

싱가포르 DTL2 C918A TBM 복구 사례



손 승 모
SK건설
TBM TF 과장
(paulus@sk.com)



정 성 우
SK건설
싱가포르 EW2현장 부장
(soilmecca@sk.com)



김 택 곤
SK건설
TBM TF 팀장
(tkkim@sk.com)



윤 정 욱
SK건설
싱가포르 지사장
(charmer@sk.com)

1. 머리말

싱가포르 Downtown line Phase 2는 서북쪽 Bukit Panjang역에서 남동부 Rochor역까지 연결되는 구간으로 총연장 16.6km, 4개의 환승역을 포함한 12개의 Station으로 구성되어 있으며 2015년 12월 완공을 눈앞에 두고 있다. 발주처는 싱가포르 육상교통청(Land Transport Authority, LTA)으로써, 육상교통망을 통합 연계하고, 육상 교통 정책업무를 총괄 기획하고 있는 싱가포르 교통부 산하기관이다.

본 원고에서는 SK건설이 당시 특수한 상황의 제한 경쟁 입찰을 통해 싱가포르 C918A를 수주한 배경 및 시공 중 문제 해결과정에 대해 소개하고자 한다.

2. 싱가포르 DTL2 C918A 공구 개요

2.1 제한 경쟁 입찰을 통한 수주

Downtown line Phase 2의 총 12개의 Station 및 Tunnel은 다시 10개 공구로 나뉘어 발주되었으며, 그 중 King Albert Park Station에서 Sixth Ave. Station(C917)과 Tan Kah Kee Station을 거쳐 Botanic Garden Station(C918)까지 연결되는 2개 공구를 Alpine Bau GmbH사가 수주하였다(그림 1). 하지만 공사를 진행하던 중 Alpine사는 재정적 이유

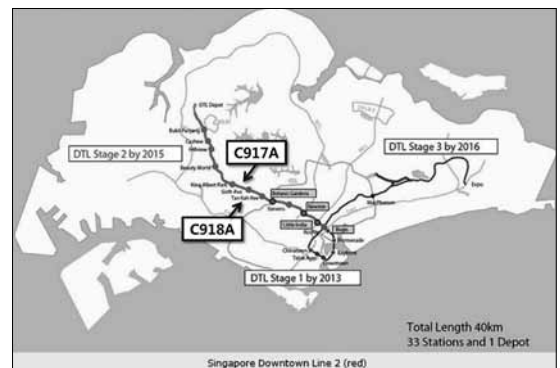


그림 1. 싱가포르 DTL2 노선도 및 C917A, C918A 위치도

로 2013년 6월 29일 파산하게 된다. 이에 따라 발주처인 LTA는 인접공구인 C916의 시공사인 McConnell Dowell사와 함께 한 팀을 긴급히 구성하여 현장 유지관리를 실시하였다. 이는 발주처가 해당 공구의 새로운 시공사를 선정하는 기간 동안 Operation 준비를 완료하여 즉시 시공에 착수하기 위함이었다.

이 기간 동안 McConnell Dowell사는 당시 시공 중인 C916공구와 인접하여 거리적인 이점이 있었던 C917공구의 입찰에 참여하였으며, 당사를 포함한 인근 공구 시공사들도 2달여간의 제한 경쟁 입찰에 참여하게 된다. 그 결과 King Albert Park Station과 Sixth Ave. Station 및 해당 구간의 Tunnel 잔여구간 시공은 McConnell Dowell(C917A), Tan Kah Kee Station 및 Botanic Garden Station까지의 Tunnel 잔여구간 시공은 당사(SK건설, C918A)가 선정 되었다.

2.2. C918A공구 개요

C918A공구는 그림 2와 같이 당초 C918공구의 총 2.2km 중 굴착이 완료된 Bored Tunnel(EPB Type) 570m를 포함하여 450m의 Cut & Cover Tunnel과 250m의 Station, 그리고 920m의 Twin Bored Tunnel(Slurry Type)로 구성되며, 공기는 2013년 8월 29일부터 2016년 1월 30일까지 29개월로 계약되었다.

2.3 지질조건

싱가포르의 지질은 그림 3에서 보는 바와 같이 서부의 Jurong Formation(퇴적암) 및 Kallang Formation(연약지층), 중부의 Bukit Timah Granite(화강암층), 동부의 Old Alluvium(충적층 계열), 남부 해안의 Kallang Formation으로 구성되어 있으며, C918A공구는 Bukit Timah Granite과

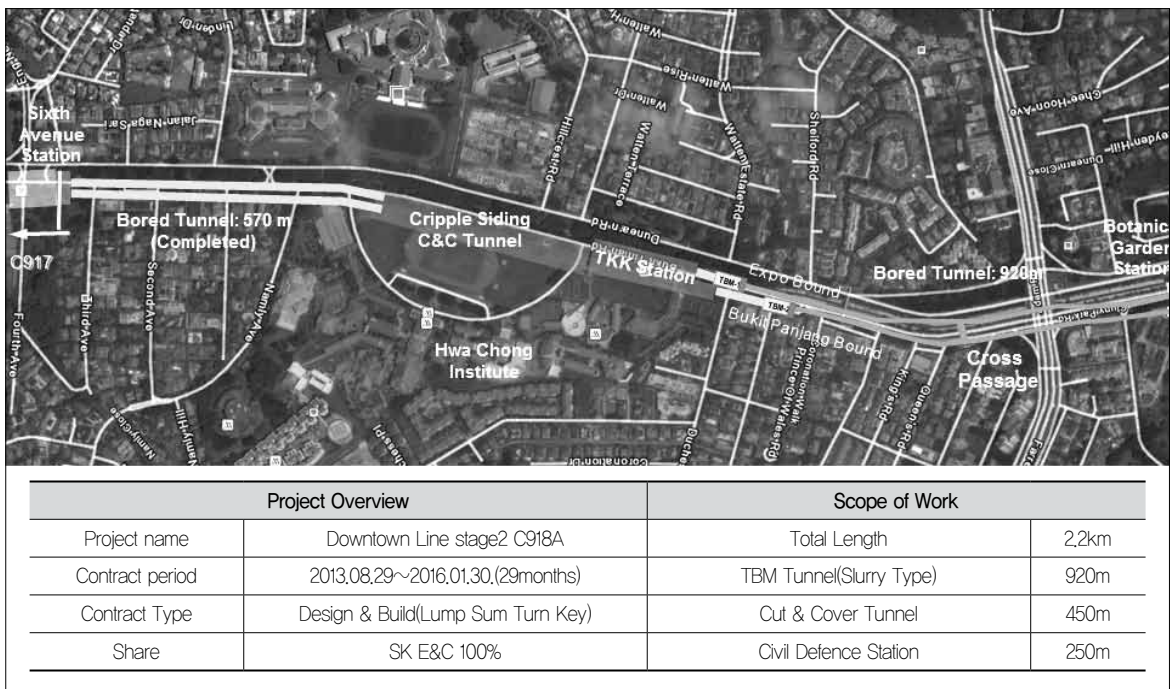


그림 2. C918A공구 노선 및 구조물 개요

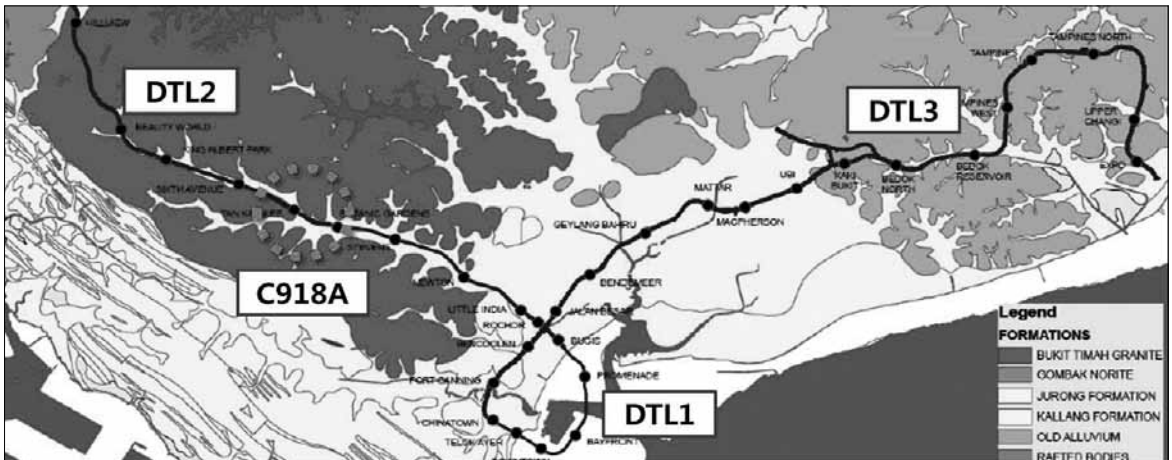


그림 3. Singapore DTL 1~3 노선도와 지질도

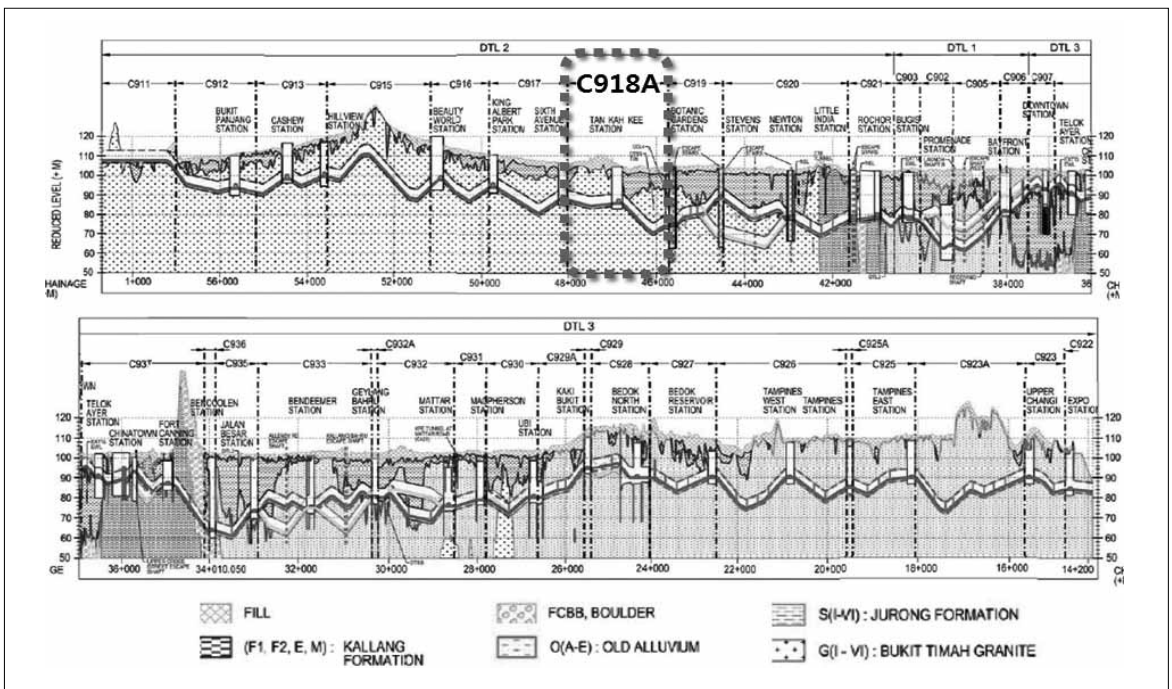


그림 4. Singapore DTL 1~3 종단에 따른 지질도

Kallang Formation이 혼재된 지역에 위치한다. 본 C918A는 대부분 Bukit Timah Granite으로 구성된 다(그림 4).

그림 5는 Bukit Timah Granite의 풍화 정도에 따라 G-I부터 G-VI까지 등급에 따른 특성을 나타내며,

이중 G-I~IV는 암반층에 해당되고, G-V~VI는 토사층에 해당된다. 본 현장은 Tan Kah Kee Station 및 Botanic Garden Station까지의 Slurry TBM 굴착 시 점부의 토사와 암반의 교호하는 복합지반 구간을 포함한 난공사 구간이다.

Grade	Classifier	Characteristics from LTA Civil Design Criteria (A6)	Typical Characteristics from BS5930:1999
GI	Fresh	Intact Strength, unaffected by weathering. Not easily broken by a hammer – rings when it's struck. No visible discolouration.	Unchanged from original state.
GII	Slightly Weathered	Not broken easily by hammer – rings when struck. Fresh rock colours generally retained but stained near joint surfaces.	Slight discolouration, slight weakening.
GIII	Moderately Weathered	Cannot be broken by hand. Easily broken by hammer. Makes a dull or slight ringing sound when struck by hammer. Stained throughout.	Considerably weakened, penetrative discolouration. Large pieces cannot be broken by hand.
GIV	Highly Weathered	Core can be broken by hand. Does not slake in water. Completely discoloured.	Large pieces cannot be broken by hand. Does not readily disaggregate (slake) when dry sample immersed in water.
GV	Completely Weathered	Original rock texture preserved, can be crumbled by hand. Slakes in water. Completely discoloured.	Considerably weakened. Slakes. Original texture apparent.
GVI	Residual Soil	Original rock structure completely degraded to a soil, with none of the original fabric remains. Can be crumbled by hand.	Soil derived by in situ weathering but retaining none of the original texture or fabric.

그림 5. Bukit Timah Granite 풍화도에 따른 특성

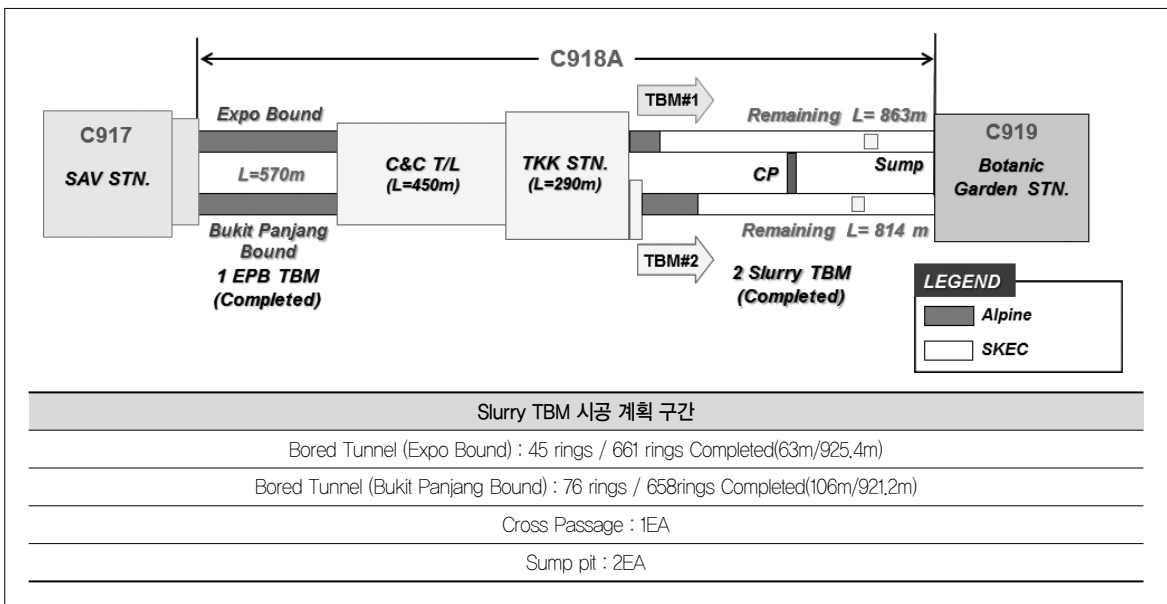


그림 6. C918A공구 시공 계획 구간

3. 착공 단계

당초 C918 공구는 1대의 EPB Type TBM을 이용한 570m Twin Tunnel, Cut & Cover Tunnel 450m, Civil Defence Station 290m, 2대의 Slurry Type

TBM을 이용한 920m Twin Tunnel로 계획되었다. 이중 EPB Type TBM을 이용한 570m Twin Tunnel 은 이미 굴착이 완료되었으며, Slurry Type TBM 을 이용한 920m Twin Tunnel 중 Expo Bound는 63m, Bukit Panjang Bound는 106m를 굴진하던 중

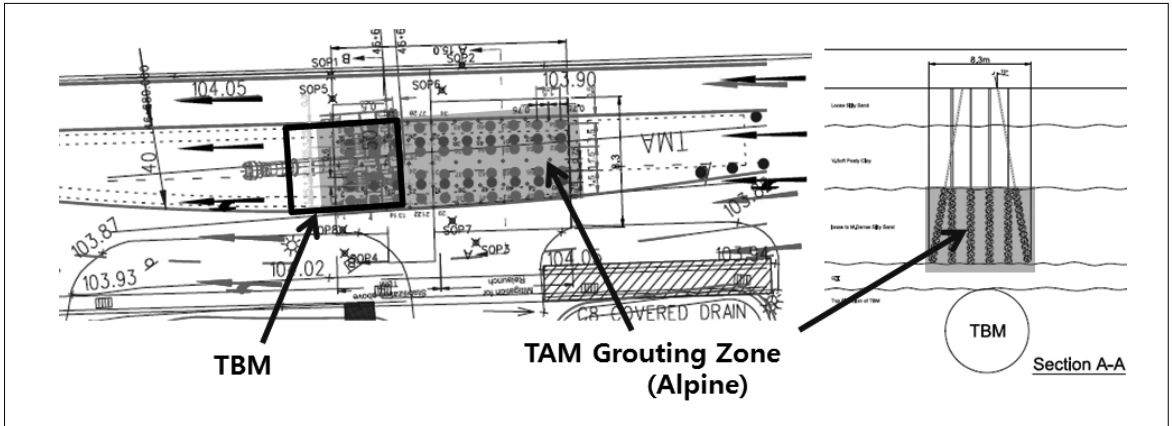


그림 7. TAM Grouting Zone(by Alpine)

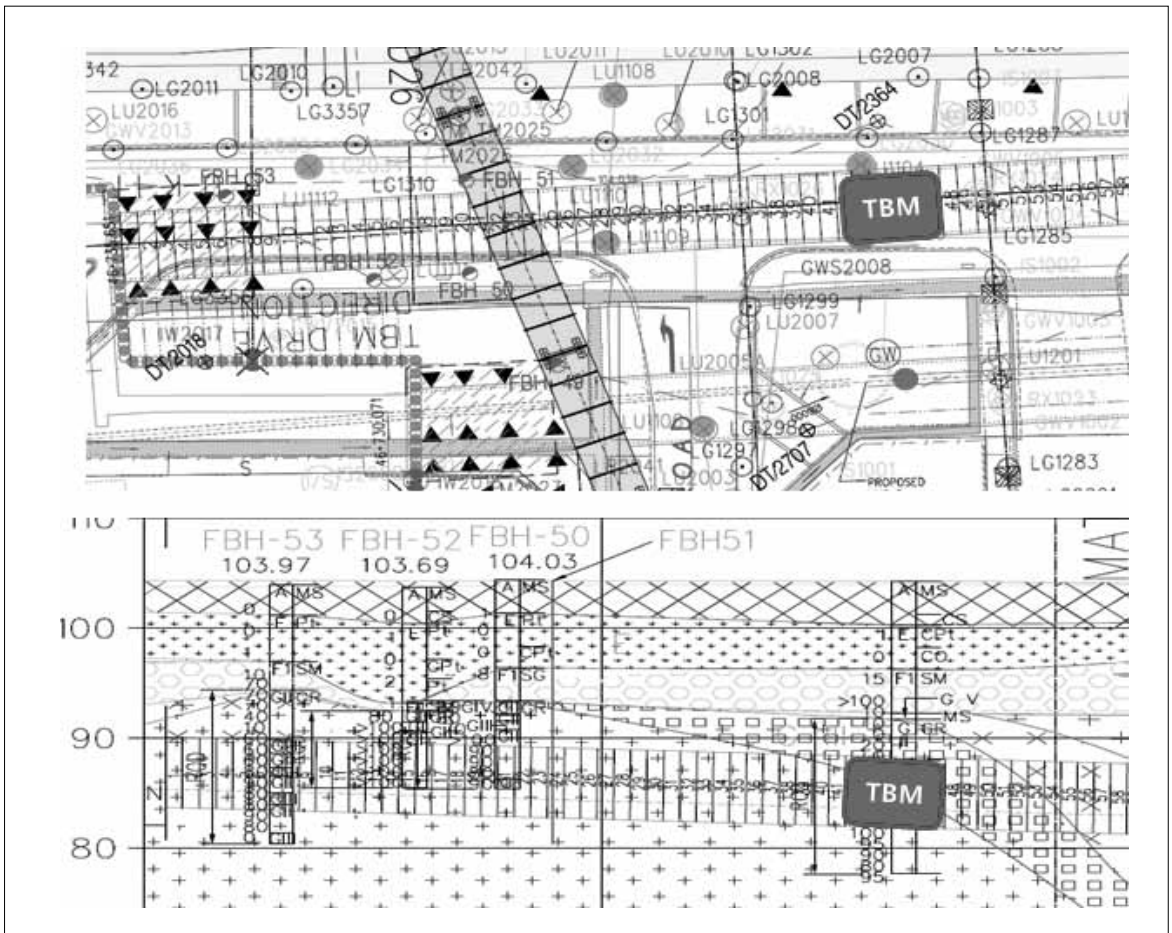


그림 8. TBM 위치 평면도 및 지질도(Expo bound)

Tunnel 내에서 작업을 중단한 상황이었다(그림 6).

특히 TBM 2기 모두 굴진을 중단한지 2달 이상 됨에 따라 굴착 전면부의 지반 교란이 우려되었으며, 그 중 Expo Bound TBM의 경우 굴진 이상 및 시공사 교체로 인해 4달 이상 굴진이 멈춰 있었던 상황이었다.

입찰 전 발주처의 사전 입찰 브리핑에서 Bukit Panjang Bound TBM은 운영 중이라고 밝혔으며, Expo Bound TBM은 2013년 4월 굴진 중 커터 토크가 높고 굴진 시 Chamber내에서 이상소음이 발생하였음에도 불구하고 무리하게 굴진을 진행하는 과정에서 결국 커터헤드가 회전하지 않아 굴착이 중단된 것으로 알려졌다. 따라서 Compressed air를 이용한 커터헤드 Intervention을 실시하였으나, 이 과정 중 지상부 도로에서 Air Leaking이 발생하였다고 전해진다. 이에 따라 Alpine사는 2013년 6월 TAM Grouting을 실시하였으나(그림 7), TBM 복구 과정에서 파산하게 되어 Care taking contractor인 McConnell Dowell사가 Maintenance 실시중이라는 기본적인 정보를 확인할 수 있었다(그림 8).

당시 지반조건은 G I 에서 G III로 변경되는 Mixed ground 조건이었으나 Alpine에서는 이러한 지반 조건을 고려하지 않고 무리하게 Cutter head 회전을 실시하여 굴진 시 지반 교란이 발생하였으며, 그에 따라 장비 Stuck됨과 동시에 Cutter Head Intervention 시 Air Leaking이 발생하였던 것으로 추정된다.

당사가 수주한 2013년 9월 Care taking contractor인, McConnell Dowell사와의 인수인계 과정에서 Expo Bound TBM의 기본적인 operation 기능은 정상적으로 작동가능하다는 의견을 들었으나 TBM stuck 원인에 대한 정보는 없는 상황이었다.

4. TBM 복구

기본적인 현장 점검 후 굴진을 재개하려고 시도하였으나 Cutterhead가 시계방향으로 회전이 되지 않음에

따라 커터헤드 상태 확인을 위해 TBM Intervention을 실시하였다. 그 결과 굴착부 10~11시 방향에 2m × 2m 크기의 공동부 및 커터헤드 전방 일부 굴착면 및 Chamber 내에서 화강암 지대의 풍화 잔존물인 Boulder 형태의 핵석(Corestone)을 발견하였다.

이러한 조사결과를 바탕으로 발주처와 TBM 장비사와 함께 현장을 오가며 기술 회의를 진행하였다. 그 결과 기존 TBM의 커터헤드가 시계방향으로 회전이 잘 되지 않는 주요 원인은 4개월 이상 TBM이 방치되면서 지반이 이완되고, 10~11시 방향의 핵석이 일부 커터헤드에 밀착 접촉하고 있으며, Chamber내의 핵석도 원활한 커터헤드 회전에 방해를 주는 것으로 추정하였다.

이에 따라 TBM복구를 위한 첫 번째 방법으로 Chamber내 핵석을 제거하기 위해 Slurry Bypass를 시도하였다. 그러나 Slurry Bypass를 진행하면서 TBM 상부에 있던 전석에도 영향을 주게 되어 공동(약 80m³)이 발생한 것을 확인하였고 또한, 기존 TBM이 끼이게 된 원인이 Wedged 형태의 핵석임을 추가적으로 파악하게 되어 다른 대책의 강구가 필요하게 되었다.

TBM 전면부의 약 80m³의 공동에 의한 추가 붕락 방지 및 운행 중인 도로의 안정성을 위해 발주처 및 관련 자문기관에서는 싱가포르에서 일반적으로 수행되는 방법인 붕락 구간을 지상부에서 모르타르를 주입하는 Grouting을 제안하였으나, Grouting 실시 및 양생

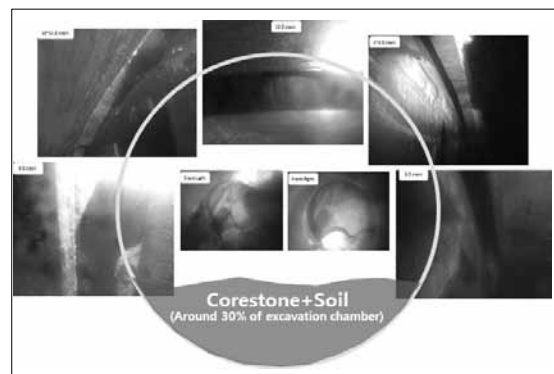


그림 9. Cutterhead Intervention 결과

후 Chamber내의 청소 등 각종 굴진을 위한 준비기간 까지 고려하면 최소 2달 이상이 소요될 것으로 예상되었다.

Alpine사의 파산 전에도 이미 공정이 지연된 상태였고, 파산 이후 입찰 기간, 이후 재굴진을 위한 TBM 복구기간을 고려하면, 발주처의 전체 노선 개통에도 영향을 줄 것임을 우려하여 당사에서는 복구기간을 최소화할 수 있는 Procedure를 그림 11과 같이 제안하고 발주처 승인 하에 실시하였다.

즉, 먼저 Chamber내 Compressed air상태에서 붕

락부의 지반 안정성을 확인하여 슛크리트를 포설하였다. 이후 커터 개구부를 임시로 폐쇄하고 전방 공동부를 모르타르로 밀실하게 채워 TBM 전방 안정성을 확보한 상태에서 Chamber 내의 잔여 핵석을 제거하고, 파손된 커터는 새로운 커터로 교체하였다.

약 2주간에 걸친 최종 정비 후 커터의 회전을 확인한 결과 한 방향으로 회전하여 굴진이 가능하였고, 장비 제조사와 TBM rolling을 monitoring하면서 5개의 ring을 설치하여 모르타르로 채워진 구간을 통과하게 되었다. 이 후 양방향으로 회전이 가능하여 정상적

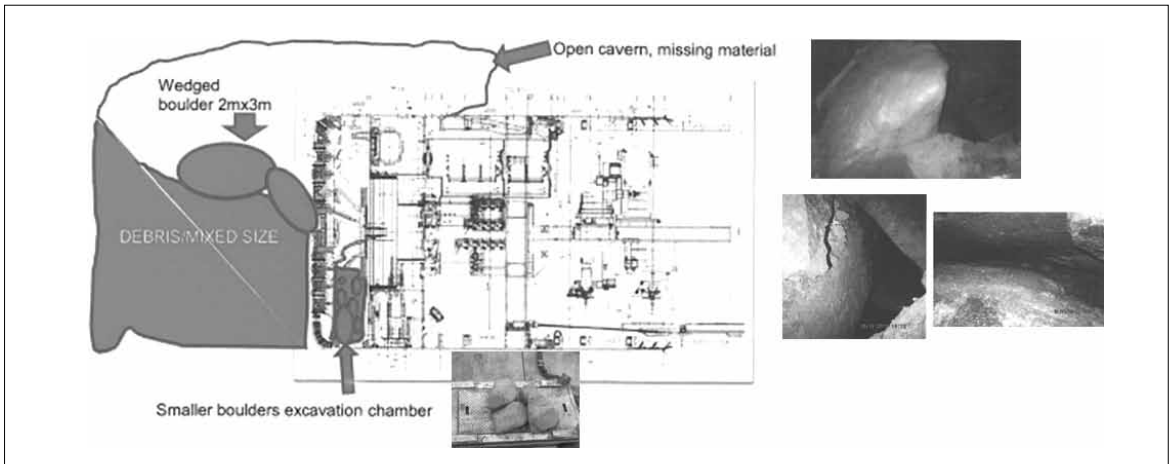


그림 10. Slurry Bypass에 따른 추가 붕락

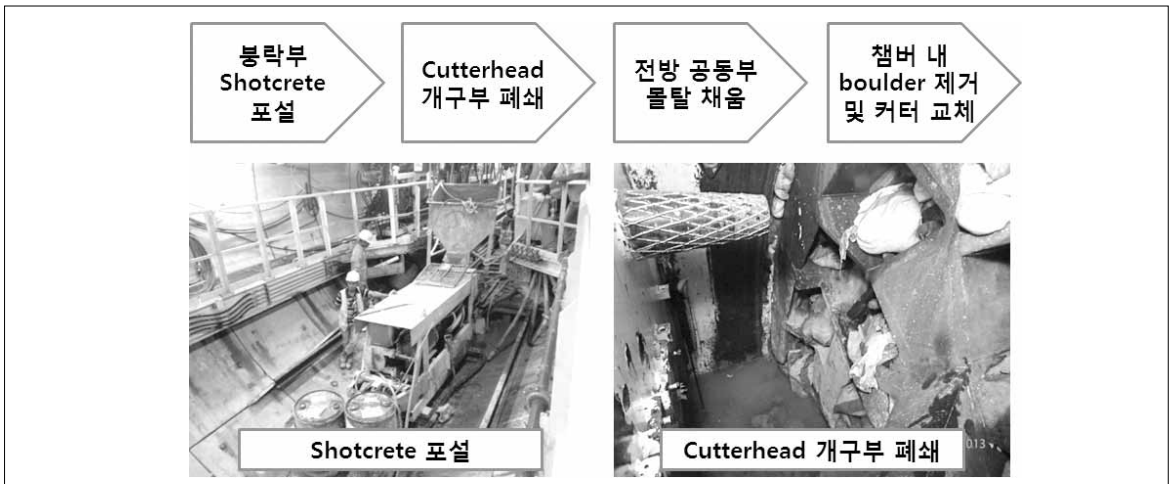


그림 11. TBM 복구 과정

인 굴진을 이어갈 수 있었다.

굴진 시 TBM 장비의 Tail 부분이 모르타르로 채워진 구간을 통과할 때 막장압, Backfill Grouting 압력 등을 확인하여 추가적인 Backfill Grouting 및 2nd Grouting 실시로 좀 더 밀실하게 지반을 보강하였다. 마지막으로 TBM이 해당 구간을 완전히 벗어난 후 지상부의 도로의 안정성을 충분히 확보하기 위해 상부에서 추가적으로 Grouting 실시하였다.

5. 맺음말

싱가포르 DTL 2단계 C918A공구는 당초 2009년 9월 Alpine Bau GmbH가 시공적격자로 선정된 후

2013년 6월까지 시공하였으나, 재정적인 파산으로 인하여 2달여의 재입찰과정을 거쳐 당사가 시공 중인 현장에 적격자로 선정된 특이한 사례이다. 본 기술보고에서는 C918A공구의 재입찰에 관련된 사항과 4달여 기간 동안 굴진을 멈춘 TBM 장비를 복구하는 사례를 기술하였다.

이후 TBM은 지속적인 Value Engineering을 통해 재입찰 당시의 계획보다 효율적 굴진을 달성하여 수주 계약 공기를 단축하였다. 따라서 발주처의 당초 계획대로 금년 내에 완공을 달성할 것으로 예상된다. 이와 같은 결과는 기술에 대한 현장의 과감한 의사결정과 구성원들의 헌신적인 노력이 있었기에 가능했다고 판단된다.

회비 납부 안내 (지로 및 온라인)

학회 사무국에서는 연중 수시로 학회비를 수납하고 있사오니, 홈페이지에 로그인 하시어 연회비 및 미납회비 확인 후 납부하여 주시기 바랍니다. 회원여러분의 적극적인 협조를 부탁드립니다. 문의 사항이 있으면 사무국으로 연락하여 주시기 바랍니다.

• 은행 무통장(타행) 입금 국민은행 계좌번호 : 534637-95-100979 예금주 : (사)한국지반공학회

• 카드결제 홈페이지 하단 “회비납부”로 들어가서 결제하시기 바랍니다. (본인정보필수)

• 지로용지 기입시 유의점

- 지로 장표상의 금액과 납부자 관련정보(회원번호, 성명, 납입금 종류 등)는 검정색펜으로 정자체로 표기해 주시기 바랍니다.

- 납부금액란에는 정확한 위치에 정자로 아라비아 숫자만 기입합니다.

납부금액 앞뒤에 특정기호(₩, -, * 등)를 표시 할 수 없습니다.

※ 지로용지가 필요하신 분은 지반공학회 사무국(02-3474-4428/박소영 대리)으로 전화주세요