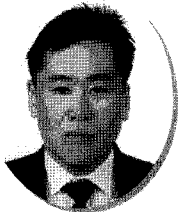
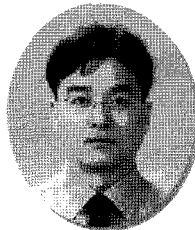


# 주열식 수직벽체를 이용한 저토피 토사구간 터널공법

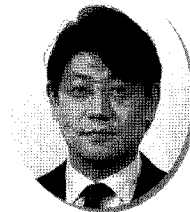
## [부산도시철도 1호선 연장(다대구간) 5공구 설계사례]



임재승  
쌍용건설(주)  
토목기술부 부장



최재호  
쌍용건설(주)  
토목기술부 과장



조현  
쌍용건설(주)  
토목사업본부 상무

### 1. 서론

최근 세계 각국의 광역대도시에서는 녹색성장의 일환으로 지하공간을 활용한 도시철도를 계획하고 있다. 대도시를 통과하는 도시철도는 각종 지하매설물, 기존 도로 및 구조물 하부를 통과하게 되어 개착공법 적용시 지장물 처리, 극심한 교통 체증 및 인접구조물 안정성 등의 문제가 발생한다. 이러한 개착공법의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 NATM공법을 적용하고 있으나, 일반적으로 저토피 토사구간에서의 NATM공법은 안정성 확보가 어려우며 다양한 보강 공종 및 보강량의 증대로 인하여 공사기간이 장기간 소요된다.

당사는 저토피 토사구간에서 NATM공법 적용시 충분한 안정성을 확보하며 공사기간을 최소화할 수 있는 M-

CAM공법(Modified Cellular Arch Method)을 고안, 부산도시철도 1호선 연장(다대구간) 5공구 건설공사 설계에 적용하였다. M-CAM공법은 대구경강관다단그라우팅과 강지보재를 설치하여 Roof를 형성하고 선시공된 주열식 수직연속벽체(Continuous Pile Wall)와 일체화함으로써 상부하중을 수직연속벽체에 전달하여 터널안정성을 확보하는 공법이다. 본 공법은 저토피 토사구간에서 공기지연 및 교통민원 없이 안전하게 시공할 수 있는 터널공법으로 기존의 각부보강 및 측벽보강 등의 갱내보강을 통한 토사터널 보강공법에 비해 변위 및 응력 제어 효과가 2배 가량 우수하며, Leg Pile, Elephant Foot, 측벽파일 등의 설치 공종이 불필요하여 공사기간이 단축되고 시공성이 우수하다.

기술기사1

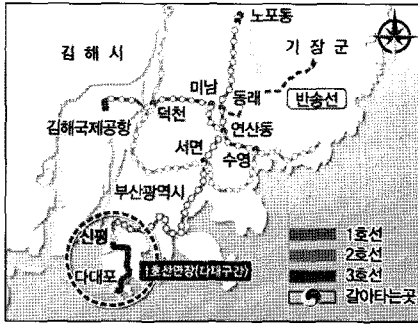


그림 1. 현장 광역 위치도

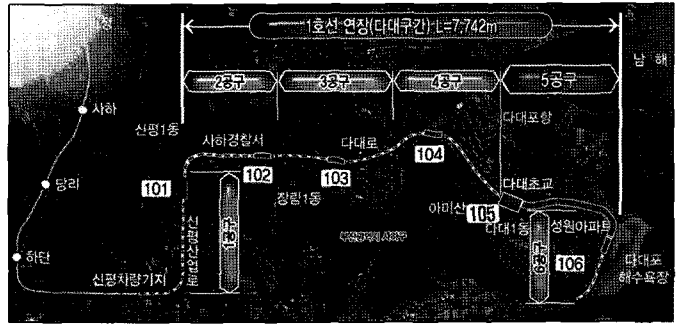


그림 2. 부산도시철도 1호선 연장(다대포구간) 노선도

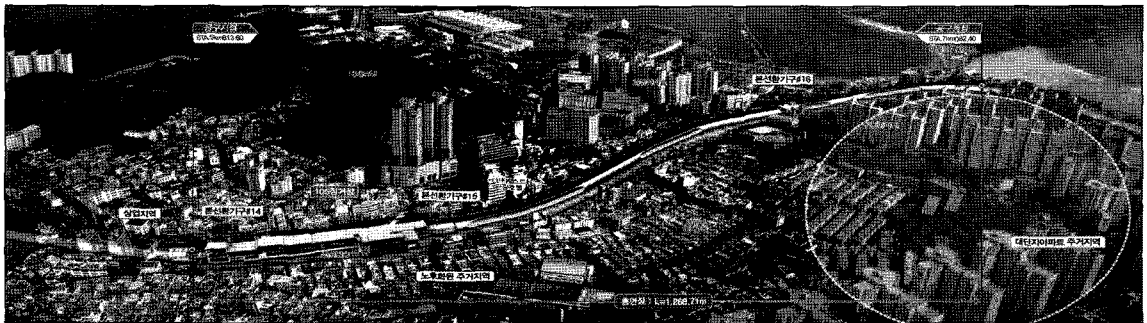


그림 3. 부산도시철도 1호선 연장(다대포구간) 5공구

## 2. 공사 개요

부산도시철도 1호선 연장(다대포구간) 건설공사는 신평~다대포 구간 총 7.74km 노선으로 6개 공구로 구분되며, 당 현장은 그 중 다대포해수욕장 앞 구간인 5공구에 해당한다. 본 구간은 총 연장 1,27km, 정거장 1개소, 환기구 3개소의 시설규모로서 대대어판장, 상업지역 및 주거 밀집 지역을 통과하는 노선으로 차집관로, 상수관, 가스관로

표 1. 공사 개요

공사명	부산도시철도 1호선 연장(다대포구간) 5공구 건설공사(대안)
위치	부산광역시 사하구 다대동 대대초등학교 ~ 성원아파트
공사규모	총연장 1,268m(정거장 1개소, 환기구 3개소, 터널 960.8m, 개착 42.3m)
공사기간	2010. 11 ~ 2015.2 (54개월)

등의 지하시설물이 매우 많이 분포하며 30m폭의 협소한 도로 하부를 통과하여 건설공법 선정시 교통, 민원, 지장물, 인접 구조물 안정성 확보가 매우 중요하다.

## 3. 지형 및 지질 특성

당 현장은 서측으로 아미산(234m)의 완만한 산기슭이 위치하고, 동측 및 남측은 부산 다대포 해안에 인접하고 있으며 해안방향으로 지형 및 지층 편경사가 심하다. 지질특성상 본 구간은 양산단층과 동래단층 사이의 남측 말단부에 위치하여 단층파쇄대 및 풍화발달대가 넓게 분포하고 있으며, 기반암은 주로 백악기 유천층군의 안산암류가 분포하고 있다. 본선 구간은 풍화토층이 지표하 2.5~23.8m로 두껍게 분포하고 있으며 지하수위는 해수면과 유사한 수준으로 지표하 2~6m부근에 분포한다.

» » 주열식 수직벽체를 이용한 저토피 토사구간 터널공법  
(부산도시철도 1호선 연장(다대구간) 5공구 설계사례)

본 구간에 두껍게 분포하는 풍화발달대의 상세 공학적 특성분석을 위하여 집중관리공을 선정하여 시추조사, 공내재하시험, 공내전단시험, 직접전단시험 등의 각종 현장 시험과 실내시험을 실시하였다. 풍화대구간은 통일분류상 주로 ML, SM층으로서 소성지수 8~13%, 점착력 18~34kPa, 내부마찰각 27~35°, 변형계수 30~79MPa 정도를 보이며, N값 40을 기준으로 강도 및 변형 분포특성이 뚜렷한 차이를 나타내어 설계시 N값 40을 기준으로

설계정수를 구분하여 적용하였다.

4. 저토피 풍화대구간 M-CAM공법에 의한 터널 설계

4.1 M-CAM공법 개요

당 현장의 풍화대가 두껍게 분포하는 저토피 토사구간은 민원, 지장물 및 교통문제를 원천 배제하기 위하여

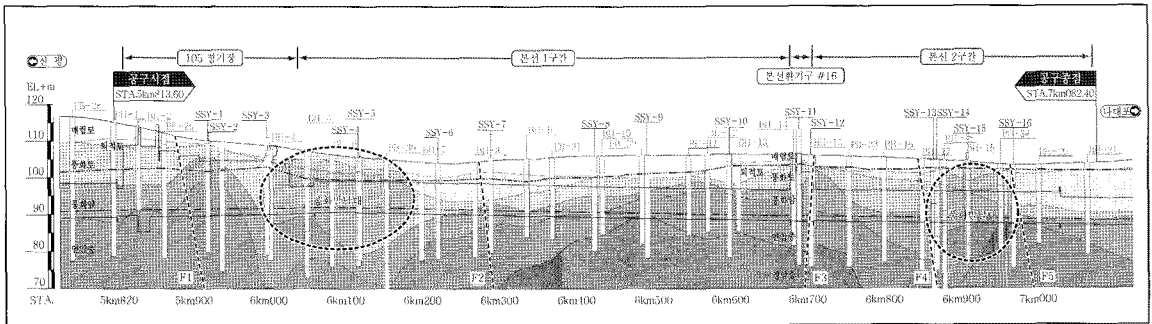


그림 4. 노선 구간 지층 단면도

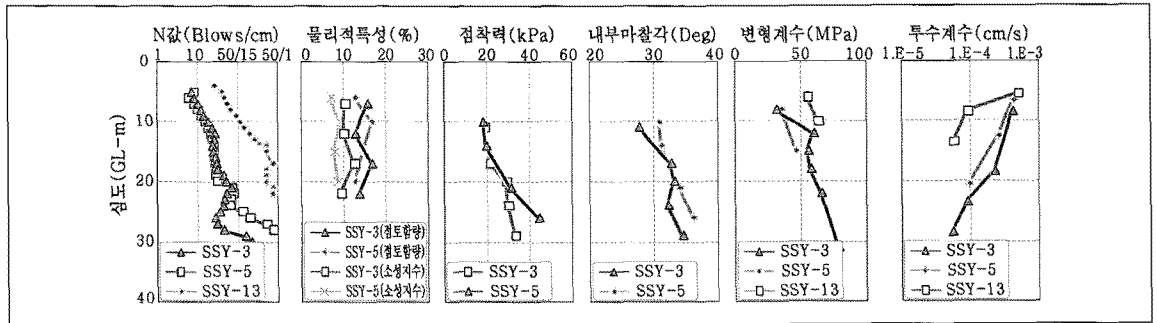


그림 5. 풍화대층 심도별 공학적 특성

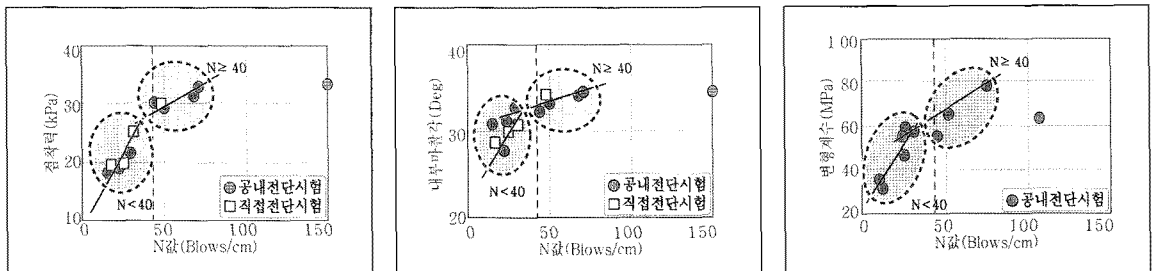


그림 6. 풍화대층 N값별 공학적 특성

기술기사1

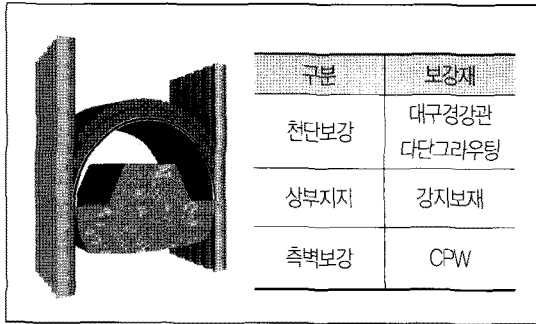


그림 7. M-CAM공법 개요도

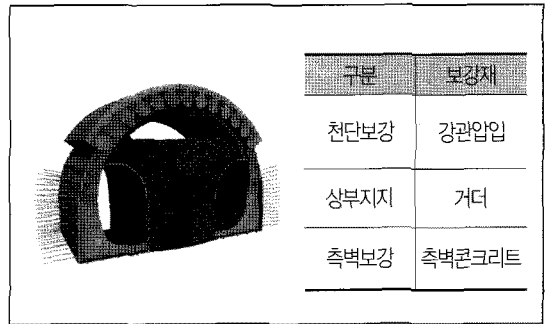


그림 8. CAM공법 개요도

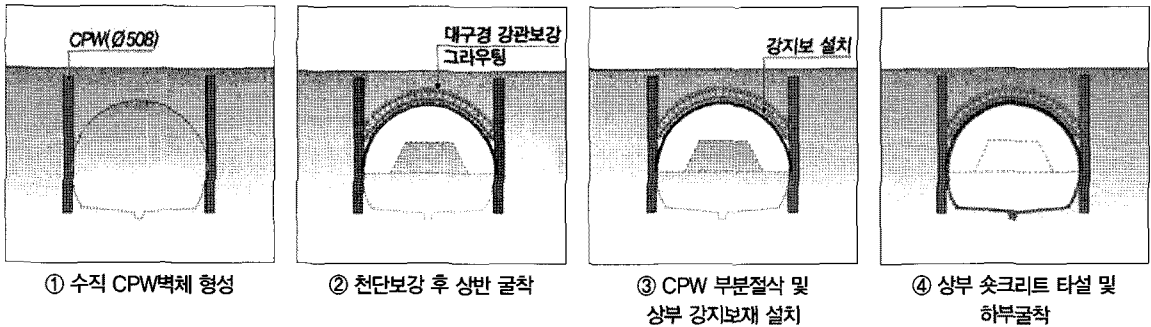


그림 9. M-CAM공법 시공순서도

CAM공법(Cellular Arch Method)의 하중전달 메카니즘을 응용한 M-CAM공법(Modified Cellular Arch Method)을 고안하여 설계에 적용하였다.

CAM공법은 터널 굴착전 아치형태로 대구경 강관을 압입하고 횡방향 거더를 설치하여 Roof를 형성하며, Pilot 터널에서 선시공된 측벽콘크리트와 Roof를 일체화함으로써 천단변위를 억제하는 보강방법으로 서울지하철 913 정거장(고속터미널역) 건설시 당사에서 적용하여 시공 완료한 공법이다.

M-CAM공법은 이러한 CAM공법의 하중전달 메카니즘을 응용하여 대구경 강관보강 그라우팅과 강지보재를 설치하여 Roof를 형성하고 선시공된 Continuous Pile Wall(이하 CPW)과 일체화함으로써 강관보강재와 강지보재에 가해지는 상부하중을 CPW에 전달하여 터널안정성을 확보하는 공법이다.

M-CAM공법의 시공순서는 ①지상으로부터 CPW(Ø 508mm, CTC 500) 선시공, ②터널내 대구경 강관보강 그라우팅 후 상반굴착, ③CPW 부분절삭 및 강지보 설치, ④상부 슛크리트 타설 및 하부굴착 순으로 진행한다. 이와 같은 시공순서를 통하여 복잡한 터널내 보강공정을 단순화하고, 변위억제 효과가 뛰어나 인접 구조물 및 기존 도로에 미치는 영향을 최소화 할 수 있다.

4.2 M-CAM공법 적용 구간 및 지보패턴

M-CAM공법은 토피고가 약 0.7~1.0D 정도이고 풍화토층이 터널 바닥면~SL까지 분포하는 구간에 적용하였으며, 풍화토층의 분포범위에 따라 PD-2A(M-CAM)와 PD-2B(M-CAM)로 구분하였다.

PD-2A(M-CAM)은 터널 바닥부까지 풍화토층이 분포하는 구간으로 터널 바닥면 하부 4M 심도까지 CPW를 계

» » 주열식 수직벽체를 이용한 저토포 토사구간 터널공법  
(부산도시철도 1호선 연장(다대구간) 5공구 설계사례)

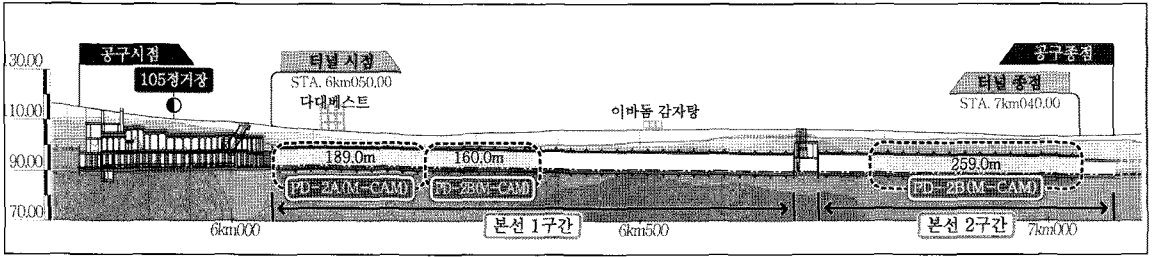


그림 10. M-CAM공법 적용구간

표 2 M-CAM공법 적용 지보패턴

구분		PD-2A(M-CAM)	PD-2B(M-CAM)
개념도			
굴착공법		링컷분할	상반링컷
굴진장		0.5m/0.5m	0.5m/0.5m
숫크리트		250mm	250mm
강지보재		H-150×150×7×10	H-150×150×7×10
보조지보	천단보강	대구경 강관다단그라우팅 ( $\phi$ 114mm, l=12m, CTC 5.5m)	대구경 강관다단그라우팅 ( $\phi$ 114mm, l=12m, CTC 5.5m)
	측벽보강	CPW( $\phi$ 508, CTC 500) CPW심도 : 터널 바닥면 하부 4.0m	CPW( $\phi$ 508, CTC 500) CPW심도 : 터널 바닥면 심도

확하였으며, PD-2B(M-CAM)은 터널 SL심도까지 풍화 토층이 분포하는 구간으로 터널 바닥면 심도까지 CPW 시공을 계획하였다.

#### 4.3 M-CAM공법과 기존 갱내보강공법 안정성 비교

동일한 지반조건에 대하여 M-CAM공법과 기존의 토사터널 보강공법인 Elephant Foot, Leg Pile, 측벽파일 등에 의한 갱내보강공법의 터널보강효과를 응력-침투류 연계해석(Coupled Analysis)을 수행하여 비교, 분석하였다.

수치해석 결과 M-CAM공법이 갱내보강공법에 비하여 지표침하 및 천단 침하량은 50%정도, 내공변위 및 막장면 변위는 30% 정도, 숫크리트 응력은 70% 정도를 나타내어 변위 및 응력에 대하여 보강효과가 매우 우수한 것으로 분석되었다.

#### 4.4 M-CAM공법 상세 안정성 검토

##### (1) 터널 천단보강공법 검토

M-CAM공법 적용시 터널 상부 Roof 형성을 위한 강관다단그라우팅은 단순보해석에 의한 강관다단그라우팅설계법(박이근, 2004)에 의하여 검토하였다. 해석결과 대구

# 기술기사1

표 3. M-CAM공법 및 갱내보강공법 제원

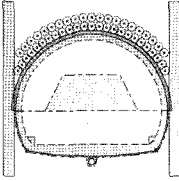
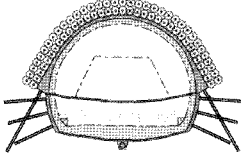
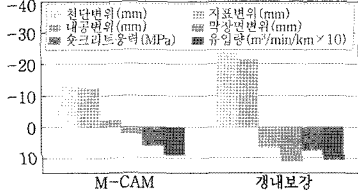
구 분		M-CAM공법	갱내보강공법
개념도			
굴착방법		상반링컷	상반링컷
굴진장		0.5m	0.5m
숏크리트두께		(상반) 250mm, (하반) 100mm	(상반) 250mm, (하반) 250mm
가인버트		-	100mm
강지보재	간격	0.5m	0.5m
	규격	H-150×150×7×10(상반)	H-150×150×7×10(상,하반)
보조지보	천단보강	대구경강관보강 그라우팅 120° φ114mm, l=12m, CTC 5.5m(중)	대구경강관보강 그라우팅 180° φ114mm, l=12m, CTC 5.5m(중)
	각부보강	-	강관보강 레그파일 φ60.5mm, CTC 1.0m(중)
	측벽보강	CPW φ508mm, CTC 500	강관보강 측벽파일 φ60.5mm, CTC 1.0m(중, 횡)

표 4. M-CAM공법 및 갱내보강공법 수치해석 결과 비교

구 분	M-CAM 공법	갱내보강 공법
지표 침하(mm)	-12.4	-21.4
천단 침하(mm)	-13.97	-24.16
내공 변위(mm)	-2.06	6.66
막장면 변위(mm)	2.25	11.06
숏크리트 응력(MPa)	5.92	7.67



■ 천단변위 (mm)    ■ 지표변위 (mm)  
■ 내공변위 (mm)    ■ 막장면변위 (mm)  
■ 숏크리트응력 (MPa)    ■ 유입량 (m³/min/km × 10)

표 5. 강관단단그라우팅 안정성 검토 결과

구 분	대구경강관(φ114.3)		
	1열	2열	3열
처짐량(mm)	12.7	6.4	4.2
힘응력(MPa)	발생응력	707.8	353.9
	허용응력	360.0	360.0
판 정	NG	OK	OK

경강관단단그라우팅(φ114.3mm) 2열 적용시 힘응력 및 처짐량이 허용기준을 만족하여 안정성이 확보되는 것으로 분석되었다.

## (2) 강지보재 및 CPW 안정성 검토

M-CAM공법은 저토퍼 토사구간에서 상부하중이 대구경강관단단그라우팅, 강지보재 및 CPW를 통하여 지지되

» » 주열식 수직벽체를 이용한 저토펜 토사구간 터널공법  
(부산도시철도 1호선 연장(다대구간) 5공구 설계사례)

어 강지보재 및 CPW 자체 안정성뿐만 아니라 강지보재-CPW 접합부의 안정성이 매우 중요하다. 강지보재와 CPW의 접속부는 갱내에서 CPW를 소정의 깊이만큼 절단하고 앵커를 설치하여 강지보재가 CPW에 견고히 접합될 수 있도록 계획하였다.

강지보재, 강지보재-CPW 접속부 및 CPW의 안정성 검토결과 강지보재 응력, 강지보재-CPW접합부 응력, CPW의 지지력 및 침하량은 모두 허용 기준을 만족하여 안전한 것으로 분석되었다.

(3) CPW 근입심도 검토

CPW는 풍화암층 지지를 기준으로 적용하였으며, 지보 패턴 PD-2A(M-CAM)는 풍화토층이 깊어 수치해석을 통하여 안정성이 확보되는 CPW 근입심도를 계획하였다. PD-2A(M-CAM)의 CPW 근입심도를 0~6m까지 변화하여 수치해석을 실시한 결과 근입심도가 증가할수록 지표침하 및 천단침하는 선형적으로 감소하며 내공변위는 미소하게 증가하는 경향을 보인다. 본 검토에서는 지하수 침투시 동수경사와 CPW의 확실한 근입효과를 위하여 근

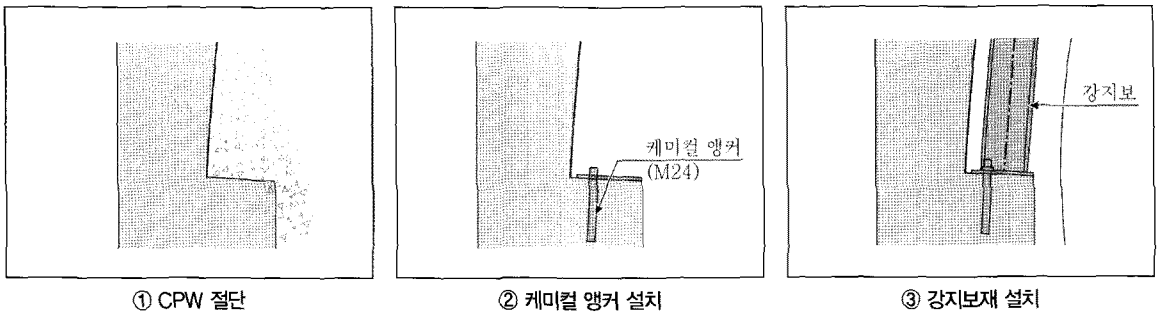


그림 11. 강지보재-CPW 접속부 시공순서도

표 6. 강지보재 및 CPW 안정검토 결과

강지보재	강지보재-CPW접합부	CPW 지지력 및 침하량
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 힘 응력 : 212.3(285.0MPa) ∴OK</li> <li>• 천단응력 : 39.3(165.0MPa) ∴OK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 압축응력 : 7.37(8.4MPa) ∴OK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 허용지지력 : 684(476kN/본) ∴OK</li> <li>• 침하량 : 8.4(25.0mm) ∴OK</li> </ul>

표 7. CPW 근입심도별 수치해석 결과

구분	근입심도	지표침하, 천단침하	내공변위	숫크러스트응력
CASE-1	0m			
CASE-2	2m			
CASE-3	4m			
CASE-4	6m			

## 기술기사 1

입심도를 4m로 계획하였다.

## 5. 결 론

M-CAM공법(Modified Cellular Arch Method)은 대구경관다단그라우팅과 강지보재를 설치하여 Roof를 형성하고 선시공된 주열식 수직연속벽체(Continuous Pile Wall)와 일체화함으로써 상부하중을 수직연속벽체에 전달하여 터널안정성을 확보하는 공법으로 저토피 토사구간에서 충분한 안정성을 확보하며 공사기간을 최소화할 수 있는 터널공법이다. 본 공법의 특징을 요약하면 다음과 같다.

1) M-CAM공법은 투수성이 작은 풍화토층으로 구성된

저토피 토사구간에서 공기지연 및 교통민원 없이 안전하게 시공할 수 있는 터널공법으로 기존의 각부보강 및 측벽보강 등의 갱내보강을 통한 토사터널 보강 공법에 비해 변위 및 응력 제어 효과가 2배 가량 유리하다.

- 2) 강지보재 응력, 강지보재-CPW접합부 응력, CPW 지지력 및 침하 등 모두 허용기준을 만족하여 터널의 안정성 확보 효과가 우수하다.
- 3) 지상 CPW 보강 공중으로 인하여 기존 갱내보강공법에 비해 Leg Pile, Elephant Foot, 측벽파일 등의 설치 공중이 불필요하여 공사기간이 단축되고 시공성이 우수하다.

### [참고문헌]

1. 부산도시철도 1호선 연장(다대구간) 5공구 건설공사 대안설계보고서(2010)
2. 한국터널공학회(2007), 터널의 이론과 실무
3. 박이근(2004), 관다단그라우팅의 설계법 제안, 한국지반공학회 논문집
4. 한국터널공학회(2010), 터널붕괴사례집