

## T.R.M과 C.A.M을 적용한 대단면 터널식 정거장 시공사례

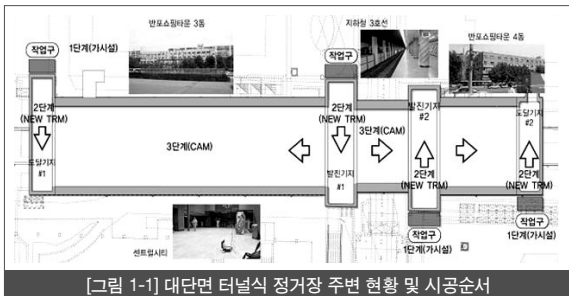
글 | 배민혁 | 토목기술부 사원 | 전화 02-3433-7763 E-mail: widedream@ssyenc.com  
 글 | 차승훈 | 토목기술부 대리 | 전화 02-3433-7761 E-mail: chocopie@ssyenc.com

### 1 터널식 정거장 현황

#### 1-1. 터널식 정거장 개요

터널식 정거장 구간은 신반포로 좌·우로 고속버스 터미널, 센트럴 시티, 꽃상가 및 강남지하상가, 반포소피텔 등이 위치하여 교통이 혼잡하고 유동인구가 많아 개착공법 적용이 곤란한 지역이다. 따라서 터널식 정거장은 이 지역의 교통 흐름을 원활히 하고, 정거장 주변 구조물의 안정성을 확보하기 위해 [그림 1-1]과 같이 3단계로 구분하여 시공 중에 있다.

1단계는 신반포로 좌·우측의 녹지 및 보도 공간을 활용하여 수직 작업구를 설치하며, 2단계는 대구경 강관을 추진하기 위해 T.R.M을 적용하여 4개의 도달기지 및 발진기지를 시공하며, 3단계는 C.A.M을 적용하여 대단면 터널을 굴착한다. 터널식 정거장의 제원은 총 연장 220m, 폭 29.6m, 높이 20.85m이다.



[그림 1-1] 대단면 터널식 정거장 주변 현황 및 시공순서

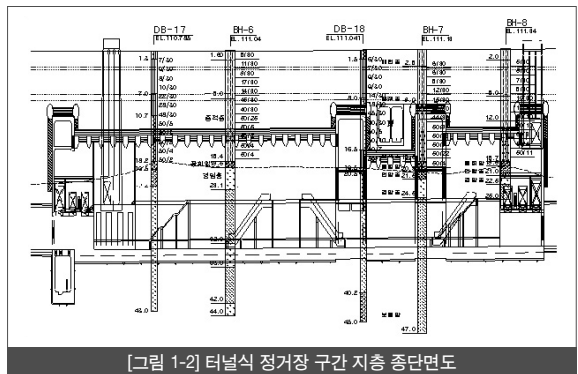
#### 1-2. 지층 특성

터널식 정거장 구간의 지층은 상부로부터 매립층, 충적층, 풍화암 및 기반암 등의 순서로 나타난다. 충적층은 실트, 모래, 자갈층의 순으로 나타나며, 자갈층의 자갈 크기는 5~20cm, 자갈 체적비는 자갈구간 체적의 30~50% 정도이다. 풍화암층은 1m 내외의 두께로 분포하며, 기반암층은 경기 편마암으로 복잡한 절리 특성을 갖고 있으며, RMR 값은 31~67(RQD : 50~100%) 내외의 범위를 보인다.

지하수위는 G.L (-)7.9~(-)9.1m로 측정되었으며, T.R.M 구조물 상부에 존재하고 있다. T.R.M 및 C.A.M 설치 심도에서의 지반 조건

은 대부분 충적층(자갈층)으로 구성되어 있으며 작업구 가설벽체 하단부에서 기반암이 출현한다.

T.R.M 시공시 지하수 유입통로가 되는 자갈층의 투수계수는 1~2 × 10<sup>-2</sup>cm/sec로 추정된다. 터널식 정거장 구간의 지층 종단면도는 [그림 1-2]에 나타낸 바와 같다.



[그림 1-2] 터널식 정거장 구간 지층 종단면도

### 2 T.R.M(Tubular Roof construction Method)

#### 2-1. 공법 개요

T.R.M(Tubular Roof construction Method)은 벨기에의 Smet Boring사가 개발한 지하구조물 축조공법으로서 강관을 이용하여 지하에 거대한 Roof를 형성하는 수평관 입입굴진공법이라 할 수 있다. 이 공법은 작업구에서 유압잭을 이용하여 강관을 압입하고 강관 내부를 굴착 후 구조물을 설치하는 공법으로, 주변 지반의 침하를 방지하여 기존의 지상 및 지하구조물에 대한 피해를 최소화하며 소요 공간을 확보할 수 있는 공법이다.

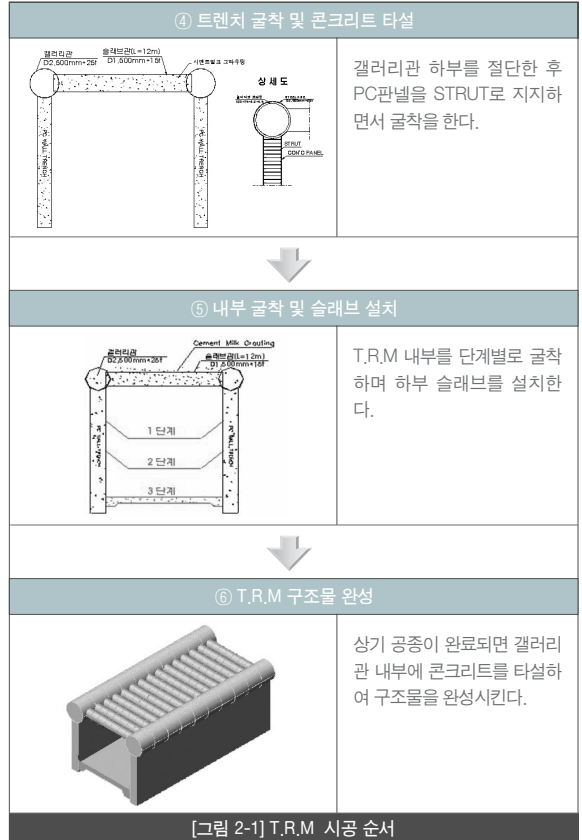
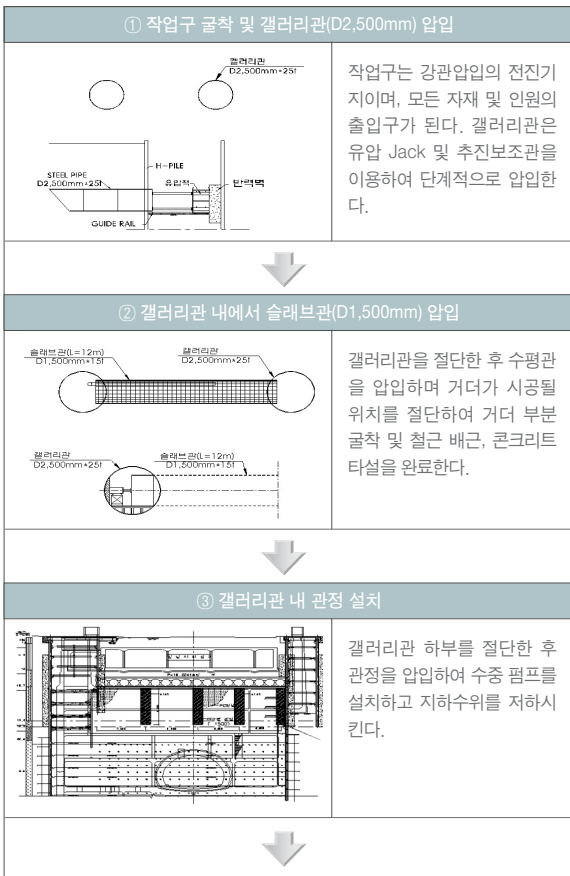
이 공법은 압입식 공법으로 견인식 공법과 달리 발진부에서 시작된 강관이 소요 길이만큼 임의 선형으로 시공이 가능한 특징이 있으며, 국내에서도 지하철건설, 광역 상수도사업, 변전소 부대설비, 지하차도, 지하상가 등에 T.R.M 공법이 적용되고 있다.

#### 2-2. 시공 순서

강남지하상가 직하부에 지하구조물을 축조하기 위하여 적용된

서울지하철 9호선 913공구 현장의 923정거장은 터널식 정거장으로 설계되었으며, 터널 단면(1-Arch 터널, 폭 29.6m, 높이 20.85m)이 기존의 녹사평정거장 터널 단면(폭 23.4m, 높이 16.1m)보다 큰 국내 최대의 터널식 정거장이다. 923정거장 상부에는 강남지하상가와 지하철 3호선이 위치하며, 터널 천단부의 지층이 대부분 충적층으로 구성되어 있어, 터널 굴착으로 인해 기존 구조물의 침하가 예상되므로 적절한 굴착공법이 검토되어야 한다. 따라서 기존 구조물의 안정성을 확보하면서, 터널식 정거장을 시공하기 위해 국내 최초로 적용한 T.R.M(Tubular Roof construction Method)과 C.A.M(Cellular Arch Method)을 소개하고자 한다.

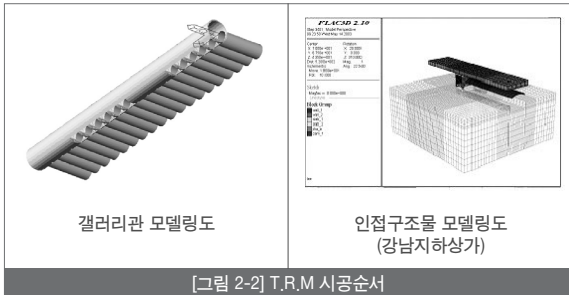
T.R.M은 대구경 강관(갤러리관)을 유압 Jack으로 압입하고 갤러리관 내에서 수직으로 벽체트렌치를 굴착하여 가설 구조물을 설치한 후 내부 굴착을 진행하므로 상부 강남지하상가의 변위를 최소화하며 구조물을 축조하는 공법이다. T.R.M에 사용된 강관은 갤러리관(D2,500mm), 슬래브관(D1,500mm)이며, 슬래브관은 갤러리관 내부에서 반대편 갤러리관으로 슬래브관을 압입하여 서로 연결시킨 후 슬래브관 내 철근 배근 및 콘크리트를 타설하여 설치한다. 벽체는 갤러리관 내에서 수직방향으로 P.C Panel을 Strut로 지지하면서 트렌치 형성 후 철근 배근 및 콘크리트를 타설하여 설치한다. T.R.M 시공순서는 [그림 2-1]과 같다.



### 2-3. T.R.M 시공단계별 안정성 해석

T.R.M 구조물의 안정성 및 인접구조물(강남지하상가 등)에 대한 영향검토는 MIDAS CIVIL 3D와 FLAC 3D를 이용하여 검토하였다. 안정성 검토는 시공 단계별 강남지하상가의 영향검토와 벽체트렌치 시공을 위한 갤러리관 절개에 따른 검토 등을 수행하였다.

[그림 2-2]는 T.R.M 갤러리관 및 인접구조물에 대한 검토 모델링이며, 강남지하상가 및 갤러리관 안정 검토시 적용한 지반 특성치 및 검토결과와 <표 2-1>, <표 2-3>과 같다.



[그림 2-2] T.R.M 시공순서

〈표 2-1〉 지반 특성치

구분	기층 두께 (m)	단위중량 (t/m³)	점착력 (t/m²)	내부마찰각 (°)	포아송비	변형계수 E(t/m²)
매립층	1.8	1.8	0.0	25	0.3	720
충적층(실트)	4.5	1.7	3.0	27	0.4	360
충적층(모래)	5.2	1.8	0.0	29	0.35	3,000
충적층(자갈)	9.8	2.2	0.0	36	0.35	10,000
풍화암	0.6	2.4	5.0	32	0.3	24,000
면암	4.0	2.5	15.0	35	0.27	100,000
보통암	20.9	2.6	50.0	37	0.25	530,000
콘크리트	-	2.5	-	-	0.184	2,464,000
그라우팅	-	2.0	75.0	35	0.35	2,800

〈표 2-2〉 T.R.M 갤러리관 응력 검토결과 및 인접구조물에 대한 검토결과

구분		갤러리관			보강링		
		최대응력 (kgf/cm²)	허용치 (kgf/cm²)	판정	최대응력 (kgf/cm²)	허용치 (kgf/cm²)	판정
갤러리관	절개전	311	2,375	O,K	433	2,375	O,K
	절개5단계	1,560	2,375	O,K	1,805	2,375	O,K

〈표 2-3〉 T.R.M 인접구조물 검토 결과

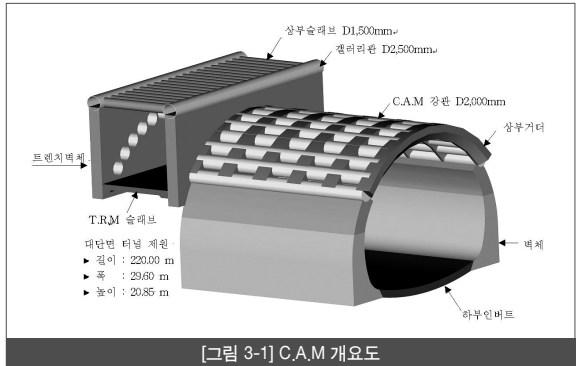
구분	시공단계	최대 각변위			검토
		부등침하량	지간거리	각변위	
강남지하상가	stage 12	0.42 cm	4.5m	1/1,071	1/480 O,K

## 3 C.A.M 공법

### 3-1. 공법 개요

C.A.M 공법은 토피가 작은 토시층에서 대단면 터널 구조물을 축조할 때 적용하는 공법으로 지층에서 다량의 대구경 강관을 유압 Jack으로 압입 및 내부 굴착하여 Arch형태로 배열하여 설치한 후, Roof를 형성하는 강관을 지지하는 횡 방향 거더를 설치하여 Arch형 횡 방향 콘크리트 Beam을 형성한다. Arch형 Beam은 강관 추진시 병행 시공한 Pilot터널의 내부 벽체와 일체화시킴으로써 목적하는 대단면 터널의 내부 단면을 굴착하기 전에 터널 구조물을 축조하고 내부 굴착을 시행하므로 지반 변위를 최소화하고 안전한 대단면 지하 구조물을 축조하는 터널공법이다. [그림 3-1] 참조

C.A.M 강관 추진시 굴착은 이수식 막장폐합형 Semi Shield와 막장 개방형 인력굴착공법 등이 있다. 본 현장의 지층 조건에서 이수식 막장폐합형 Semi Shield로 굴착할 경우 배니관의 막힘 현상과 이수막 형성의 어려움 등의 문제점이 예상되어 지하수위 저하 후 막장 개방형 인력굴착공법으로 굴착하였다.



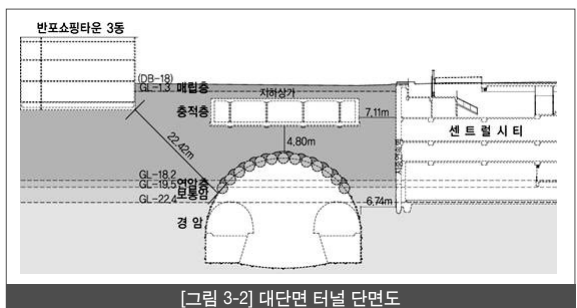
[그림 3-1] C.A.M 개요도

### 3-2. 단면 현황

대단면 터널 정거장과 인접하여 인원유동이 많은 건물들이 있고, 최단 이격거리는 〈표 3-1〉, [그림 3-2] 와 같다.

〈표 3-1〉 대단면 터널과 인접건물과의 최단이격거리

인접건물	최단이격거리
정거장 상부 강남지하상가 인접	4.80m
정거장 우측 센트럴시티빌딩 인접	6.74m
정거장 좌측 반포소평타운 인접	22.42m

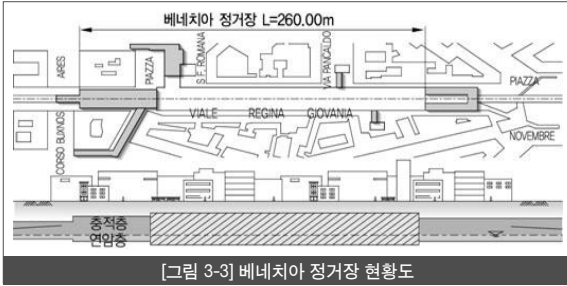


[그림 3-2] 대단면 터널 단면도

### 3-3. 기존 적용 사례

국내에서 처음 적용되는 C.A.M공법을 이용한 대단면 터널 정거장은 이탈리아 베네치아 정거장에서 사용된 공법과 흡사하다. 베네치아 정거장의 시공사례를 분석하여 시공오류 및 시행착오를 방지하고 공법개선 방향을 모색하였다.

베네치아 정거장의 현황도 및 단면도, 제원은 [그림 3-3], [그림 3-4], 〈표 3-2〉와 같다.



[그림 3-3] 베네치아 정거장 현황도



[그림 3-4] 베네치아 정거장 단면도

<표 3-2> 베네치아 정거장 제원 및 추진관 굴착 공법

구분	정거장 제원	추진관 굴착 공법
내용	- 길이 : 214.5m	- 전면 개방형 쉘드 공법
	- 터널폭 : 28.80m	- 재료 : 강재
	- 터널높이 : 16.25m	- 길이 : 8m 3부분으로 구성

### 3-4. 시공 순서

CAM 공법으로 대단면 터널을 시공하기 위한 시공 단계별 내용과 사진을 <표 3-3>에 나타내었다.

<표 3-3> C.A.M 시공순서도

FLOW CHART	개요도	시공사진
① 작업구 설치	 • 작업구 설치 • 강관압입 → 굴착 → 버력처리 → 확인측량 → 선형조정 → 반복	 • 측량 및 개구부 절단 • 유압잭 및 중간밀대 설치
② 강관추진(상부 크라운 아치)	 • 거더위치 측량 및 보강링 설치 • 철근 및 거푸집 조립	 • 강관절단 및 굴착 • 초유동 콘크리트 타설
③ 거더설치 및 관내 콘크리트	 • 막장관찰 및 지반분석 • 슛크리트, 록볼트, 감지보 및 휘폴링	 • 도강굴착 및 거력처리 • 다음막장 굴진
④ 하부측벽 도강 굴착	 • 하부 측벽 철근 및 콘크리트 타설	 • 하부 측벽 철근 및 콘크리트 타설
⑤ 하부측벽 벽체 콘크리트	 • 3단계(상단부, 중앙부, 하단부)로 단계별 굴착	 • 거더 및 벽체거푸집 해체
⑥ 터널내부 단계별 굴착	 • 인버트 설치 • 녹막이 및 에폭시	 • 방수철관 설치 및 그라우밍 • C.A.M 시공완료
⑦ 인버트 및 구조물 완료	 • 인버트 설치 • 녹막이 및 에폭시	 • 방수철관 설치 및 그라우밍 • C.A.M 시공완료
⑧ 시공완료	 • 인버트 설치 • 녹막이 및 에폭시	 • 방수철관 설치 및 그라우밍 • C.A.M 시공완료

### 3-5. C.A.M 구조물 검토

C.A.M 공법을 적용한 대단면 터널 주변에는 지장 시설물 및 인접 중요구조물이 위치하고 있어 정거장 자체의 안정성뿐만 아니라 주변구조물의 안정성을 고려한 검토를 수행하여야 한다.

C.A.M 구조물을 시공하기 위한 T.R.M 구조물은 녹지 및 보도공간을 활용하여 수직작업구를 설치하고, 작업구 내에서 선형횡단 방향으로 갤러리관을 압입하여 트렌치 벽체 시공 후 내부굴착, T.R.M 슬래브를 트렌치 벽체와 벽체를 연결하면 BOX 형태의 안정한 T.R.M 구조물이 된다.

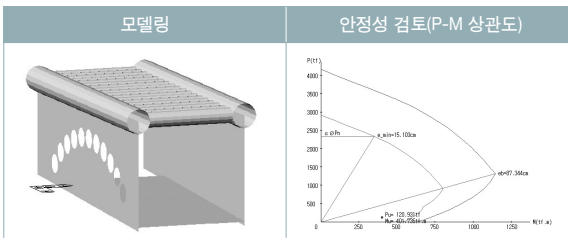
T.R.M 슬래브를 연결하기 전에 T.R.M의 내부 전체를 굴착하면 트렌치 벽체에 작용하는 토압 및 수압에 의해 구조물의 안정성을 확보하지 못한다. 따라서 부분굴착을 하면서 T.R.M 슬래브를 일부 연결하여 안정성을 확보한 후 C.A.M 강관을 추진하는 것으로 검토하였다. <표3-4>

기존 지하철 3호선 하부를 직각 방향으로 통과하는 구간에서는 C.A.M 강관 추진시 대단면 터널의 천단 및 내공변위를 검토한 결과 허용치 이내로 안정한 것으로 해석 되었고<표 3-5>, 대단면 터널의 벽체 시공을 위한 축벽도갱 시공시 인접구조물의 영향을 분석한 결과 축벽도갱의 변위, 슛크리트(허용응력 : 84 kgf/cm<sup>2</sup>) 및 Rock Bolt 응력(허용축력 : 8.4 tonf / EA)은 허용치 이내로 안정한 것으로 판단되었다. <표 3-6>

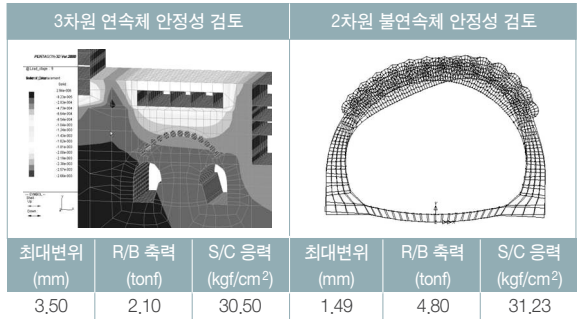
C.A.M 공법으로 대단면 터널 시공 후의 내진검토를 수행 한 결과, 내진 1등급에서 기능수해수준과 붕괴방지수준을 모두 만족하였다. <표 3-7>

대단면 터널천단부와 인접한 강남지하상가에 대한 C.A.M 공법 시공시 안정성 검토결과 침하량(허용 30mm) 및 부등침하(허용 0.02)가 각각 허용치 이내로 안정한 것으로 판단되었다. <표 3-8>

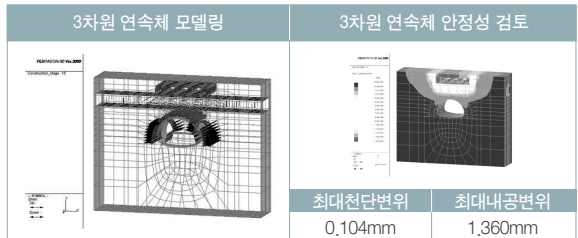
<표 3-4> C.A.M관 추진시 안정성 검토



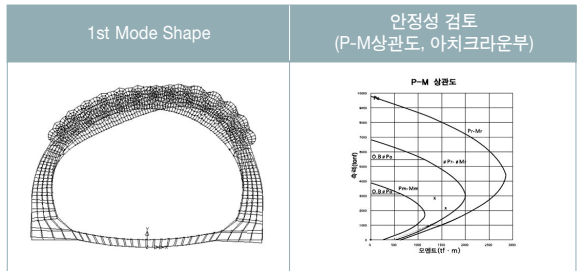
<표 3-5> 축벽도갱 안정성검토



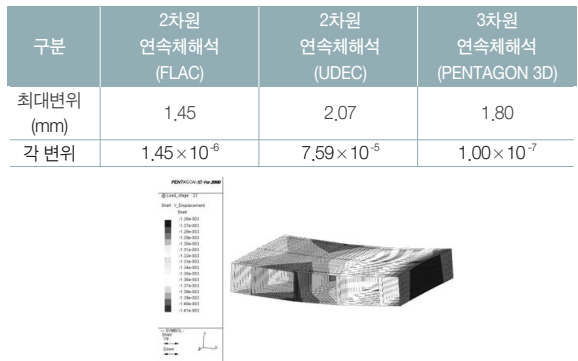
<표 3-6> 3호선 하부 통과 C.A.M관 추진 시 안정성 검토



<표 3-7> 지진시 C.A.M 구조물 안정성 검토



<표 3-8> 인접 강남지하상가 구조물 검토





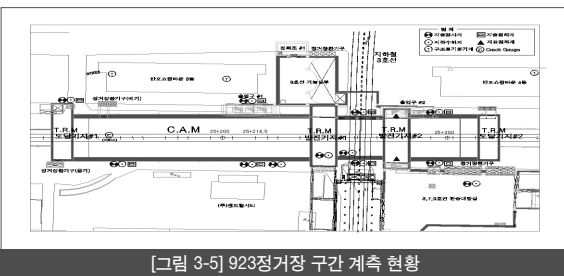
### 3-6. 계측 결과

923 대단면 터널식 정거장 구간은 T.R.M 공법과 C.A.M 공법을 적용하였으며, 정거장과 인접한 주변의 구조물 간 이격거리가 작으므로 현장 작업에 의한 불의의 사고를 미연에 방지하기 위해 자동 계측장치를 설치하여 안전시공을 하고 있다. 923 대단면 터널식 정거장 주변 지반의 침하, 구조물의 응력변화 등을 매일 계측하여 결과를 해석하고, 실측치와 예상치와의 관계를 Feedback하여 설계 적정성 및 계측을 통한 안정관리가 이루어 질 수 있도록 하고 있다. [그림 3-5]는 923정거장 구간의 계측현황을 나타낸다. 계측 수가 많아 범례에 표시되지 않은 내공 변위계는 터널시공의 안전성, 지보의 효과 및 지보의 시공시기와 방법 등을 검토하기 위한 가장 기본적인 계측으로 5.0m~10.0m 간격으로 한단면에 균으로 총 192개소를 설치하였고, E.L Beam Sensor는 강남지하상가 구조물에 17개소, 3호선에 15개소, 7호선에 11개소 등 923정거장 주변의 총 58개소에 설치하여 T.R.M 과 C.A.M 시공시 자동계측을 통한 구조물의 안정성 판단을 도모하고 있다.

특히, 정거장 구간에 위치한 강남지하상가, 지하철 3호선 통과부의 계측관리를 철저히 하여 C.A.M 강관 추진시 및 터널 굴착시에 주변의 영향을 최소화 하고 있으며, 강남지하상가 구조물의 경우에는 구조물 균열 계측결과에 따른 대처방안을 수립하여 적용하고 있다.

〈표 3-6〉

계측 결과를 보면 전체적으로 큰 변화를 보이지 않고 안정을 유지하고 있음을 알 수 있다.〈표 3-7〉



[그림 3-5] 923정거장 구간 계측 현황

〈표 3-6〉 C.A.M 터널 시공시 인접 지하상가구조물 계측결과에 대한 대처방안

구분	관리기준	대처방안	비고
1단계	균열계 0.4mm이상 증가시	주의깊은 관찰	
2단계	균열계 1.4mm이상 및 E.L.Beam 변위 1/500이상 증가시	선단부에 Grouting 강관측면에서 벤토나이트 Grouting	
3단계	균열계 2.0mm이상 및 E.L.Beam 변위 1/300이상 증가시	지하상가 통행통제 전문가 점검 후 대책 마련	

〈표 3-7〉 923정거장 구간 계측결과

계측기명	범례표시	설치개수	최대 변위량	기준치	비고
지중 경사계	⊗	12 개소	2,000mm	40,000mm	안정
지하 수위계	⊙	12 개소	0.056 m/3day	1,000 m/3day	안정
지중 침하계	⊞	8 개소	0,000 mm	30,000 mm	안정
구조물 기울기계	⊕	3 개소	1/4,167	1/500	안정
지표 침하계	▲	2 개소	-0,012 mm	30,000 mm	안정
Crack Gauge	⊙	10 개소	0,323 mm	0,500 mm	안정
E.L Beam Sensor	-	58 개소	1/520	1/500	안정
내공 변위계	-	192 개소	- 2,100 mm	20,000 mm	안정

## 4 결론

국내 최초로 적용되는 C.A.M 공법을 이용한 대단면 터널식 정거장 시공 사례연구를 통해 아래와 같은 결론을 도출하였다.

서울지하철 9호선 913공구 923정거장 구간은 서초구 반포동 일대의 교통량이 많은 도로와 강남고속버스터미널, 강남지하상가, 지하철 3호선 등의 주요 구조물이 위치하며, 주거가 밀집된 지역으로 일반적인 개착공법을 적용하여 정거장을 시공하는 것은 불가능하다. 923정거장은 시공시 지상의 원활한 교통 흐름과 강남지하상가와 지하철 3호선 등의 지중구조물의 안정성을 확보할 수 있도록 대단면 터널식 정거장(총연장 220m, 폭 29.6m, 높이 20.85m)으로 계획하였다.

터널식 정거장의 천단부는 총적층으로 구성되어 있으며, 터널 굴착으로 인한 지하구조물의 영향을 최소화하기 위해 C.A.M을 적용하였으며, 대구경 강관을 추진하기 위한 발진기지 및 도달기지 4개소에 대해서는 T.R.M을 적용하였다.

본 시공사례는 T.R.M과 C.A.M을 적용한 국내 최초의 대단면 터널식 정거장이며, 향후 총적층으로 구성된 지반조건에서 지중구조물의 직하부를 통과하는 터널 설계 및 시공시 기초자료로 활용되길 기대한다

#### 참고문헌

1. 쌍용건설㈜, "지하철9호선 913공구 건설공사 실시계획보고서", 2002
2. 쌍용건설㈜, "지하철9호선 913공구 건설공사 지반조사보고서", 2002
3. 조영호, 조 현, 권오태, 서호모, "지하상가 직하부에서 TRM 시공사례 연구", 2005