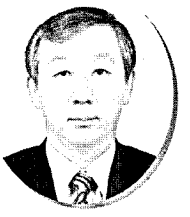
기술기사 3 | 한국지반공학회지 | Vol.26, No.5 | pp.37~47

쉴드터널에서 압송배관에 의한 굴착토사 배토방식의 적용사례

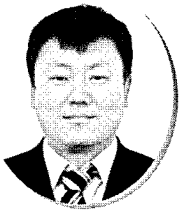
권오선
삼성물산(주) 상무
(osun.kwon@samsung.com)

신원섭
삼성물산(주) 부장
(wonseob.shin@samsung.com)

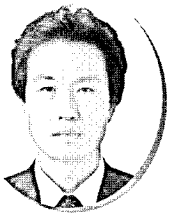
김성준
삼성물산(주) 과장
(sungjun@samsung.com)



정경환
(주)동아지질 사장
(ghjeong@dage.co.kr)



백남석
(주)동아지질 차장
(nsback@dage.co.kr)



김동준
(주)동아지질 과장
(djkim@dage.co.kr)

1. 서 론

경제성장과 함께 도시 확장 및 신도시 건설 시 인프라 구축을 위한 터널공사는 각종 소음 · 진동, 환경훼손 등에 따른 건설공해와 빈번한 붕괴사고 등에 따라 직 · 간접적으로 경제적 손실을 야기하고 있으며, 이에 대한 대안으로 기계식 터널공법인 쉴드TBM(Shield Tunnel Boring Machine)이 1987년도에 국내에 처음 소개된 이후 20년 가량의 기술축적을 이루었다.

쉴드TBM은 NATM에 비해 굴진 속도가 현저히 빠른 장점이 있으며, 추진압력, 면판의 형상, 굴진에 따른 버력의 효율적인 반출 방식이 굴진 속도에 영향을 주는 주 요인으로 작용한다. 지금까지 국내의 이토압식 쉴드TBM의 갱내 버력 운반 시스템은 버력 대차를 이용하여 지상으로 운반하는 방안이 주류를 이루고 있지만, 대차의 탈선 및 작업원과의 충돌 등 위험요소가 있고, 터널 기울기가 대차 등판능력의 한도를 넘어설 경우 시공이 어려워 특수한 장치가 필요하다. 해외의 경우, 이토압식에도 이수가압식의 배니관을 병용하는 방안으로 연속적인 버력 배토가 가능한 수평 및 수직 컨베이어를 사용하는 방안 등이 다양하게 적용되고 있다(정경환, 2005). 쉴드TBM은 국내에서도 일반화된 공법으로 그 기술력이 세계적으

로 동등한 위치에 있으나, 대단면 적용사례가 없고, 버력 운송방식에 있어서 터널굴진계획과 국내 지반조건의 특성에 의하여 벨트컨베이어 방식과 대차방식의 적용사례만 보유하고 있다.

본 기사를 통하여 국내 최초로 압송식 버력처리 방식이 적용된 『ㅇㅇ복합화력발전소 도수로터널 쉴드TBM 공사』현장을 소개하고, 향후 국내에서 압송식 버력처리 시스템 적용 시 효율성을 증대시킬 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

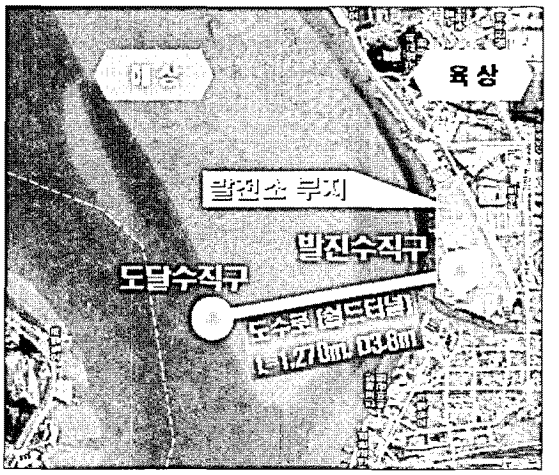


그림 1. 터널 굴진계획도

2. 현장 개요

당 현장은 육상에서 발진하여 해상에 도달하는 화력발전소 도수로 공사로서 지중터널 계획 시 지반조건 및 해상여건, 해상 환경오염과 민원의 최소화, 설계 목적에 맞는 고품질의 시공이 가능한 쉴드TBM 공법이 적용되었다. 발진수직구는 발전소 부지 내에 위치(육상)하고 있고, 도달수직구는 ㅇㅇ항 내에 위치(해상)하도록 계획되었다(그림 1).

2.1 굴진대상지반

당 현장의 쉴드 터널은 굴진장(L) 1,270m 중 전반부 880m는 실트점토, 후반부 390m는 모래질 토사지반으로 지형상 육상구간 40m, 해상구간 1,230m로 계획되었다. 굴진 계획단면상의 지반조사결과는 그림 2와 같다.

2.2 쉴드TBM 개요

쉴드TBM은 최초 연약지반의 터널 시공을 위해 개발된 공법으로, 개착식 공법의 시공 시 발생하는 인접지반의 침하 거동 및 각종 건설 장애를 효과적으로 줄일 수 있는 공법이다. 쉴드TBM은 지반 자체의 강성을 이용한 NATM과는 달리 일반적으로 원통형 굴진장비를 이용하여 터널을 굴진하게 되며, 굴진력은 굴진기 직후방에 장착된 유압 실린더의 압력으로 세그먼트의 저항력을 이용

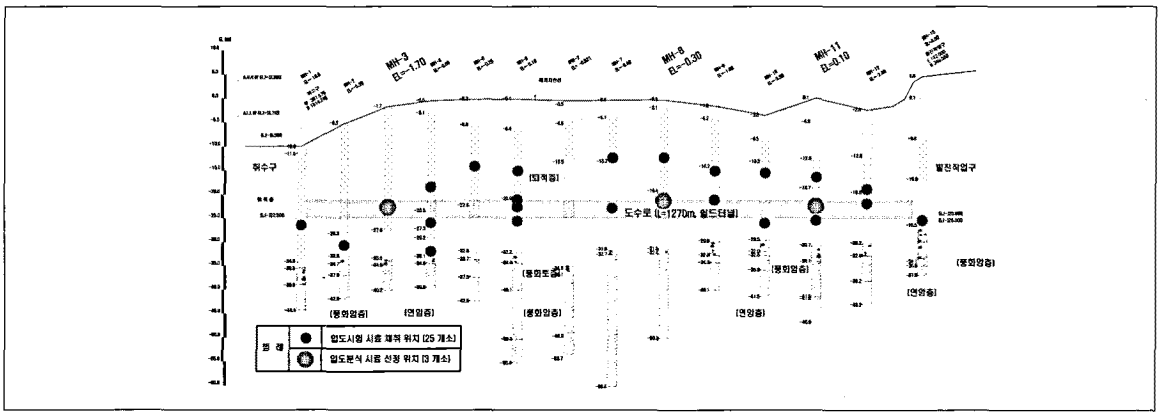
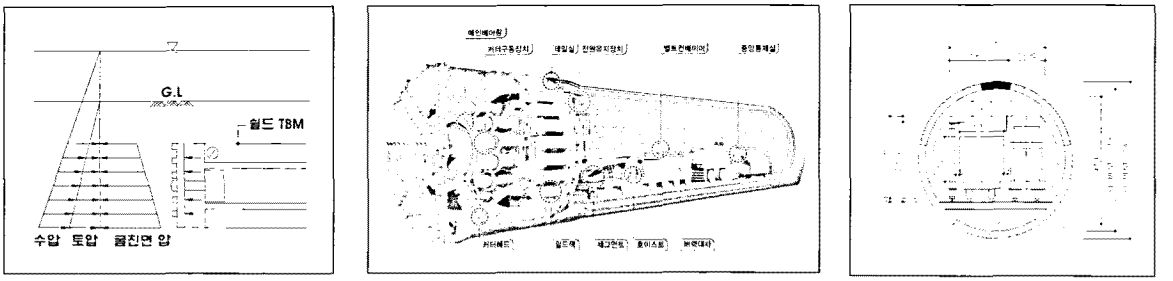


그림 2. 굴진대상지반 조건 및 시료 선정



(a) 굴착 개념도 (b) 장치 일반도 (c) 터널 단면

그림 3. 쉴드 TBM 터널 개요 및 당 현장 터널 단면

한다. 여러 종류의 쉴드TBM 타입 중 토압식 쉴드TBM의 굴진 순서는 커터 헤드로 굴착을 하며, 굴착된 토사로 쉴드 장비 전통부의 격벽과 굴진면 사이를 충전시키고, 스크류컨베이어로 배토량을 조절함으로써 굴진면압을 유지하게 되며, 세그먼트 1링 길이의 굴착이 완료되면, 이렉터를 이용하여 세그먼트를 조립한다. 이와 같은 쉴드 TBM 터널 개요 및 당 현장의 터널단면은 그림 3과 같다.

도수로의 계획단면을 만족하기 위하여 터널의 굴착직경은 4.43m, 세그먼트의 외경은 φ4,200㎜, 내경은 φ3,800㎜, 두께는 200㎜이며, 세그먼트 폭은 900㎜로 계획되었다(그림 3 (c)).

2.3 압송식 버력처리 시스템

쉴드TBM에서 버력처리는 그림 4와 같이 굴진면에서 발생한 버력을 스크류컨베이어를 통해 쉴드장비 외부로 반출하는 1차 처리와 반출된 버력을 지상으로 운반하는 2차 처리방식으로 구분된다. 2차 처리방식은 대차 방식, 컨베이어 벨트식, 압송식 등이 있으며, 터널 계획단면 및 굴착대상 지반의 특징에 따라 적합한 시스템을 선택해야 한다.

쉴드TBM에서 압송방식을 포함한 2차 버력처리 방식의 종류와 특징은 표 1과 같다.

2차 버력처리 방식 중 압송식은 쉴드TBM 장비 내 스크류컨베이어 게이트를 통해 배출되는 버력을 터널 내에 설치된 피스톤 펌프(압송 펌프), 압송관 등을 이용하여 연속적으로 지상으로 반출하는 방식으로 진공, 이수, 공기, 펌프(복동, 단동식 피스톤) 방식 등이 있다. 그 중 펌프 방식의 작동원리는 표 2와 같다.

압송방식은 굴진 중 발생한 버력을 굴진면에서 지상 호퍼까지 피스톤 펌프 및 압송관에 의해서만 반출하기 때문에 연속적인 버력반출이 용이하며, 장거리의 굴착토 운송을 쉽게 할 수 있는 장점이 있다. 또한, 흙 속에 메탄가스나 유화수소 등의 가연성 또는 유독가스가 부존하는 경우는 펌프압송방식을 채용함으로써 터널 내로의 가스 누출을 저감시킬 수 있고, 작업의 안정성을 향상시킬 수 있다. 또한, 후방설비 설치를 위한 보조터널이 필요 없어서 공사비를 절감할 수 있으며, 발진수직구 내 소요공간(압송관 설치)이 상대적으로 작아서 수직구 규모를 최소화할 수 있다.

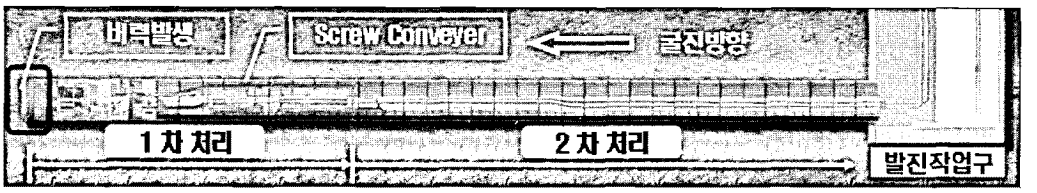


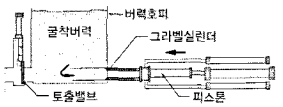
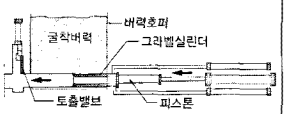
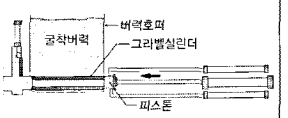
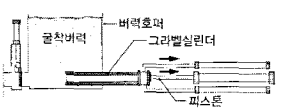
그림 4. 쉴드TBM에서 버력처리 방식 개요도

표 1. 쉴드 TBM의 버력처리 방식의 종류 및 특징(大生興産(株), 2009. 04)

버력 처리방식		토질 적용성	운반거리	시공성	안전성	경제성	비 고
대 차		◎	◎	△	X (운반 시)	X	버력 운반 시간
컨베이어		◎	◎	○	△	X (설비과대)	유지관리비 과대, 토사비산
압송	진 공	△ (ø500이상 부적합)	X (저 흡입력)	X (인원, 준비시간)	X (과대설비)	X (인건비)	지상설비 과대
	이 수	○ (ø800이상 부적합)	△ (저 배토압)	○	○	X (설비과대)	유지관리비 과대
	공 기	X (고점성토, 자갈 모래층 부적합)	X (저 배토압)	X (고 폐색율, 고 위험)	X (폐색 해체시 고 위험)	X (설비과대)	콤프레서 대용량
	펌 프 (복동식)	○ (ø500이상 부적합, 첨가재)	◎ (평균압송거리 500~700m)	◎ (펌프 대수 소량)	◎	○ (유지관리비 보통)	파쇄기, 첨가재, 토질에 따라 1㎞ 압송가능
	펌 프 (단동식)	◎ (ø150~200, 첨가재)	◎ (평균압송거리 700~1000m)	◎ (펌프 대수 소량)	◎ (무소음, 무진동)	◎ (유지관리비 소)	무진음, 무진동, 파쇄기

◎ 매우 양호, ○ 양호, △ 불량, X 매우 불량

표 2. 압송펌프 작동원리((주)삼호, 2007)

제1단계 : 버력 충전	제2단계 : 버력 압송	제3단계 : 압송 완료	제4단계 : 버력 재충전
			
버력호퍼 속에 그라벨 실린더를 밀어 넣고 실린더 속에 굴착버력 충전	그라벨 실린더가 압착되면 토출밸브가 열리고 피스톤으로 버력 압송 시작	피스톤이 그라벨 실린더 속의 버력을 전부 반출	압송 완료후 토출밸브를 잠그고 실린더와 피스톤을 동시에 당겨 버력 재충전

당 현장에서 쉴드TBM의 선단 부분 수압은 3 bar 정도 예상되고, 스크류컨베이어를 통과한 토사는 포화상태일 것으로 판단되었다. 물이 다량 함유된 토사가 스크류컨베이어를 지나 벨트컨베이어로 이송될 경우 낙하 가능성 있고, 추락한 이토(포화한 토사)는 세그먼트 조립과 후방설비(특히, 고압 판넬)에 손상이나 추가 작업(이토 청소)이 필요할 것으로 예상하였다. 따라서 추가 작업의 발생으로 인해 쉴드TBM 굴진의 지연을 해결하기 위하여 펌프 압송방식을 적용하였다.

2.3.1 압송식 버력처리 시스템 사양 검토

쉴드 TBM 굴진 시 버력은 스크류컨베이어에서 배관을 통하여 후방 대차의 P1펌프 호퍼에 투여(1차 버력 처리)하고, 이후 압송배관(D300 ㎜)과 P2 펌프를 배치하여 지상호퍼(2차 버력처리)까지 배토하는 것으로 계획하였다. 압송식 버력처리 시스템의 검토 대상 압송거리는 표 3과 같다.

2.3.2 압송식 버력처리 시스템 선정

당 현장에 적용된 압송식 버력처리 시스템의 사양은 표

표 3. 당 현장의 압송거기(압송배관 D300mm, 펌프 2대 배치)

수평거리 (m)					수직거리(m)	
배 관	L1 (P1~P2)	L2 (P2~수직구 하부)	계	지 상	수직구깊이	호퍼 높이
40	750	530	1,320	20	30	16

표 4. 압송식 버력처리 시스템 사양

구 분	내 용
펌 프 사 양	• P1, P2펌프 – 펌프형식 : KOS708 – 유압유닛형식 : HA55 – 이론 최대 토출압 : 45kgf/㎠ – 이론 최대 토출량 : 97㎥/H • 기타제원 – 압송관 지름 : dp=300mm – 신축관 단수 : 4 • 압송가능 최대 입경 40mm

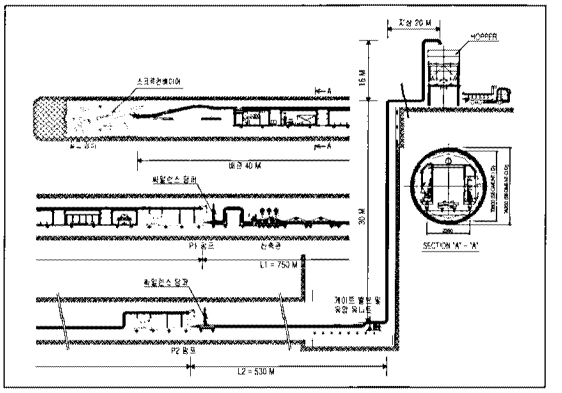
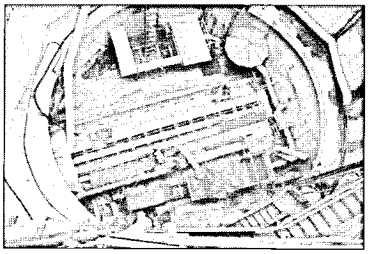
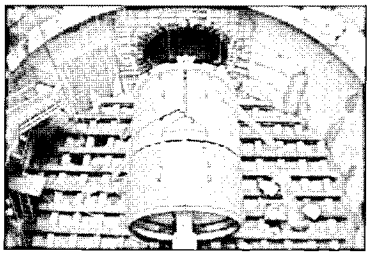


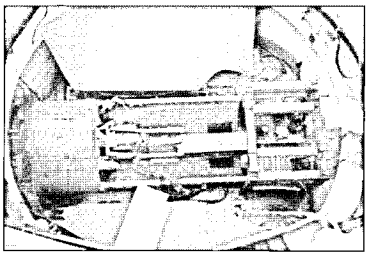
그림 5. 압송식 버력처리 시스템 설치 계획



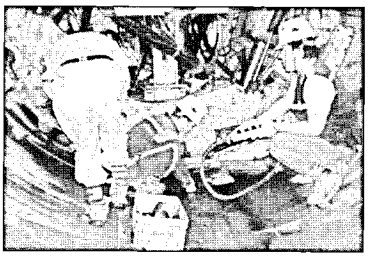
(a) 굴진기지 설치



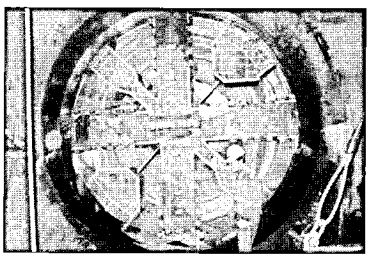
(b) 쉴드TBM 굴진기 거치



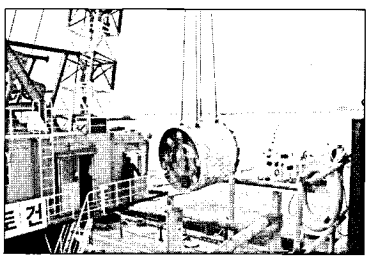
(c) 초기굴진



(d) 세그먼트 조립



(e) 쉴드 장비 관통



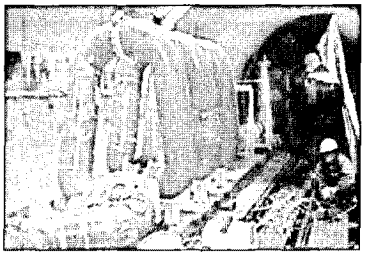
(f) 장비 인양

그림 6. 쉴드 TBM 주요 시공 단계별 사진

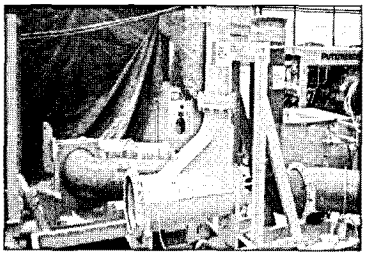
4, 소음 및 진동 저감을 위한 싸일런스 담퍼(Silence Damper)와 쉴드TBM 터널 내 압송배관 설치계획은 그림 5와 같다.

2.4 현장적용사례

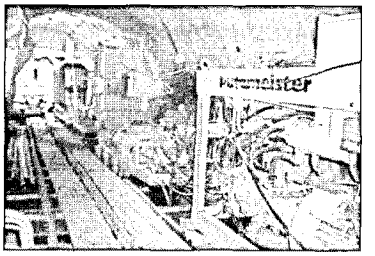
당 현장에 적용된 쉴드TBM 터널공사 시 시공 단계별 주요 전경은 그림 6과 같고, 국내 최초로 적용된 압송식 버력처리 시스템의 주요 압송배관 설비 전경은 그림 7과 같다.



(a) 신축관 설치



(b) Silence Damper



(c) 압송배관 설비 전경

그림 7. 압송배관 설비 사진

3. 압송식 버력처리 시스템의 현장적용성 평가

3.1 굴진대상지반 분석 및 적용성

압송식 버력처리 시스템의 적용성 평가를 위하여 굴진대상지반의 입도분포를 펌프 압송이 가능한 입도분포와 비교하였다. 굴진대상지반상에는 모래층과 점토층, 실트층이 존재하며 입도분석을 위하여 대표시료를 굴진대상지반조건(그림 2)에서와 같이 MH-3, 8, 11로 선정하였다. 또한, 해상지반조사(ㅇㅇ복합화력 설계기술용역/해상지질조사보고서, 2007)결과 점토 및 모래층의 특성은 표 5와 같다.

입도분석을 위하여 선정된 MH-3, 8, 11의 물리 · 역학적 성질은 표 6, 입도분포곡선은 표 7과 같다.

쉴드TBM 공사 시 이러한 점성유지와 재료분리현상 방지를 위하여 다수의 압송식 버력처리 시스템 적용 실적을 보유하고 있는 일본의 경우 펌프 압송 가능한 토사의 입도조건을 그림 8과 같이 제안하고 있다. 이 제안에 의하면 첨가제 주입(보통)의 경우는 굴진면 안정을 위한 첨가제 주입만으로 압송이 가능한 지반 조건이며, 첨가제 주입(특별)의 경우는 압송을 위해 별도의 첨가제를 추가해야하는 지반 조건이다.

압송식 버력처리 시스템의 적용성을 평가하기 위하여, 굴진대상지반중 대표시료에 대한 입도곡선을 펌프 압송 가능 입도분포곡선과 비교하였다. 그림 8과 같이 SM,

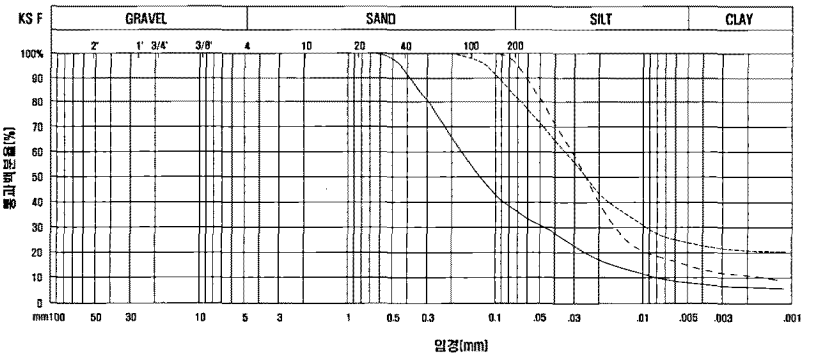
표 5. 점성토 및 모래층 지반조사 결과

지층명	층두께(m)	S.P.T (회/30cm)	비 고
상부 점성토	1.5 ~ 9.6	0 ~ 3	• 모래 섞인 실트질 점토, 점토 • 일부구간 유기질 함유
중간 모래층	4.7 ~ 25.9	0 ~ 3	• 실트질 모래 • 육지에서 해상 쪽으로 갈수록 두껍게 분포
하부 점성토	4.7 ~ 18.4	0 ~ 13	• 점토질 실트, 실트질 점토, 세립모래 함유 • 육지에서 해상 쪽으로 갈수록 두껍게 분포

표 6. 대표시료의 물리 · 역학적 성질

공 번	심 도	함수비	비 중	액성한계	소성지수	일축강도	E50	삼축강도	통 과 율 (%)			통일분류
(MH)	(m)	(w, %)	(Gs)	(LL, %)	(PI, %)	(kgf/㎠)	(kgf/㎠)	(kgf/㎠)	#4	#200	2μ	(USCS)
3	21.0	29.7	2.64	NP	–	–	–	–	100.0	37.2	6.4	SM
8	21.0	38.4	2.66	43.3	18.1	0.562	9.86	0.45	100.0	83.9	21.7	CL
11	22.5	33.9	2.66	NP	–	0.846	25.64	0.63	100.0	95.7	11.1	ML

표 7. 입도분포곡선

구분 \ 공번	MH-3	MH-8	MH-11
심 도	21.0 m	21.0 m	22.5 m
범 례	———	·····	- - - - - -
USCS	SM	CL	ML
입도분포 곡 선			

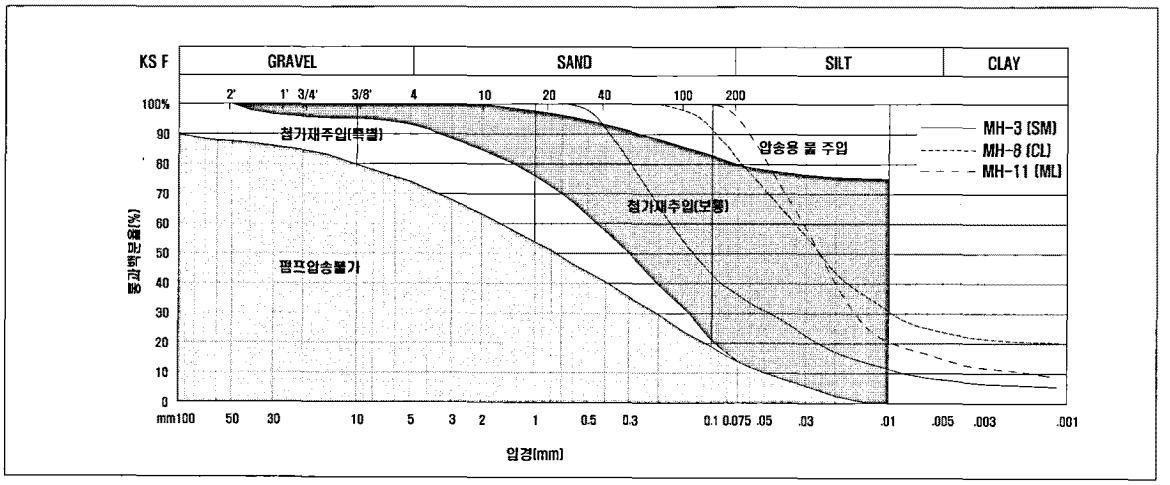
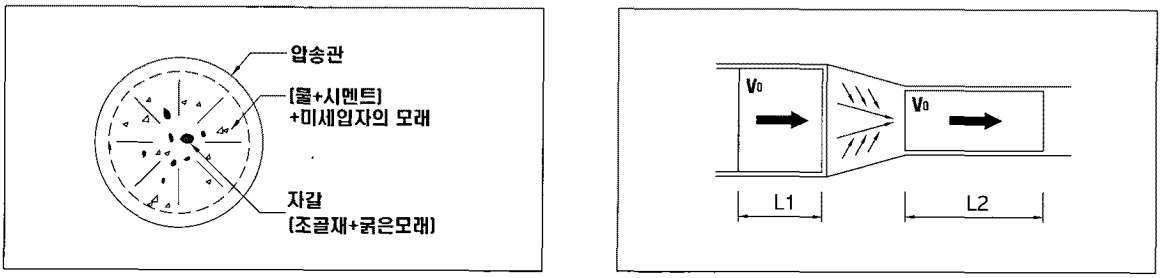


그림 8. 압송 가능 입도분포곡선과 비교 (日本地盤工學會, 1997)



(a) 압송관 단면 (b) 마찰저항 증가 형상

그림 9. 압송식 버력처리 시스템의 압송중 형상

ML, CL 층 모두 "첨가제주입 (보통) ~ 압송용 물 주입" 범위에 해당하였다. 즉, 압송을 위한 별도의 첨가제 주입 없이 굴진면 안정을 위한 첨가제 주입만으로 압송이 가능하며 일부구간에서는 물 주입만으로 압송이 가능한 것으로 나타났다.

3.2 배합시험 및 결과적용

압송식 버력처리 시스템 적용 시 압송관 내부 토사는 그림 9 (a)와 같이 콘크리트 펌프의 압송관과 유사한 거동이 예상된다. 즉, 압송관 내벽에는 극히 적은 물 또는 시멘트 paste가 마찰력으로서 작용하고, 자갈(굵은 골재)이나 굵은 모래는 관내부의 중앙부에 모이며, 압송형태는 광범위한 의미에서 버력의 점성, 고체 마찰과 유동저항에 의해 좌우되어 첨가제의 양이 큰 영향을 미친다.

또한, 그림 9(b)와 같이 압송체가 동일체적(V_o)일 경우도 관경이 작아지면 관과 토사 접촉면의 거리가 L1→L2로 길어져서 마찰저항이 커지고, 관의 내측으로 고체 막이 변형되기 때문에 내부 자갈(골재)간의 마찰저항도 증가한다.

당 현장에서는 표 8과 같이 압송버력의 처리조건을 3가지 경우로 검토하였다. 검토결과 첨가제 0.25%, 물/토사 배합비 200ℓ/m³의 Case C를 선정하였으며, 굴진거리 증가시 관 마찰저항 및 침강의 문제를 고려하여 물을 추가로 주입하였다. 한편, 첨가제를 사용하지 않는 조건에서 물을 많이 주입해야 하는 단점이 예상되는 Case B와 Case A는 배제하였다.

당 현장에서 첨가제로 사용된 제품(제품명 : Super mud)은 증점(增粘)효과와 보호피막 기능에 의한 보수성(保水性)이 높아 굴진면의 분발(噴發)을 방지하고 챔버와 커터에 굴착토의 부착을 방지하며 적당한 유동성상태로 굴착토의 배출을 용이하게 한다.

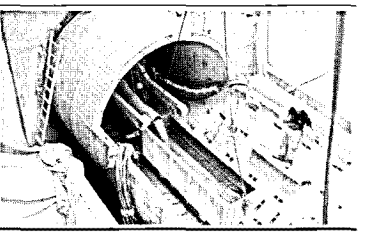
3.3 적용성 평가

3.3.1 압송배관시스템 배치

당 현장의 굴진 총연장은 L=1,270m 이며, 발진부는 실트점토질(약880m), 도달부는 모래질(약390m)로 나타났다. 압송식 버력처리 시스템을 이용하여 초기굴진(약 70m)과 본 굴진(약 680m)을 시행하였다. 본 굴진중 초기 180m 구간에서 굴진거리가 길어짐에 따라서 일평균 굴진량이 5 Ring/일(주간)로 감소되었다. 이때 굴착 대상지반 조건은 실트질 점토층으로 물 주입만으로 굴진을 시행하였다. 평균 굴진량의 저하와 압송펌프의 압송능력 저하를 고려하여, 스크류컨베이어 후방 Flexible 호스 및 신축관 대차 후방배관부위에 주수장치를 설치하여 굴진 시 계속적으로 주수를 실시하여 관벽 마찰저항을 경감시키고, 선정된 배합비에 따라 첨가제 0.25%, 물/토사 배합비 200ℓ/m³를 기준하여 현장에 설치된 탱크(45m³)에 혼합하여 버력의 압송환경을 개선한 결과 압송관의 폐색 없이 버력을 처리할 수 있었으며, 일 평균 굴진량을 12 Ring/일(주, 야간)으로 향상시킬 수 있었다. 그림 12는 굴진거리 750m까지의 압송식 버력처리 시스템의 설치 개요도이며, 압송펌프 2 대(후방대차 끝단 1 ea, 수직구 하부 1 ea)를 설치하여 버력을 배토하였다.

굴진거리 750m 이후에는 굴진대상지층이 지반조사결

표 8. 토사의 배합비 선정결과

구 분 \ Case	A	B	C	버력반출 전경
첨가제 (%)	-	-	0.25	
토사 (g)	500	500	500	
물 (mℓ)	50	100	50	
물/토사 배합비 (ℓ/m³)	200	400	200	
선 정	× (불량)	△ (보통)	○ (양호)	
비 고	첨가제 : Super Mud (제품명)			

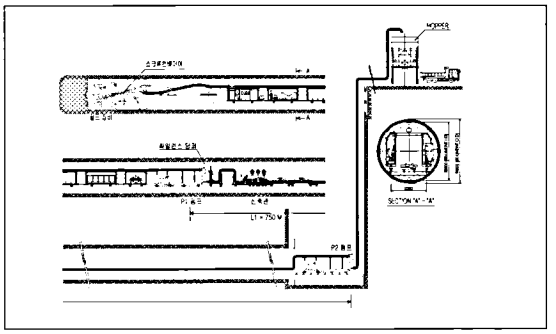


그림 10. 압송배관장비 설치개요 (굴진거리 750m까지)

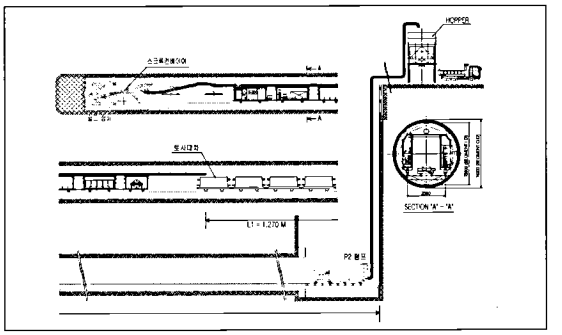


그림 11. 압송배관장비 설치 개요 (굴진거리 750m이후)

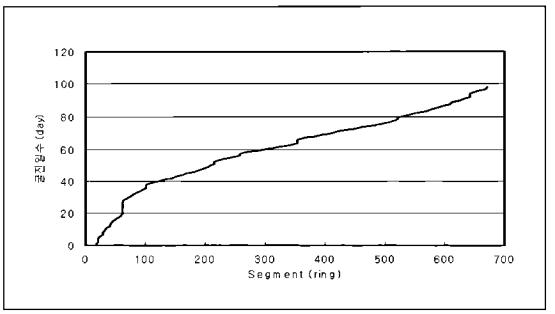


그림 12. 쉴드TBM 굴진 중 굴진속도

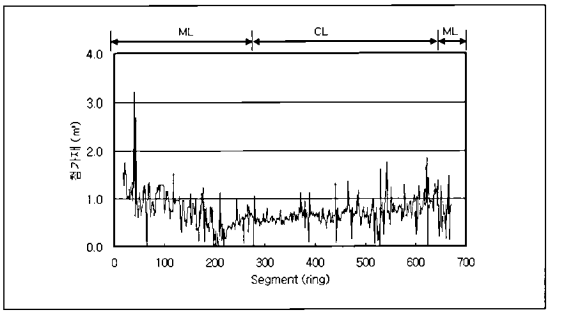


그림 13. 압송식 배토시 첨가제 사용량

과 모래질로 예상되어 압송식 버력처리 시스템을 적용한 굴진 시 관내 침강 및 마찰저항으로 압송능력이 떨어질 것으로 예상하였다. 따라서, 수직구에 P2 압송펌프를 미리 설치하여 수직구간 압송전용으로 사용하고, 모래층에서의 압송능력 저하를 고려하여 굴착토 처리 시 터널 내에서는 토사대차를 이용하여 발진수직구 하부에 있는 P2 펌프까지 운반을 하고, P2 펌프에서 지상 호퍼까지 압송하는 것으로 하였다(그림 11).

당 현장은 화력발전소의 도수로 공사로서 공기를 맞춘 통수가 무엇보다도 중요한 요소이었다. 따라서, 굴진거리 730m 이후 중계펌프를 수직구에 설치하면 굴진이 가능할 것으로 판단되었으나, 압송관 폐색 또는 P1, P2, 중계펌프 중 1대라도 고장 발생 시 수리 및 부품 교체로 인한 굴진 중단이 발생 될 것으로 예상되어, 수직구에 압송펌프 1 대(P2)를 설치하여 수직으로만 압송하고 터널 내에서는 토사대차를 설치하여 굴진하였다.

3.3.2 굴진량 분석

압송식 버력처리 시스템 적용 시 굴진량 분석을 위하여 굴진거리(Segment 수)와 굴진일수에 대하여 분석하였다. 굴진속도는 그림 12에서 그래프의 기울기로서 12 Ring/day로 일정하게 굴진하였으나, 첨가제 사용량은 점토층과 실트층에서 다른 경향을 나타내었고, 실트층에서 상대적으로 많은 양의 첨가제를 사용하였다(그림 13).

3.3.3 문제점 및 개선방안

당 현장에 사용된 압송관은 단위길이 6.0m, 세그먼트 폭 0.9m로 적용되었다. 압송관 연결을 위한 굴진장은 6.0m로서 세그먼트 6 Ring(0.9m/Ring × 6 Ring = 5.4 m) 조립후 쉴드 잭의 Stroke 굴진 0.6m를 선 시행하고 압송배관을 연결하였다. 압송관 연결 완료후 추가로 0.3m를 쉴드잭 Stroke 굴진한 다음 세그먼트를 설치해야 하는 문제점이 발생하였다. 이때 압송관 단위길이가 6m, 신축관의 최대길이가 6m 이었기 때문에 신축관은 굴진에 영향을 미치지 않았으나, 세그먼트 연장(6 Ring = 5.4m)과의 차이로 인하여 굴진을 멈추고 압송관을 연결

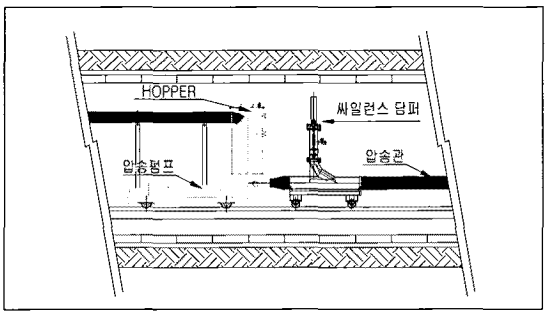
하는 등 굴진에 큰 영향을 미쳤다. 당 현장의 압송배관을 이용한 굴진 시 1 Cycle(6.3m = 세그먼트 7 Ring) 시공 순서는 표 9와 같다.

싸일런스 담퍼(Silence Damper)는 진동과 소음의 감소가 주 목적이었으나, 당 현장에서는 싸일런스 담퍼 사용에 따른 진동 · 소음의 감소 효과가 작았던 것으로 나타났다. 그 원인으로는 싸일런스 담퍼의 수직 설치높이가 터널 측벽부의 높이보다 높아 피스톤을 기울여 설치한 점, 호퍼와 근접 설치되어 펌프압을 싸일런스 담퍼가 견디지 못해 제 능력을 발휘하지 못한 점이 있으며, 후자의 영향이 컸던 것으로 판단되었다. 싸일런스 담퍼의 설치 전경 및 압송배관 설치 개요도는 그림 14와 같다.

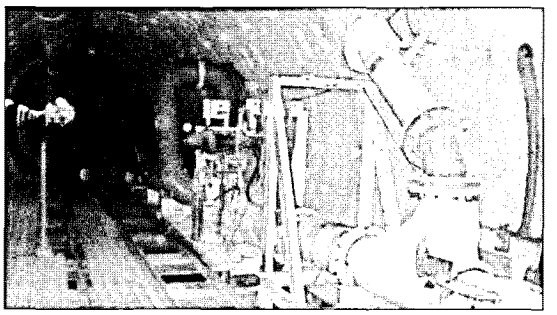
쉴드TBM 공사 중 국내 최초로 압송식 버력처리 시스템을 적용한 당 현장에서 표 10과 같은 문제점이 도출되었다. 문제점 분석 결과 압송식 버력처리 시스템 적용 시에는 배합시험을 통한 관마찰 저감방안 수립과 압송설비의 능력에 맞는 장비선정과 배치가 무엇보다도 중요할 것으로 판단되었으며, 굴진 공사 중 발생할 수 있는 압송관

표 9. 압송배관을 이용한 굴진시 1 Cycle 시공 순서

Step \ 구분	공 종	굴 진 장(m)	총 굴진장(m)	비 고
1	굴진 및 세그먼트 조립 (6 Ring)	5.4	5.4	1 Ring = 0.9 m
2	쉴드잭 Stroke 굴진	0.6	6.0	압송관 연결을 위한 굴진
3	압송관 연결	0.0	6.0	굴진 정지
4	Stroke 굴진	0.3	6.3	세그먼트 조립을 위한 굴진
5	세그먼트 조립 (1 Ring)	0.0	6.3	6.3 m = 세그먼트 7 ring



(a) 개요도



(b) 싸일런스 담퍼 설치전경

그림 14. 압송배관 설치 개요도 및 싸일런스 담퍼 설치 전경

표 10. 압송식 버력처리 시스템 적용시 문제점 및 개선방안

문 제 점	설 명	개 선 방 안
압송배관 조립 시 굴진 정지	압송배관 단위길이(6.0m)와 세그먼트 조립길이 (5.4, 6.3m)가 상이	쉴드TBM 설계단계에서 세그먼트 조립길이와 압송배관 단위길이가 같을 수 있도록 길이 조정
싸일런스 담퍼의 효율저하	토사호퍼와 근접설치되어 펌프압을 싸일런스 담퍼가 감당하지 못해 제 능력을 발휘하지 못 함.	펌프압을 고려한 장비 선정 및 설치위치를 토사호퍼와 이격
압송시 신축관의 진동 · 소음문제	버력 압송 시 신축관의 소음과 진동 등이 공사 환경 저해	첨가제와 물 주입 등으로 관 마찰저항 감소 유도 (배합시험)
압송관 폐색에 따른 공사 Risk	압송관/펌프의 폐색 및 고장 시 굴진공사 중지	- 첨가제 주입 및 압송설비의 능력 분석 철저 - 공사 전 · 중 · 후 압송설비 관리 철저
압송시 점성유지를 위한 방안	압송이 가능한 버력 특성관리 경험 부족	지층 특성에 따른 경험 축적 및 배합시험 선시행

폐색, 압송이 가능한 버력의 특성관리 등과 같은 경험축적이 뒤 따라야할 것으로 판단되었다.

4. 결언 및 제안

「ㅇㅇ복합화력발전소」도수로터널 쉴드TBM 공사는 국내 최초로 압송식 버력처리 시스템이 적용되었다. 압송식 버력처리 시스템의 적용사례를 소개하고, 향후 국내 압송식 버력처리 방식의 기술 축적과 적용성 증대를 위해 다음과 같은 제언을 하고자 한다.

(1) 당 현장에서 스크류컨베이어를 통과한 버력은 물 포화상태일 것으로 판단되었으며, 스크류컨베이어를 지나 벨트컨베이어로 이송될 경우 낙하 가능성 있고, 추락된 버력은 세그먼트 조립과 후방설비에 손상 및 추가 작업 등에 의한 쉴드TBM 굴진지연을 해결하기 위하여 펌프 압송방식을 적용하였다.

(2) 압송식 버력처리 시스템의 적용성을 평가하기 위하여 굴진대상지반중 대표시료에 대한 입도분석시험 성과와 압송가능 입도분포곡선을 비교한 결과 SM, ML, CL 층 모두 "첨가제 주입 (보통) ~ 압송용 물 주입"범위에 해당하였다. 즉, 압송을 위한 별도의 첨가제 주입 없이 굴진면 안정을 위한 첨가제 주입만으로 압송이 가능하며 일부구간에서는 물 주입만으로 압송이 가능한 것으로 나타났다.

(3) 압송식 버력처리 시스템을 이용하여 굴진중 초기 180m 구간에서 일평균 굴진량이 5 Ring/일(주간)로 감소되었다. 이때 굴착 대상지반 조건은 실트질 점토층으로 물 주입만으로 굴진하였으나, 주수와 함께 첨가제를 혼합하는 등의 압송환경을 개선한 결과 일 평균 굴진량을 12 Ring/일(주, 야간)로 향상시킬 수 있었다.

(4) 압송식 버력처리 시스템을 이용한 쉴드TBM 시공결과 압송 시 압송배관 조립에 따른 굴진정지, 싸일런스 담퍼의 효율 저하, 신축관의 소음 · 진동, 압송관 폐색에 따른 공사 Risk, 압송 버력의 점성유지 방안 등과 같은 어려움이 발생하였다. 이는 배합시험을 통한 관마찰 저감방안 수립과 압송설비의 능력에 맞는 장비선정이 무엇보다도 중요할 것으로 판단되었으며, 굴진 공사 중 발생될 수 있는 압송관 폐색, 압송이 가능한 버력의 특성관리 등과 같은 경험축적이 뒤 따라야할 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. (사)한국지반공학회, "345kV 신성남 송전선로 지중화 전력구공사 압송식 버력처리방식의 적용성 검토 보고서", 2008. 10
2. 삼호(주), "345kV 신성남 송전선로 지중화 전력구공사 설계보고서", 2007. 07
3. 정경환 외, "쉴드공법의 현황과 향후 방향", 2005년도 대한토목학회 정기학술대회논문집, 2005, pp.2961~2975
4. 현대엔지니어링(주), "ㅇㅇ복합화력 설계기술용역 도수로 기본설계서", 2007. 09
5. 현대엔지니어링(주), "ㅇㅇ복합화력 설계기술용역 해상지질조사 보고서", 2007. 06
6. ラサ商事株式會社, "土砂壓送檢討書", 2007. 12
7. (社)地盤工學會, 地盤工學 實務シリーズ3, "シールド工法の調査 · 設計から施工まで", 1997