

# OO터널 붕락구간 및 저토피 통과구간에 대한 보강 사례 연구

백기현, 노종륜, 김용일, 최용성 (대우건설)

## 1. 서 론

최근 다양한 지질조건에서 도로 및 철도 공사가 진행되면서 시공 중 여러 가지 문제가 발생되고 있다. 그 원인 중에는 석회암, 미고결 이암층, 석탄층 등의 지질학적인 위험요소가 포함된 지역에 대한 공학적인 검토 부족에 있으며, 특히 터널과 같은 암반 구조물의 경우 대상 구간의 충분한 지질학적인 요소와 암반공학적인 특성을 명확히 이해하지 못하여 많은 시공상의 애로가 발생하고 있다. 여기서는 석회암 지대에서의 터널 시공 중 발생한 붕락구간 및 저토피 지역 통과 사례에 대하여 검토하였다.

당 현장은 충청북도 단양의 석회암지역을 통과하는 철도현장으로 OO터널 종점부에서부터 193.5m 정도를 굴착하던 중 STA. 163km461.5 지점 굴진시 막장의 천단부에서 낙반이 발생하여 터널상부의 지표면까지 함몰되는 사고가 발생하였다. 이 지역은 석회암 지대로서 돌리네가 발달하여 터널깊이까지 토사층이 발달하고 있어 터널붕락구간 및 돌리네 통과구간에 대한 적용 가능한 지반보강공법을 검토, 선정하고 수치해석을 수행하여 터널시공 중은 물론 시공완료 후의 장기적인 안정성을 확보할 필요가 있었다.

시추조사, 현장시험, 실내시험 등의 지반조사를 실시하여 지반 보강공법을 선정하고 3차원 수치해석을 통해 터널 붕락구간 및 저토피 통과구간에 대한 안정성을 검토한 후에 안전한 시공을 실시하는데 그 목적이 있다.

## 2. 현장의 지형 조건 및 붕락 상황

### 2.1 현장의 지형 조건

본 터널구간은 행정구역상 단양군 매포읍에 위치하며 차령산맥의 남부지방과 남한강 상류의 수계를 포함하는 지형으로서 산지의 지형에 따라서 중앙 구릉성 산지, 박달령-대덕산, 동부고지대, 서부산지, 중남저산지로 나누어지는데, 본 지역은 중남저산지에 해당한다. 중남저산지의 특성은 대석회암층군을 바탕으로 하고 있어 비교적 저산지안에 변성퇴적암이 얹혀 있고 맹자산, 당두산, 대덕산이 둥근산형으로 솟아있고 남한강역의 부근에는 대소의 카르스트 지형이 보인다.

수계로는 이곳을 중심으로 서쪽에는 충주호가 동쪽에는 한강이 위치하고 있으며, 지질은 오르도비스기의 대석회암 등에 해당하는 석회 규산염암, 석회암, 돌로마이트가 주를 형성하고 있으며 이들 주변을 백악기 시대에 해당하는 흑운모화강암이 주위에 산지를 형성하여 발달하고 있으며 이를 부정합으로 제 4기의 충적층이 덮고 있다.

## 2.2 봉락 상황

OO터널은 갱구부 종점부에서 약 195m정도 굴착이 진행된 상태로서 현 막장 (STA.163km461.5)에서 갱구부 쪽으로 약 20m를 일부하반 남겨진 상태에서 굴착 중 돌리네 발달에 따른 싱크홀의 영향으로 봉락되어 상부지표면에 16m×14m의 크기의 함몰을 보였다 (사진 1). 이때 STA. 163km473~STA. 163km461.5 구간 약 10m정도에 막장으로 붕괴된 토사가 흘러내렸으며(사진 2), 추가시추 조사에 의한 터널 봉락 및 저토피 구간의 현황은 아래 그림 1과 같다.

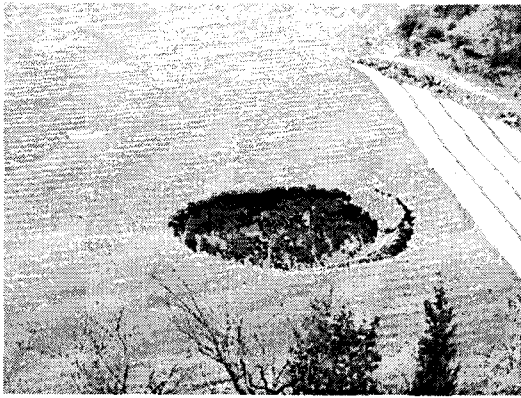


사진 1. 지표면 함몰 전경

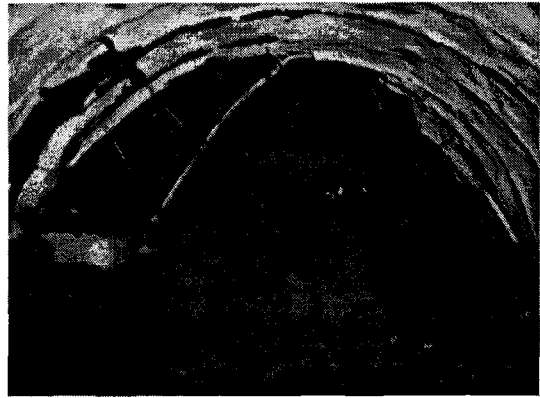


사진 2. 막장 봉락

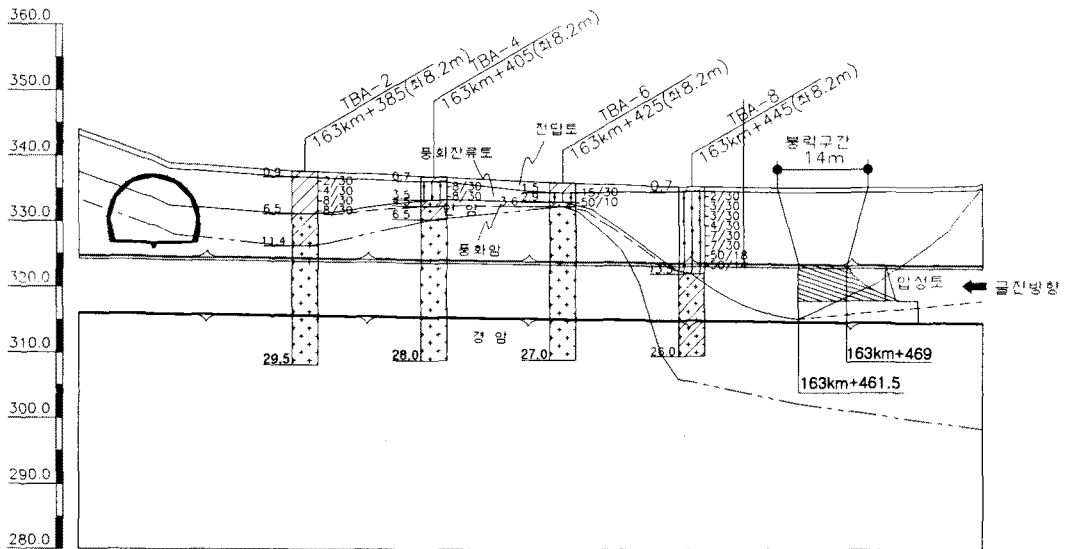


그림 1. 봉락 및 저토피 구간 현황(종단면도)

### 3. 지반조사 및 보강공법 선정

#### 3.1 추가 시추조사

붕락지점 전방의 저토피 구간에 대한 지반조건을 상세하게 파악하기 위해 20m 간격으로 노선 좌우에 각각 4공씩 8공의 시추조사를 추가로 실시하여 지층상태 및 지질구조를 분석한 결과 토사층, 풍화암층, 연암 및 경암층이 발달하고 있는 것을 확인하였다. 돌리네의 싱크홀 발달로 토사층이 터널심도까지 연결되어 굴착시 붕괴된 것으로 보이며, 저토피 구간 역시 깊은 토사층 발달로 터널 굴착시 붕괴가능성이 높은 것으로 판단되었다.

표 1. 시추공별 지층현황

공 번	위 치	토질 및 층후(m)					계	S.P.T
		전담토층 (점 토)	풍화진류토층 (점 토)	풍화암	연 암	경 암		
TBA-1	163km+385(우)	0.9	15.6	-	12.5	-	29.0	10
TBA-2	163km+385(좌)	0.9	5.6	-	4.9	17.6	29.0	4
TBA-3	163km+405(우)	0.9	7.6	-	14.0	5.5	28.0	5
TBA-4	163km+405(좌)	0.7	2.8	1.0	2.0	21.5	28.0	2
TBA-5	163km+425(우)	0.8	6.2	-	-	20.0	27.0	4
TBA-6	163km+425(좌)	1.5	1.4	0.7	-	23.4	27.0	2
TBA-7	163km+445(우)	0.7	12.8	1.4	-	12.1	26.0	8
TBA-8	163km+445(좌)	0.9	12.6	-	12.5	-	26.0	8
계		7.3	64.6	3.1	45.9	100.1	220	43

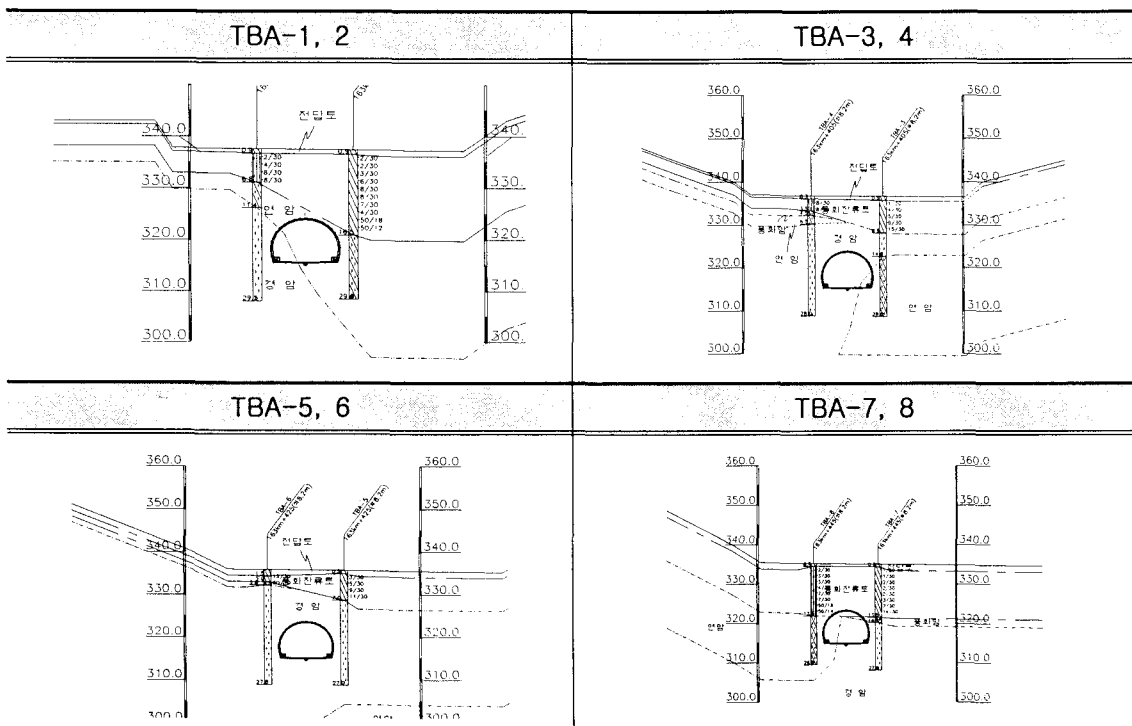


그림 2. 추가 시추구간 횡단면도

### 3.2 현장시험 및 실내시험

표준관입시험, 공내재하시험, 현장투수시험 등의 현장시험을 실시하였다. 공내재하시험 결과 풍화잔류토에서 변형계수와 탄성계수는 각각 2,668kgf/cm<sup>2</sup>과 4.802kgf/cm<sup>2</sup>을 나타내며, 연암에서 변형계수는 15,046 ~ 26,350kgf/cm<sup>2</sup>이고 탄성계수는 25,468 ~ 46,984kgf/cm<sup>2</sup>를 나타내고, 현장투수시험결과 투수계수는 2.705E-05 ~ 8.181E-05cm/sec(평균 6.723E-05cm/sec)의 범위를 나타낸다. 또한 실내토질시험, 실내암석시험 등의 실내시험을 실시하여 암반등급과 지반정수를 산정하였으며, 이 결과에 따라 봉락구간 및 저토피 통과구간에 대한 적절한 보강공법과 굴착공법을 선정하였다.

### 3.3 보강공법 선정

봉락구간에 대한 보강공법으로는 수평JSP보강과 대구경강관보강그라우팅 공법이 검토되었다. 시공 순서는 제1단계로 이완된 토체가 지하수 침투 등에 의해 느슨해져 막장면으로 밀려나오지 않도록 막장면에 압성토를 실시하고 슛크리트로 보강하여 더 이상의 붕괴 및 토체의 이완을 방지하기 위한 목적으로 우선 시공한다. 제2단계는 지표함몰부(16m×14m×2.5m)를 양질의 토사로 되메우기를 실시한 후 제3단계로 막장면 천단부에서 봉락부로 경사천공하여 마이크로시멘트로 터널천단에서 6m 범위까지 그라우팅을 실시함으로써 봉락부의 이완된 토체에 대해서 채움을 실시한다. 제4단계는 봉락부의 보강을 완결한 후 막장면의 터널굴착을 위해 터널단면 180°까지 수평JSP 및 대구경강관보강을 실시하여 굴착시 안정성을 확보하도록 한다(그림 3).

본 붕괴구간에 대한 굴착방법으로는 토사층에 적절한 미니벤치컷이 제안되었다. 양호한 암반의 경우 롱벤치컷을 주로 사용하고 있으나, 본 구간처럼 상반굴착과 하반굴착의 간격이 먼 경우는 상반굴착이 진행된 후 오랜 시간이 경과하고 나서 하반을 굴착하게 되므로 터널 보강을 위해 적용된 지보재에 과도한 응력이 작용할 경우 대처하기 곤란하기 때문이다. 따라서 미니벤치컷을 적용하여 상하반 굴착에 따른 안정성을 파악하고 그 대책을 강구하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

붕괴지역 이후의 저토피구간에 대한 시추결과 STA. 163km397에서 STA. 163km427까지는 양호한 암반상태를 보이나, 봉락지점의 변위수렴을 고려한 4D(D:터널폭) 영향원에 있고 전후구간의 굴착방법(상하분할)의 일관성을 위해 지보패턴을 한 등급 하향시켜 P-4로 선정하였고, 토사층과의 전이구간은 P-5로 결정하였다. 한편 STA. 163km361에서 STA. 163km391까지는 터널 굴착선 가까이에 토사층이 있기 때문에 소구경 강관다단그라우팅 공법을 적용하였으며, 그 현황은 표 2와 같다.

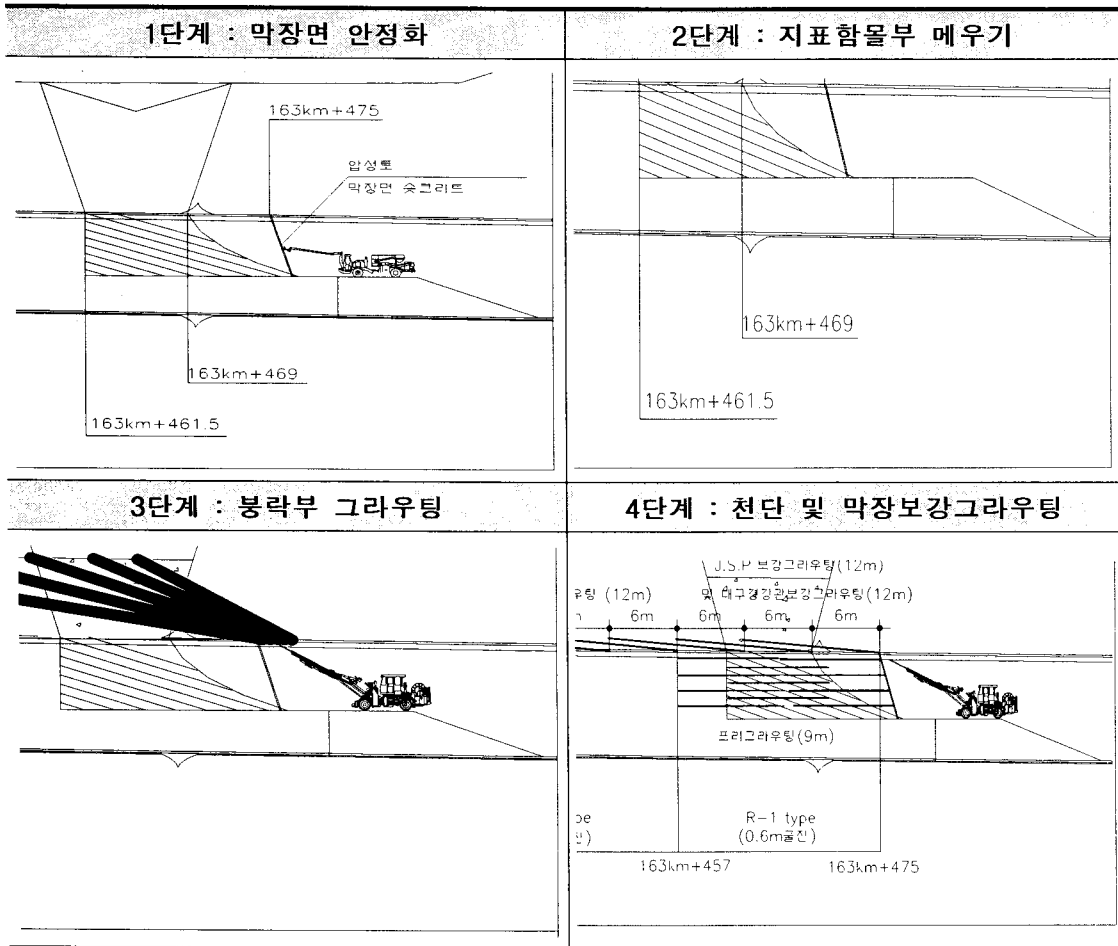


그림 3. 봉락부 보강순서도

표 2. 지보패턴 및 보강패턴의 지보재 적용현황

구분	P-4	P-5	R-1	R-2	R-3
숏크리트(mm)	80	160	200	200	200
록볼트(m)	1.5×1.5	1.0×1.5	1.0×1.0	1.0×1.2	1.0×1.5
강지보(간격)	LG-50×20×30 (1.5m)	LG-70×20×30 (1.2m)	H-150×150×7× 10(1m)	H-150×150×7× 10(0.8m)	H-150×150×7× 10(0.5m)
라이닝두께(mm)	300	300	400	400	300
보조공법	필요시 포폴링	포폴링	J.S.P 및 대구경강관 그라우팅	대구경강관 그라우팅	소구경강관 그라우팅

## 4. 터널 안정성 해석

### 4.1 해석 개요

OO터널의 굴착도중 STA. 163km461.5 ~ 163km470 구간에서 붕락사고가 발생하였으며, 붕락구간 보강 공사 및 저토피구간 통과구간 공사시 추가 붕락이 발생할 가능성이 있었다. 따라서 지반조사를 통해 결정된 지반정수, 암반등급과 보강공법을 적용하여 3차원 수치해석을 실시하여 붕락구간 통과에 대한 적용보강공법의 적정성 및 안정성을 검증하였다. 해석에 사용된 프로그램은 PENTAGON 3D이며, 해석모델로는 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 사용하는 유한요소 해석 프로그램이다.

### 4.2 해석조건 및 방법

해석대상 구간 및 해석단면은 그림 4, 5와 같고, 해석적용 조건 및 해석적용 물성치는 표 3, 4와 같다.

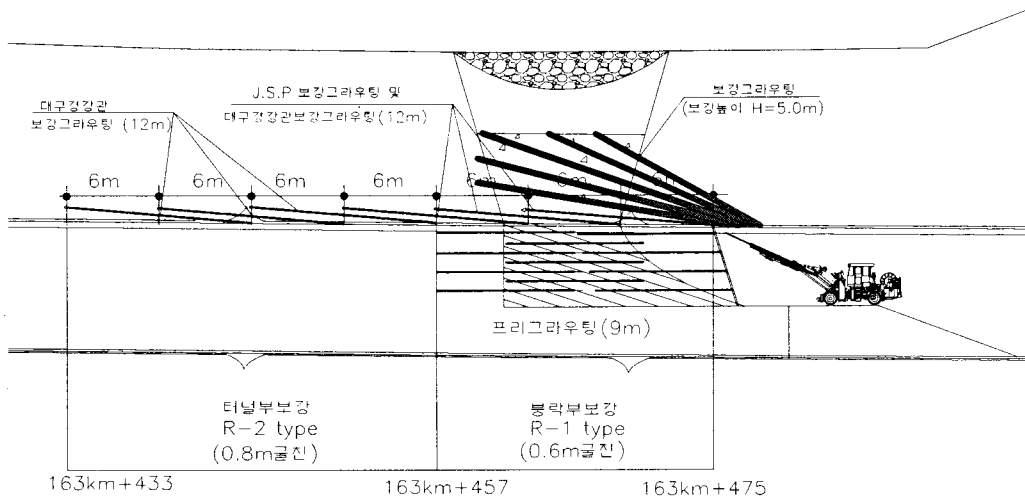


그림 4. 터널 해석 구간

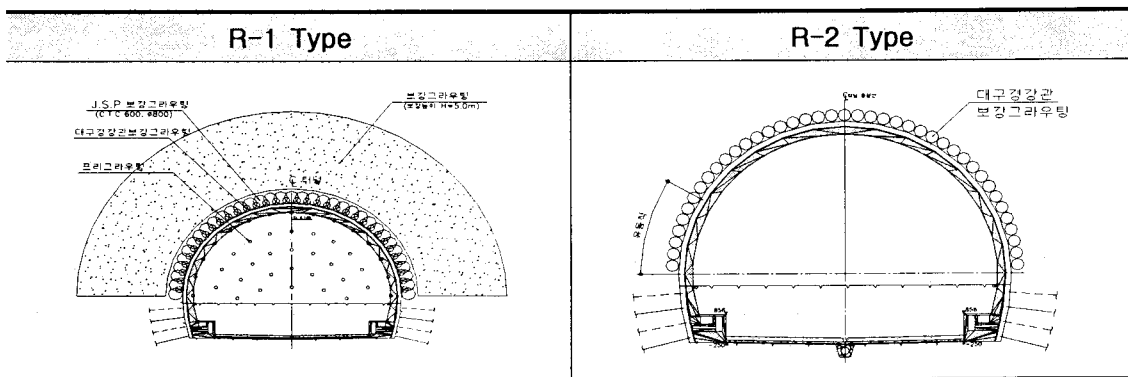


그림 5. 해석단면

표 3. 해석 프로그램 입력 조건

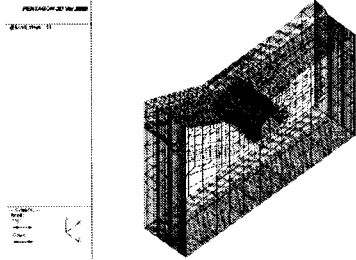
구 분	해석적용사항	모델링
해석영역	<ul style="list-style-type: none"> <li>좌·우측: 4.5D, 하부: 4.0D</li> <li>상부: 지표면 모델링</li> </ul>	
경계조건	<ul style="list-style-type: none"> <li>좌·우측면: 수평방향, 하부면: 연직방향</li> <li>전·후면: 굴진(Z)방향 변위 구속</li> </ul>	
적용지보패턴	<ul style="list-style-type: none"> <li>R-1, R-2</li> </ul>	
적용프로그램	<ul style="list-style-type: none"> <li>PENTAGON 3D</li> </ul>	
해석모델	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mohr-Coulomb 탄소성 모델</li> </ul>	

표 4. 해석적용 물성치

구 분	변형계수 (tf/m <sup>2</sup> )	점착력 (tf/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)	포아송비 (ν)	단위중량 (tf/m <sup>3</sup> )	
경 압	600,000	150	35	0.23	2.5	
연 압	300,000	50	26	0.25	2.4	
풍화 토	미보강	1,300	0.6	22	0.4	1.8
	J.S.P 보강	131,561	11.94	22	0.4	1.8
	상부보강그라우팅	71,268	8.10	22	0.4	1.8
	막장보강그라우팅	4,159	0.91	22	0.4	1.8

### 4.3 해석결과

해석 결과 붕락구간 통과시 최대천단변위는 지보패턴이 변경되는 굴착지점에서 5.198mm 이고, 내공변위는 풍화토층과 터널하반 좌측벽부 조우면에서 3.404mm, 우측벽부에서 0.589mm로 나타나 총 3.993mm로 예상되었다. 슛크리트 압축응력, 전단응력 및 록볼트 축력은 각각 42.561kgf/cm<sup>2</sup>, 3.402kgf/cm<sup>2</sup>, 2.726tf 로 예상되어 허용한계 이내로서 터널 안정성은 확보된 것으로 판단된다(표 5).

전방 붕락구간 통과시 터널거동은 연약대 통과시와 유사할 것으로 예상되지만 터널 천단부 보강공법의 도입과 상부붕락구간과 터널 막장 그라우팅을 통해 안정성이 확보되는 것으로 판단된다. 강관다단보강 영역 외 풍화토층과 터널 하반 측벽부와의 교차부 굴착시 국부적인 응력집중 현상에 의한 압축파괴가 우려되므로 시공중 보강공법 적용 후 터널 막장 굴착시 하반부의 풍화토층 출현시 추가적인 보강을 통해 터널의 안정성을 확보하여야 할 것으로 나타났다.

표 5. 수치해석 결과

구 분	최대천단변위 (mm)	최대수평변위(mm)		췁크리트 응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )		최대 록볼트 축력 (tonf)
		상반 내공 (좌측, 우측)	하반 내공 (좌측, 우측)	휨응력	전단 응력	
해석결과	5.198	3.993 (3.404, 0.589)	0.476 (0.319, 0.157)	42.561	3.402	2.726

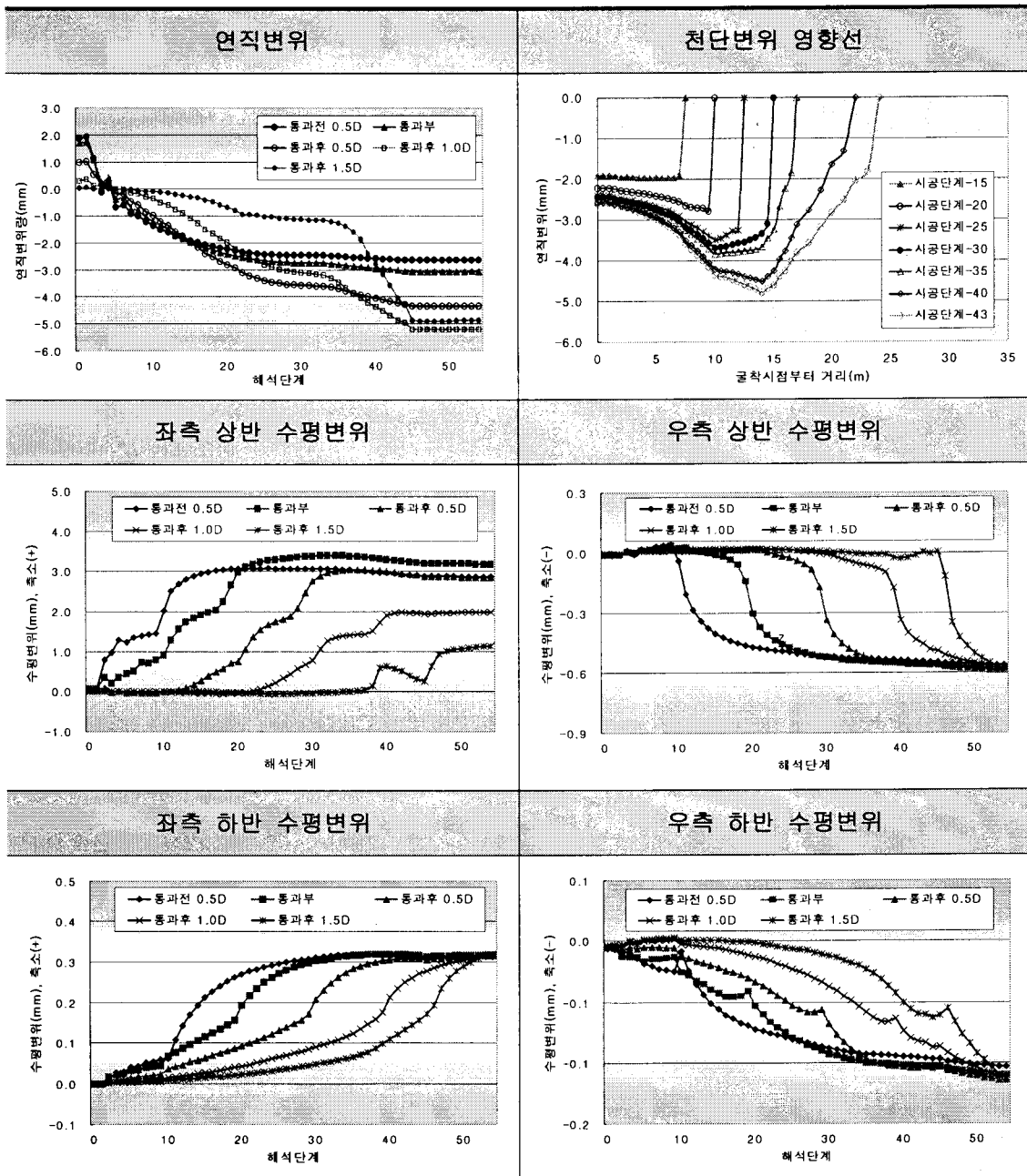


그림 6. 시공단계별 발생변위



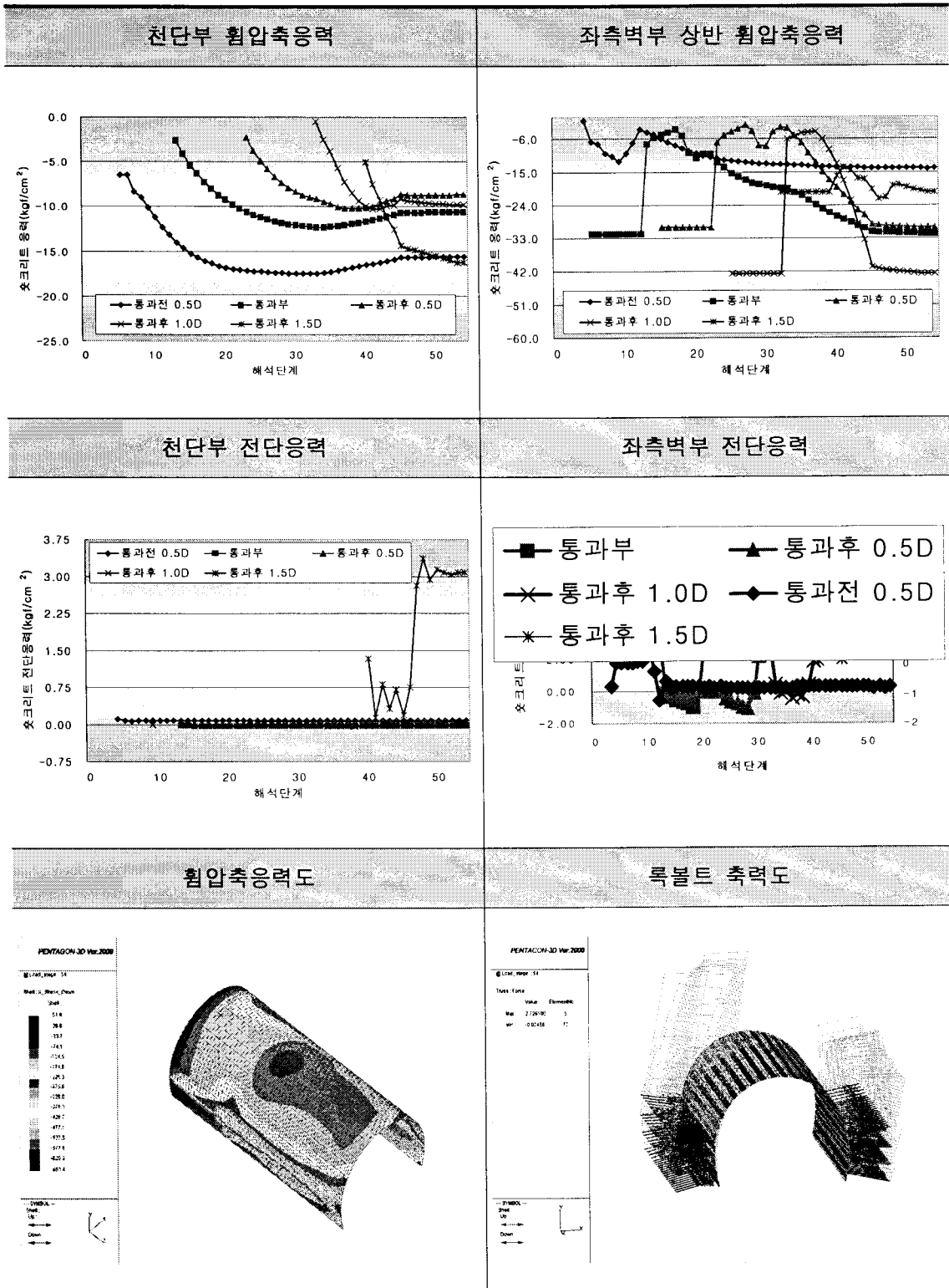


그림 7. 시공단계별 슛크리트 응력

## 5. 결 론

OO터널을 굴착하던 중 터널 막장 천단부에서 낙반이 발생하여 지표면이 함몰되는 사고가 발생하였다. 붕락지점 및 차후 굴착 예정인 저토포 통과구간의 안정성을 검토하기 위해 지반조사를 추가로 실시하였으며, 이에 따라 붕락구간 프리그라우팅, JSP보강그라우팅, 대구경강관보강그라우팅 등의 보강 공법을 선정하였다. 또한 지반의 안정성과 보강공법의 적절성을 3차원 수치해석을 통하여 검증한 결과 예상변위 및 지보재 응력 등이 안전한 것으로 예상되었으며, 제시된 보강공법을 적용하여 안전하게 시공을 완료할 수 있었다.

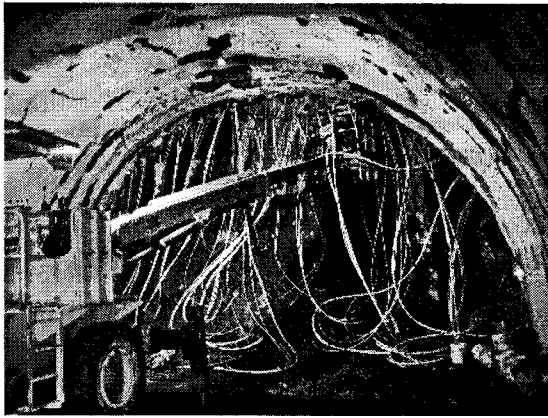


사진 3. 강관보강그라우팅 시공

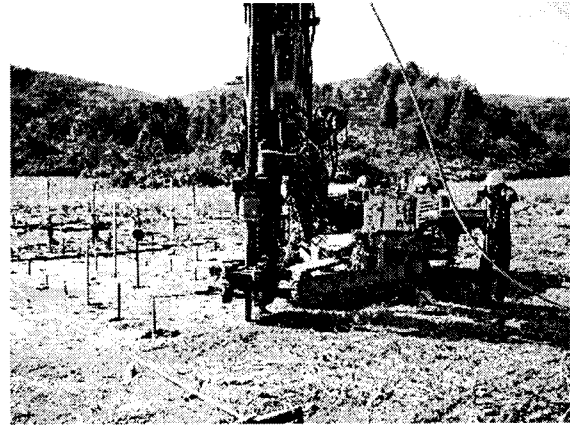


사진 4. 상부보강공법 시공

## 참 고 문 헌

1. (주)대우건설 (2005), OO터널 붕괴구간 및 저토포 통과구간에 대한 보강대책 및 안정성 검토 보고서,
2. (주)대우건설 (2001), OO선 OO구간 복선전철 건설공사 설계보고서
3. (주)대우건설 (2001), OO선 OO구간 복선전철 건설공사 지반조사보고서
4. 김영근, 백기현, 김성운(2001), 석회암 공동지역에서의 터널붕락사고 및 보강사례, 한국지반공학회 공사중 터널의 사고사례 발표회, pp. 27~36
5. 김영근, 이상돈(2001), 암반구조물의 설계사례 및 석회암 지대에서의 시공 문제사례, 2001년도 한국지반공학회 암반역학위원회/지반조사위원회 특별세미나 논문집, pp. 151~180