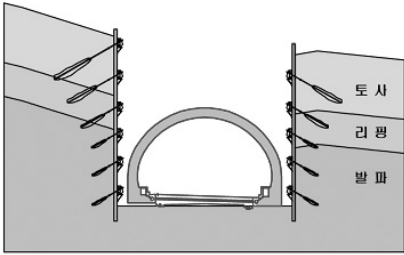
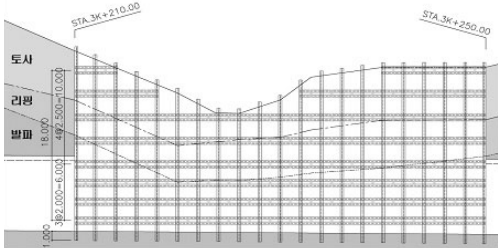
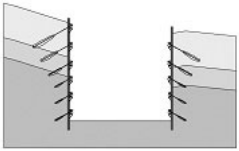
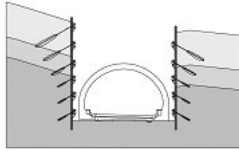
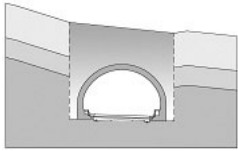
저토피 구간에 개착터널 라이닝을 설치하고 되메움하여 구조물 시공 후 원상 복구하는 공법으로 터파기 후 라이닝 시공, 되메움하는 공정으로 이루어진다.

(표 3) 개착터널(토공) 공법

구분	검토사항		
공법개요	<ul style="list-style-type: none"> · 저토피고 구간에 개착터널 라이닝을 설치하고 되메움하여 원상복구 · 라이닝 설치를 위한 공간 확보를 위해 터파기공 실시 · 되메움 토층을 고려하여 하중 Case별 구조계산에 의한 라이닝 설계 		
표준 단면		주요고려항 <ul style="list-style-type: none"> · 주변 지층별 물성치 결정(나치, ρ 값, C값, E값) · 사면안정 해석 · 되메움 높이 선정 · 라이닝 구조계산 · 철근 배근도 작성 · 시공순서 제시 	
중 단면도			
시공 순서도	① 터파기 공사 <ul style="list-style-type: none"> · 터파기 작업 · 사면 보강 · 갱구 보강 	② 라이닝 시공 <ul style="list-style-type: none"> · 거푸집 설치 · 라이닝 콘크리트 타설 · 양생 및 해체 · 방수공사 	③ 되메움 <ul style="list-style-type: none"> · 되메움 시공 · 그라우팅 실시 · 지표 배수로 설치

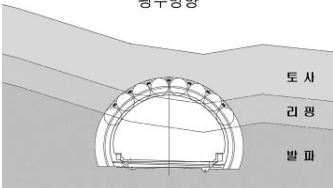
3-2. 개착터널(가시설)공법 검토

〈표 4〉 개착터널(가시설) 공법

구분	검토사항		
공법개요	<ul style="list-style-type: none"> · 저토포고 구간에 개착터널 라이닝을 설치하고 되메움하여 원상복구 · 라이닝 설치를 위한 공간 확보를 위해 가시설을 구축하여 터파기 부분 최소화 · 되메움 토층을 고려하여 하중 Case별 구조계산에 의한 라이닝 설계 		
표준단면		<p>주요고려항</p> <ul style="list-style-type: none"> · 주변 지층별 물성치 결정(N치, ϕ 값, C값, E값) · 토류벽 계산 · 되메움 높이 선정 · 라이닝 구조계산 · 철근 배근도 작성 · 시공순서 제시 	
종단면도			
시공순서도	<p>① 가시설공사</p>  <ul style="list-style-type: none"> · H-pile 설치 · 토류벽 설치 · 터파기 · Earth Anchor 설치 	<p>② 라이닝시공</p>  <ul style="list-style-type: none"> · 거푸집 설치 · 라이닝 콘크리트 타설 · 양생 및 해체 · 방수공사 	<p>③ 되메움</p>  <ul style="list-style-type: none"> · H-pile 해체 · 되메움 시공 · 지표 배수로 설치

3-3. N.T.R(New Tublar Roof Method)공법 검토

〈표 5〉 N.T.R(New Tublar Roof Method) 공법

구분	검토사항	
공법개요	<ul style="list-style-type: none"> · 수평관 굴착공법(N.T.R)은 강관을 유압적으로 압입하여 Arch 형성 · 수평강관의 내측(라이닝 중벽 부분) 절단 후 콘크리트 타설 · 강지보 지지 후 라이닝 콘크리트 타설 	
표준단면	<p>광주방향</p> 	<p>주요고려항</p> <ul style="list-style-type: none"> · 수평관 규격 결정 · 확대 단면 규격 결정 · 지층 구성에 따른 압입효율 산정 · 라이닝 구조계산 · 철근 배근도 작성 · 시공순서 제시

<p>중 단면도</p>		
<p>시공 순서도</p>		<ol style="list-style-type: none"> ① 추진 작업을 위한 터널 확장 ② 추진지지 설치 및 반력대 설치 ③ 단계별 강관 추진 ④ 수평관 절단 및 H-BEAM 설치 ⑤ 강관내부 콘크리트 타설 ⑥ 본선 굴착 및 강관해체 ⑦ 라이닝 콘크리트 타설

3-4. 개착 Roof공법 검토

〈표 6〉 개착 Roof공법

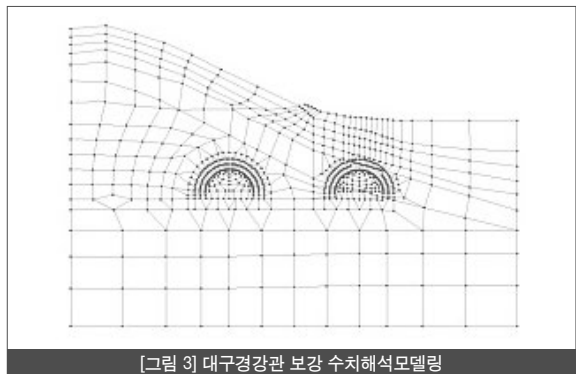
구분	검 토 사항		
공법개요	<ul style="list-style-type: none"> · 저토피부의 양호한 암반까지 터파기 후 Roof 라이닝 콘크리트를 시공하고 되메움하여 원상복구 · Footing부 보강을 Root Pile(D25, L=3.0m) 시공 · 되메움 토층을 고려하여 하중 Case별 구조계산에 의한 Roof설계 · 터널 굴진 방향에 따라 Roof구간 터널시공 		
표준 단면	<p>광주방향</p>	<p>주요고려항</p> <ul style="list-style-type: none"> · 터파기 규모결정 · Roof부 구조계산 · Roof부 기초설계 · 라이닝 구조계산 · 라이닝 구조도 작성 · 시공순서 제시 	
중 단면도			
시공 순서도	<p>① 터 파 기</p> <ul style="list-style-type: none"> · 지표부 터파기 · Root Pile 시공 	<p>② Roof 시공 및 되메움</p> <ul style="list-style-type: none"> · 거푸집 설치 · 철근콘크리트 타설 · 되메움 및 지표마감 	<p>③ 터널 마무리</p> <ul style="list-style-type: none"> · 터널구간 굴진 · 측벽부 보강 · 방수공사 · 라이닝 콘크리트 타설

4 공법 장·단점 비교

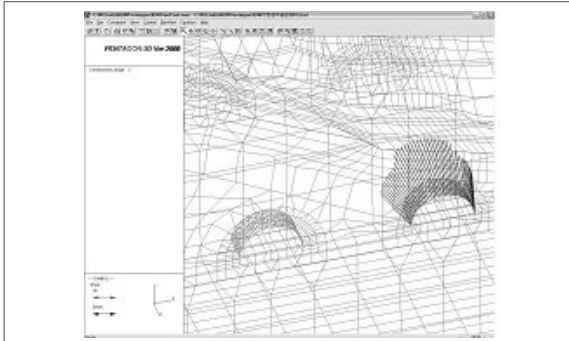
구분	개착터널(토공)	개착터널(가시설)	N.T.R공법	개착 ROOF공법
장점	<ul style="list-style-type: none"> · 토사층이 깊을수록 터파량 증대 · 터파기 공사의 안정성 보통 · - · 공사비 저렴 · 공사실적 풍부 	<ul style="list-style-type: none"> · 지층 구조에 관계없이 적용성 양호 · 가시설공사의 안정성 보통 · - · 공사비 저렴 · 공사실적 풍부 	<ul style="list-style-type: none"> · 토층 및 풍화암층에 적용성 양호 · 압입공사의 안전성 보통 · 터널 내 시공 가능 · - · 공사실적 다수 	<ul style="list-style-type: none"> · 지층구조에 관계없이 적용성 양호 · 터파기 공사의 안정성 보통 · - · 공사비 저렴 · 공사실적 미비
단점	<ul style="list-style-type: none"> · 절취 범위가 증대에 따른 환경훼손 문제 대두 · 퇴매움 층후가 6.0m 이상시 비경제적 · 외부 진입로 필요 · 계곡부 우회배수로 필요 · - · - · - 	<ul style="list-style-type: none"> · 연경암 층후가 클 경우 적용성 보통 · 퇴매움 층후가 6.0m 이상시 비경제적 · 외부 진입로 필요 · 계곡부 배수로 설치 가능 · - · - · - 	<ul style="list-style-type: none"> · 연암층이 지속적으로 발달할 경우 적용 곤란 · - · - · - · 터널 내 확대 단면 필요 · 확대 단면부 채움 콘크리트 필요 · 공사비 고가 	<ul style="list-style-type: none"> · 토사층이 깊을 경우 적용성 보통 · 퇴매움 층후가 6.0m 이상시 비경제적 · 외부 진입로 필요 · 계곡부 우회배수로 필요 · - · Roof 콘크리트 추가 필요 · -
환경 훼손	30×100=3000㎡	600㎡	- ㎡	2800㎡
공기	<ul style="list-style-type: none"> · 가시설 진입로 개설 + 토공 : 3개월 · 라이닝 방수공 + 콘크리트 공사 + 퇴매움 : 2개월 · 계 : 5개월 	<ul style="list-style-type: none"> · 가시설 진입로 개설 + 가시설 공사 : 4개월 · 라이닝 방수공 + 콘크리트 공사 + 퇴매움 : 2개월 · 계 : 6개월 	<ul style="list-style-type: none"> · 확대단면 + 압입공사 + 채움콘크리트 : 8개월 · 터널굴착 + 라이닝 공사 : 4개월 · 계 : 12개월 	<ul style="list-style-type: none"> · 터파기 + Roof 설치 + 퇴매움 : 4개월 · 터널굴착 + 라이닝 공사 : 4개월 · 계 : 8개월
공사비	6억원	6.5억원	6억원	8억원

5 갱내 보강 공법 검토

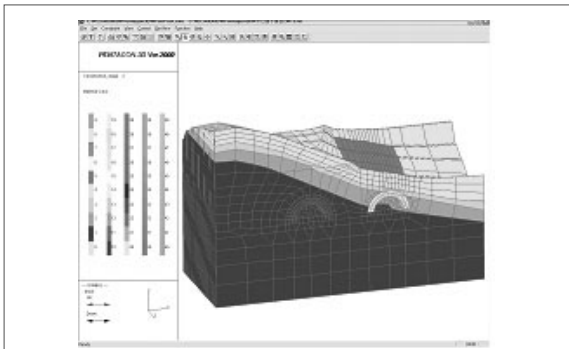
검토 결과는 위와 같이 4가지 공법에 대한 공사비 측면에서 볼 때, 개착공법이 유리한 것으로 분석되었으나 터널주변 환경 및 민원을 고려할 경우 갱내에서 작업이 가능한 공법을 적용하여야만 한다. 이 경우 갱내보강이 가능한 공법은 상기에서 예시된 N.T.R공법 이외에 대구경 강관다단 그라우팅공법을 들 수 있다. 실제로 당초(원설계) 검토된 N.T.R공법은 공사기간이 길고 공사비가 고가이며 확대 단면부 처리가 어렵다는 단점으로 인해 대구경 강관다단 그라우팅 공법으로 변경하여 현장에 적용하였다. 현장 적용시 검토한 3D 수치해석 모델링 및 시공순서에 따른 검토결과는 다음과 같다.



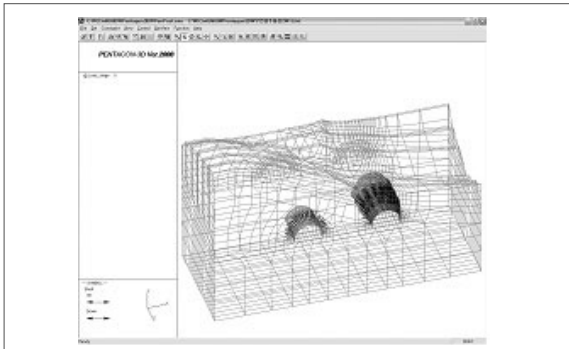
[그림 3] 대구경강관 보강 수치해석모델링



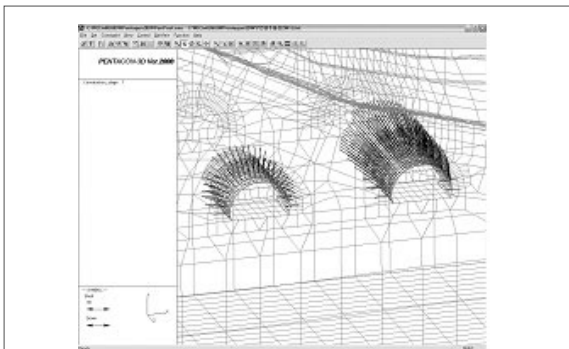
[그림 4] 광주 방향 강관다단보강



[그림 5] 터널 상반굴착



[그림 6] 터널 상반지보 설치



[그림 7] 터널 하반굴착 및 지보설치

6 결론

대구경 강관 보강 후 터널을 굴착함에 따라 변위 및 지보재 응력은 증가하지만 굴착 직후 수렴하였으며, 굴착시에 천단 및 측벽 슛크리트 휨 압축응력은 측벽부에서 최대 82.22 kg/cm²로 나타났고 록볼트 축력은 최대 7.07ton 으로서 허용기준치 이내이다.

측압계수 적용에 따른 안정성을 검토하면 다음과 같다. 무안공항 방향 터널의 최대 천단침하량은 Ko=1.0일 때 1.414mm, 내공변위는 최대 2.392mm, 슛크리트 최대 휨 압축응력은 Ko = 2.0일 때 78.87kg/cm²로 나타났으며 이는 허용치 이내이다.

또한, 광주 방향 터널의 최대 천단침하량은 2.392mm, 내공변위는 Ko = 1.0일 때 최대 2.319mm, 슛크리트 최대 휨 압축응력은 Ko = 2.0일 때 82.22kg/cm²로 나타났으며 이 또한 허용치 이내로 검토되었다.

특히, 슛크리트 최대 휨 압축응력은 Ko = 1.0일 때 51.081kg/cm², Ko = 2.0일 때 82.22kg/cm²로 무안공항 방향 터널 측벽부에서 발생했으며, 이는 응력 재배분과 편토압에 의한 응력집중에 의한 것으로 판단되나 허용치 이내이므로 설치된 지보재의 안정성에는 문제가 없는 것으로 검토되었다.

저토피 구간으로 인한 불리한 지반조건으로 인해 무안방향 터널의 슛크리트 응력 및 록볼트 축력이 비교적 크게 발생하였으나 허용치 이내이고, 상대적으로 광주방향 터널은 충분한 보강을 실시하여 비교적 적게 발생하였다.

갱내에서 적용이 가능한 대구경 강관보강 그라우팅공법을 적용하여 저토피 구간에서도 기존 자연환경에 영향을 주지 않고 안전하게 터널을 굴착할 수 있으며, 경제성 또한 확보할 수 있었다.

참고문헌

1. G.Angnostou and K.Kovari(1996), "Face Stability Conditions With Earth-Pressure-Balanced Shields", Tunnelling and Underground Technology, Vol.11, No.2, pp.165 ~ 173
2. G.Angnostou and K.Kovari(1994), "The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnels", Tunnelling and Underground Technology, Vol.9, No.2, pp.165 ~ 174
3. N.H. Danziger and W.D. Kennedy, 1982, "Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon tunnels.", 4th Int. Sym. on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, 169-181.