

주열식 연속벽체를 이용한 저토피 토사구간 터널공법(M-CAM)

(국토교통부 건설신기술 제745호)



임재승
쌍용건설(주)
토목기술팀
부장



최재호
쌍용건설(주)
토목기술팀
차장



조 현
쌍용건설(주)
토목/기술총괄
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 NATM(New Australian Tunneling Method)공법을 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 개발하여 부산도시철도 1호선 연장 (다대구간) 5공구 건설공사에 적용하였으며, 연장 406m의 시공을 완료하였다. 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 우수하며, Leg Pile, Elephant Foot, 측벽파일 등의 설치 공종이 불필요하여 공사기간이 단축되고 시공성이 우수하다.

2. 신기술의 내용

가. 신기술의 범위 및 내용

본 기술은 저토피(토피고 1D이하, D:터널폭) 토사구간에서 대구경 강관보강그라우팅과 강지보재를 설치하여 터널 루프(roof)를 형성하고 선시공된 주열식 연속벽체와 강지보재를 일체화함으로써 상부하중을 연속벽체에 전달하여 구조물의 안정성을 확보하는 저토피 토사터널공법으로써, 주열식 연속벽체와 강지보재는 연속벽체의 절취 및 케미칼앵커 또는 브라켓 시스템 등을 통하여 접합한다.

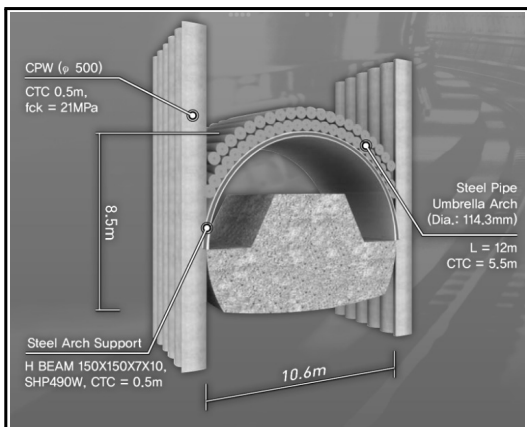
나. 신기술의 시공절차 및 방법

(1) 신기술 개발 배경

최근 국내외에서 도심지 도시철도건설은 활발히 진행되고 있으며, 도심지에서 개착공법을 적용할 경우에는 교통정체, 환경공해, 인접구조물 피해 등이 필연적으로 수반된다. 또한, 개착공법의 단점을 해소하기 위하여 저토피 토사구간에서 터널공법을 적용할 경우에는 침하 안정성이 매우 불리하여 대규모 보강이 필요하고, 이에 따라서 공사비가 증가되고 공사기간이 장기간 소요되는 문제점이 있다. 본 기술 M-CAM(Modified Cellular Arch Method)은 이러한 기존 기술의 문제점을 해소하기 위하여 개발되었으며, 부산도시철도 1호선 연장(다대구간) 5공구 건설공사에 적용되어 406m의 시공을 완료하였다.

(2) 신기술 구성 및 하중전달 메커니즘

본 기술의 하중전달 메커니즘은 터널상부의 하중이 대구경 강관보강그라우팅을 통하여 강지보재로 전달되며, 이것은 다시 구조부재인 주열식 연속벽체(CPW, Continuous Pile Wall)을 통하여 견고한 지반으로 전이됨으로써 안정성을 확보한다.



구분	보강재	상세 제원
천단보강	• 대구경 강관보강 그라우팅	• 직경 114mm, 길이 12m • 종방향 CTC 5.5m
상부지지	• 강지보재	• H-150×150×7×10 • 종방향 CTC 0.5m
측벽보강	• 주열식 연속벽체 (CPW)	• 직경 508mm • 종방향 CTC 0.5m

(3) 신기술 시공절차

M-CAM공법의 시공순서는 그림 1과 같이 ①지상으로부터 CPW(Ø508mm, CTC 500) 선시공, ②터널내 대구경 강관보강 보강그라우팅, ③상반굴착, ④CPW 부분절삭, ⑤강지보재 설치, ⑥CPW-강지보재 접합, ⑦상반 슛크리트 타설 및 코어 굴착, ⑧하반 굴착 및 슛크리트 타설 순으로 진행한다.

또한, 강지보재와 CPW의 연결은 그림 1의 ⑥과 같이 CPW의 부분 절취와 앵커(또는 브라켓)을 통하여 견고하게 접합되며, 공극이 발생하지 않도록 슛크리트를 밀실하게 충전한다.

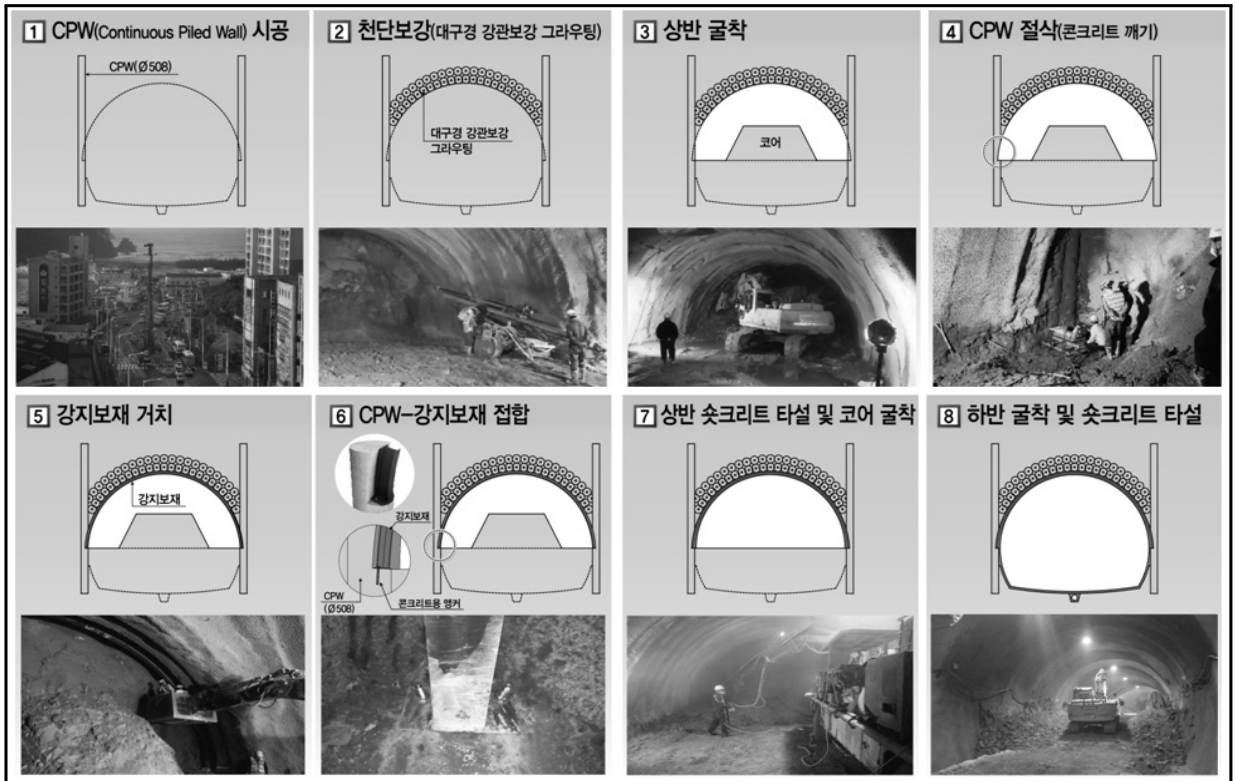


그림 1. 신기술(M-CAM) 시공순서

다. 신기술의 안정성 검증

(1) 수치해석을 통한 안정성 검증

동일 단면에 대한 수치해석 결과 엘리펀트 풋, 레그파일 및 측벽보강공법을 적용한 기존의 NATM 터널공법은 지표침하 8.67mm, 천단침하 13.25mm, 내공변위 8.76mm, 슛크리트응력 6.97MPa 발생하였으며, 본 기술은 지표침하 2.14mm, 천단침하 8.01mm, 내공변위 6.90mm, 슛크리트응력 5.79MPa으로서 기존 갱내보강에 의한 터널공법에 비하여 변위 21% 감소, 응력 17% 감소하여 안정성이 우수한 것으로 분석되었다.



구분	신기술 (M-CAM)	갱내보강에 의한 NATM
보강 단면도		
수직변위도	<p>FLAC3D 3.00 Job Title: 3기</p> <p>Step 6023 Model Perspective 13:47:48 Wed Oct 09 2013</p> <p>Center: X: 3.094e+01 Y: 0.000 Z: 3.456e+01 Z: 340.000 Dist: 1.786e+02 Mag: 2.44 Ang: 22.500</p> <p>Surface Magfac = 0.000e+000</p> <p>Contour of Z-Displacement Magfac = 0.000e+000</p> <p>Interval = 2.0e-003</p> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN, USA</p>	<p>FLAC3D 3.00 Job Title: 3기</p> <p>Step 6023 Model Perspective 15:28:27 Wed Oct 09 2013</p> <p>Center: X: 3.094e+01 Y: 0.000 Z: 3.417e+01 Z: 340.000 Dist: 1.786e+02 Mag: 2.44 Ang: 22.500</p> <p>Surface Magfac = 0.000e+000</p> <p>Contour of Z-Displacement Magfac = 0.000e+000</p> <p>Interval = 2.0e-003</p> <p>Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, MN, USA</p>
지표침하(mm)	2.14 ~ 2.60 (73% 감소)	8.67 ~ 9.59
천단침하(mm)	8.01 ~ 8.29 (39% 감소)	13.25 ~ 13.66
내공변위(mm)	7.52 ~ 7.68 (24% 감소)	10.12 ~ 10.18
숫크리트응력(MPa)	5.79 (17% 감소)	6.97

(2) 현장계측을 통한 안정성 검증

본 기술(M-CAM)이 적용된 부산도시철도 1호선 연장(다대구간) 5공구 현장에서 지보패턴 PD-2A 및 PD-2B구간의 21개소 계측결과를 토대로 본 기술의 안정성을 분석하였다.

또한, 참고적으로 인접구간의 지반조건이 비교적 양호한 지보패턴 PD-2C 및 PD-2D의 일반 NATM이 적용된 구간에서 10개소의 비교 계측을 실시하였다.

계측분석결과 본 기술은 지표침하, 천단침하 및 내공변위가 관리기준치 20mm 기준을 만족하며, 일반 NATM보다 천단침하가 52% 정도 감소하여 품질이 우수한 것으로 분석되었다.

구분	본 기술 계획결과 (M-CAM공법)	인접구간 (일반 NATM)
지 보 패턴도		
지보패턴	PD-2A, PD-2B	PD-2C, PD-2D
주 요 보강공법	강관보강그라우팅(120°, L=12m, CTC 5.5m) 주열식연속벽체(D 508mm)	강관보강그라우팅(180°, L=12m, CTC 5.5m) 록볼트(L=4m, CTC 0.8m)
지표침하	<p>8.0 ~ 18.0mm (평균 80% 감소)</p>	<p>8.0 ~ 129.0mm</p>
천단침하	<p>2.8 ~ 7.0mm (평균 52% 감소)</p>	<p>6.4 ~ 18.4mm</p>

3. 국내외 건설공사 활용실적 및 전망

가. 활용실적

공사명	발주자	시공자	공사기간	신기술 공사규모	위치	특징
부산도시철도 1호선 연장 5공구	부산 교통공단	쌍용건설	2010.11~2015.05	연장 406.5M 공사비 152억원	부산광역시 사하구	저심도 (토피고 1D이하)


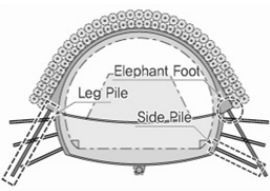
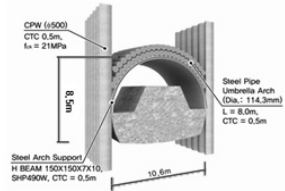
나. 향후 활용전망

본 기술은 저토피 토사터널 공법으로서 도심지에서 개착공법을 대체하여 적용할 수 있으며, 이에 따라서 개착공사시 필연적으로 수반되는 교통, 환경, 민원, 지장물 처리 등의 문제점을 해소할 수 있다. 또한, 갱내보강 NATM 보다 보강물량이 감소되고 공종이 단순화되어 공사비절감 및 공기단축 효과가 있으며, 도시철도를 저심도의 터널공법으로 계획할 수 있으므로 정거장 심도 상황에 따른 동선축소로 인하여 이용자의 편의성이 향상되고, 전체 도시철도 건설공사비를 절감할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라, 최근 국내외의 도시철도 건설시장 규모는 지속적으로 확대되고 있으므로 기존 기술의 한계점을 극복한 본 기술은 선호도와 활용전망이 우수할 것으로 기대된다.

4. 기술적 경제적 파급효과

가. 기술적 파급효과

(1) 국내외 기술과 수준 비교

구분	개착공법	갱내보강 NATM	신기술(M-CAM)
개요도			
안정성	<ul style="list-style-type: none"> • 인접구조물 균열 및 침하 → 민원발생, 보수보강 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정성확보를 위한 대규모 보강 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 안정성우수 (갱내보강 NATM 대비 침하 80%)
시공성	<ul style="list-style-type: none"> • 공사중 차로 점용, 소음진동 → 교통, 환경 민원 발생 • 지장물 처리대책 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 대규모 보강, 보강공종 복잡 • 공종간 작업 간섭 → 시공성 불리 	<ul style="list-style-type: none"> • 보강물량 감소, 공종 단순화 • 공종간 작업간섭 배제 → 시공성 우수
경제성	<ul style="list-style-type: none"> • 공사비 고가 	<ul style="list-style-type: none"> • 공사비 고가 	<ul style="list-style-type: none"> • 공사비 절감(개착 대비 91%, 갱내보강 NATM 대비 74%)
공사기간	<ul style="list-style-type: none"> • 공기 단축시 대규모 굴착 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 공기 과다 소요 	<ul style="list-style-type: none"> • 공기 단축(갱내보강 NATM 대비 77%)

(2) 건설시장에 미칠 파급효과

본 신기술은 도심지 저토피 토사구간에서 개착공법과 갱내보강 NATM을 대체 적용하여 안정성 향상, 공사비 절감, 공기 단축의 효과를 발휘할 수 있다. 또한, 교통정체 해소, 탄소배출량 및 굴착소음 감소를 통하여 지역주민의 삶의 질을 향상하고 사회적 간접비용을 절감할 수 있으므로, 본 기술이 도시철도 건설시장에 미칠 파급효과는 매우 클 것으로 기대된다.

(3) 국내외 기술 대비 경쟁력

최근 도심지 도시철도 건설 시장 규모는 국내의 경우 서울, 광주, 김포, 하남선 등에서 10조원 정도이며, 해외의 경우 카타르, 싱가포르, 사우디, 인도네시아 등의 해외에서도 62조원 정도로서 지속적으로 거대 시장이 형성되고 있다. 본 기술은 저토피 토사터널 공법으로서 개착공법의 대체가 가능하며, 갱내보강 NATM 보다 지반변위 20%, 지보재응력 11% 이상 감소되는 등 안정성이 향상되며, 공사비 절감효과가 우수하다. 또한, 본 기술은 이미 부산도시철도 현장에서 406m의 시공을 완료하여 실증적 우수성이 입증되었으므로, 국내외 도시철도 건설시장에서 경쟁력과 시장성이 우수할 것으로 기대된다.

나. 경제적 파급효과

(1) 설계단가

구 분	단위 공사비 (원/m)			
	직접재료비	직접노무비	산출경비	총계
신기술 (M-CAM)	14,837,933	18,049,866	4,071,361	36,959,160

(2) 공사비

본 신기술은 기존기술보다 보강물량이 감소되고 공종이 단순화되며 공공간 작업간섭이 배제되어 갱내보강 NATM공법 대비 26%, 개착공법 대비 9%의 공사비 절감효과가 있다.

구 분	단위 공사비 (원/m)				비 고	
	직접재료비	직접노무비	산출경비	총계		
신기술 (M-CAM)	14,837,933	18,049,866	4,071,361	36,959,160	74%	91%
갱내보강 NATM	17,472,796	26,456,401	6,394,973	50,324,170	100%	-
개착공법	22,584,655	15,483,176	2,555,425	40,623,256	-	100%

(3) 공사기간

본 신기술은 갯내보강 NATM에서 안정성 확보를 위하여 필요한 엘리펀트 풋, 레그 파일 및 측벽 파일 등의 보강공종이 불필요하다. 또한, 하반 굴착시 강지보재설치 및 측벽보강이 불필요하고 굴착과 숏크리트공으로 단순화되어 공사기간이 23% 단축되는 효과가 있다.

구 분	상반 Cycle Time (시간)				하반 Cycle Time (시간)			총계 (시간)	비 고
	상반굴착 1차 숏크리트	강지보재	레그파일	2, 3차 숏크리트	하반굴착 1차 숏크리트	강지보재 측벽파일	2,3차 숏크리트		
신기술 (M-CAM)	3.5	1.5	1.5	2.0	4.0	3.0	1.5	17.0	100%
갯내보강 NATM	3.5	2.0	-	2.0	4.0	-	1.5	13.0	77%

(4) 유지관리비

본 신기술은 도심지에서 개착공법을 적용할 경우에 필요한 지장물처리, 도로복구, 민원대책, 교통대책, 복공판 미끄러짐 및 소음 대책 등이 최소화되어 공사중 유지관리비용을 절감할 수 있다.

(5) 환경부하 저감, 시장확대, 고용창출, 타산업 활성화 등 간접효과

본 신기술은 개착공법 보다 공사차량에 의한 탄소배출량이 32%정도 감소되고 굴착 소음이 10%정도 저감되어 친환경성이 우수하다. 또한, 순수 국내기술로서 모든 자재는 국내생산 자재를 사용하여 환율변동이나 원자재가 등 외부환경 변화에 영향이 적으므로 독창성과 자립성이 우수하고 국내 자재시장의 활성화에 기여할 수 있다.