

싱가포르 Transmission Cable Tunnel NS1공구의 설계사례



김재영
삼성물산 건설부문
토목ENG센터
지하토목팀
공학박사, 과장



문준식
경북대학교
건축토목공학부
토목공학과
공학박사, 조교수



장석부
삼성물산 건설부문
토목ENG센터
지하토목팀
공학박사, 부장



이승복
삼성물산 건설부문
토목ENG센터
지하토목팀
토질및기초기술사, 팀장

1. 머리말

싱가포르 Transmission Cable Tunnel 공사는 장기적인 전력수요를 충족시키기 위한 전력 공급망 확장 Pro-

gramme의 일환으로 추진되는 프로젝트이다. 남북 18.5km (Gambas Ave. ~May Road), 동서 16.5km(Aver Rajah~Paya Lebar)의 400kV 전력 배송망 설치를 위한 지하 터널공사로서 그림 1에 개요를 나타내었다.

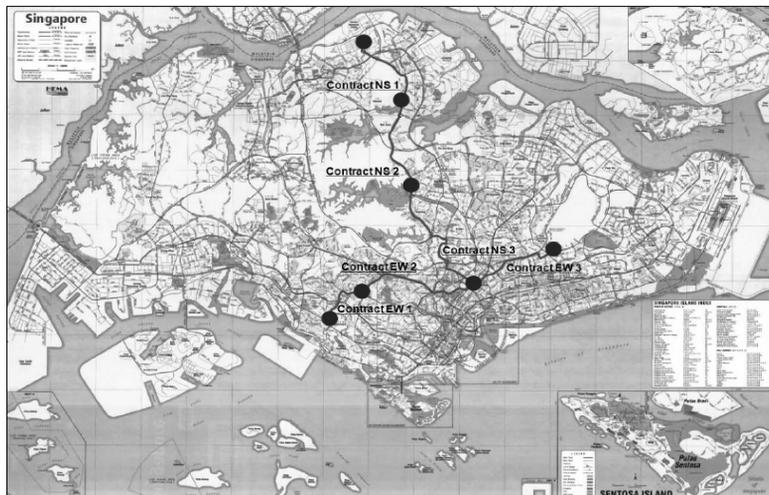


그림 1. 싱가포르 Transmission Cable Tunnel공사의 노선개요

본 프로젝트는 2000년 Senoko~Gambas 및 Tuas~Jurong간 전력구터널 이후 10년만에 발주되는 대심도 전력구 터널공사로서, 발주처는 싱가포르 및 호주에서 전력배송 사업을 수행중인 Singapore Power Group 산하 SP Power Assets(SPPA)이며, 발주처 기본설계는 Mott MacDonald (North~South)와 WorleyParsons(East~West)에서 수행하였다.

당사가 수행중인 Transmission Cable Tunnel NS1공구는 싱가포르 남북방향 전력구 공사인 NS-line중 총 연장 5.82km의 NS1구간이다(그림 1). 최종 목적구조물은 내경 6.0m, 세그먼트 두께 300mm의 TBM터널, 작업구 및 NATM 연결터널, 지상부 Building 및 M&E설비(환기, 냉각, 비상전기, 방재시설 등)이다. 본 과업은 TBM터널 구간이 암반강도가 높고 절리가 적은 Bukit Timah 화강암층을 주로 통과하며, 복합지반 등 암석시험결과와 인근 사례의 검토내용에 대해 소개하고자 한다.

2. 과업구간 NS1공구의 개요

당사가 수행하는 NS1공구는 싱가포르 북부 Gambas Ave와 Mandai에 위치하며, 총 연장 5.86km 구간으로 TBM tunnel을 포함한 shaft 3개소 및 mined adit tunnel (NATM), Ventilation building, Equipment building으로 구성되어 있다. 본 공구의 시점인 Gambas Shaft는 기존 변전소와 연결하는 계획이다. NS1공구의 노선은 그림 2와 같이 주로 기존 도로를 따라 계획되었으며, 터널은 약 36.8m~58.2m의 대심도에 위치하고 있으며, 총 2대의 TBM(slurry type)이 각각 Gambas와 Mandai shaft에서 발진하여 Sembawang shaft에 도달하여 해체될 계획이다.

TBM터널구간은 그림 3과 같이 주로 Bukit Timah 화강암층을 통과하며, 일부 Old Alluvium의 토사층이 출현할 것으로 예상되었다. 이러한 지반조건 및 통과심도를 고려하여 발주처에서는 EPB(Earth Pressured Balanced)

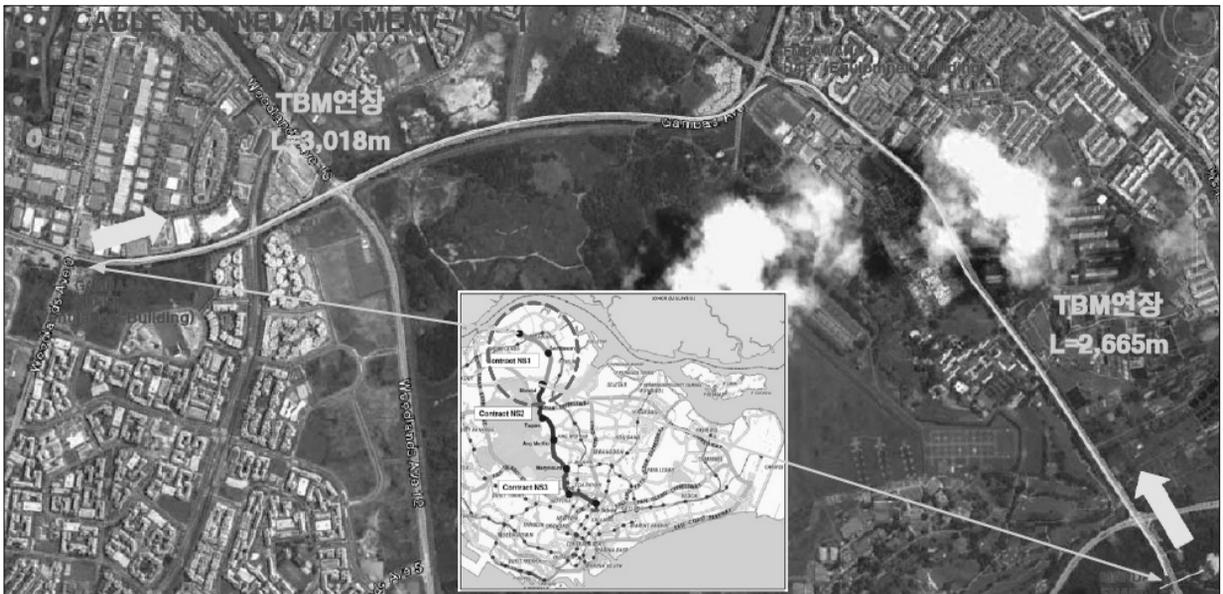


그림 2. NS1구간의 평면계획

TBM대비 마모에 유리하고, 수압에 대한 대응이 가능한 Slurry type의 TBM을 사용토록 하였다.

3. TBM터널구간의 지반조사결과

3.1 지반조건

싱가포르 Transmission Cable Tunnel NS1공구의 지

반조건을 그림 3에 나타내었다.

Gambas~Sembawang구간은 연장 3,018m로 터널통과 심도는 36.8m~44.8m, 발주처에서 제공한 보링 조사 결과는 총 69공으로 노선을 따라 약 44m 간격으로 실시되었다. TBM 통과구간에는 전반적으로 압축강도가 높은 Bukit Timah 화강암 GI~GIII등급이 70%, Mixed 구간이 20%, 토사구간이 10%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한 Bukit Timah 화강암의 경우, 석영함유량(22~63%)이 높아 Cutter의 마모가 클 것으로 예측되었다. Sembawang~

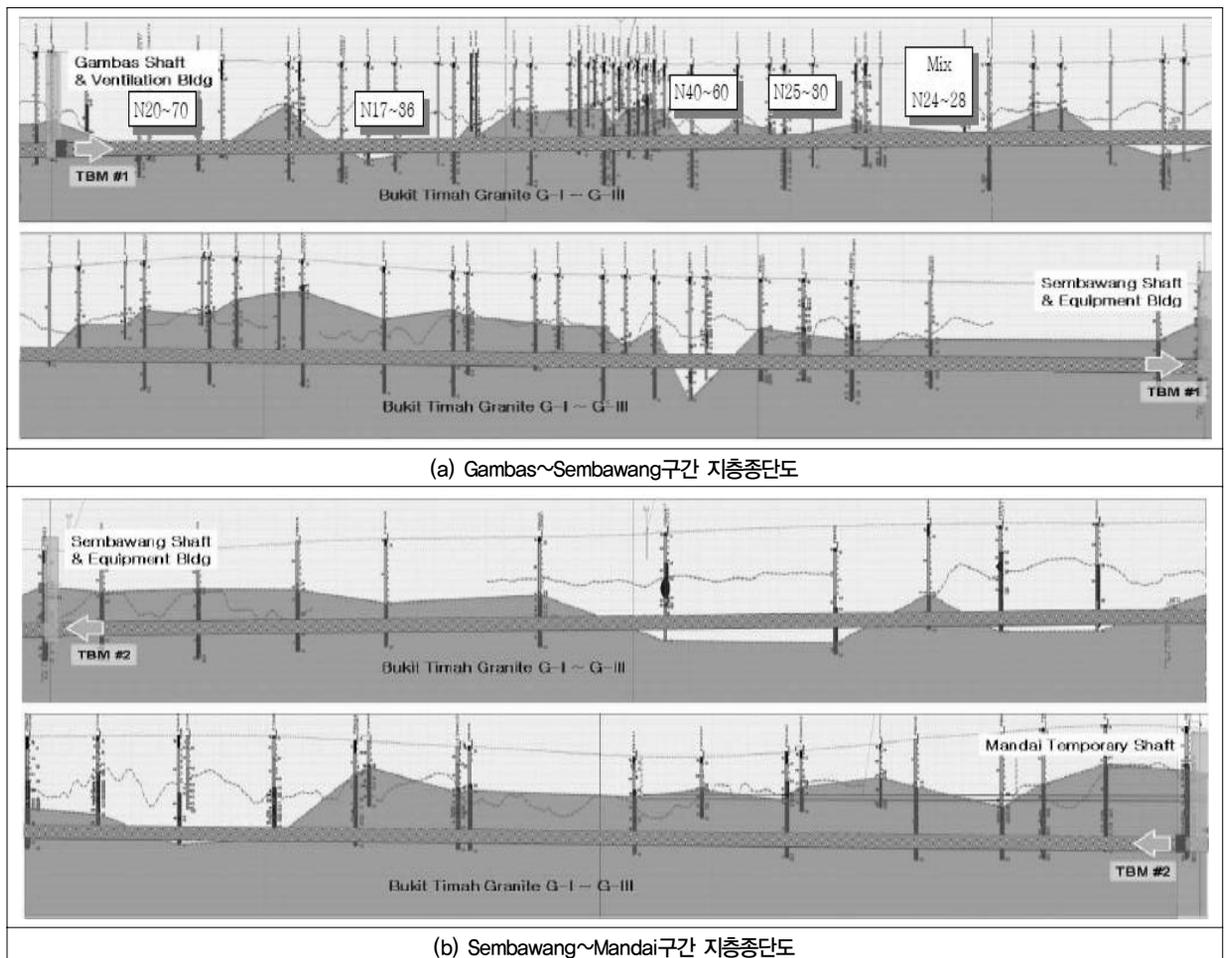


그림 3. Transmission Cable Tunnel NS1공구의 지층종단도

표 1. Bukit Timah 화강암의 암반등급 및 분류

Grade	Classifier	LTA Civil Design Criteria 제시
GI	Fresh (신선)	풍화에 의한 영향없음. 해머에 의한 타격시 쉽게 깨지지 않음.
GII	Slightly Weathered (약간 풍화됨)	타격시 해머에 의해 쉽게 깨지지 않음.
GIII	Moderately Weathered (적당히 풍화)	손으로 깎 수 없음. 해머에 의해 쉽게 깨짐.
GIV	Highly Weathered (풍화높음)	코어는 손으로 깎 수 있음. 수침시 파쇄, 분해되지 않음
GV	Completely Weathered (완전 풍화)	원지반암의 감축이 살아 있고, 손으로 깎 수 있음. 수침시 파쇄, 분해됨.
GVI	Residual Soil (풍화토)	원지반은 본래의 구조가 남아있지 않은 토사로 변화했고, 손으로 깎 수 있음

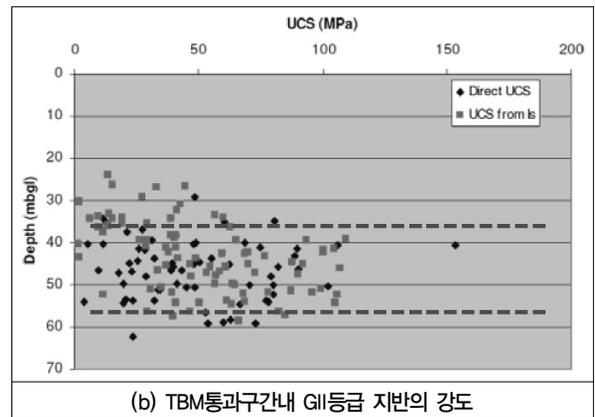
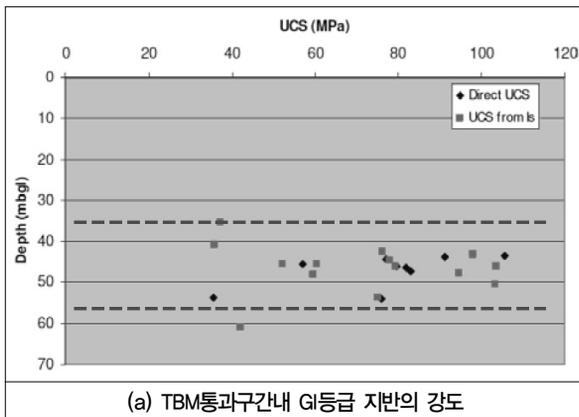


그림 4. GI, GII등급 TBM 통과구간의 압축강도분포

Mandai구간은 연장 2,665m로 터널통과 심도는 38.0m~58.2m, 보링 조사는 총 31공이 수행되었으며, 노선을 따라 약 86m 간격으로 실시되었다. 이 구간도 전반적으로 압축강도가 높은 Bukit Timah 화강암 GI~GIII등급이 터널연장의 72.3%, Mixed 구간이 11.1%, 토사구간이 16.6%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한 이 구간에서도 Bukit Timah 화강암의 경우, 석영함유량(22~63%)이 높아 Cutter의 마모가 클 것으로 예측되었다.

표 1에 Bukit Timah 화강암의 암반등급 및 분류에 대

해 나타내고, 그림 4에 TBM터널 통과구간에 분포하는 GI, GII등급 Bukit Timah 화강암의 압축강도 분포를 나타내었다. 표 2에는 발주처에서 시행한 지반조사결과에 따른 설계지반정수를 참고를 위해 나타내었다.

3.2 Bukit Timah 화강암의 암석시험

본 과업구간의 TBM 통과구간에 분포하는 Bukit Timah 화강암에 대해 발주처에서는 다양한 암석시험을 수행하

표 2. 발주처 제시 설계지반정수

Div.	Bulk Unit Weight γ_s (kN/m ³)	Coefficient of Earth Pressure at rest K_0	Effective Angle of Friction Φ' (°)	Effective Cohesion c' (kPa)	Undrained Shear Strength c_u (kPa)	Elastic Modulus E_u (MPa)	Effective Elastic Modulus E' (MPa)	Coefficient Permeability k (m/sec)	
Fill (granular)	18.0	0.5	30	0	-	-	1.5N	1.0E-06	
Fill (cohesive)	18.0	0.5	28	0	20	250cu	Eu/1.2	1.0E-08	
F1*	18.0	0.7	30	0	-	-	1.5N	1.0E-06	
F2**	18.5	1.0	27	0	30	300cu	Eu/1.2	1.0E-08	
E***	15.0	1.0	22	0	5kPa (d≤5m) 0.22P'0≤20kPa (d>5m)	200cu	Eu/1.2	1.0E-08	
Bukit Timah Formation	GVI	18.5	0.8	30	3	25kPa (d≤5m) 5z (5m<d≤26m) 130 kPa (d>26m)	400cu	Eu/1.2(cohesive) 1.5N (granular)	1.0E-06
	GV	19.0	0.8	30	5	75kPa(d≤10m)10z (10m<d≤20m)200 kPa (d>20m)	400cu	Eu/1.2(cohesive) 1.5N (granular)	5.0E-06
	GIV	23.0	0.8	35	50	-	300 (Em)	7.0E-06	
	GIII	24.0	0.8	38	400	-	4000 (Em)	1.0E-06	
	GII	25.0	0.8	45	600	-	6000 (Em)	5.0E-07	
	GI	25.0	0.8	50	1000	-	15000 (Em)	1.0E-07	

*F1 : Fluvial Sand Loose to medium dense yellow and brown silty SAND
 **F2 : Fluvial Clay Soft to firm grey sandy CLAY
 ***E : ESTUARINE Very soft dark grey peaty CLAY

표 3. 암석시험별 결과 정리

구분	GIV~G I	GIV	GIII	GII	GI
Cerchar abrasivity test	0.28~6.44	0.28~5.95	1.30~6.41	1.30~6.44	1.30~6.23
Abrasion Cutter Steel test	0.15~17.4	0.20~5.15	0.25~10.6	0.15~12.7	0.40~17.4
Siever's J-Value test	2.5~1544	5.2~1544	4.7~610	3.7~150	2.5~58
Brittleness test	7.35~95.2	52.7~95.2	40.0~80.5	7.63~71.2	7.35~67.4
Los Angeles Abrasion test	0.14~0.75	0.20~0.67	0.19~0.75	0.14~0.41	0.16~0.30

였으며, 표 3에 시험결과를 정리하여 나타내었다.

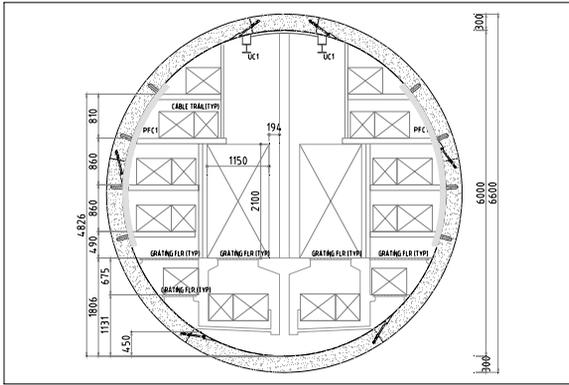
암석의 마모성을 평가하는 Cerchar abrasivity 시험결과, 0.28~6.23으로 평균 3.70으로 나타났으며, 마모도가 높을 것으로 예상되었다.

Cutter마모에 대한 잠재적인 평가를 위한 Abrasion Cutter Steel 시험결과는 0.2~17.4의 범위로 나타났으며, GIV와 GIII에서는 낮은 값을 나타내었다.

암석의 표면경도를 측정, 암석의 엽리에 대해 수평방향으로 측정된 SJ값으로 DRI(Drill Rate Index)산정, DRI

는 TBM의 굴진성능을 산정하는 변수로 암석의 S20과 SJ 값으로부터 경험적인 그래프를 이용하여 산정하는 Siever's J-Value Test를 수행하였다. J-Value 결과는 GII와 GIII 등급의 화강암이 GI등급보다 단단한 것으로 나타나지만, 실제로는 GI~GIII는 거의 비슷할 것으로 예상하였다.

취성도, 충격시험시 반복되는 충격에 의한 암석의 분쇄 저항성을 측정하는 Brittleness 시험결과, 7.35~80.05의 범위에 분포하고 있었다. 일반적인 Bukit Timah 화강암의 특성과 같이 GIV등급이 분쇄가 쉽고, GI등급은 분쇄



터널내공		6.0m
세그먼트	두께 / 폭 / 강도	300mm / 1400mm / 60MPa
	분할 및 연결방식	5+1key, Grummets on all bolts
	형상	All Taper
	지수재	Hydrophilic gaskets +EDPM gaskets
최소 곡선반경		R=200m
내구연한		120년
종단구배		±0.5%이내

그림 5. TBM터널의 설계

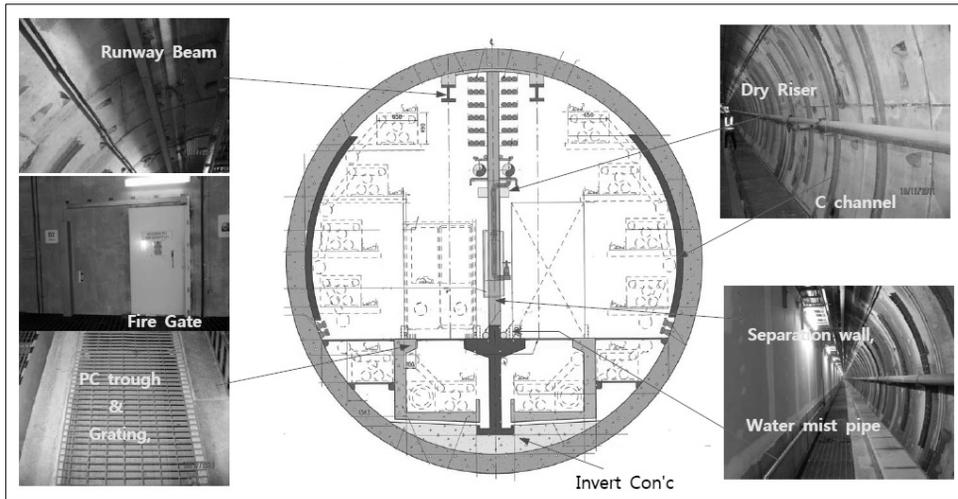


그림 6. TBM터널의 시설개요

되기 어려운 것으로 예측되었다.

Los Angeles 마모시험결과, 과업구간에서는 15~67%의 범위로 나타났으며, Bukit Timah 화강암은 마모, 충격에 대해 특성이 저하되기 쉬운 것으로 판단되었다.

4. TBM터널의 설계

본 과업구간은 상술한 바와 같이 TBM이 심도 36.8m~58.2m의 대심도 조건에서 강도가 크고, 마모도가 높은

Bukit Timah 화강암을 굴착해야 한다. 따라서 발주처에서는 EPB TBM 대비 마모에 유리하고, 수압에 대한 대응이 가능한 TBM 형식으로 이수식(Slurry)으로 계획되었다. 그림 5에 TBM터널의 단면과 주요 설계사항을, 그림 6에 시설개요를 나타내었다.

5. TBM터널공사 굴진을 검토

TBM터널구간의 지반은 전체 연장의 약 70% 이상이 암

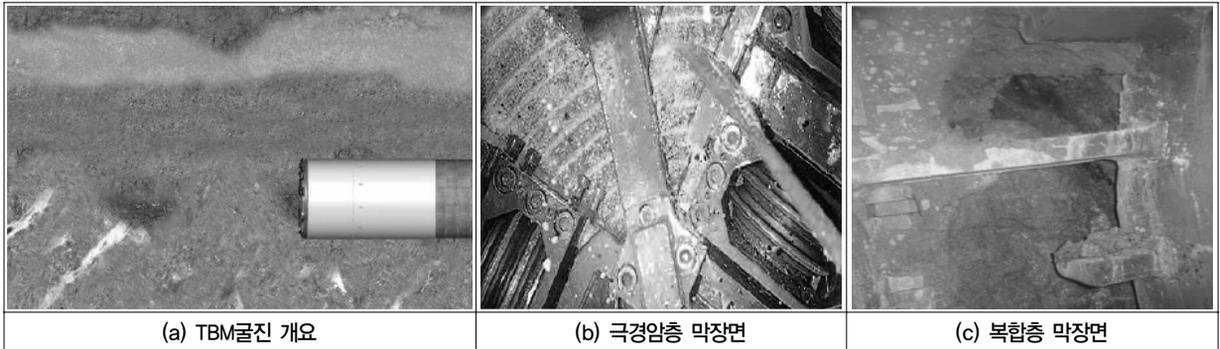


그림 7. TBM구간의 굴진 및 막장상황 개요

표 4. 싱가포르 Circle Line Stage 사례검토 (Osborne et al., 2008)

Contract	Circle Line Stage 2			Circle Line Stage 3				Circle Line Stage 4		
	822			852		853		854	855	
Type	EPBM			EPBM		EPBM	Slurry	Slurry	Mix	EPBM
Max Drive Length (m)	704	664	795	700	1200	1513	1237	3170	5800	3000
TBMs proposed (No.)	2			2		2		4	2	2
Geology	Kallang formation, Old Alluvium & Bukit Timah Granite			Old Alluvium & Granite		Granite & Old Alluvium	Varying grade soft Weathered Granite	Mainly Bukit Timah Granite (GI-GVI) overlain by fill material	Predominantly Jurong Formation Mainly Bukit Timah Granite	
TBM Outside dia. (mm)	6600			6630		6680	6720	6720	6630	6630
TBM L (m)	8.8			7.6		9.9	9.9	10.1	9.6	8.7
Planned Daily Production (m)	6.5	7.5	7.8	6.3	6.3	5.6	4.5	5	7	7
Achieved Ave. (m/day)	5.5	7.3	6.9	4.9	3.2	4.95	3.6	3.7	4.3	3.9
Daily Production (m)	5.2	6.7	7	4.7	3.2	5.15	3.2	-	-	-
Actual/Planned Percentage (%)	82	93	100	76	51	89	75	74	61	55

반의 강도가 높고 절리가 적은 GI~GIII의 Bukit Timah 화강암으로 구성되어 있으며, 일부 토사층 및 복합지층을 통과할 것으로 예상되었다. 그림 7에 TBM터널 굴진구간에서 조우가 예상되는 막장개요를 나타내었다. Bukit Timah 화강암층을 TBM으로 굴착통과한 인근 사례로 볼 때, TBM의 굴진속도와 Disk Cutter의 마모가 주요 문제점으로 나타났으며, 다음과 같은 문제점이 예상되었다.

- 압축강도 1MPa~300MPa로 다양, 신선한 화강암은

마모도가 매우 높음.

- 화강암, Jurong, Old Alluvium은 모두 Cutter의 마모가 심한 경향을 나타냄.

그리고 최근 싱가포르 Circle line의 Project사례를 문헌조사하여 Bukit Timah 화강암구간에서 TBM터널의 시공사례를 표 4와 같이 정리, 검토하였다. 기존 사례검토 결과, 계획 및 시공준비 단계 대비 낮은 굴진율로서 공정



지연이 발생한 것으로 판단되었으며, 굴진율도 큰 편차를 보이고 있었다.

6. 맺음말

싱가포르 Transmission Cable Tunnel NS1공구는 대심도 전력구 터널공사로서 총 연장 5.82km에 수직구 3개소, TBM터널 2개소, 지상부 Building 및 M&E설비를 포함하고 있다. 본 과업의 TBM터널구간은 암반강도가 높고 절리가 적은 Bukit Timah 화강암을 주로 통과하며, 복합지반 등 암석시험결과와 인근 사례의 검토내용에 대해 소개하였다.

1) Bukit Timah 화강암의 강도와 마모도 등 각종 암석 시험을 수행한 결과, 전체 연장의 약 70% 이상이 암반의 강도가 높고 절리가 적은 GI~GIII의 Bukit Timah 화강암으로 구성되어 있으며, 일부 토사층 및 복합지

층을 통과할 것으로 예상되었다.

- 2) 싱가포르 내 Timah 화강암을 TBM으로 굴착한 Circle line의 시공사례를 조사한 결과, 계획 및 시공준비 단계의 예측굴진을 대비 낮은 굴진율을 보였다.
- 3) 향후 본 과업구간의 TBM굴진 Data를 바탕으로 암반 강도가 높고 절리가 적은 화강암지반의 경우에 대한 굴진율과 Cutter의 마모 및 교체에 대해 별도 보고하여 Data와 경험을 축적하여 유사 프로젝트 수행시 참고자료로서 활용하고자 한다.

참고문헌

- 1. Geotechnical Interpretative Baseline Report (2011), Design and Construction of North-South Transmission Cable Tunnel Contract NS1, SP PowerAssets Limited.
- 2. N.H Osborne, C. Knight Hassell, L.C. Tan & R. Wong (2008), A review of the performance of the tunnelling for Singapore's circle line project, World Tunnel Congress, pp. 1497-1508.