

## 병렬 쉴드터널의 이격거리와 적용사례

### Distance between the Parallel Shield tunnel and Application

곽철홍<sup>1)</sup>, Kwak Chul-Hong, 김재영<sup>2)</sup>, Kim Jae-Young, 김동현<sup>3)</sup>, Kim Dong-Hyun, 이두화<sup>4)</sup>, Lee Du-Hwa, 이승복<sup>5)</sup>, Lee Seung-Bok, 김응태<sup>6)</sup>, Kim Eung-Tae, 심재범<sup>7)</sup>, Shim Jai-Beom

- 1) (주)삼보기술단 지반사업부 대리
- 2) (주)삼보기술단 지반사업부 과장
- 3) (주)삼보기술단 지반사업부 이사
- 4) (주)삼보기술단 대표이사
- 5) 삼성건설 국내토목영업팀 차장
- 6) 삼성건설 국내토목영업팀 부장
- 7) 삼성건설 토목기술팀 부장

**SYNOPSIS** : The construction of parallel tunnel by using the shield TBM method was increased recently. Accordingly the application and the propriety of the parallel shield TBM tunnels were studied through domestic and foreign construction cases herein. Also the behavior of tunnel structure and ground was evaluated by a numerical analysis with various ground conditions and the distance between the parallel tunnels. As a result, it was concluded that a deep investigation as well as a ground reinforcement was required with a ratio(L/D) of the distance between the parallel tunnels(L) to tunnel outer diameter(D) less than 0.5 because the interference phenomenon was expected to occur. And the appropriateness of the application method of parallel shield TBM tunnel was validated through the 2-dimensional numerical analysis simulated the process of excavation after the ground reinforcement in the starting area of the OOO construction site with the ratio(L/D) of 0.35.

**Key words** : Shield Tunnel, Numerical Analysis, Tunnel behavior, Ground reinforcement

## 1. 머리말

과거 전력구, 통신구, 하수관로, 방류관로 등의 공사에 직경 5m이내의 소구경 쉴드TBM의 적용이 많았던 것에 비해, 최근에는 서울, 부산, 광주 등에서 지하철공사를 중심으로 직경 7m이상의 대구경 쉴드TBM에 의한 시공 및 설계사례가 꾸준히 증가하고 있다.

지하철공사는 급증하는 도시교통난을 해소하며, 도심으로의 교통수단 제공을 통해 기존 지하철의 이용혼잡을 완화하는 등 시민편의를 목적으로 계획되는 경우가 많다. 따라서 대부분 도심지의 도로하부에 건설되므로 선형계획시 도로시설이나 지하지장물, 시공시 주변환경에 미치는 영향 등을 충분히 고려하여야 한다. 이러한 지하철 터널의 선형계획은 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 영향을 미치지 않도록 충분히 이격시켜야 한다.

국내의 병렬터널간 이격거리에 대한 기준은 NATM공법에 의한 적용이 대부분을 차지하고 있는 실정

으로 터널상호간의 영향에 대해서는 지반조건이나 시공법에 따라 다르지만, 일반적으로 굴착폭(D)의 2배를 적용하며, 연약지반의 경우에는 5배 이상으로 설정하면 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다.

따라서 본 논문은 국내 지하철공사에 적용사례가 적은 쉘드TBM공법으로 단선 병렬터널을 구축하는 경우에 있어서 지반조건과 이격거리에 따른 검토를 통해 주변지반과 인접터널에 미치는 영향을 평가하여 안정성을 확보하기 위한 방안을 제시하고자 하였다. 또한 서울지하철 ○○○공구의 적용사례를 통해 검토방법의 타당성을 나타내고자 하였다. 이를 위해, 국내 쉘드TBM공법에 의한 시공사례를 조사한 후, 일본의 쉘드터널간 이격거리에 따른 시공사례를 통해 검토하였다. 그리고 지반조건과 이격거리에 따른 거동을 수치해석을 통해 검토한 후, ○○○공구에서 적용한 방법의 타당성을 확인하였다.

## 2. 국내외 쉘드터널간 근접거리와 시공사례

### 2.1 국내의 시공사례

과거 국내의 시공 및 설계사례를 조사하여 주요 지하철공사에 적용된 쉘드터널의 터널간 근접거리와 그에 대한 대처방안을 표 1에 나타내었다. 표 1에 나타낸 것과 같이 터널외경(D)에 대한 이격거리 비는 0.4~0.9의 범위이며, 수직 또는 수평방향 지반보강을 통해 대처하고 있었다. 그리고 보강공법은 주로 저압방식의 그라우팅을 적용하고 있으며, 부산지하철 230공구의 경우 이격거리에 따라 보강공법을 달리 적용하였다. 이와 같이 터널간 근접구간에 대한 국내 시공사례를 분석한 결과, 지반보강으로 안정성을 확보하고 있었으며, 보강공법의 선정에는 지반조건과 이격거리에 따른 검토를 통해 적용하고 있는 것을 확인하였다.

표 1. 국내 쉘드터널간 이격거리에 따른 대표적 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
쉘드형식	이수식	이토압식	이토압식	이토압식
지반조건	모래, 경암	토사~경암	경암	풍화암, 연경암교차
이격거리(m)	3.1~3.4	4.4~6.8	2.93~3.96	3.99~5.66
이격거리/ 터널외경	0.4~0.47	0.6~0.9	0.38~0.5	0.5~0.7
보강 방안	Double Packer, RJP보강	토사층 지반보강	전방예측 및 보강, LW그라우팅	LW 저압그라우팅

### 2.2 해외(일본)의 사례

쉘드터널의 시공경험이 풍부한 일본의 시공사례를 통해 이격거리에 따른 안정성 확보방안을 검토하였다. 표 2에는 최근 일본의 쉘드터널간 근접하는 경우의 시공개요와 각각의 대처방안을 나타냈다. 니시हत초보리터널, 영단지하철 오오키바 B선, 쓰쿠바터널은 상부에 대형건물이 위치하는 도심지 하부를 통과하며, 삿포로 고속철도 토오호선은 수위변동이 심한 1급 하천하부를 통과한다. 터널외경에 대한 이격거리와의 비는 0.03~0.3으로 안정성을 검토할 필요가 있다. 통과구간의 안정성 검토에는 표 2에 나타낸 지반개량을 실시한 후 통과하는 과정을 사전해석으로 검토하여 통과중 관리방안과 항목을 설정하였다. 그리고 굴진중에는 추진력과 막장압력의 관리, 지표면변위에 대한 실측관리를 통해 예측 값과 비교하며 통과한 결과, 예측치와 큰 차이가 없는 것으로부터 적용방법의 타당성을 확인하였다. 아울러 그림 1에는 터널간 이격거리별 보강사례를 나타내었으며, 0.25D이하의 경우 지반보강을 실시하고 있었다.

표 2. 일본의 쉘드터널간 이격거리에 따른 보강사례

공사명	니시하초보리터널	삿포로 고속철도 토오호선	영단지하철 오오키바 B선	쓰쿠바터널
터널외경 (m)	8.1	6.6	6.8	7.3
셸드형식	이수식	이토압식	이토압식	이토압식
지반조건	충적자갈	홍적자갈	충적점성토	홍적사질토
통과지역	상업지구 하부	1급 하천하부	기존 지하철 하부	국도, 대형건물하부
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 및 이중관 분사그라우팅	터널내 지보공	지반개량	고압분사그라우팅, 약액주입

표 1, 2에 나타난 국내의 쉘드TBM에 의한 단선 병렬터널 시공사례를 보면, 국내보다는 일본의 경우가 병렬터널간 이격거리가 짧은 것으로 나타났다. 또한 근접구간에는 적용방법에 차이는 있지만 지반개량에 의한 보강을 적용하고 있는 것으로 나타났다. 참고로 일본의 터널표준시방서 “셸드공법편·동해설”에서는 터널외경에 대해 이격거리와의 비가 0.5이상일 경우 별도의 보강을 실시하지 않아도 되지만, 지반상태와 주변조건에 따른 검토를 실시하도록 하고 있다.

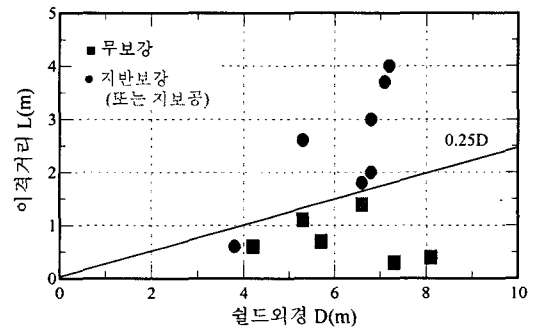


그림 1. 터널간 이격거리별 보강사례

### 3. 병렬터널간 이격거리에 대한 해석적 검증

병렬터널 시공시 이격거리에 따른 병렬터널 상호간의 거동에 미치는 영향을 파악하고자 병렬터널의 이격거리를 다양하게 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 쉘드TBM에 의한 병렬터널 굴진에 따른 세그먼트와 주변지반의 응력상태는 두 터널의 상호간섭효과에 영향을 받으므로 이격거리에 따른 거동과 주변지반의 거동에 대한 평가가 필요하다. 따라서 병렬터널 구축시 주변지반에 미칠 수 있는 영향을 기하학적 요소 중 터널간 이격거리와 지반의 재료학적 요소로는 지반조건, 측압계수를 고려하여 2차원 유한차분해석을 통해 이격거리에 대해 검토하였다.

수치해석은 ITASCA사의 FLAC 2D(version 3.30)를 이용하였으며, 굴착단계는 크게 ①선행터널 굴착, ②세그먼트 설치, ③후행터널 굴착, ④세그먼트 설치의 4단계로 모델링 하였다. 지반은 균질성 매질로 가정하여 Mohr-Coulomb모델을 적용하였으며, 해석영역은 터널 중심에서 좌·우 40m이상, 하부로는 터널 중심에서 30m이상을 모델링 하였다. 터널시공의 3차원 과정을 2차원 모델링에 적용하기 위하여 굴착 및 세그먼트 설치시 중간단계에 50%의 하중분담율을 적용하였다.

2차원 유한차분해석에 적용한 해석모델링을 그림 2에 나타냈다. 모델링은 병렬터널의 굴진에 따른 간섭효과와 지반거동을 분석하기 위해, 우측터널 굴착후 좌측터널이 굴착되는 시공과정을 모사하였다. 측압계수에 따른 영향검토에는 측압계수  $K_0=0.5, 1.0, 1.5$ 에 대해 적용하였다. 선행터널 굴착후 후행터널 굴착에 대한 영향평가는 터널간 이격거리는 0.1~2.0D의 범위에서 변화시켰다. 모델링에 적용한 지반물성치를 표 3에 나타냈다.

표 3. 적용지반 물성치

암 종	변형계수 $E_m$ (MPa)	포아송비 ( $\nu$ )	단위중량 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	내부마찰각 $\phi$ (°)	점착력 $c$ (MPa)	압축강도 (MPa)
풍 화 토	120	0.30	19.3	32	0.011	-
풍 화 암	250	0.28	20.4	33	0.025	-
연 암	3,600	0.25	23.0	35	0.100	-
세그먼트	32,000	-	25.0	-	-	48

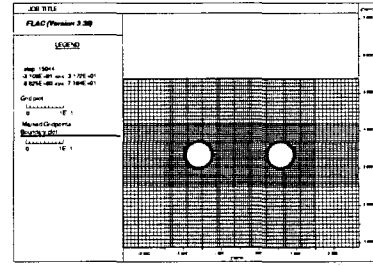
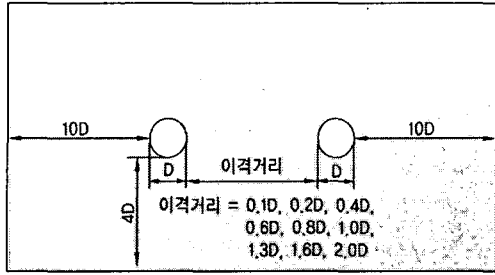


그림 2. 2차원 유한차분해석에 적용한 해석모델링

해석결과는  $K_0$ 와 이격거리의 변화에 따른 천단변위와 내공변위, 세그먼트 응력을 그림 3, 4, 5에 나타내었다. 천단변위의 경우,  $K_0=0.5, 1.0$ 의 풍화토, 풍화암과  $K_0=0.5, 1.0, 1.5$ 의 연암에서 터널간 이격거리가  $0.1D(D:터널직경)$ 에서  $1.0D$ 로 증가함에 따라 천단변위는 감소하는 경향을 나타내며,  $1.0D$ 이상부터 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타냈다. 풍화토, 풍화암의  $K_0=1.5$ 의 경우는 터널간 이격거리가  $0.1D$ 에서  $1.0D$ 로 증가함에 따라 천단변위가 증가하는 경향을 나타내며,  $1.0D$ 이상에서는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타냈다.

내공변위는  $K_0=0.5$ 의 경우 표 3의 적용지반 모두 이격거리에 따른 변위의 차이가 미미하게 나타났다.  $K_0=1.0$ 인 경우에는 풍화토, 풍화암, 연암에서 이격거리가 증가할수록 내공변위도 증가하며  $1.0D$ 이상에서는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타냈다.  $K_0=1.5$ 의 경우는 적용지반 모두 이격거리가 증가할수록 내공변위가 증가하는 경향을 나타내며,  $1.0D$ 이후의 증가는 둔화되어 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타냈다.

세그먼트 응력은 터널간 이격거리가 증가함에 따라 후행터널의 세그먼트에서 발생하는 응력이 점차 감소하여 일정한 값에 수렴하는 경향을 나타내며, 선행터널에서는 비교적 작게 발생하였다. 그림에는 세그먼트 강도 42, 48MPa에 대한 허용응력값 16.8, 19.2MPa를 참고로 나타내었다. 풍화토의  $K_0=0.5, 1.5$ 에서 이격거리  $0.6D$ 이상 일때 일정한 값을 나타내며,  $K_0=1.0$ 의 경우 이격거리가 증가함에 따라 세그먼트 응력은 일정한 값에 수렴하는 경향을 나타냈다. 풍화암의  $K_0=0.5, 1.5$ 의 경우는 이격거리가  $0.6D$ 이상일때 일정한 값에 수렴하며,  $K_0=1.0$ 의 경우는 이격거리가  $2.0D$ 에서 일정한 값으로 수렴하고 있다. 연암의 경우 이격거리가  $0.6D$ 이상에서는  $K_0$ 값에 상관없이 세그먼트 응력 값이 일정한 값에 수렴하였다.

표 3의 지반조건으로 단선 병렬터널간 이격거리에 따른 영향을 2차원 해석으로 검토한 결과, 이격거리  $1.0D$ 이상의 경우 지반상태에 관계없이 굴착으로 인한 간섭효과는 미미한 것으로 판단된다. 터널간 이격거리  $1.0D$ 이하의 경우 간섭효과가 나타나는 것으로 판단되며, 특히 이격거리  $0.5D$ 이내의 경우는 간섭효과의 발생으로 변위, 세그먼트응력의 큰 증가가 예상되므로 Pillar부 보강과 상세해석이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 풍화토 구간에서 세그먼트의 응력은 터널간 이격거리  $0.5D$ 이하일 경우 축압계수에 상관없이 급격하게 증가하여 세그먼트 허용응력 16.8, 19.2MPa에 근접하므로 적절한 보강공법 적용 및 그에 따른 안정검토를 수행해야 할 것으로 판단된다.

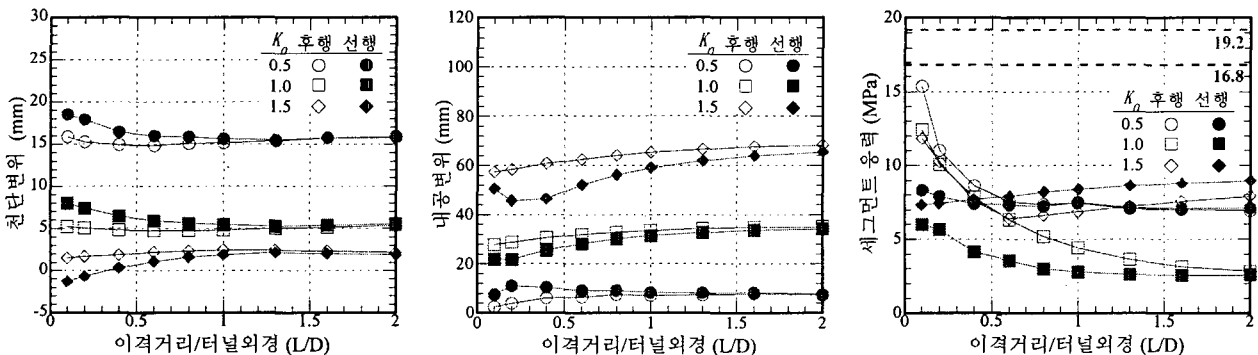


그림 3. 풍화토의 경우 천단변위와 내공변위, 세그먼트 응력

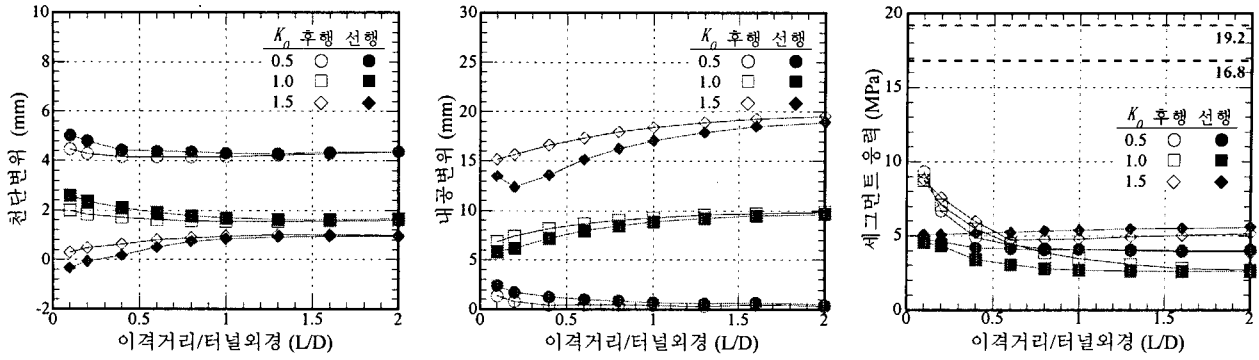


그림 4. 풍화암의 경우 천단변위와 내공변위, 세그먼트 응력

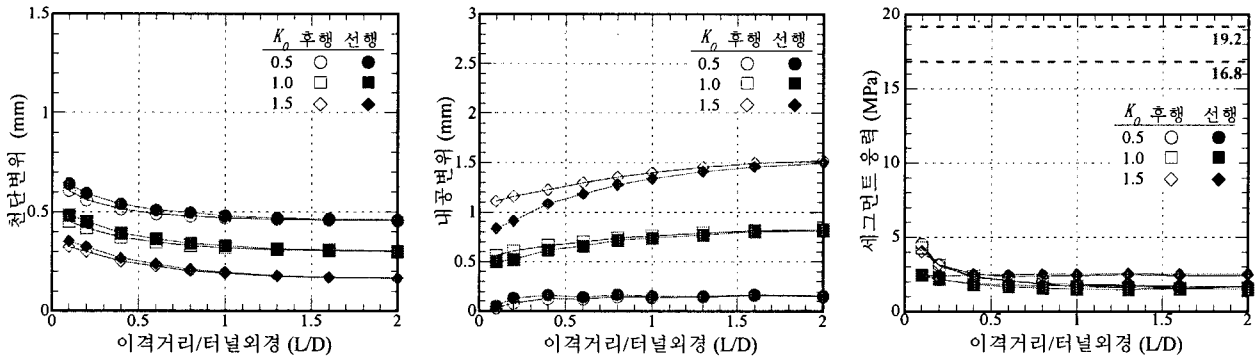


그림 5. 연암의 경우 천단변위와 내공변위, 세그먼트 응력

#### 4. 서울지하철 ○○○공구의 적용사례

##### 4.1 공사개요 및 지반조건

상기의 검토결과를 바탕으로 ○○○공구에서 적용한 검토방법과 결과에 대한 타당성을 확인하고자 하였으며, 쉘드터널 구간의 개요를 그림 6에 나타내었다. 본 구간의 시점부에는 상부에 대형 우수박스가 구간 중간부까지 존재하며, 중간부부터 종점부 부근까지는 고가도로가 상부에 위치하고 있다. 또한 상부 도로주변에는 대형 상가 등의 밀집도가 높은 상업지구의 하부를 통과하고 있기 때문에 굴착에 따른 주변 지장물의 안정성을 고려하여 정거장 2개소 사이가 단선병렬의 쉘드터널로 계획되었다. 따라서 상부 지장물과의 저촉을 피하여 기존 시설물의 안정성을 확보하고, 경제적인 시공을 위한 선형계획을 수행하였다. 그리고 정거장과 인접해 있는 쉘드TBM 발진부에서 선행터널과 후행터널간 이격거리가 일부구간에서 2.5m로 근접되어, 굴착에 따른 안정성확보가 요구되었다.



그림 6. 쉘드터널구간 현황

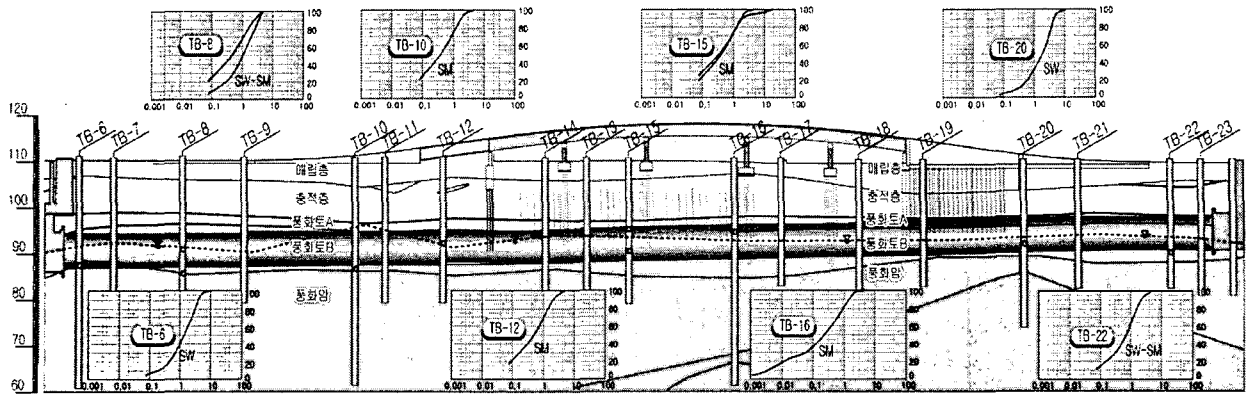


그림 7. 쉴드터널구간 지반조사 현황

쉴드TBM이 굴착하는 지반조건은 N치 약 22/30~50/5의 풍화토층으로, 시점부 부근에서는 터널하부에 풍화암층이 나타나고 있다(그림 7. 참조). 이 구간은 투수계수  $6.3 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ 의 풍화토지반(중립모래 41.5%, 세립모래 25.0%, 세립분 16.4%, 자갈 2%)이며, 보링과 지하수위정에 의한 장기관측결과 지하수위는 GL.-10~17m로써 터널 천단 또는 중간부에 위치하며, 굴착에 따른 지하수위의 영향이나 지하수가 굴착에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

이와 같은 굴착환경 및 지층, 지하수위, 입도분포를 바탕으로 쉴드TBM 형식은 이토압(EPB)쉴드를 선정하였으며, 외경 7.13m의 터널을 단선병렬로 굴착한다. 또한 막장첨가재로는 기포를 사용하여 굴착토사의 소성유동화를 촉진시켜 굴착효율을 증대시키고, 굴착비트의 마모를 경감시켰다.

#### 4.2 단선 병렬터널간 근접구간의 지반보강

쉴드TBM 발진부는 터널간 이격거리가 2.5m로 근접하고 있으며, 쉴드터널외경과 근접거리의 비로 나타내면 0.35로써, 부산지하철에서 0.4~0.47, 광주지하철에서 0.6~0.9, 신공항 철도에서 0.5~0.7보다 작은 값을 나타내고 있다. 또한 발진부 주변에는 대형 건물 등이 위치하고 있는 점을 고려하여 다음과 같은 검토를 수행한 후 적용하였다.

먼저 발진부의 터널간 근접구간에 대한 안정성을 확보하기 위한 방안으로, 발진부의 지반조건을 고려한 지반개량공법을 선정할 필요가 있다. 지반개량공법의 선정에는 최근 일본의 시공사례를 참조하여, 강도가 높고, 지수성에 신뢰성이 높은 고압분사식 그라우팅공법(SRC공법, Slim Reused Column Jet Grout)을 선정하였으며, 개량범위를 그림 8에 나타냈다.

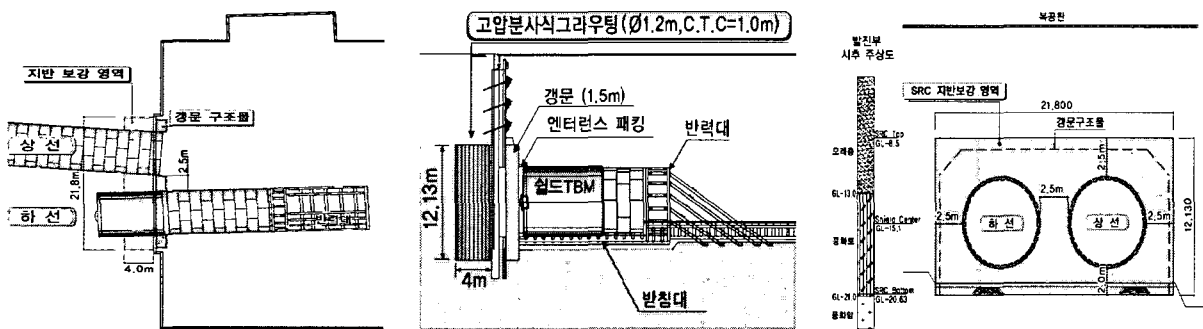


그림 8. 쉴드TBM 발진부 개요

#### 4.3 병렬터널간 근접구간의 2차원 해석

본 공구의 단선 병렬터널간 일부구간의 이격거리는 0.35D로써, 해석결과를 보면 이격거리 0.5D이내의 구간에 해당되므로 간섭효과의 발생으로 변위, 세그먼트 응력의 증가가 예상된다. 따라서 그림 8에 나타낸 범위를 지반개량후 굴착에 따른 영향을 2차원 해석을 통해 검토하였다. 해석단면은 그림 9에 나타내었으며, 굴착지반은 풍화토 구간으로 축압계수  $K_0=0.5$ 를 적용하였다. 해석단면은 터널 중심에서 좌·우측

40m이상, 하부 30m이상을 모델링 하였다.

2차원 수치해석에 의한 세그먼트의 응력과 천단변위 및 내공변위 결과를 표 4에 나타내었다. 지반보강을 적용한 해석결과, 세그먼트에 발생하는 응력은 최대 4.18MPa로 허용 응력 16.8, 19.2MPa 이내로 터널은 안정한 것으로 판단된다. 이를 3장의 풍화도,  $K_0=0.5$ 를 적용한 유사한 이격거리 단면과 비교하였을 경우, 변위 및 세그먼트 응력이 전반적으로 작게 발생하여 지반보강공법 선정의 타당성을 확인할 수 있었다.

아울러 상기의 결과를 바탕으로 굴진시에는 지표침하계에 의한 통과 중 굴진관리를 실시하여 비교하며, 완성 후에는 2차원 내공변위계를 설치하여 유지관리에 있어서 관리기준을 설정하였다(그림 10참조). 이와 같은 철저한 시공계측과 유지관리계측의 연계에 따라 터널구조물의 장기적인 안정성과 손상여부에 대한 중점관리가 가능하며, 향후 통합관리 시스템의 구축으로 체계적 관리가 가능할 것으로 기대된다.

표 4. 발진부 2차원 해석 결과

구 분	천단변위 (mm)	내공변위 (mm)	세그먼트 응력(MPa)
선행터널	3.146	2.338	4.18
후행터널	1.775	3.253	2.68

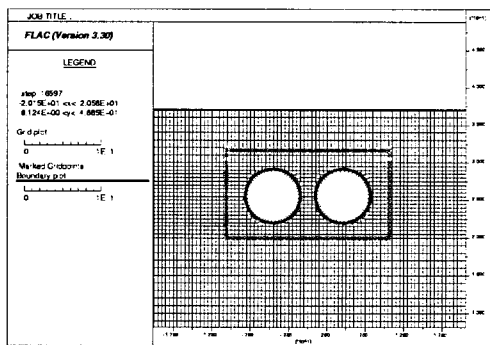


그림 9. 발진부 2차원 해석모델링

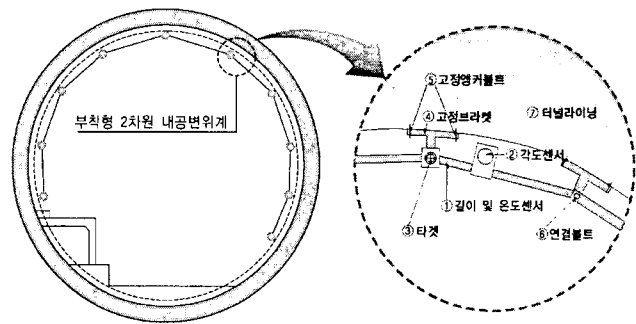


그림 10. 내공변위계에 의한 유지관리

## 5. 맺음말

도심지 지하철공사에 있어서 쉘드TBM공법으로 단선 병렬터널을 구축하는 경우에 있어서 지반조건과 이격거리에 따라 안정성을 확보하는 방법을 다음과 같이 검토하였다. 먼저 국내의 시공사례를 통해 이격거리에 따른 적용방법을 조사하였다. 또한 지반조건과 이격거리를 다양하게 설정한 쉘드터널 모델링에 의한 2차원 유한차분해석을 수행하여, 터널구조물과 지반거동을 평가하고 안정성 확보를 위한 방안을 나타냈다. 이와 같은 결과를 바탕으로 ○○○공구의 병렬 쉘드터널간 이격거리가 2.5m로 근접되는 구간에서 안정성을 확보하기 위해 적용한 방법을 검토하고, 타당성을 확인하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 국내 시공사례의 경우, 터널외경에 대한 이격거리 비는 0.4~0.9의 범위이며, 주로 저압방식의 지반개량으로 근접구간의 안정성을 취하고 있다. 한편 일본의 경우는 0.03~0.3의 범위로 고압방식의 지반개량을 적용하고, 굴진 중 관리를 통해 안정성을 확보하고 있다.
- 2) 단선 병렬터널이 구축되는 지반조건과 이격거리별로 수치해석에 의한 방법으로 검토한 결과, 이격거리 1.0D이상에서는 간섭효과가 나타나지 않았으며, 이격거리 1.0D이내에서는 간섭효과가 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 이격거리 0.5D이하의 경우에는 간섭효과로 인한 변위 및 세그먼트 응력의 큰 증가가 예상되므로 적절한 지반보강공법 적용과 상세해석이 필요한 것으로 나타났다.
- 3) 일본 “쉘드공법편·동해설”에 나타난 0.5D이상의 범위는 보강을 실시하지 않아도 좋은 범위로 볼 때, 본 모델링을 통한 해석결과와 거의 일치하고 있는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 쉘드TBM 발진부에서 터널간 이격거리가 0.35D로 근접하는 ○○○공구의 경우를 예로써, 고압분사식 그라우팅에 의한 지반개량 후 굴착에 따른 영향을 2차원 해석으로 검토하였다. 그 결과, 천단변위와 내공변위, 세그먼트 응력은 모두 허용치 이내로 나타나므로 안정성을 충분히 확보하고 있는

것으로 판단된다.

- 5) 이와 같이 단선 병렬터널간 이격거리가 충분하지 않는 구간에 지반보강을 적용하고, 그 효과를 고려한 2차원 해석을 통해 천단변위와 내공변위, 세그먼트 응력이 감소되는 효과를 확인하였다. 향후 상기의 결과를 바탕으로 시공 중, 완공 후에도 지속적인 관리를 통한 데이터를 축적하여 그 결과보고를 통해 신뢰성을 확인하고자 한다.

## 참고문헌

1. 쉴드TBM 공법 적용시 병렬터널간 이격거리 검토(2005), 터널기술 Vol. 7, No. 1, 한국터널공학회지, pp.32-39.
2. 서울지하철7호선 연장 704공구 건설공사 대안설계보고서(2004)
3. 離隔30cm以下の併設泥土圧シールド(2004), トンネルと地下 35卷 2号, pp.21-30.
4. Slim Reused Column Jet Grout공법(2002), 성하엔지니어링.
5. 泥水式と泥土圧式シールドの併設施工(2002), トンネルと地下 55卷 5号, pp.27-35.
6. シールド発進部の土留め工法(2001), 土木技術 56卷 10号, pp.93-100.
7. トンネル標準示方書“シールド工法編”同解説(1998), 日本土木学会
8. 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会
9. 異なるカッタの泥土圧シールド併進で河川横断(1992), トンネルと地下 23卷 12号, pp.35-44.
10. 超近接シールドの計画と設計(1988), トンネルと地下 19卷 7号, pp.45.