

# 도로하부를 통과하는 철도터널의 특수공법 적용사례

## Case of construction method to the railway tunnel under the road

김선홍\*                  조용석\*\*                  김동기\*\*\*                  박병은\*\*\*\*  
Kim, Sun-Hong    Jo, Yong-Seok    Kim, Dong-Ki    Park, Byung-Eun

---

### ABSTRACT

This paper is about the examination and selection of the special method applied to the railway tunnel which will lie under the road. Moreover, the road was constructed on the weak ground. Eventually, we select DSM, considering geological condition, stability during construction of the railway tunnel, and economic efficiency. The 3D-analysis, performed with PENTAGON-3D and MIDAS CIVIL-3D, shows that allowable standards are all satisfied. In the design of the railroad tunnel under the road at low depth, this paper will give useful data for the selection of the tunneling method.

**Keyword : DSM, Pipe roof, TRcM, 3D-analysis**

---

## 1. 서론

저토포 연약지반구간에서 철도터널이 도로하부를 통과하는 경우, NATM 공법이나 재래식 산악터널공법으로는 지표침하 억제, 터널 안정성 확보, 시공성 및 경제성 등의 한계로 인하여 시공이 곤란하여 다양한 특수공법들이 적용되고 있다.

특히, 붕적층 및 풍화토층으로 구성된 연약지반에서는 막장자립, 지표침하관리, 현장 적용성이 우수한 공법의 선정이 중요하며, 이에 본 논문에서는 현장현황에 적용가능한 공법인 DSM 공법, Pipe Roof 공법, TRcM 공법 등에 대하여 비교·검토하였다.

그 결과, 막장자립, 지표침하, 경제성 등이 우수한 DSM(Divided shield method) 공법을 선정하였으며, 수치해석으로 터널의 안정성 및 상부도로침하량을 검토하여 DSM 공법의 적정성을 확인하였다.

수치해석은 3차원 지반해석 프로그램인 Pentagon 3D과 구조해석 프로그램인 MIDAS CIVIL-3D를 사용하였으며, 터널, DSM 지보재 및 상부도로침하량을 검토하였다.

---

(주)유신코퍼레이션 지반·터널2부 상무, 정희원

E-mail : shkim@yooshin.co.kr

TEL : (02)6202-0832 FAX : (02)6202-0829

\*\* (주)유신코퍼레이션 철도구조연구실 상무, 정희원

\*\*\* (주)일신하이텍 철도부 전무이사, 정희원

\*\*\*\* 한국철도시설공단 영남지역본부 부장, 정희원

## 2. 현장개요

본 현장은 동해선 죽변~북면간 철도건설공사 구간 중 죽변터널(L=950m) 종점부 도로하부통과구간에 적용한 설계사례로서, 그림 1. 에서 보는바와 같이 신설철도노선이 약 30°의 교차각을 이루며 기존국도(왕복 4차선) 하부를 통과하고 있다.

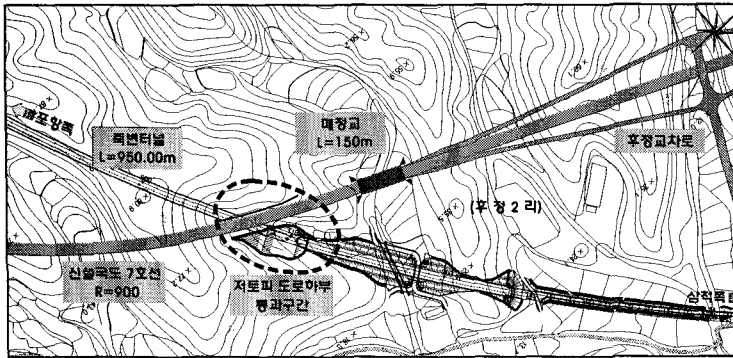


그림 1. 평면선형 및 주변지장물 현황도



그림 2. 도로하부 통과구간 상부 전경

철도터널과 교차되는 기존국도구간은 완만한 구릉사면과 접한 성토노반으로 2~6m의 성토층이 분포하며, 약 8m 하부에 철도터널이 계획되어 있어 터널굴착에 따른 도로노면침하 및 균열이 예상된다.

검토구간의 지반조사 결과, 성토층, 붕적층 및 풍화암, 풍화암, 연암의 다양한 지층이 형성되어 있으며, 터널 측벽 및 바닥부까지 토사층이 분포하는 연약한 지반으로 NATM 공법 시공이 어려운 구간이다.

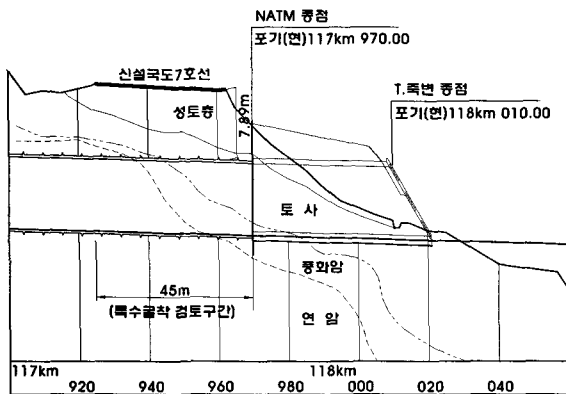


그림 3. 종단면도

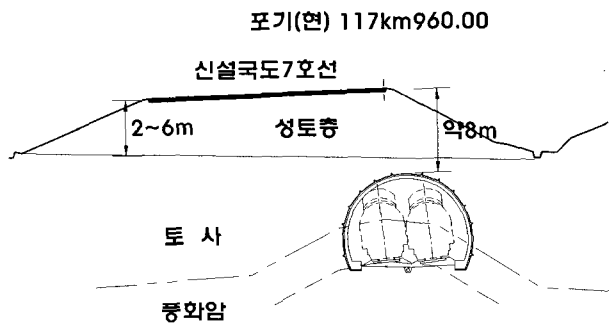


그림 4. 횡단면도

## 3. 도로하부 통과공법 선정 및 시공방법 결정

일반적으로 도로하부를 통과하는 철도터널은 상부도로의 단계별 이설에 의한 개착터널 시공이 가장 보편적인 방법이나 검토대상 지역은 그림 2. 에서 보는바와 같이 주행중인 차량이 곡선구간을 빠져나오는 구간으로 공사구간에 대한 시인성이 불리하여 교통사고발생이 우려되고, 교량 및 입체교차로와 근접하여 단계별 도로 이설시 작업공간 및 가설도로의 선형 확보가 어려운 상황이다.

따라서, 설계초기단계에서는 지상보강그라우팅 후 갱내 대구경 강관다단그라우팅 공법을 적용하여 도로하부를 통과하는 방법을 검토하였으나, 성토재료가 불균질한 구간에 대한 보강효과의 신뢰성 저하와 원지반보다 이완된 성토구간 보강시 침하발생우려 등의 문제로 특수한 굴착공법인 Earth Tunnel 공법의 적용성이 검토되었다.

Earth Tunnel 공법은 막장자립이 곤란한 연약지반에 적용하여 상부 지장물 및 주변지반의 영향을 최

소화시키는 공법으로 근래 과밀화된 교통난이나 지하 매설물의 장애로 인하여 개착공사를 하지 못하는 지하터널공사에 자주 적용된다.

이에, Earth Tunnel 공법들 중 현장여건에 적용가능한 DSM, PIPE ROOF, TRcM 공법을 비교 검토하여 가장적합한 공법을 선정하였으며, 공법 선정시 검토방향은 다음과 같다.

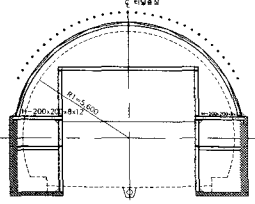
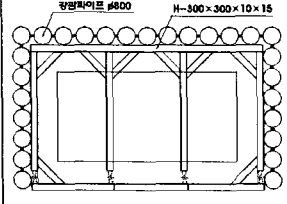
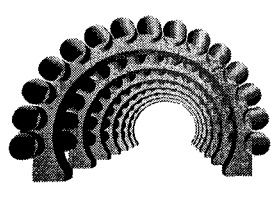
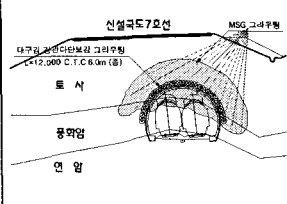
- ① 터널막장 및 상부 지반이동으로 인한 도로의 침하발생 최소화
- ② 지하수 유출시 지반응력증가 및 토립자 유실에 의한 터널안정성 저하
- ③ 시공시 지반상태 확인 및 응급조치가 용이한 굴착공법 선정
- ④ 곡선선형 및 일방향 작업여건에 대한 적용성이 우수

기존차선을 우회시키지 않으면서 터널시공이 가능한 Earth Tunnel공법에 대하여 적용성을 검토한 결과, DSM, PIPE ROOF, TRcM 공법 시공시 지반침하 억제력이 우수한 것으로 검토되었으나, 본 검토구간과 같이 곡선선형으로 일방향 작업조건의 경우 PIPE ROOF, TRcM 공법에 비하여 DSM 공법의 적용성이 높은 것으로 평가되었다.

특히, 터널 굴착시 지하수 유출에 의한 지반침하로 인해 지상에 인접한 구조물의 안정성 저하가 우려되는 경우에 갱내에서 차수그라우팅 보강이 용이하고 지반변위억제 효과가 탁월한 DSM 공법 적용이 유리할 것으로 평가되었다.

이와 같은 설계여건을 종합적으로 고려하였을 때, 도로 노면침하의 최소화와 현장 적용성이 우수하고 PIPE ROOF, TRcM 공법에 비하여 경제성에서도 유리한 DSM 공법을 선정하였으며, 세부 검토사항은 표 1.에 나타내었다.

표 1. 특수굴착공법 비교

구 분	DSM 공법	PIPE ROOF 공법	TRcM 공법	대구경 강관다단 + 지상보강그라우팅 공법
단면도				
장·단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지반이완 및 과다여굴 방지</li> <li>· 소단면 분할 굴진가능 및 보조공법 비용이 용이하여 터널안정성 우수</li> <li>· 암반층 출현시 굴착방법 변경이 용이함</li> <li>· 품질관리가 다소 복잡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 주변지반의 변형 미소</li> <li>· 지하수 유입시 안정성, 시공성 저하 우려됨</li> <li>· 현장타설콘크리트이므로 작업공간 협소, 시공성 저하</li> <li>· 암석층 Pipe 설치 곤란</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 주변지반의 변형 미소</li> <li>· 선형 구조물의 정밀시공이 필수요소이며 이격발생시 토립자 이동 및 지하수 유입으로 인한 침하발생</li> <li>· 암석층 Pipe 설치 곤란</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 암반층 출현시 굴착방법 변경이 용이함</li> <li>· 터널 안정성 확보는 이론적으로 가능하나 위험성 내재, 침하 발생 억제에 한계가 있음</li> </ul>
적용지반	토사~연암지반 적용	토사지반	토사지반	토사~연암지반
시공성	△	△	△	◎
안전성	◎	◎	◎	△
경제성	1.2~1.3	1.3~1.4	2.2~2.7	1.0(기준)
선정공법	◎			
적용	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 다양한 지층조건에서 보강 및 시공이 용이하고 공기, 공사비 및 시공경험 측면에서는 지반보강에 의한 그라우팅 공법이 유리하나 지반침하 억제 및 터널안정성 확보 측면에서 적용성이 떨어짐</li> <li>· 특수공법 중 Pipe Roof 공법과 TRcM 공법은 공사비가 다소 고가이며, 선형이 직선인 구간에만 적용가능하므로 터널 및 도로침하에 대한 안정성을 확보하면서 경제성이 우수하고 시공여건이 유리한 DSM공법 적용</li> </ul>			

DSM 공법(Divided Shield Method)은 종래의 Messer Shield 공법의 문제점(표 2.)을 개선한 공법으로, 현장현황에 맞게 단면형상, 단면분할방법 등의 변경이 자유로운 공법이다.

표 2. DSM 공법의 개선사항

구분	Messer Shield공법의 문제점	개선사항
1	· Arc Sliding에 의한 전면막장의 불안정	· 갱내 강관다단그라우팅 보강으로 막장전방의 안정성 확보
2	· Plate 꼬리부 처짐	· 강관 꼬리부를 2가지 Type으로 보강하여 처짐문제 해결
3	· 목재 토류관 부식	· 토류관을 RC판넬 또는 각파이프로 대체하여 부식 방지
4	· Tie rod의 뒤틀림	· 기존 스틸파이프를 L-형강으로 개선하여 뒤틀림 방지
5	· 시공중 지반의 변위발생에 대한 대처미흡	· 설계시의 3차원해석에 의한 변위의 예측과 시공시의 계측 결과를 Feed back하여 적절한 보강대처 가능
6	· 방수시트 접합시공이 불량하여 누수발생	· 1차 배면그라우팅 및 구체방수와 2차ECB 시트방수로 방수기능 향상

DSM 공법의 일반적인 시공순서는 “① DSM 패널 삽입 ② 막장 굴착(0.6~1.0m) ③ 굴착 후 H-BEAM 보강”의 공정으로 구성되어 있으며, 이와같은 공정을 반복 시행하여 터널굴착을 완료한다.

따라서, 본 검토대상현장의 경우에도 위의 공정으로 DSM공법을 계획하였으나, ARCH 단면이 비교적 크고 하부층의 지지력이 작기 때문에 우선 SIDE LOT방식으로 분할굴착한 후에 ARCH 부분을 RING-CUT 방식으로 굴착하도록 하였다.

ARCH 부분을 굴착할 때에는 양측 하부 지점에 집중 하중이 작용하기 때문에 이런 구조적인 문제를 해결하기 위해서 SIDE LOT를 굴착한 후에 1차 콘크리트를 타설하여 지지 강성을 증가시켰으며, SIDE LOT부와 ARCH부는 터널 상부의 토피두께가 달라 강재에 작용하는 하중이 다르므로 서로 다른 재질(SIDE LOT부는 SM490, ARCH부는 SS400)의 강재를 사용하였다. 또한, 설치된 강지보재는 종방향으로 변위가 발생하지 않도록 TIE-ROD를 설치하여 각 지보재간 일정간격을 유지하도록 하였다.

터널상부의 지층이 성토층으로서 터널굴착시 지하수 용출에 따른 2차응력 증가 및 토립자 유실이 발생할 수 있으므로 지하수위 저하 및 지반이동을 억제할 수 있도록 굴착대상구간의 터널상부에 지반보강 그라우팅 공법을 추가로 적용하였다.

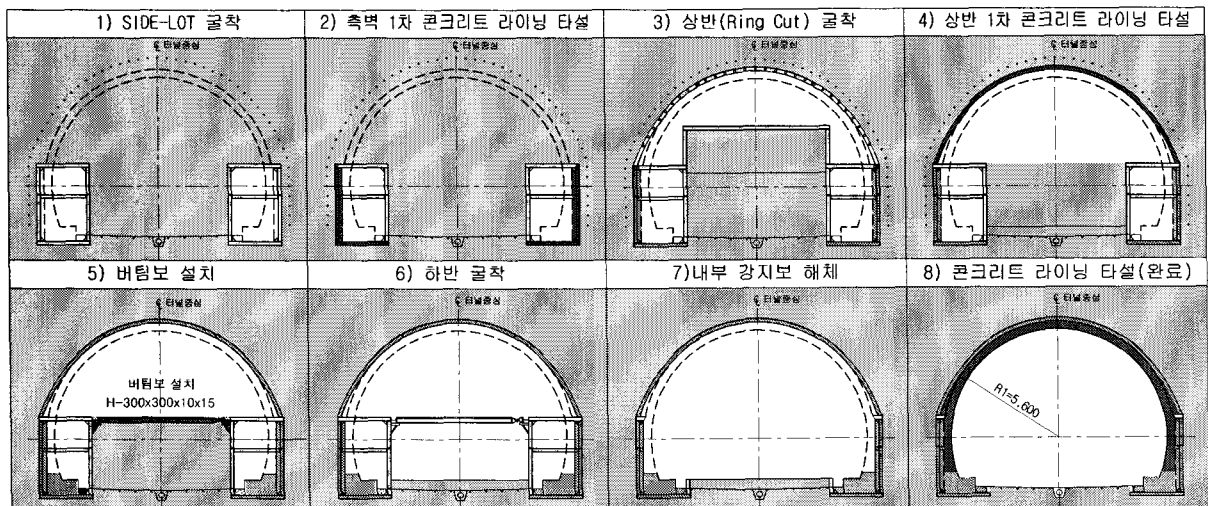


그림 5. DSM 시공순서

#### 4. 수치해석을 통한 안정성 분석

본 논문에서는 공법선정시 가장 우선적으로 요구된 조건인 터널 상부도로의 침하 최소화와 터널의 안정성을 검토하기 위하여 수치해석을 수행하였으며, 터널이 계획된 대상 지반이 불연속면이 거동을 지배하는 암반과는 달리 주로 붕적토 및 풍화토, 풍화암으로 구성되어 있어 연속체 모델을 적용하였다. 또한, 지반반력 모델을 사용하여 DSM의 강지보재에 대한 세부검토를 수행하였다.

##### 4.1 상부 도로 및 DSM 터널의 안정성 검토

터널의 안정성 및 국도침하 검토는 유한요소법을 이용한 지반해석 전용프로그램인 PENTAGON-3D를 사용하여 총 19단계의 해석단계로 구분하여 현장의 시공순서를 모사하였다.

해석영역은 DSM 굴착구간을 중심으로 주응력의 분포가 영향을 받지 않는 적정범위까지 설정하였으며, 상부는 지표면까지를 해석영역으로 설정하여 가능한 실제지형과 같은 지반상태가 되도록 하였다.

유한요소해석에는 DSM Plate, RC 판넬, 강지보공(H-pile), Strut, 1차 콘크리트 라이닝 등의 부재 모델링과 지반에 대한 요소모델링이 요구된다. 따라서, 본 해석에서는 DSM Plate, RC 판넬, 1차 콘크리트 라이닝은 휨강성을 가지는 Shell 요소로, 강지보공은 Frame 요소로 모델링하였으며, 모델 경계조건은 Moment 및 변위를 구속시키지 않았다. 또한, 지반 및 상부도로는 Solid 요소를 사용하여 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄소성 해석을 수행하였으며 해석모델링 현황은 그림 6. 과 같다.

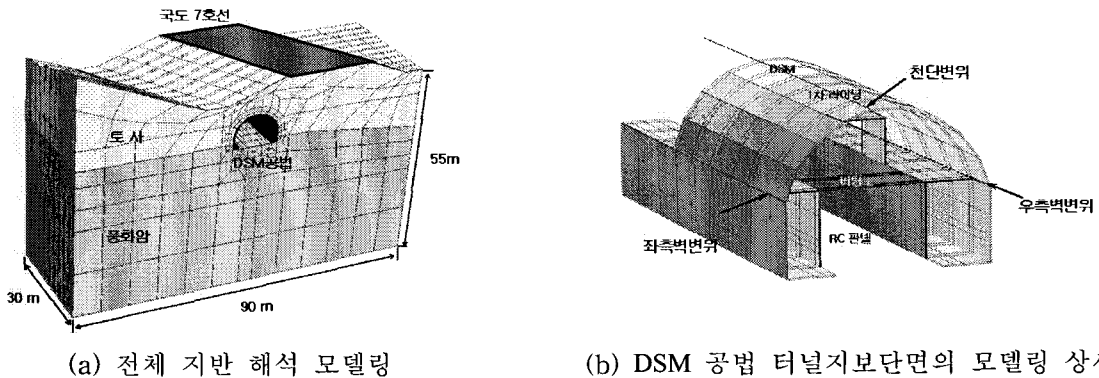


그림 6. 해석구간 지반 및 터널 모델링

지반물성치는 지반조사결과를 사용하였으며, 해석시 적용한 지반 및 보강재료의 물성치는 표 3. 에 나타내었다.

표 3. 해석 적용 지반물성치

구분	단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	변형계수(MPa)	포아손비	내부마찰각(°)	점착력(MPa)
붕적층	18.0	30	0.35	27	0.01
풍화암	20.0	100	0.32	32	0.03
그라우팅보강	18.0	100	0.32	27	0.03

해석결과, 상부도로의 최대침하량은 8.7 mm로 허용기준치 30 mm 보다 적게 발생하며, 부등침하에 대한 각변위도 종방향 1/4,167, 횡방향이 1/4,811로 매우 미소하여 상부도로의 안정성에는 영향이 없을 것으로 판단된다. DSM터널 굴착시 지표침하 발생경향은 시점측으로 굴착이 진행되면서 침하량이 서서히 커지는 경향을 보이다가 갱구부에서 18m 굴진된 국도 직하부 통과지점에서 최대 침하량을 나타내고 있으며, 굴착이 진행되는 동안 수렴하는 경향을 보인다.

터널의 내공변위는 좌측 -1.7 mm, 우측 6.4 mm로서 편토압의 터널변위 양상을 보이며, 이는 터널 좌

측으로 상부토피가 낮게 형성되기 때문인 것으로 판단되나 그 값이 미미하며 전반적으로 변위가 수렴되어 터널안정성에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

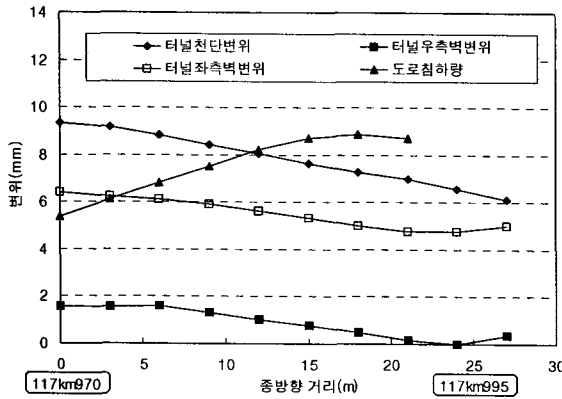


그림 7. 중방향 거리별 지표침하 및 터널내공 변위량

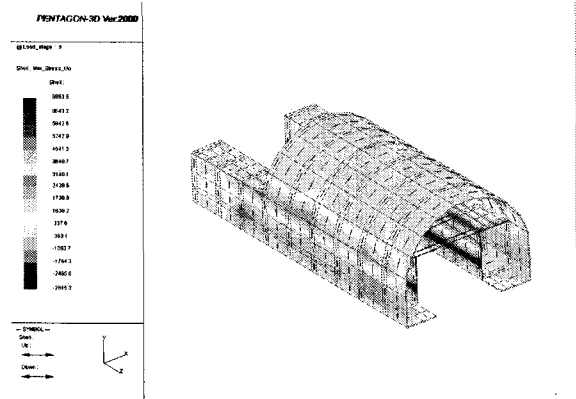


그림 8. Shell 요소의 최대응력 분포도

Frame 요소인 강재(H-Beam)에 작용하는 휨응력은 125.6 MPa(허용치 140 MPa), Plate와 복합부재인 1차 콘크리트라이닝에 작용하는 휨응력은 6.1 MPa(허용치 8.4 MPa), 전단응력은 0.23 MPa(허용치 0.36 MPa)로 지보부재에 작용하는 응력은 모두 허용치 이내의 값을 나타내며 Shell부재에 작용하는 응력은 Side Lot 상부와 아치부 하부가 접속되는 부위에서 최대로 작용한다. (그림 8).

결과적으로, 최종 굴착단계의 지표침하량, 터널 내공변위, 지보재의 부재력을 검토한 결과 모두 허용치를 만족하여 대상 검토구간의 터널 굴착 및 보강공법에 대한 계획은 적절한 것으로 판단된다.

#### 4.2 보요소법을 이용한 강지보재 응력검토

DSM 강지보재에 대한 상세검토는 구조해석 전용 프로그램인 MIDAS CIVIL을 사용하였으며, 3차원 해석을 통하여 터널의 단계별 굴착시 강지보에 작용하는 하중과 그에 따른 안정성을 분석하였다. 해석은 DSM 굴착시 강지보재가 가장 불리한 조건인 Side Lot 굴착시와 상부 ARCH 굴착시로 나누어 수행하였으며, 라멘 강구조 형식으로 모델링하였다. 적용조건은 1단계 Side Lot 굴착시 토사심도 11.75m, 도로활하중 10 kPa을 적용하였고 2단계 ARCH 굴착시 토사심도 6.9m, 도로활하중 15 kPa을 적용하였으며 측압계수는 저토피 구간임을 고려하여 0.5를 적용하였다. 해석단면 및 단면조건 해석결과에 의한 휨모멘트도는 그림 9, 그림 10. 과 같다.

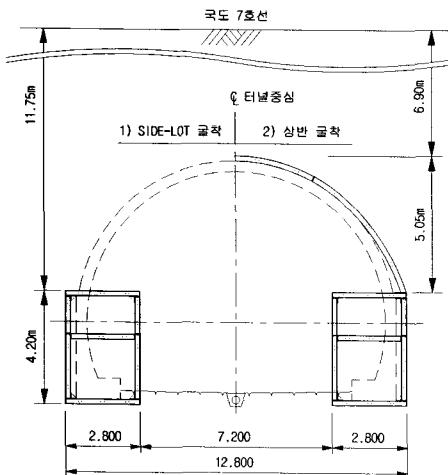
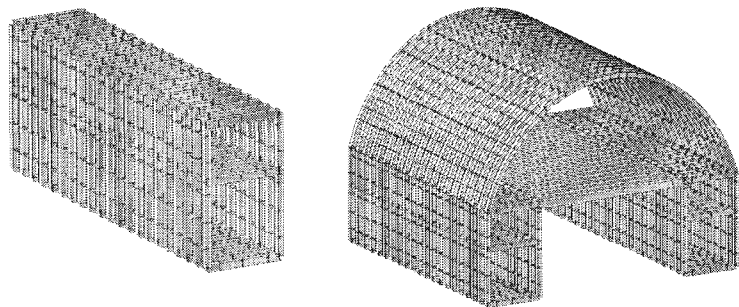


그림 9. 해석단면 및 하중조건



(a) 1단계 모델링

(b) 2단계 모델링

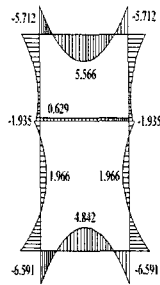
그림 10. 해석 모델링

Frame 해석 결과, 주요부재인 H-beam과 연결부재인 Bolt에 작용하는 응력은 표 4. 에 나타낸 바와 같이 모두 허용치 이내로서 터널의 안정성은 확보되는 것으로 판단된다.

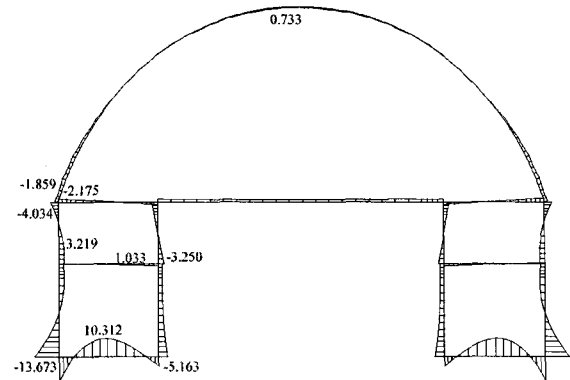
부재력이 가장 많이 작용하는 위치는 1단계 Side Lot 굴착시에는 바닥부 강재에서 최대단면력이 발생하고, 2단계 아치부 굴착시에는 아치부와 Side Lot이 접속하는 우각부에서 최대 단면력이 발생한다.

표 6. 검토부재의 최대 부재력

구 분		H-beam		Bolt	비 고
		휨응력 (MPa)	전단응력 (MPa)	전단력 (Ton/ea)	
SIDE LOT 굴착시	부재력	137.3	123.0	5.79	허용치 만족 재질 SM490
	허용치	285 (190*1.5)	165 (110*1.5)	5.82 (3.88*1.5)	
ARCH부 굴착시	부재력	49.4	28.1	4.65	허용치 만족 재질 SS400
	허용치	210 (140*1.5)	120 (80*1.5)	5.79 (3.88*1.5)	



(a) 1단계 단면력도



(b) 2단계 단면력도

그림 11. 구조계산 결과 단면력도

## 5. 결론

저토피 국도하부 통과구간에 터널굴착을 위한 특수공법을 계획하고 수치해석을 통하여 터널 및 상부 도로의 안정성을 검토하였다. 본 검토대상 현장은 도로의 선형 여건상 단계별 도로이설에 의한 개착공법의 적용이 불가능하여 기존 도로의 선형을 그대로 유지한 상태에서 터널 시공이 가능한 특수굴착공법 중 터널과 도로의 안정성을 확보하면서 경제성 측면에서 유리한 DSM 공법을 적용하였다. 특수굴착공법의 선정 및 안정성 검토를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 터널굴착에 따른 경제성과 시공성 그리고 강관다단 그라우팅에 의해 선행침하를 최대한 억제시키는 점을 고려할 때 검토된 특수공법 중 DSM 공법의 적용성이 가장 우수한 것으로 판단된다.
- 안정성 검토 결과, 도로의 최대 지표침하량은 8.7 mm로서 허용침하량 30 mm에 비하여 매우 작은 값을 나타내며 부등침하량도 갱구를 기준으로 상부도로의 좌·우측 침하량 차이가 4.88 mm(1/4,470)로서 허용부등침하량 1/500 이내의 안정된 상태를 나타낸다.
- 터널의 천단침하량은 최대 9.3 mm이고 터널 좌측 내공변위가 -1.7 mm, 우측 변위가 6.4 mm로서 편도압의 터널변위 양상을 보이고 있으나 그 값이 미소하고 수렴되어 안정된 상태를 나타낸다.
- 강지보재 상세검토 결과, 1단계 Side Lot 굴착시 H-beam에 작용하는 응력이 최대값을 나타내나, 최대 137.3 MPa로서 허용치 285 MPa이내로 안정된 상태를 나타낸다.

위와 같은 해석 및 공법검토 결과를 종합해 볼 때, 저토피 도로하부 통과구간에 적용된 DSM 공법은 침하 및 변위억제 기능이 우수하여 취약지반 내에서 터널굴착에 따른 터널 및 상부도로의 안정성을 확보할 것으로 사료된다. DSM 공법은 굴착중 지하수 유출 등에 대한 대처가 용이하고, 지반상태에 따라 분할단면 및 횡수 조정이 가능하며, 노선이 직선이 아니더라도 좌우상하 시공이 가능하므로 도심지나 상부 구조물이 근접된 연약지반에서 적용성이 높은 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. (2004.10), “DSM(Divided Shield Method) 공법의 현장 적용성 및 시공사례에 관한 연구”, 한국지반환경공학회
2. (2003), “건설교통부 구조물 기초설계기준 해설”, 한국지반공학회
3. 권호진, 김동수, 박준범, 정성교(2001), “기초공학”, 구미서관
4. (1998.11), “지반공학시리즈(7) 터널”, 구미서관, 한국지반공학회
5. 박두교(2000.03), “Messer Shield 공법의 개선방안에 대한 연구”, 석사학위논문, 동아대학교 산업대학원
6. 홍창수, 황대진, 이강호, 조금식(2005.09), “도심지 지하상가 연결통로 DSM공법 적용사례 연구”