

서울지하철 9호선 909공구 현장

- 도심지 대구경 쉴드 TBM 터널의 주요 시공사례 -



강문구
두산건설(주)
토목설계팀 차장



최기훈
두산건설(주)
토목설계팀 과장

1. 서론

서울지하철 9호선은 서울 수도권 광역철도망 계획, 인천국제공항 전용철도계획 등을 반영하여 서울시 교통난 해소와 지역간 균형발전을 도모하기 위하여 서울 강남의 동서축을 연결하는 909공구는 여의도 지하차도 및 국회 의사당 주변을 통과하는 구간이다.

공사에 적용된 쉴드장비는 지반침하를 최소화 할 수 있는 대구경 이수가압식(Slurry Pressured Balanced)으로 일본 Kawasaki사에서 제작하였으며, 외경은 7.65 m이다.

쉴드 TBM은 현장에서 조립된 후 2004년 12월 6일에 초기굴진을 시작하였으며, 세그먼트는 판상의 직사각형 모양인 평판형 철근콘크리트 세그먼트로 Key Stone을 포함한 7조각이 조립되어 중량 24톤의 1링으로 구성된다.

부산지하철공사 및 광주지하철공사에 이어 서울지하철 공사에 도입된 대구경 쉴드터널 공법은 토사 및 암반의 복합지반에서 지반이완과 인접구조물(지하차도, 국회의사당, 한국화학시험연구원, 올림픽도로 교량 말뚝기초)에

미치는 영향을 최소화하여 굴착 가능하기 때문에 국내에서 지장물이 근접한 터널공사와 개착식공법 및 NATM으로 시공하기 어려운 공사에 적용되고 있다. 본 현장은 이러한 사유로 쉴드터널 공법으로 선정되었다. 최근에 준공되어 시험운행중인 서울지하철 909공구의 설계 및 시공 과정을 상술하여 향후 대구경 쉴드터널 공사시 도움이 되고자 시공과정 등을 소개하고자 한다.

2. 현장개요

서울지하철 909공구는 총 2,330 m로 그림 1과 같이 서울지하철 5호선과 환승할 수 있는 915정거장을 포함하여 2개의 정거장 및 8개의 환기구와 쉴드터널을 포함하고 있으며, 공사위치는 서울시 영등포구 당산동에서 여의도동까지이다.

쉴드TBM 적용구간은 터널의 설계심도와 인접 구조물의 이격거리가 가까워 근접시공으로 분류되는 다수의 난공사구간이 존재한다.

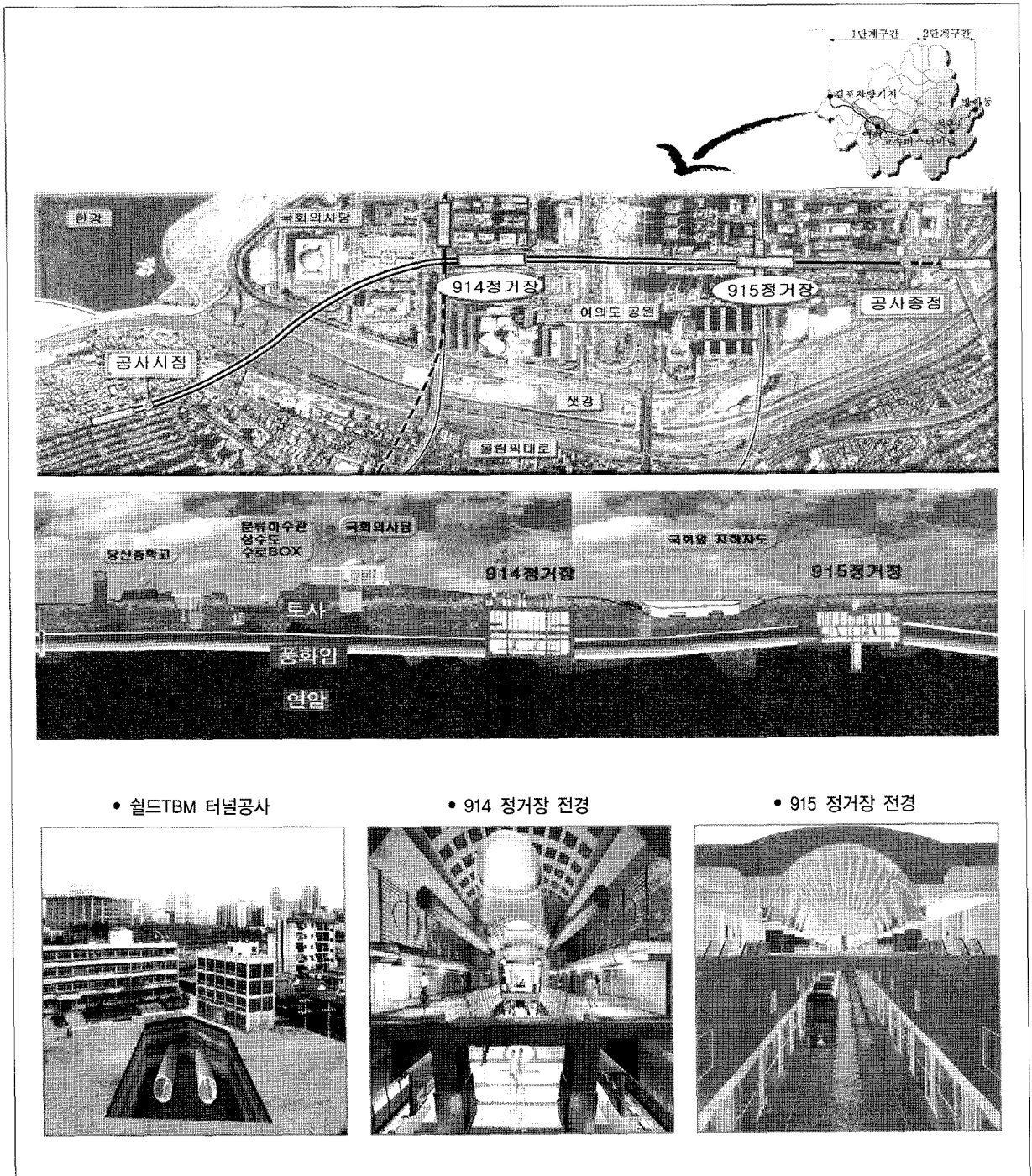


그림 1. 서울지하철 909공구 현장개요

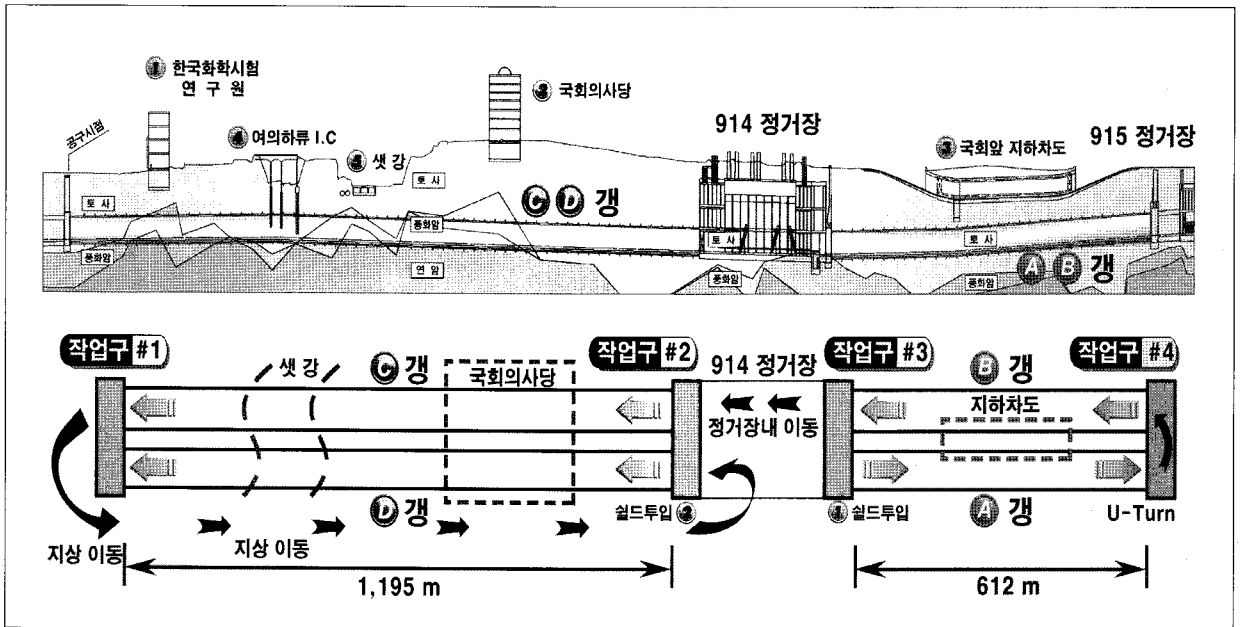


그림 2. 서울지하철 909공구의 지반 및 실드터널 시공현황

그림 2에 도시한 바와 같이 각각 4개의 실드터널(A~D 갱) 및 작업구(#1~#4)와 2개의 정거장으로 이루어져 있다. A와 B터널 지반조건은 실트질 모래, 모래질 자갈 등이 혼재된 조립질의 퇴적층이며, C와 D터널은 토사, 풍화암 및 연·경암이 혼재되어 있는 실정이다. 본 실드 TBM 적용구간의 최소토피는 셋강 횡단 구간 약 180 m에서 8.06 m(1.08D)를 형성하고 최대토피는 국회의사당 구간에서 21.8 m(2.93D)를 형성하며, 대부분 터널 외경의 2배 이상의 토피를 확보하였다. 지하수위는 GL-19.5 m 정도이며, 실드터널 상부에서의 최대 지하수위는 8.0 m이다. 터널 구간의 선형은 다음과 같다.

평면선형	① 시점 ~ 셋강 구간	: R = 1,200 m
	② 셋강 ~ 914정거장 구간	: R = 800 m
	③ 국회 앞 지하차도 구간	: R = 2,000 m
종단선형	• 시점 ~ 914정거장 시점부 구간	: +2% ~ -4%
	• 국회앞 지하차도 구간	: +3% ~ +11%

3. 실드TBM 터널시공

3.1 장비선정

서울지하철 909공구에 적용된 실드TBM의 종류는 그림 3과 같이 일본의 Kawasaki 중공업의 이수가압식 실드TBM으로서 외경 7.65 m, 세그먼트 내경 6.75 m의 터널을 형성하고 암반 및 토사를 굴착할 수 있도록 17인치 Disk Cutter 53개와 Cutter bits를 Dome type의 면판에 장착하였다. 또한, 천단(상부) 토사 붕괴 감지봉(Jack)를 장착하여 상부 토사의 상태를 파악할수 있도록 하였다.

3.2 면판설계

서울지하철909공구에 사용된 면판은 그림 4와 같이 Kawasaki사의 Dome타입 면판으로 17인치 Disk cutter

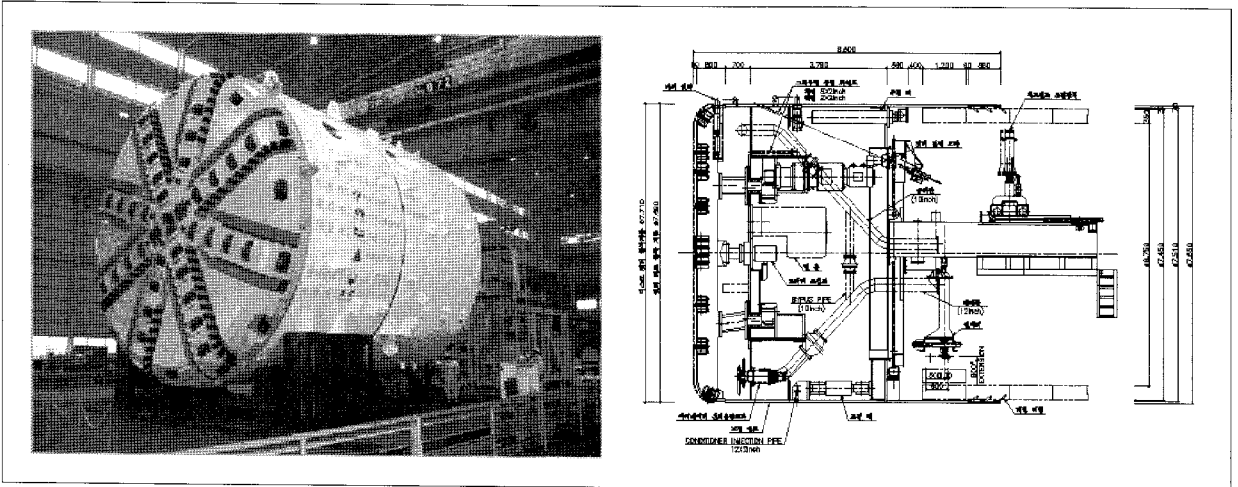


그림 3. 서울지하철 909공구의 실드TBM 전경

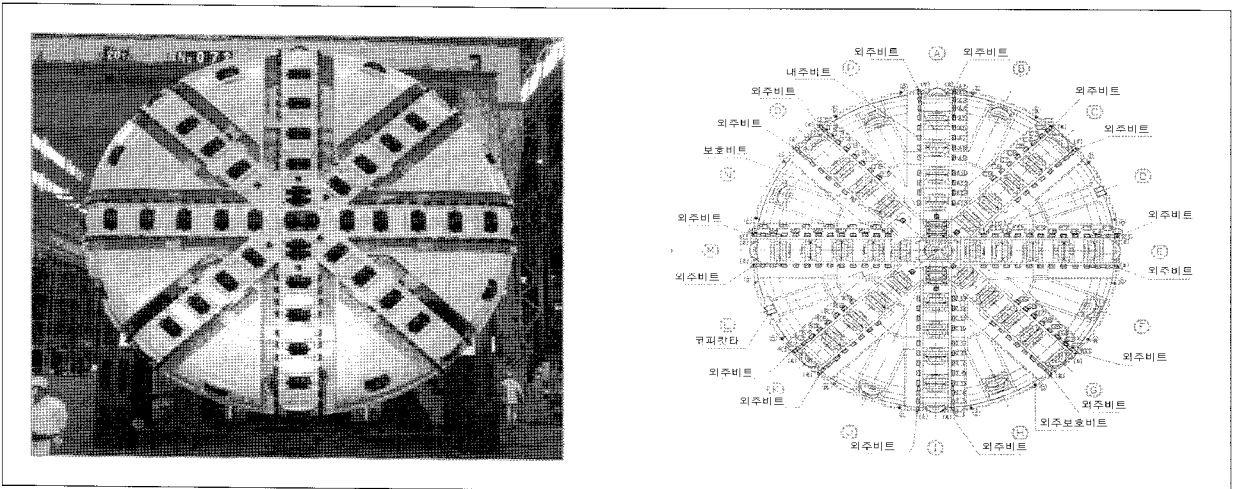


그림 4. 서울지하철 909공구의 실드TBM 면판모습

53개를 장착하였고 개구율은 17~21%로 지반조건에 따라 개구율 및 Disk Cutter 수량을 조절하였다.

3.3 세그먼트의 제작 및 시공

서울지하철909공구에서는 직사각형 모양의 평판형 철

근콘크리트 세그먼트를 사용하였고 Key Segment를 포함한 7조각이 조립되어 중량 24톤의 1링을 구성한다. 세그먼트의 재원은 내경 6.75 m, 외경 7.45 m, 폭 1.2 m, 두께 0.35 m이며 450 kgf/cm²의 강도로 설계하였다. 세그먼트 체결방식은 Ø24 mm의 곡볼트로 설계하였고 그림 5와 같이 2열의 수평창지수재를 사용하였다.

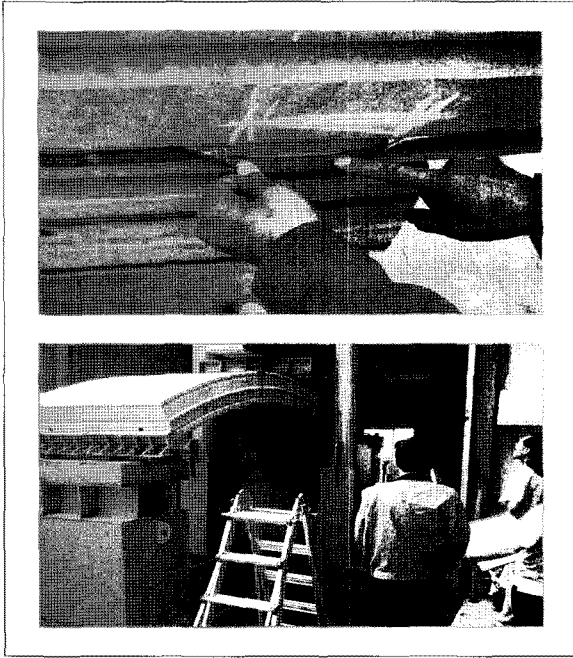


그림 5. 수평창 지수재 검사 및 세그먼트 휨 검사

조립되고 규격시험, 성능시험 등의 완성도 검사와 시험을 전을 거쳐 모든 장비에 이상이 없으면 운반하기 쉽도록 분해되어 현장으로 운반된다. 현장에 반입된 쉴드TBM 조각은 지상에서 컷터헤드, 메인베어링 및 구동부 일부가 조립되고 그림 6과 같이 세그먼트와 자재 투입을 위해 마련한 반입구로 투입되어 나머지 부분이 조립된다. 또한 이와는 별도로 여잉조, 조정조, 필터프레스 등의 슬러리 처리를 위한 지상설비시설이 반입구 주변에 설치되었다. 지상설비는 여의도 중심가에 위치하여 소음에 의한 민원의 대책으로서 지상설비시설 설치 후 방음 panel로 가건물을 만들어 설치하였다.

(2) 발진 및 도달

쉴드TBM의 단계별 발진과정은 작업구 #3에서 그림 6 및 7과 같이 ① 발진받침대 및 발진갱구 설치, ② 쉴드 TBM 조립, ③ 초기 굴진을 위한 반력대 설치 및 가조립 세그먼트 설치, ④ 후방대차 조립 및 발진부 지지철물 절삭, ⑤ 초기굴진(약 50링) 및 본 굴진 순으로 진행되었다.

도달과정은 ① 쉴드TBM이 작업구 #4에 도착하기 전 쉴드TBM의 추진력에 대응할 수 있도록 작업구 #3의 갱구에 H-pile로 지지벽 설치, ② 지상에서 3중관 그라우팅으로 지반 보강, ③ 1~2m 전에 도달시 굴진 정지 및 지지벽 철거, ④ 최종 관통 순으로 시공하였다.

3.4 쉴드터널의 시공

(1) 쉴드TBM장비의 조립

서울지하철 909공구의 쉴드TBM은 부분별로 여러 공장에서 생산되어 Kawasaki사의 주공장에서 완성품으로

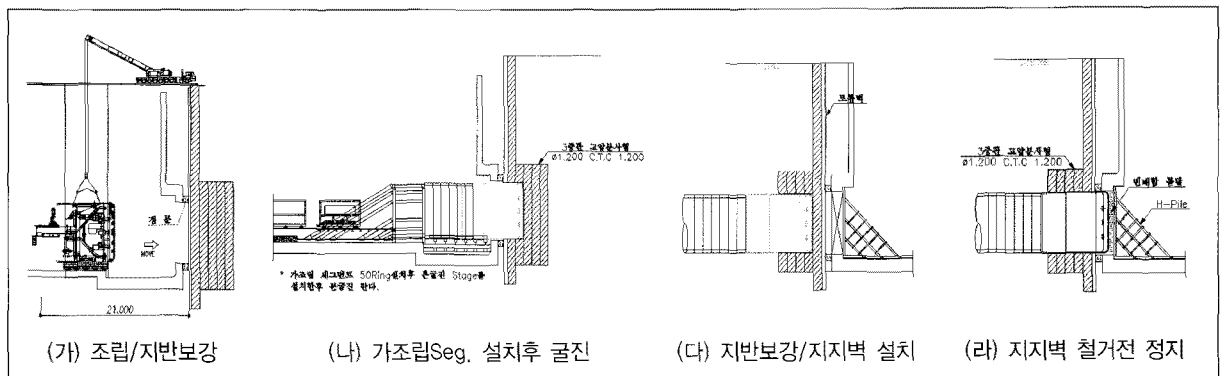


그림 6. 서울지하철909공구 쉴드 TBM 발진 및 도달부 단면

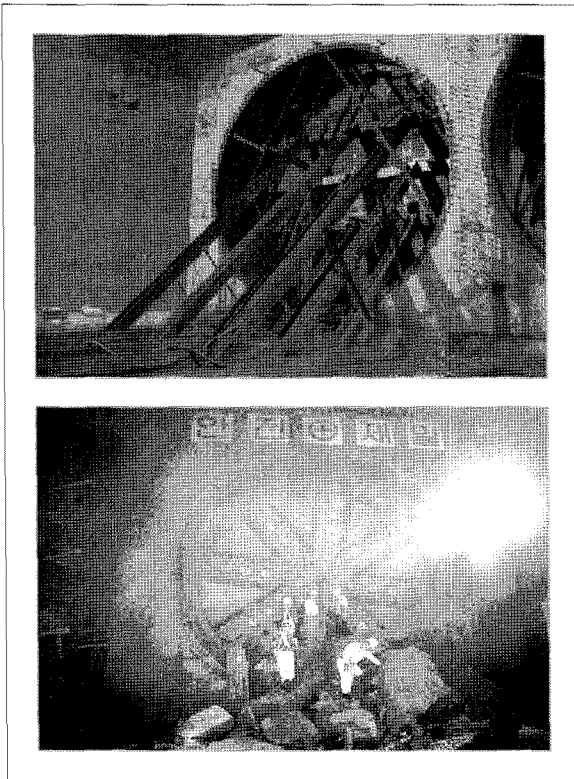


그림 7. A터널 관통전 지지벽 및 U-Turn후 B터널 관통사진(작업구 #3)

(3) 뒷채움 주입

뒷채움 주입이라 함은 쉴드TBM 굴착시 그림 8의 위의 사진과 같이 a) 면판 외주부에 부착되어 있는 cutter의 굴착작업에 의해 발생하는 여굴, b) 쉴드TBM의 Skin Plate(철판)두께, c) 쉴드TBM 내경과 세그먼트 사이의 Clearance의 공간이 발생되는데 이 공간을 지반침하를 억제하기 위하여 시멘트, 벤토나이트 등을 혼합한 주입재로 조속히 채워주는 것을 말한다. 서울지하철 909공구에서 쉴드 굴착후 세그먼트 주위로 17.5 cm의 공간(a+b+c)이 발생되는데 뒷채움재의 주입범위와 지반침하(변위)를 확인하기 위해 그림 8의 아래 사진과 같이 주입 후 세그먼트에 만들어놓은 뒷채움 주입구로 천공하였고 굴착면의 침하 없이 주입되었음을 확인하였다. 이는 지반 침하

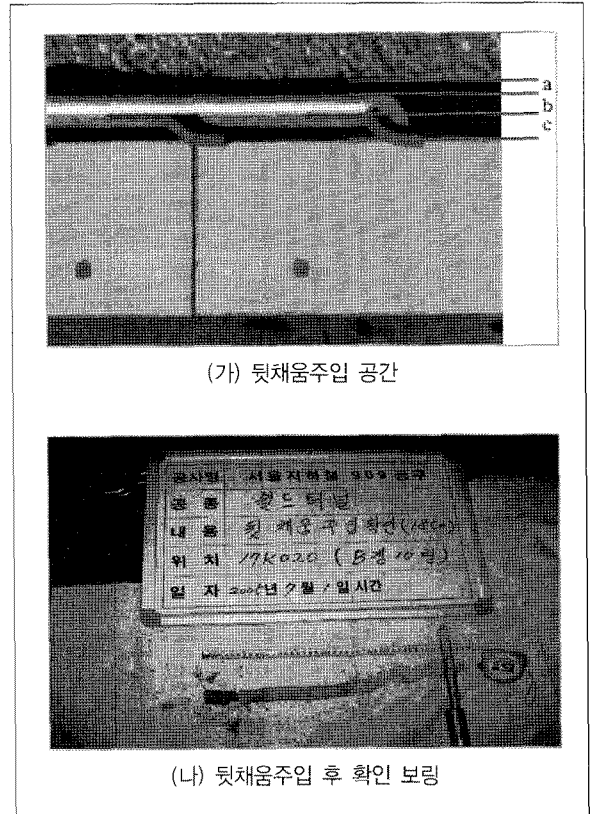


그림 8. 뒷채움주입 공간 및 주입 확인

를 최대한 억제하기 위하여 국내 최초로 가소성 뒷채움재를 동시주입방식으로 시공하였기 때문이라고 판단된다.

(4) 쉴드TBM의 근접 시공사례

- 여의하류 I.C 통과구간

쉴드TBM 적용구간은 그림 9와 같이 터널의 설계심도와 인접 구조물의 이격거리가 가까워 근접시공으로 분류되는 구간이 존재한다. 그 중 여의하류IC의 교각기초는 A교각과 B교각 모두 우물통 기초로 시공되었고, 터널노선과 기초간의 이격거리가 C갱의 경우 여의하류IC A교각의 좌측으로 약 0.64 m 가량 이격되며, D갱의 경우 A교각에 약 1.75 m, B교각에 약 1.87 m 가량 이격하여 A교각과 B교각

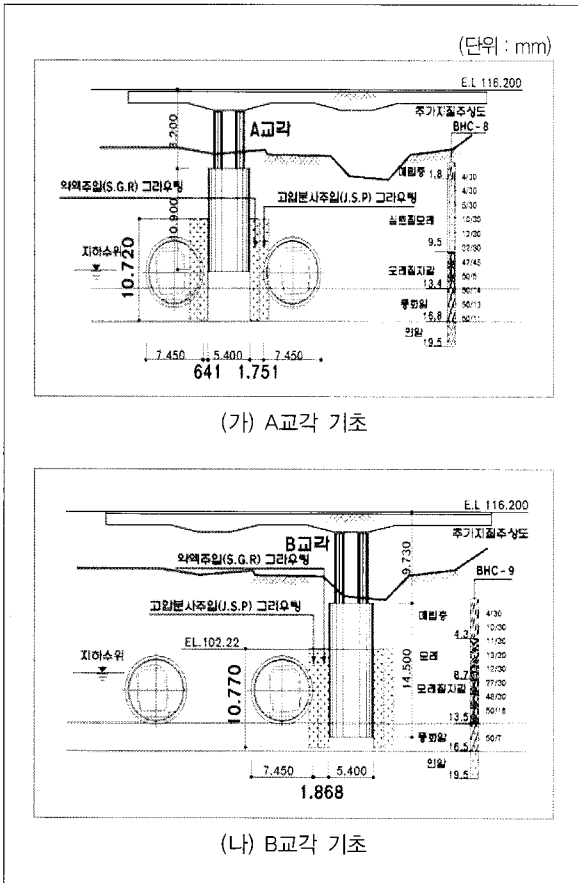


그림 9. 여의하류 IC 교각 통과구간의 현황 및 지반조건

사이를 통과하도록 계획되어 있어 쉴드TBM 굴착시 인접 구조물의 거동 특성이 매우 중요하였다.

지반조건은 A교각의 경우 상부 1.8m 두께의 매립층 하부에 N값이 4~32에 해당하는 실트질 모래층이 7.7m 두께로 존재하며, A교각의 기초 선단은 직경 30cm 미만의 자갈을 함유한 자갈층에 위치한다. (나)에 도시된 B교각의 경우 4.3m 두께의 실트질 모래와 점토성분을 함유한 매립층과 4.4m 두께의 모래층 및 직경 5cm 내외의 모래자갈층이 4.8m 두께로 존재하며 B교각의 기초 선단은 풍화암층에 위치한다.

현장여건 및 지반조건 등을 고려한 적정 보강방안으로는

차량 통행 제한 및 시공성 측면을 고려하여 외곽열의 경우 강성의 구조체를 구성하기 위한 목적으로 JSP공법(Jumbo Special Pattern)을 적용하였으며, 외곽열과 우물통기초 사이의 공간은 SGR공법(Space Grouting Rocket system)을 적용하여 중앙부 흙을 고결하여 일체화를 도모하였다.

본 여의하류 I.C 교각기초 통과구간의 경우 층별침하계 4개소, 지표침하계, 교각 및 교대부의 경사계(tilt-meter) 8개소, 균열계 및 쉴드터널 라이닝 segment의 응력계 등을 매설하여 통과구간의 지반, 구조물 및 라이닝 segment의 응력-변형 거동을 종합적으로 측정하여 안전한 시공을 도모하였다.

- 국회내 지하보도 구간

여의하류 IC교 외에 정밀시공을 위하여 주요 구간마다 계측기를 설치하였고 국회내 지하보도 구간에도 그림 10과 같이 계측을 실시하여 지반 침하 경향을 파악하였다. 추가적으로 지중 침하량은 굴진 초기에는 큰 변동을 보이거나 쉴드 통과 후 약 10일에서 20일 이내 점차적으로 지반의 변형이 수렴됨을 확인할 수 있었으며, 발생하는 변위의 크기는 매우 미소한 것으로 평가되어 쉴드굴진에 따른 영향이 인접하거나 상부에 존재하는 구조물의 안정에 거의 영향을 미치지 않았다.

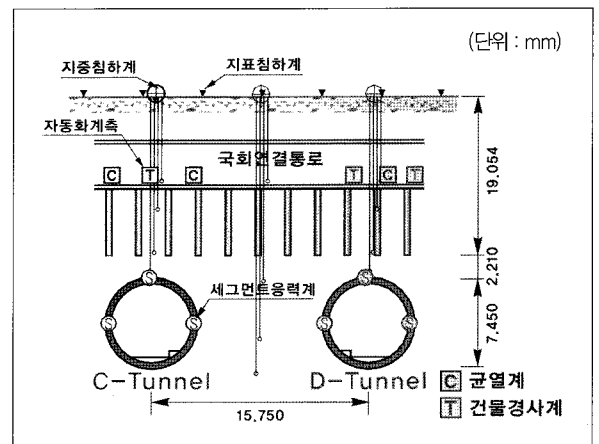


그림 10. 국회내 지하보도 구간의 계측 모식도

4. 맺음말

도심의 대표적인 지하구조물인 지하철공사는 비 개착 공사의 경우 대부분 NATM에 의해 시공되고 있으나 대구경 쉴드TBM장비가 1990년 중반 국내 최초로 부산지하철 230공구에 도입된 이래, 광주지하철1호선TK-1 구간에서 준공되어 지하철이 운행되고 있으며, 금번 서울지하철 909공구에서도 성공적으로 수행되어 준공하게 되었다.

쉴드공법은 시공시 발생하는 소음, 진동이나 교통장애

를 최소화 할 수 있는 공법으로 토사 지역에서 최소의 침하 및 지반보강으로 굴착 가능하고, 하저 터널 시공시 통수단면 감소 등이 거의 없는 장점으로 타공법으로 시공이 어려운 지하철 공사에 적용되고 있다.

본 시공사례는 공사 중이거나 향후 공사 예정인 현장에 조금이나마 도움이 되기를 바라며, 국내 세 번째로 대구경 쉴드터널 공법으로 준공한 서울지하철 909공구의 이수가 압식 쉴드TBM 굴착에 대한 개요, 장비선정, 장비의 조립, 발진 및 도달공정, 근접시공사례 등을 기술하였다.