

# 서울지하철 터널의 T.R.c.M.공법 적용 사례 연구

## An application of the tubular roof construction method for Seoul subway tunnel construction

지홍근<sup>1</sup>, 유광호\*<sup>2</sup>, 박연준<sup>3</sup>

Jie, Hong-Keun · You, Kwang-Ho · Park, Yeon-Jun

### Abstract

Open-cut method has been widely used to construct underground structures, but it causes several problems such as traffic congestion and public resentment resulting from severe construction noise and ground settlement. In many cases, it is very difficult to build underground structures safely due to the unknown locations of buried facilities such as water pipes, drainage pipes, gas pipes and high-pressure cable conduits etc. Also in open-cut method, moving buried facilities causes additional cost and extension of construction period. Therefore, this paper is to present a case study in which Tubular Roof construction Method (T.R.c.M.), a newly developed construction method for underground structures using slab steel pipes and PC wall trench, is applied for the construction of a subway tunnel in Seoul. As a result, it is found that T.R.c.M. is a construction method by which tunnels can be constructed safely without any effect on the surrounding environment and traffic flow due to the minimized construction vibration and noise.

**Keywords:** T.R.c.M.(Tubular roof construction method), underground structures, tunneling method, stability

### 요 지

지하구조물을 축조하는 공법으로 기존에 가장 많이 사용해 온 것이 개착식 공법이나, 지상교통 흐름을 방해하고 공사소음 및 주변 지반의 침하로 인한 민원 발생 등 많은 문제점을 야기해 왔다. 많은 경우에 있어 지중에 매설된 상수도관·하수도관·도시 가스관·고압 전력구·통신 케이블 등 지중 매설물의 위치가 정확하게 파악되지 않아서 안전한 시공에 어려움이 크고, 개착공사 시 지하지장물의 이설로 인한 공지지연 및 추가공사비가 소요될 것으로 판단되다. 따라서 본 논문에서는 기존 지하구조물 축조공법을 개선하여 슬래브강관과 PC벽체 트랜치를 이용한 터널축조공법 (T.R.c.M.)을 서울지하철 현장에 적용한 시공사례를 소개하고자 한다. 연구결과, T.R.c.M.공법은 진동과 소음을 최소화하여 주변환경과 교통의 흐름에 전혀 지장을 주지 않고 안정적으로 터널을 축조할 수 있는 공법임을 알 수 있었다.

**주요어:** T.R.c.M. (Tubular roof construction method), 지하구조물, 터널축조공법, 안정성

1 정회원, 수원대학교 공학정보대학원, 석사과정

\*2 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수 (khyou@suwon.ac.kr)

3 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수

## 1. 서론

사회가 발전함에 따라 시공성이나 공기단축 등 공사자체의 목적만이 아닌 주변 사회환경과 자연환경에 미치는 영향을 최소화하기 위한 노력은 계속되고 있다. 이에 지하구조물을 축조함에 있어 가장 널리 쓰이는 개착공법의 적용이 불가능하거나, 그에 비해 여러 이점이 있을 시 개착공법을 대체할 수 있는 공법의 개발에 대한 필요성이 대두되었으며, 많은 새로운 지하구조물 축조공법이 탄생되어 왔다. 본 연구에서는 슬래브강관과 PC벽체 트렌치를 이용하여 터널을 축조하는 T.R.c.M. (Tubular roof construction method) 공법에 대해 살펴보고, 실제 터널현장에 적용한 사례를 중심으로 그 적용성을 살펴보고자 한다.

T.R.c.M. 공법은 통로용 강관을 작업구내에서 유압적으로 종방향 2열로 일정한 간격을 유지하여 압입한 후 강관내부를 굴착하고, 보다 작은 강관을 통로용 강관 내에서 다른 통로용 강관까지 압입하고 관내토사를 제거하여 강관 슬래브를 형성한 후, 영구적인 내부벽체의 역할과 거푸집 역할을 하는 PC 콘크리트 판넬로 토사붕괴를 방지하며 필요한 벽체의 깊이만큼 굴착하여 구조물을 형성한 후 터널내부를 굴착한다. 따라서 진동과 소음을 최소화하여 주변 환경에 영향을 최소화하고 지상의 교통흐름에 전혀 지장을 주지 않으며, 지하구조물을 구축할 수 있는 방법이다.

본 논문에서는 지하철 본선을 개착으로 시공하는 중

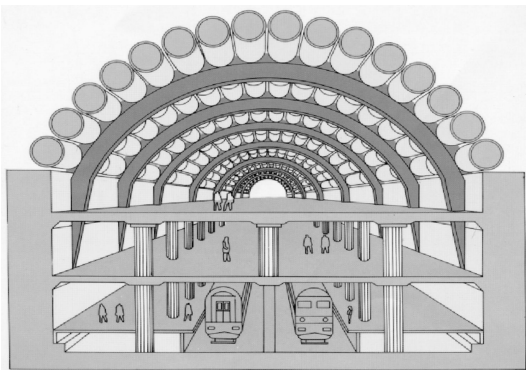


그림 1. T.R.c.M. 지하철 시공 개념도

다수의 중·횡단 지하지장물에 대한 매설확인이 곤란하므로 안전한 시공에 어려움이 예상되고, 지하지장물의 이설로 인한 공기지연 및 공사비가 추가적으로 소요될 것으로 판단되어 T.R.c.M.으로 변경하여 시공한 현장 사례를 연구하였다. 이에 따라서, 시공사례의 지반조건 및 수치해석 결과와 실제 시공상의 계측결과를 비교·분석함으로써 T.R.c.M. 공법의 안정성을 검토하고자 한다.

## 2. T.R.c.M. 공법 개요

### 2.1 T.R.c.M. 공법 소개

T.R.c.M. 공법의 초기 형태인 T.R.M. (Tubular roof method) 공법은 벨기에의 SMET社가 개발한 공법으로 지하에 거대한 지붕 (Roof)을 형성하는 수평관 굴진공법이라 할 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 강관을 작업구에서 유압적으로 압입한 후 강관내부 굴착 및 콘크리트를 주입함으로써 지붕을 완성시키고 강관의 하부를 굴착함으로써 구조물을 축조하는 공법이다 (천병식의 2명, 2000).

그 동안의 비개착공법으로는 Front Jacking이나 Pipe Roof 공법이 도입되어 사용되었으나, 우리나라와 같이 조건이 까다롭고 협소한 장소에서는 사용에 제한이 따를 뿐만 아니라 고가로서 경제적으로도 부담이었다. 또한, Front Jacking 공법의 경우 대규모의 작업구가 필요하므로 현장여건에 많은 제약을 받을 수 있고, Pipe Roof 공법은 직경  $\varnothing 300 \sim 1,200$  mm의 소구경 강관을 압입하여 임시 가시설용 강재지보를 설치하는 보조공법으로 가시설 설치 후 본 구조물을 따로 구축하기에 많은 공기가 소요되고, 특히 전석층에서는 시공이 어려워진다. 반면에, T.R.c.M. 공법은 이러한 단점을 크게 개선하여 필요한 작업공간을 최소화하였고, 가설구조물이 아닌 본구조물로 활용이 가능하기에 이중작업을 회피할 수 있고 이에 따라서 공기를 단축하는 효과가 있다. 그리고, Front Jacking 공법에서는 전단면이 프리캐스트 콘크리트이므로 견인중에 방향전환이 어려우나, 해당공법은 통로용 강관의 유도 조절장치 및 레이저 측량기를 이용하여 선형의 확인 및 조정이 용이하므로 보다 정밀한

시공이 가능하게 되었다. 또한 가설구조물이 아닌 철근 콘크리트로 충전한 강관을 사용하므로 강성이 매우 커서 지반의 거동을 최소화하였다 (동원기초, 2001).

## 2.2 여타 공법과의 비교

### 2.2.1 N.T.R. (New Tubular Roof Method)

본 공법을 최초로 지하구조물 축조에 사용한 것은 1988년 이태리의 베네치아 중앙역사 공사이다. 상대적으로 지반 강도가 연약한 유럽에서는 흙관을 압입하였으나, 국내의 지층은 전단강도가 비교적 큰 퇴적암층이 널리 분포되어 있어 강관으로 대체 적용하였다 (이영복외 4인, 2003).

해당공법은 수평강관을 연속하여 유압잭으로 압입하고 강관과 강관사이 측면부를 절단한 다음 철판으로 이어 용접하여 강관들을 완전히 연결하여 일체화시킨다. 이후 강관 중단을 절개하여 강관내측에 거푸집을 설치하고 철근이나 H-beam을 설치한 후, 콘크리트를 타설하여 지붕 (Roof)을 형성한다 (그림 2 참조).

이 공법 역시 T.R.c.M.공법과 마찬가지로 지하구조물 시공 시 인접한 구조물에 침하 및 진동에 의한 균열 등이 발생하지 않는다. 강관과 강관 측면부를 절단하여 철판으로 용접해 이어주므로 구조체의 방수가 확실하며, 강관과 강관사이의 차수능력이 탁월하여 지하수 조절이 가능하다 (김정운외 2인, 2002). 또한, 측벽굴착 시 대구경 강관내에서 작업하므로 위험성이 전혀 없고, 타구조물과의 단면 연결 시 이질감이 없으며 최소토포 (1 m)로

원하는 구조물을 구축할 수 있다 (이영복외 4인, 2003).

### 2.2.2 T.R.&T. (Tubular Roof & Trench Method)

지하구조물의 형상에 따라 대구경 강관을 그림 3과 같이 연속적으로 압입하고 강관내부를 굴착한 다음, 강관 측면부를 소정의 크기로 절개하여 절개면 하부에 방수철판을 설치하고 절개된 곳에 응력부담재로 소구경 강관을 설치한 후 보강후렌지로 응력부담재와 압입강관을 용접하여 일체화 시킨다. 이후, 터널 내부를 굴착하면서 중간 벽체를 타설한 후 구조물 바닥에 영구버팀보를 설치해 지지하도록 하고 하부슬래브를 철근조립하여 콘크리트 타설한다 (김정운 외 6명, 2004).

이 공법은 T.R.c.M.공법과는 달리 강관의 강성을 설계에 반영하여 무근콘크리트로 타설하므로, 철근기공 조립이 필요 없고 지하구조물 내부에 거푸집을 설치하여 내부 콘크리트를 타설하므로 미관이 좋으나, 실제로 강관의 삽입 시 정확도의 유지가 매우 중요하며 많은 시간이 소요되므로, 강관수가 늘어나는데 따른 부담이 작용할 수 있다. 또한, 가시설이 있어 내부 굴착 시 간섭을 받을 수 있으며, 가시설 설치 후 본구조물을 시공하여야 하므로 공기가 길어질 수 있다.

### 2.2.3 Front Jacking 공법

소구경의 강관을 압입하여 토류시설을 설치하고 구조물과의 마찰력과 토압을 최소화시킨 후, 현장에서 제작한 전단면 프리캐스트 콘크리트 구조물 선단부에 PC 강연선과 유압잭을 사용하여 지중의 소정위치에 견인한다.

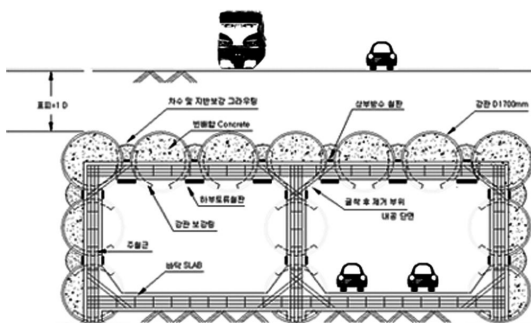


그림 2. N.T.R. 단면도 (한국엔티에스, 2004)

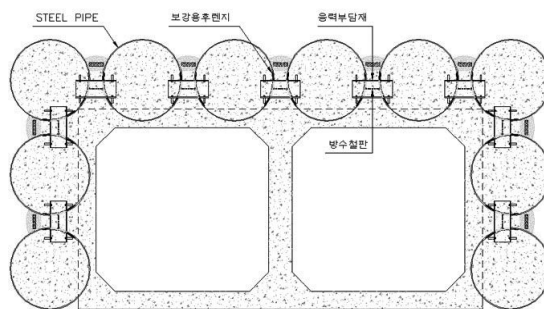


그림 3. T.R.&T. 단면도 (한국엔티에스, 2004)

이 후 합체주변과 강관 내를 그라우팅하고 조인트를 방수하여 지하구조물을 축조하는 공법이다.

시공실적이 많아서 안정도가 매우 높으며, 준공 후 유지 관리비가 저렴하며, 콘크리트 품질관리가 용이하다. 교통흐름에 큰 지장을 주지 않으나 열차 등은 서행이 필요하다.

### 2.3 T.R.c.M. 시공 방법

#### 2.3.1 T.R.c.M.공법의 특징

T.R.c.M.공법은 선도관과 후속관 사이에 유압식(또는 볼트식) 조정 장치를 장착하여 중·횡단 구배에 따라 선형을 유지할 수 있도록 하며, 통로용 강관과 슬래브 강관을 압입하여 본 구조물의 상부구조물을 직접 형성하며, 콘크리트 패널 및 스트러트(Strut)를 이용하여 지중 수직벽을 설치한 후, 강관과 강관사이에 방수처리를 하는 터널 축조공법이다. 따라서 외부 조건에 관계없이 시공되므로 공기가 단축되고, 연속된 연암이상의 지층시 다소 시공성이 저하되나 별도의 가설공사가 필요하지 않으므로 이중 작업이 발생하지 않아 경제적이다. 작업구간 상부의 교통흐름 및 열차의 정상 운행에 전혀 영향이 없으며, 지반거동을 극소화하므로 인접한 구조물에 큰 영향 없이 시공이 가능하다.

#### 2.3.2 T.R.c.M. 시공 순서

##### ① 작업구 설치 및 반력벽 설치

통로용 강관의 중심축에 직각이 되게 반력벽을 설치할 수 있도록 작업구를 구축하고, 반력벽은 통로용 강관을 추진·설치하기 위한 가설 구조물로서 통로용 강관의 환경, 추진 길이, 토질상태, 작업조건 등을 고려하여 구조 검토 후 철근콘크리트 구조물로 축조한다. 이 후 유압잭 및 가이드 레일을 설치하는데, 유압잭은 통로용 강관에 맞는 규격으로 강관추진을 위한 유압잭을 설치하고, 가이드 레일은 강관 압입 시 선형, 수평·수직 레벨을 유지할 수 있도록 견고하게 설치한다.

##### ② 통로용 강관 제작 및 추진

통로용 강관 선단부(선도관)는 사질토 지반에서 막장부의 붕괴를 방지하기 위해 0.5 m 정도의 길이로 만들어 설치한다. 또한, 선도관은 강관의 선단에 장치하여 강관

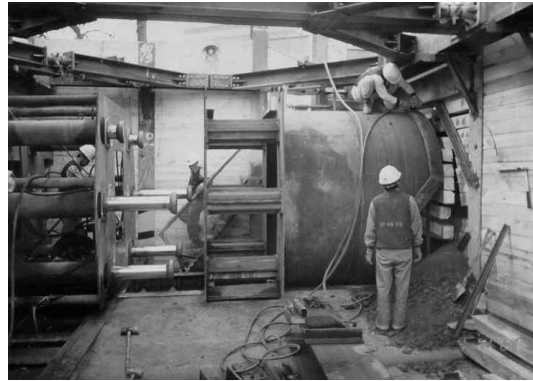


사진 1. 반력벽 및 유압잭 설치전경

압입 시 발생할 수 있는 곡선 진행을 필요한 방향으로 유도 조절하는 방향조절 장치이며, 계획된 중·횡단 선형에 맞출 수 있도록 해준다. 통로용 강관 내부에는 호이스트 및 체인 블록, 레일을 설치하여 강관, 굴착 토사의 운반을 용이하도록 한다. 강관 내에서 인력으로 굴착하거나 유압 브레이커를 이용하여 굴착하고 버력은 운반차를 이용하여 갱외로 운반한다.

##### ③ 벤토나이트 주입

통로용 강관 추진 시 강관의 주변마찰력을 감소시키고, 통로용 강관 Cutting Shoe에 발생한 여굴 부위를 충전하기 위해 벤토나이트 현탁액을 주입한다. 추진이 완료되면 강관을 연결하며, 강관압입이 끝나고 용접이 완료된 후에는 혹시 발생할 수 있는 굴진시의 여굴 부위에 시멘트 밀크 그라우팅을 실시하여 침하를 예방한다.

##### ④ 슬래브관 추진 및 외부 그라우팅

작업대 및 강관 거치가 완료되면 슬래브관 추진을 실시하며 슬래브관의 길이는 1본당 1 m 길이의 강관을 사용한다. 이 때 통로용 강관과 마찬가지로 강관 추진, 강관 내 굴착, 벤토나이트 주입 및 연결용접을 실시한다. 추진이 완료되면 슬래브관 상부에 0.5 m 간격으로 밸브를 설치하고 시멘트 그라우팅을 실시하며, 강관외부를 경화·차수시켜 안정화시키고 터널내부 굴착 시 상부 토층의 붕괴를 방지한다. 본 단계에서는 강관과 강관 사이 상부 반단면만을 그라우팅하여 시공중 상부의 용수를 억제하는 역할과 향후 구조물 완공시 1차적인 방수역할을 하게된다. 나머지 하부 반단면은 터널 내부 굴착 후 그라



사진 2. 슬래브판 압입

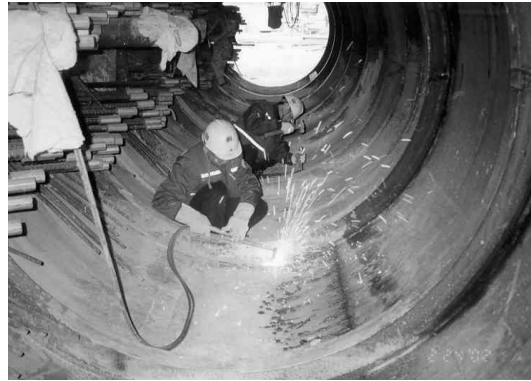


사진 3. 통로용 강관 보강링 설치 및 하부 절단

우팅하도록 한다.

⑤ 슬래브 관내 콘크리트 타설

상부 토압에 대응하기 위해 슬래브관내 철근을배근하고 콘크리트를 타설한다. 강관의 끝단에 철망 거푸집을 설치하여 콘크리트를 타설하며, 콘크리트 타설 완료 후 콘크리트의 수축으로 인해 발생하는 공간은 이미 설치된 그라우팅 주입 파이프를 이용하여 공극을 채워준다.

⑥ 통로용 강관 보강링 설치 및 하부 절단

PC 벽체 트렌치 하부를 굴착하기 위하여 통로용 강관을 절단할 경우 주변 토압에 의해 통로용 강관이 변형될 우려를 방지하기 위하여 통로용 강관 보강링을 설치한다. 보강링은 슬래브판과 슬래브판 사이에 용접하여 설치하도록 한다.

⑦ 트렌치 굴착

벽체를 축조하기 위하여 통로용 강관을 하향으로 소정의 크기만큼 절개하여 굴착을 시작하며, 토사의 붕괴를 방지하기 위하여 양면으로 보통 가로 1.5 m, 세로 0.4 m로 제작된 콘크리트 PC 판넬을 설치하고, 양쪽 판넬 사이에는 토압에 대비하여 스트러트를 설치한다. 구조물 완료 후에 터널 내측 측벽은 노출되므로 수직도 및 정밀도를 요하여 시공한다. 과도한 선행굴착을 피하며 소정의 심도까지 반복 작업으로 굴착한다. 시공중에 발생용수를 차단하기 위하여 굴착전에 통로용강관내에서 벽체 외측으로 그라우팅 (C.T.C 800 mm, D1,000 mm)을 실시하고, 추진시점측 하부 중앙바닥에는 집수정 (2 m×4 m)을 설치한다. 벽체의 외측 판넬에는 방수에폭시를 도포



사진 4. 트렌치 굴착

하며, 판넬과 판넬의 연결부에는 수팽창 지수재 및 Seal재를 사용하여 벽체의 방수를 완벽하게 처리하도록 한다.

⑧ 트렌치 및 통로용 강관내 콘크리트 타설

철근은 기존 PC 판넬의 철근과 연결하여 작업하며, 작업공간이 매우 협소하므로 철근이음은 커풀러를 이용하여 연결한다. 콘크리트 타설시 Air Vent로 콘크리트가 흘러나올 때까지 주입해야 한다. 또한, 콘크리트 타설시 품질관리 확보를 위하여 콘크리트에 유동화제를 첨가하여 시공성을 확보하며, 구체방수재를 사용하여 PC 벽체 트렌치자체에서의 확실한 방수효과를 얻을 수 있다.

⑨ 터널 내부 굴착 및 하부슬래브 설치

통로용 강관과 트렌치 벽체 콘크리트의 양생 후 소요강도가 충분히 발휘되면, 중앙 부분을 우선 굴착하고 측벽



사진 5. 마감 작업 및 T.R.c.M. 공법 완료

부를 차후에 굴착한다. 터널 굴착이 완료된 후, 터널 바닥과 트랜치 경계면의 철근이음 연결은 이미 설치된 철근이음용 커플러를 이용하여 시공하며 지수재를 설치하도록 하고 콘크리트를 타설한다.

#### ⑩ 방수 및 마감작업

방수를 위해 천장마감 1차 철판(1,000×200×4.5)을 제작하여 슬래브관 중심선사이에 용접하고 그라우팅을 실시한다. 이 후 슬래브관 하부 사이에 천장마감 2차 철판(1,000×400×4.5)을 제작하여 용접하고 1차 철판과의 빈 공간에 최종 그라우팅을 실시하여 완벽한 방수역할을 하도록 한다. 최종적으로 노출되는 강관의 마감면은 녹막이 페인트 및 타르 에폭시 수지 도포를 실시하여 도장처리한다.

### 3. 현장 적용 사례

#### 3.1 현장 개요

본 연구사례의 현장은 2002년 1월 5일에 착공하여 2007년 12월 29일 준공을 목표로 대부분 개착공법으로 지하철공사를 진행 중으로, 11월 현재 공정을 약 40%로 흙막이와 복공이 완료되었고, 굴착과 가시철이 시공 중이다. 공사구간의 연장은 총 1,540 m, 폭은 최소 12 m에서 최대 50m이며, 정거장 1개소, 본선 1,375 m, 출입구 10개소, 환기구 4개소의 규모이다.

해당공사 구간은 도심의 통행량이 많은 간선도로를 따라 공사구간이 펼쳐져 있는 관계로 인근에 아파트 3개단지, 중소규모의 주택가, 관공서, 방송국, 대형 할인마트와 상가가 밀집해 있다. 따라서 주변 민원이나 교통통행에 영향을 최소화하여 공사를 진행할 것이 요구되는 세심한 공사관리가 필요한 구간이다.

#### 3.2 공법 적용 개요

대상현장에서는 지하철 본선을 개착으로 시공하는 중하수박스(11 m×3 m) 및 상수도 3개 라인(Ø2400 mm·Ø1200 mm·Ø700 mm), 도시가스 2개 라인(Ø500 mm·Ø300 mm), 통신케이블(Ø100 mm), 전력케이블(Ø200mm)등 다수의 중·횡단 지하지장물에 대한 매설확인이 곤란하여 안전한 시공에 어려움이 예상되었다. 또한 개착 시에 본선의 좌우측에 시공되어야 하는 주열식 벽체에 저축되는 지하지장물(상수도Ø700 mm·신호케이블·한전맨홀·통신맨홀)의 이설로 인한 공기지연 및 공사비가 추가적으로 소요될 것으로 판단되었다(대우건설, 2004a). 이에 지하 지장물 이설 및 추가 보강이 불필요하고 공기를 단축하고, 추가 공사비를 절감할 수 있도록 당초 개착공법에서 T.R.c.M.으로 변경하여 시공하였다.

공사구간의 지층은 매립층-충적층-풍화토-풍화암-연암-보통암-경암의 순서로 분포되어 있었다. 충적층은 16.02 m까지 분포하고 있으며, 주로 실트질 모래, 모래질 실트, 점토질 실트, 실트질 점토, 모래 섞인 자갈로 구성되어 있으며, 표준관입시험결과 점성토는 연약 내지 매우 견고한 연경도를 사질토는 느슨 내지 매우 조밀하게 구성되어 있었다. 풍화대층은 충적층하부에서 5.4 m의 층후로 분포하고 있고 본 층은 주로 실트질 모래로 구성되어 있으며, 표준관입시험 결과 매우 조밀한 조밀도를 나타내고 있으나 특성상 대기에 노출되거나 물과 접촉할 경우 연약한 토체로 변하는 특성을 나타냈다. 연암이 지표하 26.5 m까지 흑운모 편마암, 호상흑운모 편마암으로 구성되어 있었고, 그 하부로는 보통암층으로 보통 강함 내지 안구상 편마암으로 구성되어 있었다(대우건설, 2002).

해당구조물은 심도 18.5 m~27.5 m에 위치하며, 총

연장 40.5 m이며, 폭은 12.5 m이다. 2004. 8. 30일 부터 반력벽 설치를 시작으로 그림 4와 그림 5와 같이 10월말 현재 통로용 강관과 슬러리관은 압입이 완료된 상태이다. 통로용 강관은  $\varnothing 2500$  mm, 슬래브관은  $\varnothing 1800$  mm을 압입했고 텀버트렌치는 1400 mm로 시공했다.

### 3.3 수치해석을 이용한 안정성 검토

먼저 SAP2000 (Computers and Structures, Inc, 1997, Ver.6.1)을 사용하여 콘크리트, 도상, 아스팔트, 성토재료, 지하수의 하중과 축벽토압 및 차량운행에 따른 활하중을 고려하여 박스구조물 및 시점부와 종점부 막장 가시설에 대하여 수치해석을 실시했다.

또한, T.R.c.M. 박스 벽체 시공을 위한 트렌치 굴착시 배면 토압의 지지를 위한 콘크리트 판넬 및 버팀 지보의 안정성 확인을 위하여 지반 해석 프로그램 FLAC-2D

(Itasca Consulting Group, Inc., 1991)을 사용하여 해석하였다. 해석단계는 시공순서에 맞추어 34단계로 나누어 스트러트의 축력 및 Timber Wall의 응력을 검토 하였다. 본 해석에서 가정단면은 그림 5와 같으며, 지반 물성값은 지하철 구조물 설치위치에서 가장 가까운 지반 조사 결과와 국내지하철 안정성 해석 시 적용한 지반물 성값 및 지반상태를 고려하여 표 1과 같이 결정하였다. 또한, 재료의 물성값은 표 2에 정리된 바와 같이 적용 하였다.

해석결과 스트러트의 최대 축력은 최종 굴착 단계에서 2.62 ton/EA이 작용하는 것으로 산정되었다. 이는 강 봉 스트러트의 허용 축하중인 17.221 ton/EA 보다 적어 굴착 진행시 충분한 지지가 가능한 것으로 검토되었다. Timber Wall의 콘크리트 판넬 최대 휨응력은 21.89 kgf/cm<sup>2</sup>로 허용 휨응력 84.0 kgf/cm<sup>2</sup> 보다 적어서 안전한 것으로 검토되었다 (대우건설, 2004a).

T.R.c.M.공법에 의한 지지력의 검토는 SAP 2000에 의해 수행되었고, Case 1: 터널내부 굴착, Case 2: 1차 강지보공 설치 후 토사 굴착, Case 3: 2차 강지보공 설치 후 토사 굴착, Case 4: 3차 강지보공 설치 후 토사 굴착, Case 5: 토사굴착 완료의 5단계에 대해서 검토한 결과 표 1과 같이 연암의 지지력인 90ton/m<sup>2</sup> 미만으로

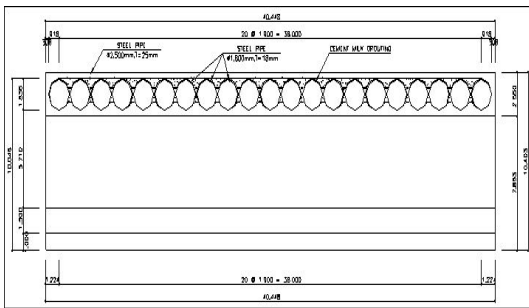


그림 4. T.R.c.M. 공사 정면도

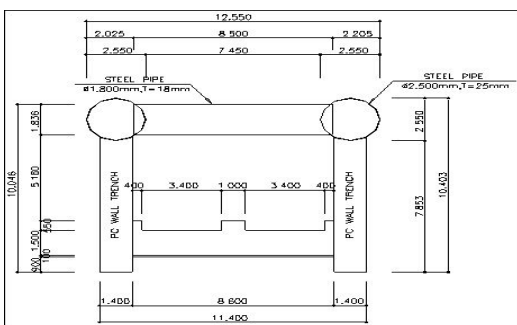


그림 5. T.R.c.M. 공사 단면도

표 1. 지반의 물성값

구 분	$\gamma$ (ton/m <sup>3</sup> )	E ( $\times 10^3$ t/m <sup>2</sup> )	$\nu$	C (ton/m <sup>2</sup> )	$\phi$ ( $^\circ$ )
풍화토	2.0	5.000	0.33	5.0	35

표 2. 재료의 물성값

구 분	설계기준강도	탄성계수	비 고
콘크리트	270(kg/cm <sup>2</sup> )	2.5 $\times 10^5$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
철근(강관)	4,000(kg/cm <sup>2</sup> )	2.0 $\times 10^6$ (kg/cm <sup>2</sup> )	

표 3. Case별 지지력 검토

구 분	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	비 고
최대연직력 (ton/m <sup>2</sup> )	16.631	9.546	12.453	13.617	23.774	
허용지지력 (ton/m <sup>2</sup> )	90	90	90	90	90	연암

매우 안정한 것으로 나타났다 (대우건설, 2004b).

또한, PENTAGON-3D (에메랄드 소프트, 2000)를 이용하여 침하량을 검토하였다. 시공순서에 의해서 12단계 (지장물 설치-통로용강관 설치-슬래브판 설치-벽체 트렌치 굴착1-벽체트렌치 굴착2-벽체트렌치 굴착3-벽체트렌치 굴착4-벽체트렌치 굴착5-벽체트렌치 굴착6-벽체타설-터널내부 굴착-바닥슬래브 설치)로 해석단계를 구분하고, 내부굴착 시 시·중점측에서 양방향으로부터 굴착거리를 달리하여 6개 Case별 (3 m 굴착-6 m 굴착-9 m 굴착-12 m 굴착-15 m 굴착-전구간 굴착하는 경우)로 구분하여 침하량을 검토하였다.

검토결과 그림 6과 같이 천단부 및 측벽하부에서의 침하량은 큰 차이가 없었으며, 굴착면 하부에서의 침하량은 다소 차이가 있으나 굴착에 따른 응력해방에 의해 모두 옹기하는 것으로 검토되었다. 해석결과 발생된 변위는 모두 허용범위 이내로 각각의 경우가 안정성을 확보할 수 있는 것으로 판단되므로 시공성 및 경제성을 고려하여 전 구간 굴착후 하부 바닥슬래브를 설치하도록 했다. 전구간 굴착 시에는 수평변위량은 최대 2.624 mm로 매우 적었으며, 연직침하량은 천단부: -0.870 mm, 좌측측벽하부: 1.123 mm, 우측측벽하부: 1.126 mm, 하부슬래브 4.733 mm로 구조물기초 설계기준 (건설교통부, 2003)에 의한 허용침하량 25 mm, 도로설계요령 (한국도로공사, 2002)에 의한 허용침하량 20 mm에 비교할시 매우 적었다 (대우건설, 2004b). 이에 최종 굴착

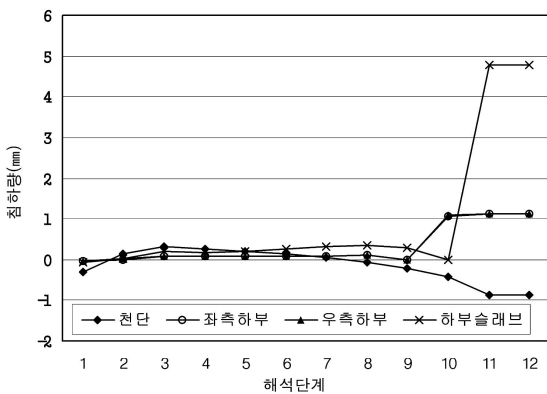


그림 6. 전구간 굴착시 시공단계별 연직침하량 (대우건설, 2004b)

단계의 구조물 침하량, 최대침하량, 부등침하량, 각 변위량을 검토한 결과 모두 허용치를 만족하였다. 또한 최종단계에서 지반의 연직변위 분포도는 그림 7과 같다.

이상과 같이, 박스구조물 및 시점부와 중점부 막장 가시설에 대한 설계, 트렌치 굴착시 배면 토압의 지지를 위한 콘크리트 판넬 및 버팀 지보의 안정성 확인, 지지력의 검토, 굴착거리를 달리한 침하량을 모두 검토한 결과 지반조건과 하중조건에 있어서 적절한 것으로 판단되었다. 그러나 시공시의 불확실한 요소를 제거하기 위하여, 계측을 수행하고 계측값과 수치해석결과를 비교·검증하였다.

### 3.4 계측관리 및 분석

대상터널의 계측은 어스앵커 또는 록볼트의 반력과 설계 시 제안된 설계축력을 상호 비교함으로써 토압의 작용크기 및 변화를 파악하여 토류벽의 안정성을 판단하는 자료로 활용하고자 하중계를 T.R.c.M.구간의 시점부 막장 사보강재 좌측 6단과 좌측 7단에 2개소를 설치하고, 중점부 막장 사보강재 좌측 6단과 좌측 7단에 2개소를 설치하였고 계측한 결과는 그림 8과 같다. 또한, 버팀보의 축력에 의해 배면토압의 변화를 측정하여 이상 변형 파악 및 대책을 수립하고자, 응력계를 T.R.c.M. 구간 시점부 막장 사보강재 좌측 2단과 우측3단에 그리고 좌측 4단과 우측 5단에 4개소를 설치하고, 중점부 막장 사보강재 우측 1단과 좌측 2단 그리고 우측 3단과 좌측

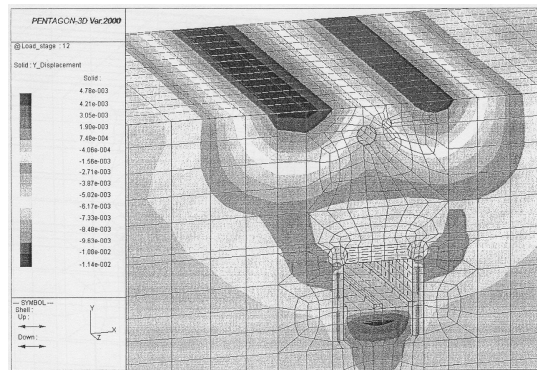
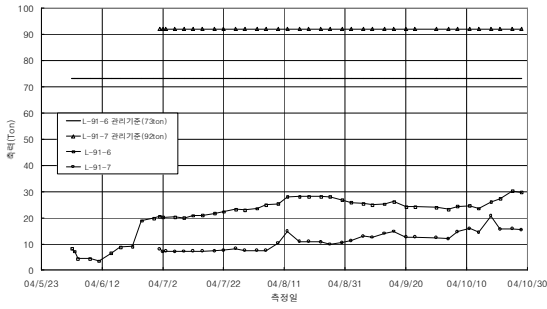
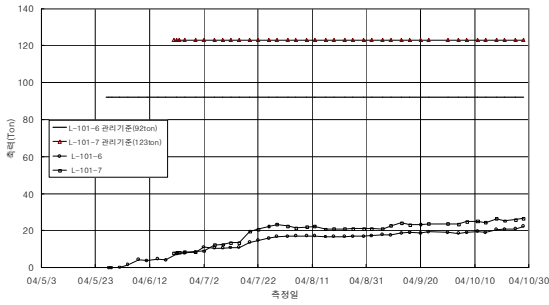


그림 7. 최종단계의 연직변위 분포도 (대우건설, 2004b)





a. 시점측



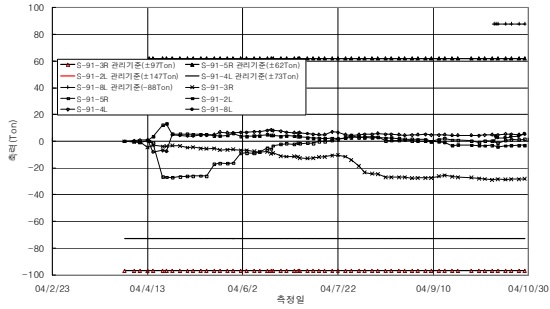
b. 종점측

그림 8. 하중계 계측결과 (대우건설, 2004c)

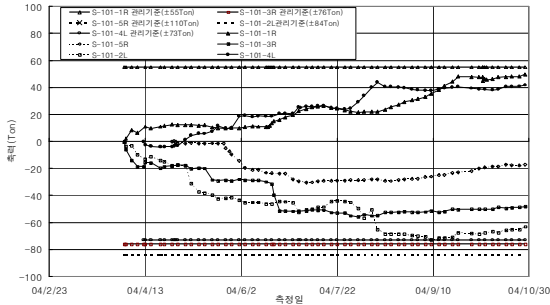
4단과 우측 5단에 5개소를 설치하였으며, 계측한 결과는 그림 9에 정리하였다.

하중계는 앵커와 락이 수직이 되도록 하고 전면 Plate, 하중계, 후면 Plate 순으로 각각 설치하고, 편심이 작용하지 않도록 주의하여 유압잭으로 앵커를 인장한다. 유압잭 제거 후 반력 증감량을 측정한다. 하중계 케이블에 측정기 (MB-6T)를 연결하여 축력 ( $\mu$ -strain)을 측정한다. 응력계는 측정하고자 하는 Strut면을 깨끗이 고른 후 Spot 용접기를 이용하여 Strain Gage Sensor를 부착시키고, 케이블을 측정위치까지 연결시킨 후 보호덮개로 센서를 보호한다.

계측빈도는 설치 후 3일간은 1회/일, 공사 중에는 2회/주, 공사완료 후는 1개월간 1회/주로 측정하였다. 설치 일자 는 가시설이 완료되고 굴착이 시작되기 전인 2004년 4월 2일에 응력계를 설치하였고, 2004년 6월 2일에 하중계를 설치하여 현재까지 계측을 진행 중이다. 계측 자료의 관리기준치는 발주처의 지시방침에 의거하여 1차



a. 시점측



b. 종점측

그림 9. 응력계 계측결과 (대우건설, 2004c)

기준: 설계 예상치, 2차 기준: 1.25×설계 예상치, 3차 기준: 부재허용치로 관리하였다. 만약 1차 기준을 초과 할 시에는 측정 빈도의 증가 등으로 계측체제를 강화하고, 요인을 분석하고, 해당구간의 계측기 및 측정점을 추가 하도록 하였다 (대우건설, 2004c).

하중계의 최근 계측결과를 표 4에 정리하였으며, 계측된 값이 1차 관리기준치의 30% 이내로 매우 안정적임을 알 수 있다.

응력계의 최근 계측결과 또한 표 5에 정리되었는데, 계측값 모두 1차 관리기준치의 80% 이내로 매우 안정적임을 알 수 있다.

또한, 지표침하계를 12개소 설치하여 측량한 결과 착공전의 초기값에 대비한 누계침하량이 최대

0.007 mm로 수치해석 시 통로용 강관과 수평관 설치 시에 예상되는 최대침하량 0.321 mm에 비교할 때 매우 적어서 안정적이었다. 향후 트랜치 굴착 및 내부굴착 시에 침하량이 다소 증가할 것으로 예상되나, 현재의 침하

표 4. 하중계 설치위치 및 계측결과

계측위치		버팀보 축력 (ton)			
		8. 26	9. 23	월간 변화량	1차 관리기준치
시점	좌측6단 (L-91-6)	28.00	24.20	-3.80	79.00
	우측7단 (L-91-7)	9.90	12.70	2.80	92.00
종점	좌측6단 (L-101-6)	16.90	19.30	2.40	92.00
	우측7단 (L-101-7)	21.00	23.70	2.70	123.00

표 5. 응력계 설치위치 및 계측결과

계측위치		버팀보 축력 (ton)			
		08.26	09.23	월간 변화량	1차 관리기준치
시점	좌측2단 (L-91-2)	-26.96	-26.88	0.08	97.00
	우측3단 (L-91-3)	0.95	0.91	-0.04	62.00
	좌측4단 (L-91-4)	1.50	-2.72	-4.22	147.00
	우측5단 (L-91-5)	4.42	4.49	0.07	73.00
종점	우측1단 (L-101-1)	29.25	48.01	18.76	55.0
	좌측2단 (L-101-2)	-52.04	-50.34	1.70	76.00
	우측3단 (L-101-3)	-28.02	-22.85	5.17	110.00
	좌측4단 (L-101-4)	-68.71	-67.55	1.16	84.00
	우측5단 (L-101-5)	39.66	40.44	0.78	73.00

경향으로 판단할 때 전구간을 굴착하고 바닥 슬래브까지 설치 시에 예상되는 수치해석 결과 최대침하량 4.778 mm에 비하여 매우 안정적일 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

지금까지 시공사례를 통하여 T.R.c.M.공법의 적용사유와 수치해석 및 계측자료를 통해서 현재까지 시공상의 안정성을 검토하였다.

사례의 현장은 통행량이 많은 간선도로를 따라 시공중으로 인근에 주택단지과 상가 및 관공서 등의 건물이 밀집해 있어 주변 민원이나 교통통행에 미치는 영향을 최소화할 것이 요구되었으며, 다수의 중·횡단 지하 지장물에 대한 매설확인이 곤란하고 이설로 인한 공기지연 및 공사비가 추가적으로 소요될 것으로 판단되어, 당초 개착공법에서 T.R.c.M.으로 변경하여 적용되었다. 해

당구간의 토질은 주로 풍화대층과 편마암 계열의 연암층으로 이루어져 있었다.

이에 대한 수치해석 결과, 5 가지 Case별 지지력은 모두 연암의 허용지지력 이내로 안정하였고, 시·종점측에서 굴착거리를 달리하여 침하량을 검토한 결과로 천단부 및 측벽하부에서의 침하량은 큰 차이가 없었으며, 굴착면 하부에서의 침하량은 다소 차이가 있었으나 굴착에 따른 응력해방에 의해 모두 융기하는 것으로 검토되어 허용침하량 이내로 안정하였다. 실제 시공 상의 하중계와 응력계의 계측치는 1차 관리기준치에 크게 못 미쳤으며, 지표침하계의 계측치도 최대 0.007 mm로 수치해석 시 통로용 강관과 수평관 설치 시에 예상되는 최대침하량 0.321 mm와 비교할 때 매우 적어서 안정적이었다.

위와 같은 검토결과를 종합할 시에 현장의 지반조건과 시공상태에 따라 수치해석치보다 크게 못 미치거나 유사한 결과를 나타냈으며, 모두 관리기준치 이내로 T.R.c.M.공법으로 시공한 지하구조물이 신뢰성을 갖고 있다고 판단

되었다.

다른 한편으로 실제 시공과정을 검토해 볼 때, 강관의 직경이 2.0 m 이내이거나 트렌치 벽체가 1.0 m 이내로 협소할 경우, 공법의 특성상 인력작업이 많기에 시공성이 다소 떨어짐을 알 수 있었다. 특히 슬래브관과 트렌치 벽체의 철근조립이 상당히 어려워, 향후 설계 시에 강관의 강성을 적정하게 반영하여 배근량을 최소화 할 필요성이 대두된다. 다만, 통로용 강관의 추진 시에 정밀도 유지를 위해서는 많은 노력이 필요하고 전체 공기 중에서 많은 공기가 소요되었는데, 통로용 강관의 추진공정을 2분으로 최소화시킨 것은 공기와 품질 양측면에서 큰 역할을 하였다.

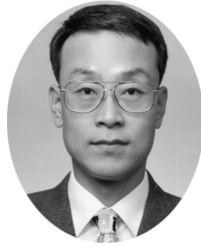
이상에서 살펴본 바와 같이 지하구조물의 구축에 있어서 여전히 많은 수작업에 의존하는 등 T.R.c.M.공법이 좀 더 개선되어야 하고 발전할 수 있는 많은 가능성은 있으나, 현장의 특수한 사정으로 인해 개착공법의 적용이 어려운 현장에서는 다양하게 적용할 수 있을 것으로 보이며, 향후에도 안정적인 지하구조물 축조공법으로서 많은 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Computers and Structures, Inc. (1997) SAP2000 Manual (Ver.6.1), Berkeley, California, USA.
2. Itasca Consulting Group, Inc. (1991) FLAC Manual, Minneapolis, Minnesota, USA.
3. 건설교통부 (2003) 구조물 기초설계기준 해설, 한국지반공학회.
4. 김정운, 박인준, 김경곤 (2002) “지하공간개발을 위한 N.T.R.공법의 적용성 연구”, 제3차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, 한국터널공학회, pp. 172~178.
5. 김정운, 박인준, 유광호, 김경곤, 심정식, 한광우, 양재섭 (2004) “국내 지하공간개발을 위한 T.R.&T.공법의 적용성 연구”, 제5차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, 한국터널공학회, pp.126~132.
6. 대우건설 (2002) 지반조사보고서, 서울특별시 지하철 건설본부, 1094p.
7. 대우건설 (2004a) T.R.c.M. 공법 설계검토서, 서울특별시 지하철 건설본부, 240p.
8. 대우건설 (2004b) T.R.c.M. 공법 구조계산서, 서울특별시 지하철 건설본부, 278p.
9. 대우건설 (2004c) 계측관리 월간 보고서, 대우건설, pp. 318.
10. 동원기초 (2001) 슬래브강관과 PC벽체 트렌치를 이용한 터널축조공법(T.R.c.M.), 신기술지정등록서, pp. 3~32.
11. 에메랄드 소프트 (2000) PENTAGON-3D 사용 설명서.
12. 이영복, 김정운, 박인준, 김경곤, 이정호 (2003) “대구경 강관을 이용한 지하구조물 축조공법의 국내지반 적용성 연구”, 터널기술 (한국터널공학회 논문집) 제5권 제4호, pp. 402~403.
13. 천병식, 김정운, 최현석 (2000) “지하구조물 축조를 위한 TRM공법”, 한국지반공학회 논문집, 제16권 제4호, pp. 34~35.
14. 한국도로공사 (2002) 도로설계요령 제3권, 한국도로공사.
15. 한국엔티에스 (2004), <http://www.knts.co.kr>, 한국엔티에스 홈페이지.



**지홍근**  
(주)대우건설 토목건설적팀장  
HKJIE@dwconst.co.kr



**유광호**  
수원대학교 토목공학과 부교수  
khyou@suwon.ac.kr

---



**박연준**  
수원대학교 토목공학과 부교수  
yjpark@suwon.ac.kr

---

K C I