

인도 Delhi 지하철 Shield TBM 공법 적용 사례



이병남
삼성물산(주) 건설부문
인도지하철현장 현장소장



김정환
삼성물산(주) 건설부문
인도지하철현장 과장



이승복
삼성물산(주) 건설부문
국내토목영업팀 차장



손재일
삼성물산(주) 건설부문
국내토목영업팀 대리



김응태
삼성물산(주) 건설부문
국내토목영업팀 부장

1. 서론

최근 국내의 도심지에 적용되는 건설공사의 경우, 노무비의 상승은 물론이거니와 건설공해에 따른 민원, 보상비 등으로 인해 현장에서 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 반면 기계분야에서는 고효율의 건설장비가 계속 개발되고 있어 과거에 고가로만 인식되던 장비비가 전체 공사비에서 차지하는 비율은 점점 낮아져 건설공사의 기계화, 대형화, 자동화가 가속화 되고 있으며 특히, 터널분야의 기계화 시공은 가장 두드러지는 특징 중 하나이다. 따라서 당사에서 시공 중인 인도 Delhi 지하철 공사에 적용된 대구경 Shield TBM 공법의 사례를 소개하여, 향후 대구경 터널 기계화 시공에 참고가 될 수 있기를 기대한다.

2. 공사개요

당사(삼성물산(주) 건설부문)가 J/V형식의 Turn-Key Project로 참여하고 있는 Delhi Metro Corridor Project 패키지 중 하나인 MC1B는 총 연장 6.6km에 6개의 정거장(1.8km) 과 개착구간(Cut & Cover, 0.9km), 단선 병렬

터널구간(3.9km)으로 구성되어 있으나 본 고에서는 터널구간에 대해서만 기술하고자 한다.

터널은 Shield TBM을 이용한 전면굴착방식으로 계획되었으며, 터널구간은 다시 4개 구간으로 나누어 지는데, 토사(Alluvium)층을 통과하는 구간이 3개 구간이며, 나머지 1개 구간(Delhi Main Station ~ New Delhi Station(1.5km))은 암반층을 통과한다.

토사구간의 경우 Delhi시의 주요 2개 기차역사 및 철로 밀을 관통하는 것으로 되어있으며 암반구간의 경우 터널상부가 Old Delhi 시의 중심지역으로 상당히 노후된 건물 Burland(1974)에 의거한 빌딩 등급 "severe"와 "very severe"들이 대다수 밀집된 상가 및 주택지역을 통과하여 터널 굴진시 각별한 안전관리 및 침하관리가 요구되고 있다.

3. 지반조건

본 Project의 지층 조건은 크게 매립층, Alluvium 토사층, 규암(Quartzite)과 편암(Schist)의 암반층으로 구분 지을 수 있다. 매립층의 경우 지표하 2~5미터까지 분포

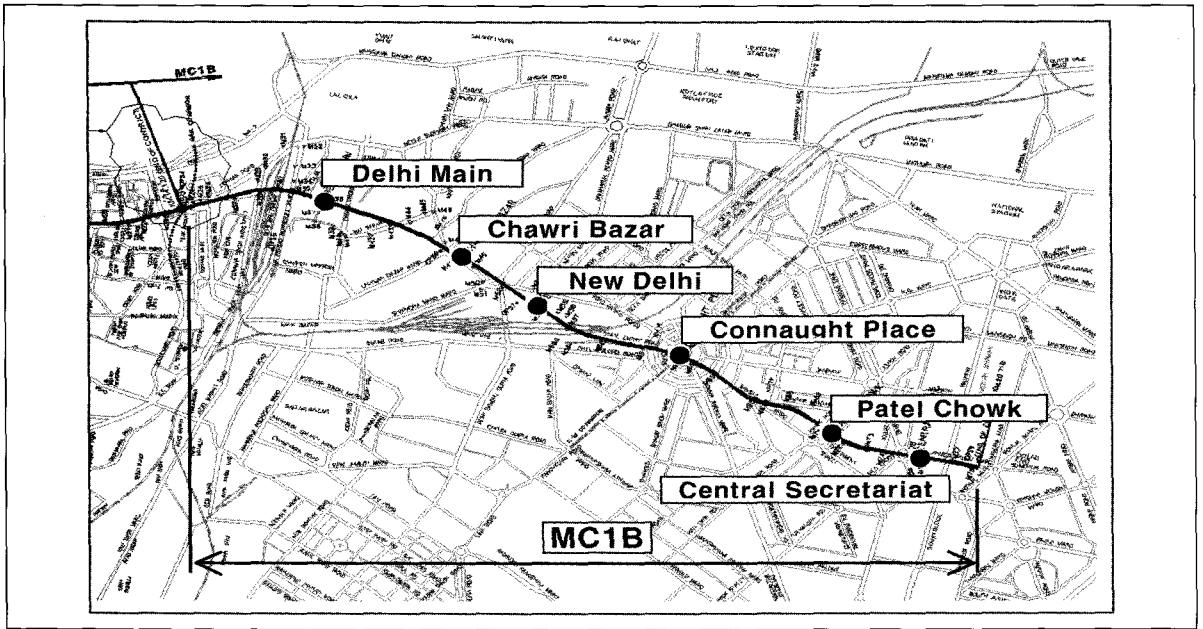


그림 1. Corridor Plan-view

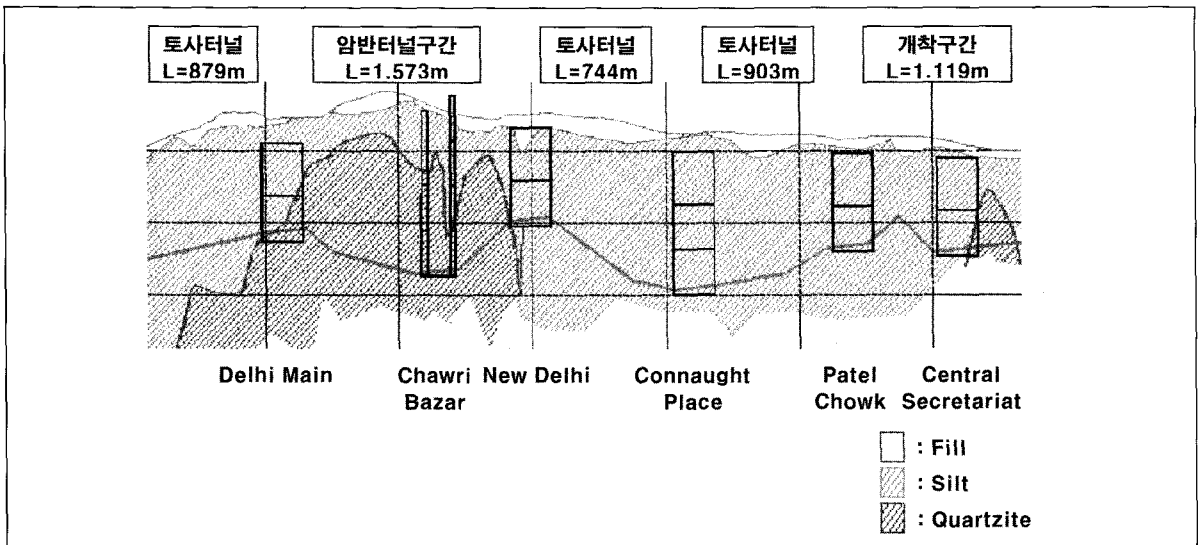


그림 2. 지하철 역사 및 터널 구간의 지질조건

하고 있으며 Delhi Silt로 명명되는 Alluvium의 경우 세립의 모래를 포함하고 있는 점토와 실트질로 구성되어 있

고 "KanKar"라 불리는 석회질(calcareous)의 조립질 결정(nodule)이 아울러 포함되어 있으며 Alluvium층의

표 1. 터널 기계화 시공법의 분류 [ITA^{주1} 2000. 5(안)]

지보형태 (굴착직후)	그룹	명칭	굴착방법	비고
무지보	롬 타입터널 굴착기	로더헤더	Inline Cutter Transverse Cutter	
		Digger Type	백호우, 버켓, 리버 또는 Pick, 수압충격 Breaker	
	Open TBM	-	전단면	국내에서는 TBM ^{주2} 으로 명명됨
	터널단면 확대식	-	전단면 + 발파	
주면지보 방식	전면 개방형 실드 TBM	Gripper 실드 TBM	전단면	
		세그먼트 실드 TBM	전·부분단면	
		더블 실드 TBM	전단면	
막장 및 주면 지보 방식	전면 밀폐형 실드 TBM	기계식지지 실드 TBM	전·부분단면	
		압축공기 실드 TBM	전·부분단면	
		Slurry식 실드 TBM(이수식)	전단면	
		EPB식 실드 TBM(토압식)	전단면	
		복합형 실드 TBM	전단면	1) Open + EPB 2) Open + Slurry 3) EPB + Slurry

주1) ITA(International Tunnelling Association) : 국제터널협회

주2) 국내에서는 암반에 사용되는 막장 개방형 Machine에 대해서만 TBM으로 불려져 왔으나, ITA의 분류(안)은 장비를 이용한 터널굴착은 모두 TBM이며, 막장지지와 세그먼트 등에 의한 주면 지보형식에 따라 상기와 같이 분류함.

N치는 대략 지표면 이하 10~20m에서 약 20~30정도로 분포한다.

그림 2에서 보는 바와 같이 암반선은 Delhi Main Station과 New Delhi Station 사이, Central Secretariat Station에서 높으며 기반암은 주로 규암(Quartzite)이며 Quartzite Schist Band, Mica Schist 그리고 Orthoquartzite등이 부차적으로 포함되어 있다.

규암(Quartzite)의 경우 그 강도는 100MPa(1000kg/cm²)이 넘는 경우로부터 풍화도가 심하여 강도가 상당히 낮은 경우까지 광범위하게 변화한다.

지하수위는 지표하 1.5m에서 10m까지 변하고 있으며 그 투수성은 사전 조사 결과, Alluvium의 경우 5×10⁻⁵m/

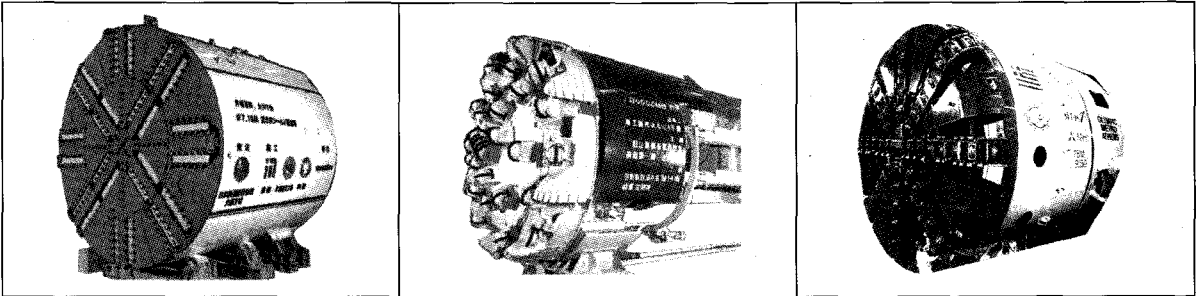
sec에서 5×10⁻⁶m/sec, 암반의 경우 5×10⁻⁵m/sec에서 1×10⁻⁶m/sec로 그 범위의 폭이 상당히 큰 것으로 나타났다.

4. 터널 굴착공법

4.1 터널 기계화 시공법의 분류

최근 시공되는 각종 터널의 굴착공법을 보면 발파에 의한 NATM공법과 TBM장비 등을 이용한 기계화 시공으로 크게 나눌 수 있다.

이 중 기계화 시공법의 분류는 최근까지도 뚜렷한 정립

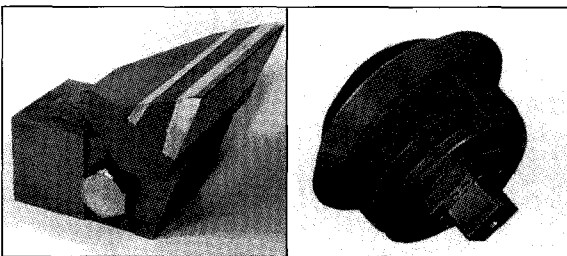


토사용

암반용

복합지반용

그림 4. 「Cutter Head」의 형상



Teeth Cutter

Disk Roller Cutter

그림 5. 「Cutter Bit」의 형상

TBM 장비를 선택하였다.

토사용과 암반용의 가장 뚜렷한 구분은 Cutter Head (면판)의 형상으로 토사지반을 대상으로 하는 경우 Cutter Head의 형상은 평평한 원형 면판에 커터-비트는 Teeth cutter가 부착되어 있으며, 암반지반용 Cutter Head의 형상은 반원형의 본체(주로 Reamer)에 Disk Roller Cutter가 돌출된 형태이나, 대상지층이 주로 암반이라하더라도 터널 노선상에 일부 토사층이 분포한다든지, 암반의 풍화가 심하던지 또는 지하수가 존재하는 경우는 대개 복합지반용 Cutter Head로 설계된다.

당 현장의 원활한 시공을 위해 토사구간의 경우, 암반을 만났을 경우를 대비하여 6개의 Disk Roller Cutter가 면판(Cutter Head)에 추가된 EPB(Earth Pressure Balance) Type이 채택되었고, 암반 구간의 경우 그 풍화도를 고려하여 8열의 Teeth Cutter가 포함된 복합지반형 Shield TBM이 채택되었으며, 선정된 토사구간 Shield

TBM과 암반구간 Shield TBM 장비에 대한 개요는 아래와 같다.

5.1 토사구간 Shield TBM 장비

당 현장에 도입된 2기의 토사용 Shield TBM은 독일의 Herrenknecht사가 제작사로 1993년 대만지하철 공사에 투입, 평균 2.5bar의 Earth Pressure로 약 6km의 터널 공사를 수행하였고, 1997년 추진력 등을 up-grade 한 후 태국 현장에 투입 1.8bar의 Earth Pressure로 약 8km의 터널공사를 성공적으로 완수하여 그 성능이 입증된 바 있다.

이후 당 현장 적용에 앞서 제작사에 의해 전면적으로 개조되었고 Tail skin을 통한 그라우팅, Diaphragm Wall 굴착 및 터널 하단에 암반을 만났을 경우를 대비한 Cutter Head의 개조가 추가되었다.

아울러 본 터널 장비는 Foam 주입이 가능하고 PLC system, VMT system, Compressed Air Lock 등의 장비가 탑재되었으며 실드 외경은 6,460mm이다.

이미 Connaught Place Station ~ Patel Chowk Station(0.9km) 구간의 단선 병렬 구간을 최대 굴진량 21rings/day, 평균 굴진량 12rings/day(분굴진시)로 성공적으로 완수하였고, 현재 New Delhi Station ~ Connaught Place Station 구간 중 New Delhi 기차역사

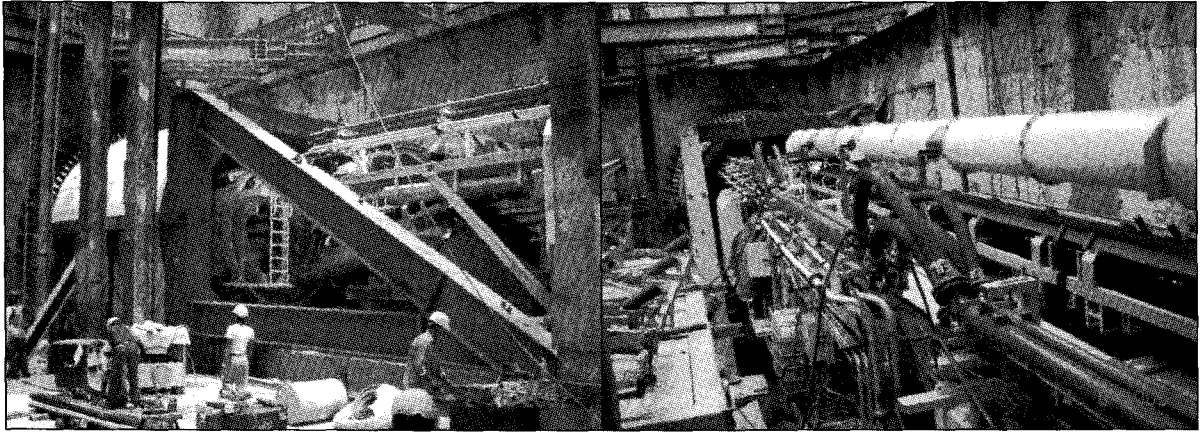


그림 6. 토사구간 Shield TBM의 초기 굴진

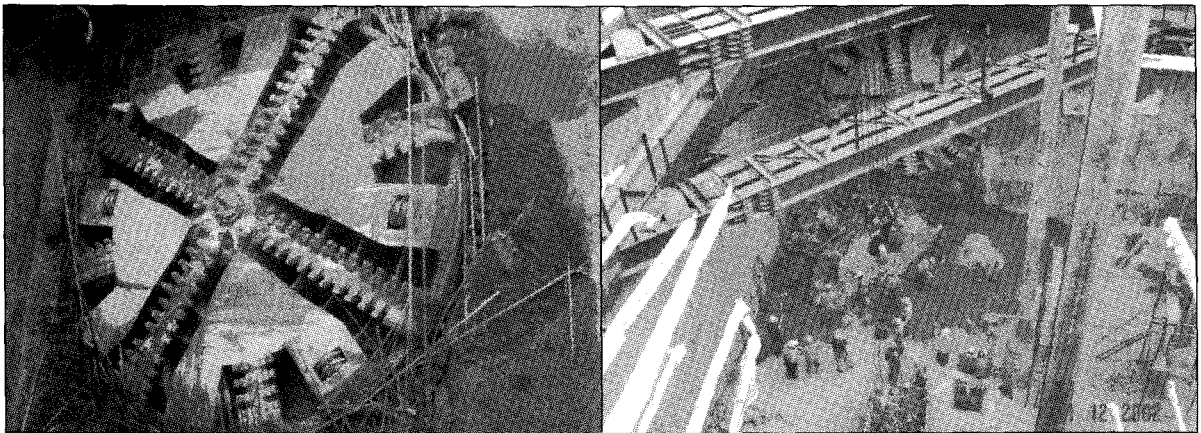


그림 7. Diaphragm Wall을 관통한 토사구간 Shield TBM의 Cutter Head

및 철도 관통에 앞서 초기 굴진이 진행 중이다. 아래 그림 7은 Connaught Place Station 도착시 Diaphragm Wall을 관통하는 모습을 보이고 있다.

5.2 암반구간 Shield TBM 장비

암반구간 Shield TBM장비는 3km 이상의 암반 터널 굴진을 위하여 독일의 Herrenknecht사에서 구입되었고 밀폐형 (Closed Mode)굴진이 가능하도록 225kN·m 토

크의 Screw Conveyor가 부착되었다. 한편, 풍화도에 따른 터널 전단면의 지지를 위해 Disc Cutters, Reamers, Knives로 구성된 Cutter Head가 설계 되었으며 선진 보링 조사를 위한 Probe Drilling 및 Compressed Air Lock 장비를 아울러 탑재하였다. 최대 추진압은 35725kN, 최대 추진 속도는 35mm/min, 버럭 처리 능력은 300m³/hr이고 쉴드 외경은 6,490mm이다. 아래 그림 8은 조립이 완성된 암반구간 Shield TBM Cutter Head 전면의 모습이다.

6. Segment Lining Type 선정

Shield TBM공법은 Open TBM 공법과 달리 굴착하면서 동시에 세그먼트를 조립하여 터널의 주면을 지보한다. 다양한 형태의 세그먼트가 존재하지만 구조적 안정성과 Shield TBM 장비의 특성에 적합한 원형 단면의 세그먼트를 일반적으로 사용한다.

당 현장의 터널 라이닝에 사용된 Precast Segment Lining 과 관련된 사항을 정리하면 아래와 같다.

- 외경 및 내경 : 6.26m, 5.7m
- 두께 및 길이 : 280mm, 1.2m
- 세그먼트의 구성 : 3(72°) + 2(64°) + Key (16°)
- 재 질 : Concrete (Grade 40)
- 형 식 : 양테이퍼형

- 키세그먼트 조립 : 축방향 투입형
- 연결방식 :경사Bolt System
- 방수: 이중방수 System(EPDM Gasket + Hydraulic Sealing Strip)

7. 터널 굴진시 계측관리

터널의 안정적인 굴진을 도모하기 위해 초기 굴진시 계측을 수행하였고 그 결과를 토대로 본 굴진시의 관리 기준치를 설정하였다. 초기 굴진시 계측 계획은 아래 그림 10 (계측 단면도)에 보이는 바와 같다. 설계 타당성 평가 및 효율적인 터널굴진 관리를 위해 적용한 계측 항목을 정리하면 다음과 같다.

표 2. 세그먼트 Type 선정항목

설계항목	종 류	비 고
재 질	철근콘크리트, 강재, 덕타일 주철, 강판+콘크리트 합성재	
형 식	편테이퍼형, 양테이퍼형	
키세그먼트	축방향 투입형, 반경방향 투입형	
링 형 식	평판형, 상자형, 사다리꼴	
이음형식	곡선볼트방식, 경사볼트방식, 볼트박스방식, 연결핀 + 조립봉방식	

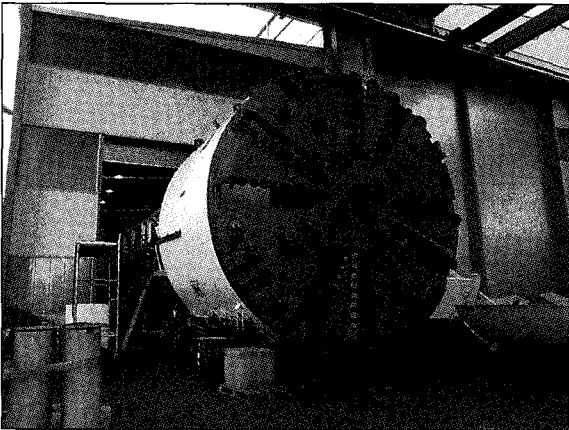


그림 8. 조립이 완성된 암반구간 Shield TBM의 Cutter Head 모습

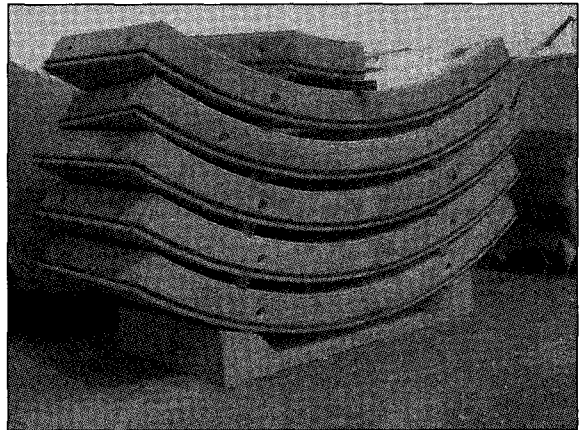


그림 9. 기 제작되어 야적된 Segment Lining 모습

- 지표침하계 : 터널 축을 따른 지표 침하점 설치(25m 간격) 및 Trough 측정을 위한 횡단 계측선 설치 (100m 간격)
- 건물침하계 : 5mm 예상 침하 영역 내의 모든 구조 물에 대한 침하점 설치

- 지중침하계 : 초기 굴진시 지표하부 지반의 거동을 파악하기 위한 지중 침하점 설치
- 지중경사계 : 병렬 터널 굴진시 지표 하부 지반의 횡적 거동을 파악하기 위한 경사계 설치
- 지하수위계/간극수압계 : 초기 굴진시 지하수 거동 파악위해 터널 주변에 설치

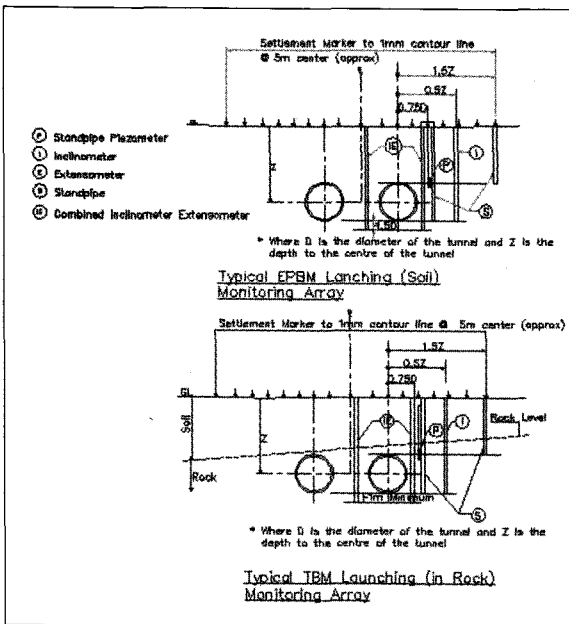


그림 10. 초기굴진시 계측 대표 단면

그림 11은 Patel Chowk Station~Connaught Place Station구간의 터널 종방향 굴진을 따라 25미터 간격으로 설치된 지표 침하점을 통해 실측된 data를 정리한 것으로 종축에 침하량을, 횡축에 설치된 segment 수를 나타내었고 막대그래프는 East, West 터널의 진행 경과를 나타내었다(East 터널이 선행, West 터널이 후행). 그림 12는 초기 굴진시 터널 진행 방향에 직각 방향으로 설치한 지표 침하점으로부터 실측된 지표 침하량으로서 East, West 터널의 굴진에 따른 침하 Trough 양상을 나타내고 있다. 사전 예측된 예상 지표 침하량은 10~15mm로서 침하 관리가 만족스럽게 수행되었음을 알 수 있으며 본 굴진에 사용된 주 관리 기준치는 아래와 같다.

- Earth Pressure: 1.5~2.5Bar
- Backfill Pressure: 3 Bar
- Backfill 주입률: 130%(이론상 소요체적 대비)

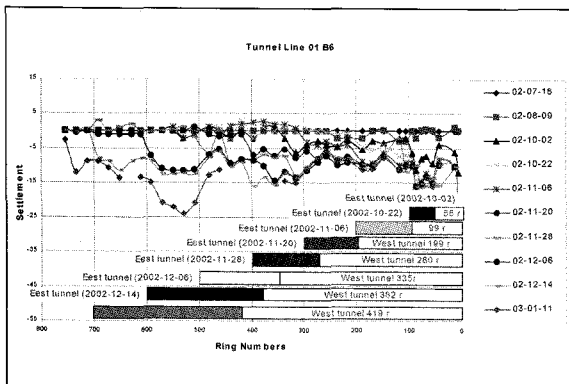


그림 11. 터널 진행 방향에 따른 지표 침하 계측 결과

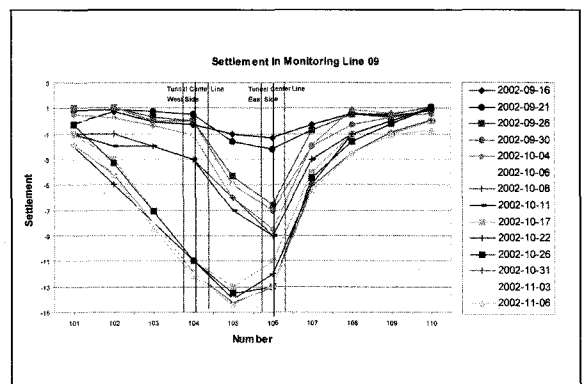


그림 12. 초기 굴진시 터널 진행 직각 방향으로 계측한 지표 침하 결과

8. Old Delhi Railway Station & New delhi Railway Station 및 철도 횡단을 위한 터널링 방안

상기의 공사 개요에서 언급한 바와 같이 본 Project 에는 Delhi 시의 2개의 주요 기차 역사 및 철도를 터널로 관통하게 되어 있으며 발주처의 침하 관리 기준치(최대 15mm)를 준수하고 안전한 터널공사를 완수하기 위해 아래와 같은 관리 기준을 수립하였다.

- Earth Pressure 상향 조정(평균치 대비 0.5bar)
- 철저한 1차 그라우팅 관리(항시1차 그라우팅 완료후 굴진 재개)
- 매 60m마다 2차 그라우팅 실시 및 공극 완전 충전
- 철저한 장비 점검 및 계획, 자재 동원을 통한 중단 없는 터널링
- 경험 있는 기술자의 Full Time 관리 감독
- 별도의 Track유지 보수팀 마련.

한편, 터널 굴진시 별도로 마련된 계측수행계획은 아래와 같다

- 매일 2회 계측 수행 및 터널 공사팀과의 신속한 연락 체계 마련을 통한
- 실시간 관리

- 침하 영향 반경(Active Zone) 내의 Main Track 에 대한 정밀 leveling (5m 간격의 측점)
- 침하 영향 반경 내의 주요 구조물 및 Platform에 대한 연직 leveling 및 경사 계측

9. 성과 및 향후 계획

당사는 Open TBM 뿐만 아니라 Shield TBM(싱가폴 MRT 지하철 등)을 성공적으로 수행한 경험과 기술력을 바탕으로, 인도에서 최초로 시공되는 지하철공사를 성공적으로 수행하고 있다.

본 Project를 통해 얻은 성과로는

- 1) 토사지반, 암반지반 등 다양한 지반조건에서의 Shield TBM 터널 시공기술력 확보
- 2) 국제 J/V공사를 통한 선진 기술력 확보 및 심화
- 3) 대구경 터널 기계화 시공분야의 설계/시공 기술능력 향상 등

의 많은 성과를 거둘 수 있었으며, 이러한 성과를 바탕으로 향후 수행되는 터널 기계화 시공분야에서 보다 안전하고 체계적인 설계와 시공을 수행할 것이다.