

셸드 TBM 공법 적용시 병렬터널간 이격거리 검토



김재영
(주)삼보기술단
지반사업부 과장



김동환
(주)삼보기술단
지반사업부 이사



이두화
(주)삼보기술단
대표이사



이승복
삼성건설
국내토목영입팀 차장



김윤태
삼성건설
국내토목영입팀 부장



천윤철
삼성건설
토목사업본부 상무

1. 머리말

국내에서의 셸드 TBM 공법의 적용은 전력구, 통신구, 하수관로, 방류관로 등의 공사에 직경 5m 이내의 소구경 셸드 TBM 적용이 주종을 이루었으나, 최근에는 서울, 부산, 광주 등에서 지하철공사를 중심으로 직경 7m 이상의 대구경 셸드 TBM에 의한 시공 및 설계사례가 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 또한 다양한 용도로 개발되는 지하공간과 도시환경의 개선, 대형 건축물의 증가에 따른 기존 시설물의 안전성을 확보하면서 터널구축이 가능한 공법으로써 셸드 TBM 공법은 우수한 것으로 알려져 있다.

지하철공사는 공용성이 높아 도심지의 도로하부에 건설되는 경우가 많으므로 선형계획시 도로시설이나 지하지장물, 시공시 주변환경에 미치는 영향 등을 고려할 필요가 있다. 일반적으로 터널의 선형은 직선을 우선으로 하며, 곡선을 포함하는 경우는 가능한 큰 곡선반경을 취하는 것이 바람직하다. 또한, 터널을 2개 이상 병렬로 계획하는 경우는 터널의 단면크기와 굴착대상이 되는 지반의 공학적 특성을 고려하여, 터널 굴착에 따른 주변지반의 거동이 인접터널에 영향

을 미치지 않도록 충분히 이격시켜야 한다. 그러나, 지하철공사의 특성상 터널 구조물은 정거장이나 환기구 구조물과 연결되므로 병렬터널간 이격거리가 클 경우 필요 이상의 구조물계획이 수립되어 경제성 확보가 어렵게 된다. 따라서, 국내 지하철공사에 적용사례가 적은 셸드 TBM 공법 적용시 적절한 이격거리 산정에 대한 검토가 요구되고 있다.

본 고에서는 NATM공법에 의한 병렬터널간 이격거리에 대한 국내 적용현황과 셸드 TBM을 적용하는 경우의 터널간 이격거리 적용사례를 국내의 시공사례를 통해 검토하여 발파굴착과 기계굴착에 따른 터널간 이격거리 차이를 분석하였다. 또한, 이를 바탕으로 유사구간에 대한 시공시 참조가 될 수 있도록 서울지하철 7호선연장 704공구에서 적용된 터널간 이격거리 및 보강방안에 대한 설계사례를 소개하였다.

2 NATM 적용시 터널간 이격거리

국내에서 병렬터널의 이격거리란 그림 1과 같이 NATM



그림 1. 터널간 이격거리 설정

에 의한 터널굴착에 적용한 사례가 대부분을 차지하고 있는 실정이다. 이 때, 터널상호간의 영향에 대해서는 지반 조건이나 시공법에 따라 다르지만, 일반적으로 굴착폭(D)의 2배를 적용하며, 연약지반의 경우에는 5배 이상으로 설정하면 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 표 1에 국내 기존 도로터널의 적용 예를 참고로 나타내었으며, 표 2에는 철도설계편람의 터널간 이격거리에 따른

대책구분을 나타냈다. 표 2에 나타난 이격거리는 터널간 위치가 상하에 있는 경우에 대한 구분이지만 1.0~1.5D미만의 경우에 대해 대책시공범위로 구분하고 있으며, 굴착 공법에 따른 구분은 명시되지 않고 있다.

표 1과 같이 터널간 이격거리를 2~3D로 일률적으로 적용하는 경우는 토공구간의 증가로 인한 공사비 증가 및 유지관리비용의 증가를 초래하게 된다. 특히 도심지의 경우는 용지비용이 크기 때문에 갱구부근(환기구 또는 정거장 시종점)에서는 각종 보강공법을 적용하여 터널간 간격을 최대한 근접시키며, 굴착과 함께 점차적으로 넓혀가는 방법을 적용하는 것이 경제적이 될 수 있다.

3. 국내외 실드TBM 터널간 이격거리

NATM과 같은 발파굴착의 경우는 국내 적용사례가 많아 터널간 이격거리에 대한 기준이 정립되어 있으나, 실드 TBM 공법에 의한 터널공사의 경우는 갱구부근에서

표 1. 병렬터널의 중심 간격 적용 예

차선수	구분	터널명	터널폭(m)	굴착폭D(m)	중심간격	비 고
편도 2차로		죽령터널	10.03	11.93	2.5D (30m)	2차로 고속도로 터널의 일반적 기준은 2.5D
		상주터널	11.30	12.00	2.5D (30.2m)	
		내사터널	10.86	11.86	2.5D (30m)	
편도 3차로		매봉터널	12.55	14.66	2.0D (30m)	암질 매우 양호
		소하터널	13.81	15.88	2.8D (45m)	급사면, 토피 20m정도의 계곡통과
편도 4차로		수암터널	17.94	19.63	2.3D (44.4m)	암질 보통

표 2. 병행터널의 근접도 구분(철도설계편람)

양 터널의 위치관계	터널이격거리	근접도 구분
신설터널이 기존터널 수평면보다 위에 위치할 때	1.0D 미만	대책시공 범위
	1.0~2.5D	주의시공 범위
	2.5D 이상	일반시공 범위
신설터널이 기존터널 수평면보다 아래에 위치할 때	1.5D 미만	대책시공 범위
	1.5~2.5D	주의시공 범위
	2.5D 이상	일반시공 범위

터널간 근접에 따른 이격거리에 대한 검토결과가 거의 없는 실정이다. 따라서, 본 장에서는 실드 TBM에 의한 굴착시 터널간 근접에 따른 이격거리를 국내 사례와 일본 사례를 검토한 결과를 나타내고자 한다. 본 검토결과에 앞서, 일본의 터널표준시방서 “실드공법편·동해설”에서는 실드 TBM에 의한 터널공사시 병렬터널간 이격거리를 터널외경(D)에 대해 0.5D 이상 확보하도록 제시하고 있으며, 0.5D 이하의 경우에 대해서는 지반상태와 주변조건에 따른 별도의 검토를 실시하도록 하고 있음을 밝혀둔다.

3.1 국내 대구경 실드터널의 이격거리 분석

국내 주요 지하철공사에 적용된 실드터널 중 터널간 간격이 갱구부근에서 근접되어 점차적으로 확대된 사례를 표 3에 나타냈다. 표 3에는 검토대상의 터널개요와 터널간 이격거리 및 안정성 확보방안을 간략하게 나타내었다.

표 3에서 알 수 있듯이, 국내에서 실드터널간 이격거리 L과 터널외경 D의 비(L/D)는 약 0.4~0.9의 범위를 나타내고 있다. 부산지하철 230공구는 환기구에서의 터널간 이격거리이며, 광주지하철 1호선, 분당선 3공구, 신공항철도는 실드 TBM 발진 또는 도달부에서의 터널간 이격거리를 나타내었다. 국내의 경우, 터널간 이격거리가 일본에서 보강이 필요하지 않다고 제시하는 0.5D 이상을 확보하고 있음에도 불구하고 수직 또는 수평방향 지반보강을 실시하고 있는 것으로 나타났다. 보강공법으로는 주

로 저압방식의 LW그라우팅을 적용하고 있으며, 부산지하철 230공구의 경우 이격거리에 따라 보강공법을 다르게 적용하고 있었다. 이상의 경우에서 보듯이 국내에서 실드 TBM에 의한 터널 시공실적이 적어 보강에 대한 적절한 기준정립이 되어있지 않은 것으로 판단된다.

3.2 일본 대구경 실드터널의 이격거리 분석

국내의 실드 TBM 터널간 이격거리 사례검토와 함께 실드터널 시공경험이 풍부한 일본의 시공사례를 검토하였다. 표 4에는 검토대상의 최근 일본내 실드터널 개요와 터널간 이격거리 및 안정성 확보방안을 나타내었다.

니시हत초보리터널은 그림 2에서 보듯이 지상에서 약 22m 아래에 위치하며, 상부에는 6~9층 빌딩이 밀집한 상업지구의 하부를 통과하고 있다. 실드 TBM 발진부에서 도달부까지 병렬터널간 이격거리가 0.25~0.8m로 터널간 근접구간에 대한 보강은 후행하는 실드 TBM 장비의 이수압에 의한 선행 터널의 변형방지를 위해 십자지보공을 설치하여 세그먼트에 발생하는 응력을 허용응력이 하로 관리하였다. 근접구간은 지반 점착력을 증가시켜 안정시키기 위해 지상에서 이중관 Double packer에 의한 주입보강을 실시하였다.

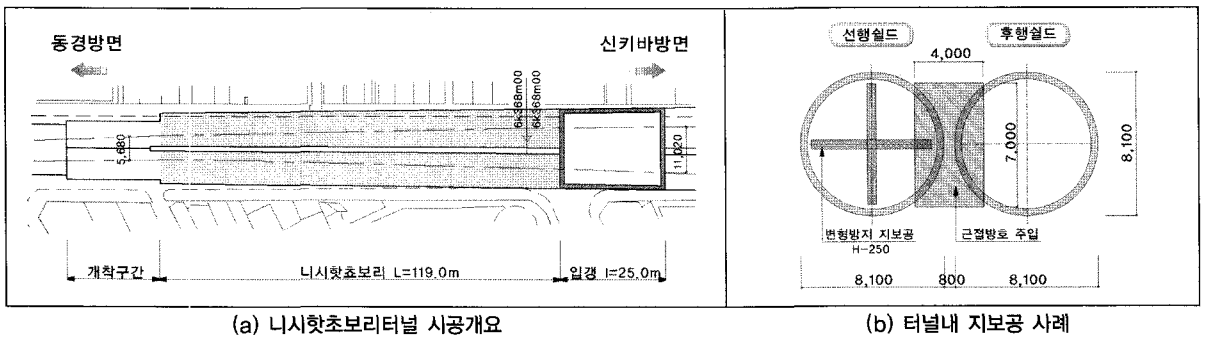
삿포로 고속철도 토오호선은 세립분이 적은 자갈층으로 수위변동(최대 2kgf/cm²)이 심한 1급 하천아래를 통과하며, 도달부에서의 터널간 이격거리가 1.4m이다. 근접

표 3. 국내 실드터널간 이격거리와 보강사례

공사명	부산지하철 230공구	광주지하철 1호선	분당선 3공구	신공항 철도
시공 개요	부산 수영강 하저	지하상가하부 및 사유지하부	한강 하저	지하철5호선 송정역 하부
터널외경(m)	7.1	7.2	7.8	7.58
실드형식	이수식	이토압식	이토압식	이토압식
지반조건	모래, 경암	토사~경암	경암	풍화암, 연·경암교차
이격거리(m)	3.1~3.4	4.4~6.8	2.93~3.96	3.99~5.66
이격거리/ 터널외경	0.4~0.5	0.6~0.9	0.4~0.5	0.5~0.7
보강 방안	Double Packer, RJP보강	토사층 지반보강	전방예측 및 보강, LW그라우팅	LW저압그라우팅

표 4. 일본의 쉴드터널간 이격거리에 따른 보강사례

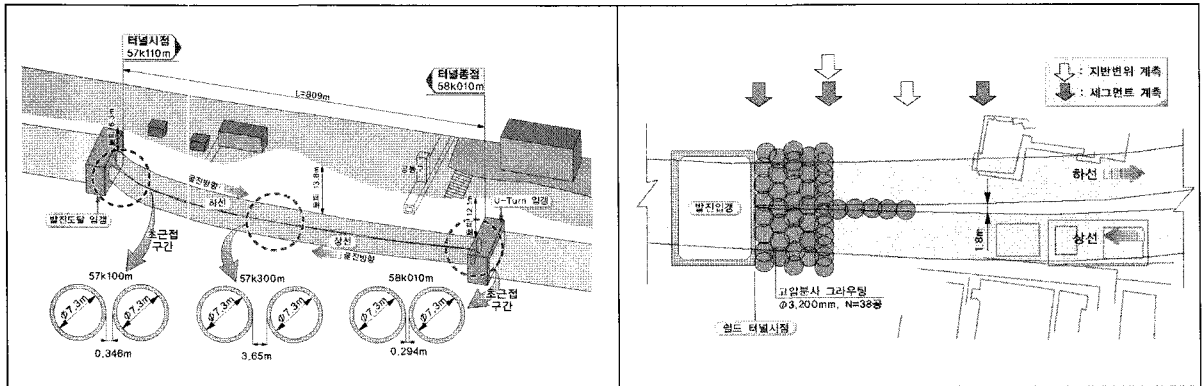
공사명	니시하초보리터널	삿포르 고속철도토오호선	영단지하철 오오키바 B선	쓰쿠바터널
터널외경(m)	8.1	6.6	6.8	7.3
쉴드형식	이수식	이토압식	이토압식	이토압식
지반조건	충적자갈	홍적자갈	충적점성토	홍적사질토
이격거리(m)	0.25~0.8	1.4	2.0	0.3
이격거리/터널외경	0.03~0.1	0.2	0.3	0.04
보강방안	터널내 지보공, 이중관분사 그라우팅	터널내 지보공	지반개량	고압분사그라우팅, 약액주입



(a) 니시하초보리터널 시공개요

(b) 터널내 지보공 사례

그림 2. 니시하초보리터널의 보강사례



(a) 쓰쿠바터널 시공개요

(b) 쓰쿠바터널 발진부 지반보강사례

그림 3. 쓰쿠바터널의 보강사례

구간에서는 터널내 변형을 억제하기 위한 지보공을 실시 하고, 굴진중 변형량 계측을 통해 굴진속도를 조절하였다.

영단지하철 오오키바 B선은 도심지 기존 지하철 노선 하부의 충적점성토 지반을 통과하며, 후행터널의 굴착을

고려하여 발진부를 개량하였다. 굴진 중에는 추진력과 막 장압력의 관리, 지표변위에 대한 측정만을 실시하여, 굴 진에 따른 지표침하량은 선행터널 통과시 1~2mm, 통과 후 2~3mm, 후행터널 통과시 2~4mm, 통과후 3~5mm

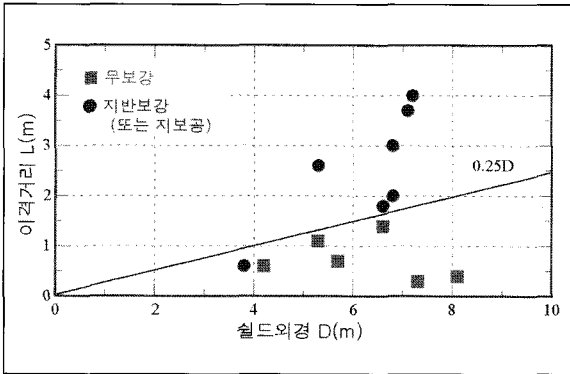


그림 4. 터널간 이격거리에 따른 보강사례

로 나타났다.

그림 3의 쪼쿠바터널은 비교적 입경이 균질한 모래층(N치 5~50 이상)에 위치하나, 지하수에 의한 막장 붕괴 위험성이 높고, 상부에는 국도408호가, 주변에는 대형건물들이 밀집되어 있는 구간을 통과한다. 발전부의 터널간 이격거리는 0.294m, 도달부는 0.346m로 매우 근접되어 있으므로 면밀한 검토가 요구되었다. 이에 발전부에서는 고압분사식 그라우팅을 실시하고, 도달부에서는 고압분사식 그라우팅과 약액주입을 병행하였으며, 굴진중 막장 압력과 침하계 등에 의한 신중한 관리를 수행하였다. 그 결과 터널간 이격이 작은 부분에서도 지반개량으로 인해 영향이 거의 없었으며, 지표침하량 해석결과가 3mm로 나타난 것에 대해 실제 침하량은 2mm로써 해석결과와 신뢰성도 확인되었다.

일본의 터널표준시방서 “실드공법편·동해설”을 참조하면, 터널외경에 대해 이격거리와의 비가 0.5D 이하의 경우에 대해 지반상태와 주변조건에 따른 검토를 실시하도록 하고 있다. 그러나, 표 4와 그림 4에 나타난 최근 일본의 병렬터널간 이격거리와 실드외경과의 관계를 보면, 0.25D 이상의 경우 특별한 보강을 하지 않고 계측 또는 굴진관리를 실시하고 있었으며, 이격거리가 0.25D 이하에 대해서는 지반보강 또는 터널내 지보, 계측관리 및 굴진관리를 실시하고 있는 것으로 나타났다.

4. 서울지하철 7호선연장 704공구의 사례

본 장에서는 최근 수행된 실드 TBM 설계사례로 서울 지하철 7호선연장 704공구에서의 터널간 이격거리 선정 배경과 최소 이격거리가 적용된 발전부에서의 보강공법을 설명하고 상술한 검토결과와 비교하였다.

4.1 공사개요

서울지하철 7호선연장 704공구의 실드터널구간에 대한 개요를 그림 5에 나타내었다. 본 구간에 적용된 실드 터널의 외경은 7.31m, 내경은 6.71m이며, 연장은 상선 693.7m, 하선 689.7m로써 비교적 고결도가 높은 풍화 토지를 통과한다. 시점부에서 중간지점까지는 8편 우

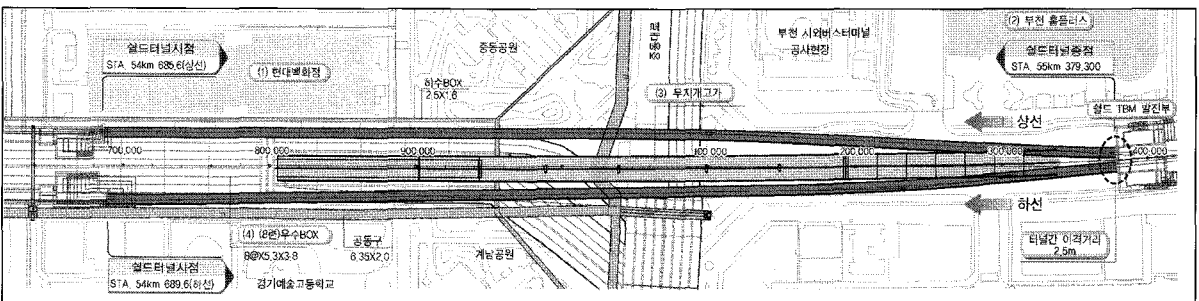


그림 5. 서울지하철 7호선연장 704공구 실드 TBM구간의 평면개요

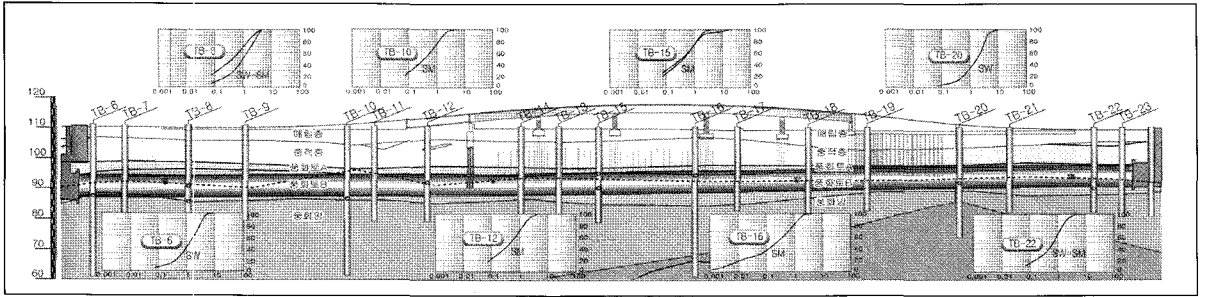


그림 6. 서울지하철 7호선연장 704공구 쉴드터널구간 지반개요

수BOX 하부를 통과하며, 중간지점부터 종점부 부근까지는 무지개 고가가 상부에 위치하고 있다. 또한 상부 도로 주변에는 대형 상가 등 밀집도가 높은 상업지구의 하부를 통과하고 있다. 쉴드 TBM의 발진기지는 시점부 상부에 대형백화점이 위치하고 있으며, 지중에는 8편 우수BOX가 터널 진행방향과 평행하게 위치하고 있어 작업장 설치가 곤란하여 종점부에 발진기지를 설치하였다. 아울러 쉴드 TBM의 발진부는 발진작업장 면적 최소화, 정거장내 불필요한 사공간 및 곡선부 최소화를 위한 선형계획으로 상·하선 터널간 이격거리가 2.5m로 근접하게 되었다. 따라서 발진부에서의 터널간 이격거리 적정성과 안정성에 대한 검토가 요구되어, 지반조건 및 상술한 국내외 사례를 통한 검토를 수행하였다.

4.2 지반조건

쉴드 TBM이 굴착하는 지반조건은 그림 6에서 보듯이 대부분 N값이 22/30~50/5의 풍화토층이며, 시점부 부근에서는 터널하부에 풍화암층이 나타나고 있다. 이 구간의 투수계수는 $6.3 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로써 대표적 입도구성은 중립모래 41.5%, 세립모래 25.0%, 세립분 16.4%, 자갈 2%로 조사되었다. 지하수위는 장기관측공에 의한 측정결과 GL-10~17m로써 터널 천단 또는 중간부에 위치하고 있기 때문에 굴착에 따른 지하수위의 영향이나 지하수가 굴착에 미치는 영향은 미미할 것으로 판

단되었다.

상기와 같은 굴착환경과 지층조건, 지하수위, 입도분포를 바탕으로 쉴드 TBM 형식은 이토압(EPB)쉴드를 선정하였으며, 기포재를 막장에 첨가하여 굴착토사의 소성 유동화를 촉진시켜 굴착효율을 증대시키고, 굴착비트의 마모를 경감시켰다.

4.3 이격거리에 대한 검토

쉴드 TBM 발진기지는 그림 5에 나타난 종점부에 설치하며, 발진부에서는 쉴드터널간 이격거리가 2.5m로 근접하고 있다. 본 공구의 경우 근접구간의 쉴드터널 외경과 이격거리의 비(2.5m/7.31m)가 0.35로써, 부산지하철과 분당선의 0.4, 광주지하철의 0.6, 신공항철도에서의 0.5보다 작은 값을 나타내고 있으며, 일본의 터널표준시방서 “쉴드공법편·동해설”을 참조하면, 터널외경에 대해 0.5D 이하이므로 별도의 검토가 필요한 것으로 나타났다. 그러나, 본 구간의 지층분포가 조밀한 풍화토층으로 구성되어 있어 일본의 사례들보다는 지반상태가 양호한 것으로 판단되며, 그림 4에 나타난 실제 시공사례를 참조하면 0.25D 이상을 확보하고 있으므로 별도의 보강이 필요 없는 것으로 검토되었다. 그러나, 국내 쉴드터널이 과거 소구경의 경우가 대부분으로 지하철과 같이 대구경의 시공경험이 적고, 또한 발진부 주변에는 대형 건물 등이 위치하고 있는 점을 고려하여 다음과 같은 보강방안

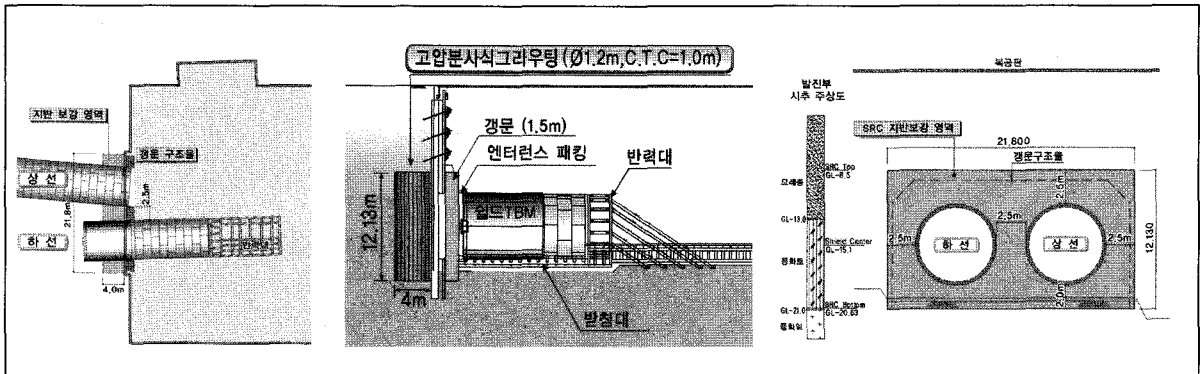


그림 7. 704공구 셸드TBM 발진부 개요

을 검토하여 적용하였다.

발진부의 터널간 근접구간에 대해 안정성을 확보하기 위해 지반조건을 고려한 개량을 검토하였다. 이격거리가 근접한 발진부의 지반개량공법으로는 최근 일본의 적용 사례와 대심도나 대단면에 경우 지반안정과 지수성에 신뢰성이 높은 고압분사식 그라우팅공법(SRC공법, Slime Reused Column Jet Grout)을 적용하였으며, 개량범위는 그림 7에 나타난 바와 같이 발진전방 4m를 좌우측 2.5m, 상부 3.0m, 하부 2.2m를 설정하였다. 또한, 발진부 가시설의 안정성 확보와 효율적인 선형관리를 위해 갭문을 설치하여 굴진 초기의 안정성을 증대시켰다.

시공시 이상징후 발생에 대비하기 위한 제측계획으로는 일정간격으로 지표침하계측을 실시하며, 터널내측에는 부착형 내공변위계를 설치하였다. 셸드 TBM 장비에는 천단에 지중침하 감지계를 설치하여 굴착중 지표변화를 직접 측정하며, 토압계에 의한 막장전방의 지반응력변화를 실시간 모니터링을 통해 확인하도록 하였다.

5. 맺음말

국내의 셸드 TBM 공법의 적용은 과거 직경 5m 이내의 소구경에 의한 것이 많았지만, 최근에는 지하철공사를

중심으로 직경 7m 이상의 대구경 셸드 TBM에 의한 시공사례가 증가하고 있다. 지하철공사는 도심지에서의 작업이 대부분이며, 병렬 셸드터널과 인접하여 정거장 또는 환기구가 위치하므로 선형계획상 터널간 이격거리를 축소시켜 작업점유면적을 최소화하여 경제성을 향상시킬 필요가 있다. 따라서 터널간 이격거리를 충분히 확보하지 못하는 경우가 발생하나, 국내 시공사례가 많은 NATM 공법에 비해 셸드 TBM 공법에 대한 검토가 미미한 실정이다. 본 고에서는 셸드 TBM 공법으로 터널을 굴착하는 경우 터널간 이격거리에 대해 국내외의 시공사례를 검토하고, 최근 서울지하철 7호선연장 704공구의 적용사례를 소개하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 터널간 이격거리를 NATM공법의 기준과 같이 2~3D로 적용하는 경우 공사비 증가 및 유지관리비용의 증가를 초래하게 된다. 한편 도심지의 경우는 갭구부 근(환기구 또는 정거장 시중점)의 터널간 간격을 근접시키며, 굴착과 함께 점차적으로 넓혀가는 방법의 적용사례가 많다.
- 2) 셸드 TBM 공법의 경우, 일본의 터널표준시방서 “셸드공법편·동해설”에서는 터널외경에 대한 이격거리의 비가 0.5D 이하의 경우 지반상태와 주변조건에 따른 검토를 실시하도록 하고 있다.

- 3) 국내외 도심지 쉴드터널 시공사례를 통한 검토결과, 국내의 경우 터널간 이격거리는 0.4~0.9D의 범위로 계획되어 있었다. 일본의 경우에는 0.5D 이하의 시공이 많았으며, 최소 30cm의 이격거리로 시공된 사례도 있었다. 아울러 일본의 시공사례 검토결과, 터널간 이격거리가 0.25D 이상의 경우는 특별한 대책공이나 보강을 실시하지 않고 있다.
- 4) 따라서, 서울지하철 7호선 연장 704공구의 쉴드터널의 터널간 이격거리는 별도의 보강이 필요없는 0.25D 이상인 0.35D를 선정하였다. 다만, 국내 지하철공사에 쉴드 TBM 적용사례가 적은 점 등을 고려하여 발진 전방부를 고압분사식 그라우팅으로 보강하였다. 또한, 발진부 가시성 및 선형관리의 효율성을 증대시키기 위해 갱문을 설치함으로써 굴진 초기의 안정성을 확보하고자 하였다.
- 5) 본 검토결과가 향후 유사 프로젝트에 있어서 참고적 자료로써 활용되기를 기대하며, 이 때 제반조건을 면밀히 고려한 후 개량의 필요성과 공법선정, 개량 범위의 타당성을 함께 검토할 필요가 있다.

참고문헌

1. 서울지하철7호선 연장 704공구 건설공사 대안설계보고서 (2004).
2. 離隔30cm以下の併設泥土壓シールド(2004), トンネルと地下 35巻 2号, pp.21-30.
3. Slim Reused Column Jet Grout공법(2002), 성하엔지니어링.
4. 泥水式と泥土壓式シールドの併設施工(2002), トンネルと地下 55巻 5号, pp.27-35.
5. シールド發進部の土留め工法(2001), 土木技術 56巻 10号, pp.93-100.
6. ジェットグラウト工法技術資料(2001), 日本ジェットグラウト協會.
7. トンネル標準示方書 “シールド工法編” 同解編(1998), 日本土木學會.
8. 異なるカッタの泥土壓シールド併進で河川横斷(1992), トンネルと地下 23巻 12号, pp.35-44.
9. 超近接シールドの計畫と設計(1988), トンネルと地下 19巻 7号, pp.45.