

# 싱가포르 Transmission Cable Tunnel Contract NS2 프로젝트



**최성호**  
SK건설(주)  
Singapore NS2 현장  
대리



**윤현진**  
SK건설(주)  
Infra기술2팀  
과장



**조만섭**  
SK건설(주)  
Singapore NS2 현장  
설계부장



**이용석**  
SK건설(주)  
Singapore NS2 현장  
현장소장



**이승철**  
SK건설(주)  
해외 Infra 견적팀  
부장

## 1. 프로젝트 개요

싱가포르 Transmission Cable Tunnel Contract NS2 공사는 안정적인 전력공급을 위해 싱가포르 동서(EW)

16.5km 및 남북(NS) 18.5km을 가로지르는 400kV 용량의 지하 전력구 터널을 건설하는 프로젝트이며, 공사기간은 총 68개월로 2018년 완공을 목표로 하고 있다. 계약방식은 Design and Build Lump-sum 방식으로 발주처는



그림 1. 싱가포르 Transmission Cable Tunnel Contract 개요

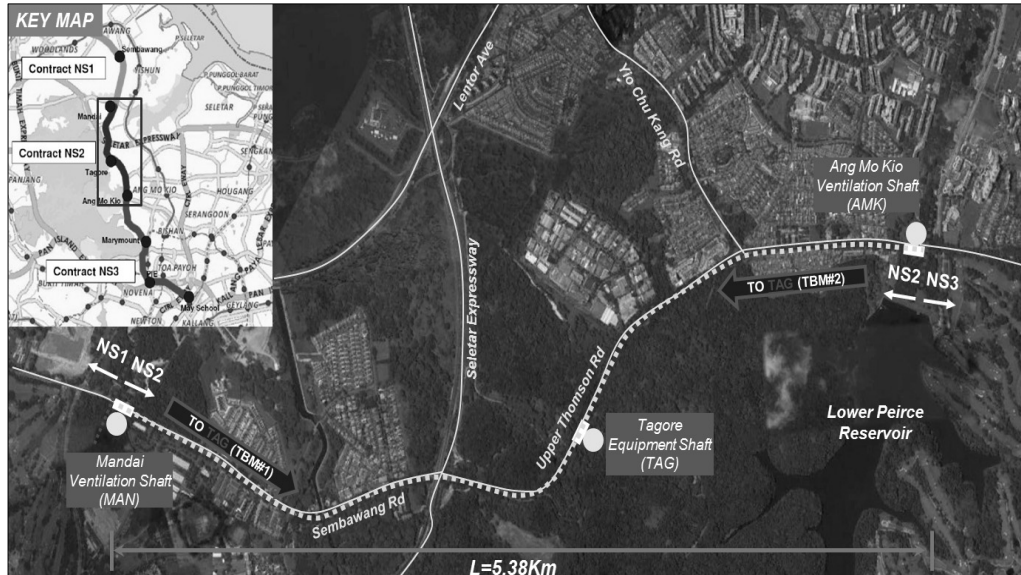


그림 2. NS2 구간의 평면 계획

싱가포르에서 전력, 가스 공급 및 배송 사업을 수행하는 Singapore Power 산하 기관인 SP Power Assets(SPPA)로, 싱가포르 전역의 전력 배급 및 네트워크를 관리하는 기관이다.

SK건설(주)는 NS 3구간 EW 3구간의 총 6 공구 중 NS2 및 EW2 구간을 수주하였으며, 그 중 NS2 공구는 North-South line 의 중간인 Mandai에서 Ang Mo Kio 까지를 잇는 총 연장 5.38km 의 터널 구간이다(그림 1).

본 공사는 그림 2와 같이 기존의 Sembawang road 와 Upper Thomson road 하부를 따라 굴착되는 6m 내경의 TBM Tunnel 및 M&E설비가 주된 공종이며, Ang Mo Kio, Mandai 2개소의 환기동(Ventilation building) 및 수직구(shaft), Tagore 의 장비동(Equipment building) 및 수직구(shaft)를 각각 포함하고 있다.

각각의 수직구는 TBM 운용 및 반출을 위한 횡갱(Adit tunnel)과 접속갱(Enlargement tunnel)을 포함한다. NS1 공구와 연결되는 Mandai shaft에서 3.15km 굴착 연장을 가지는 TBM 1호기, NS3 공구와 연결되는 Ang Mo Kio

shaft에서 2.23km 굴착 연장을 가지는 TBM 2호기를 각각 발진하여 Tagore shaft에서 회수할 계획이다.

## 2. 지질 조건

싱가포르의 지질 분포는 서부의 Jurong Formation(퇴적암) 및 Kallang Formation(연약지층), 중부의 Bukit Timah Granite(화강암층), 그리고 동부의 Old Alluvium(충적층 계열) 등으로 구성되어 있으며, NS2 공구는 전반적으로 압축강도가 높은 Bukit Timah Granite 지역에 위치하고 있다. 표 1에서는 현장에 분포하는 Bukit Timah Granite의 분류 및 특성을 나타내고 있다. 풍화도에 따라서 GI(신선암)에서 GVI(풍화잔류토)로 구분되며 G-I~G-IV는 암반층, G-V~GVI는 토사층으로 분류된다.

지반조사보고서에 따르면, Mandai-Tagore 구간은 GI~GIII등급의 화강암 구간이 86%, GIV~GVI등급의 Soil 및 Mixed 구간이 14%의 비율로 나타났으며, Ang Mo Kio

표 1. Bukit Timah Formation 지반정수

Stratum	Bulk Density kN/m <sup>3</sup>	Coefficient of Earth Pressure at Rest, K <sub>0</sub>	Effective Angle of Friction, °	Effective Cohesion c' kPa	Undrained Shear Strength cu, kPa	Elastic Modulus Eu MPa	Effective Elastic Modulus, E' MPa	Coefficient Permeability, k m/s
Bukit Timah Formation	G-VI	18.5	0.8	30	3	25kPa(d<5m) 5.z(5m<d<26m) 130kPa(d>26m)	400cu Eu/1.2 (cohesive) 1.5N (granular)	1.0E-06
	G-V	19.0	0.8	30	5	75kPa(d<10m) 5.z(10m<d<20m) 130kPa(d>20m)	400cu Eu/1.2 (cohesive) 1.5N (granular)	5.0E-06
	G-IV	23.0	0.8	35	50	-	300(Em)	7.0E-06
	G-III	24.0	0.8	38	400	-	4,000(Em)	1.0E-06
	G-II	25.0	0.8	45	600	-	6,000(Em)	5.0E-07
	G-I	25.0	0.8	50	1000	-	15,000(Em)	1.0E-07

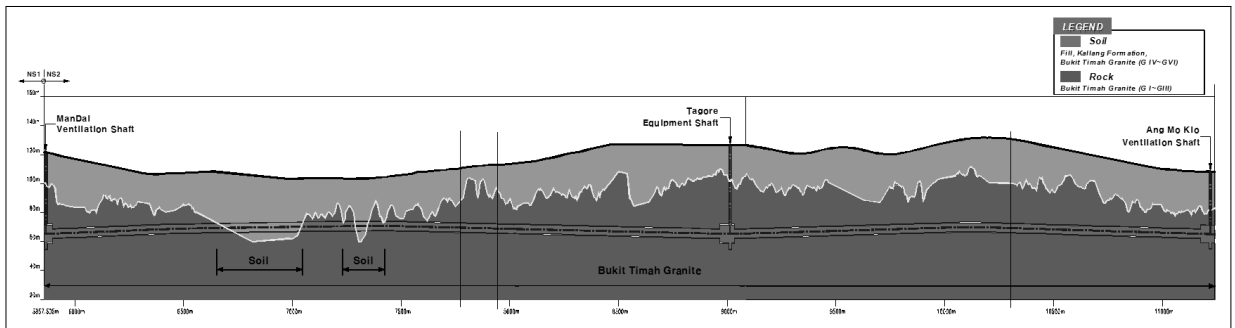


그림 3. NS2구간 지층단면도 및 구성 비율

~Tagore의 구간은 거의 대부분이 GI~GIII의 화강암 구간인 것으로 나타났다(그림 3).

특히 Mandai-Tagore 구간의 CH.6750~CH.7440 구간은 암반과 토사가 교호하는 복합지반 및 단층대가 확인되어 TBM 굴착 작업시 트러블 요인으로 작용할 것으로 예상된다. 따라서 36공의 추가 시추조사 및 공대공 탄성파 토모그래피(Geo-tomography)를 실시하여, 적절한 Cutter head intervention 위치를 선정하고 Sink-hole 발생을 최소화하여 효율적인 TBM 운영 및 굴진을 향상을 위한 설계를 진행 중에 있다.

### 3. Diaphragm-Wall 시공

본 과업에서 시공되는 3개소의 Shaft는 120년 내구수명을 요하는 영구 구조물로서 활용된다. 각각의 shaft는 16m의 직경, 총 심도는 약 50m에서 67m로 계획되어 있다. 그 중 Diaphragm wall(이하 D-wall)의 근입 깊이는 GIII 암반 출현심도까지로 수직구당 30m 내외의 동일한 깊이로 계획되어 있었으나, 실시설계를 위한 지반조사 수행결과 Shaft 주변에 파쇄대가 형성되어 GIII 암반의 출현심도가 급격하게 변하는 것으로 나타났다. 이에 따라

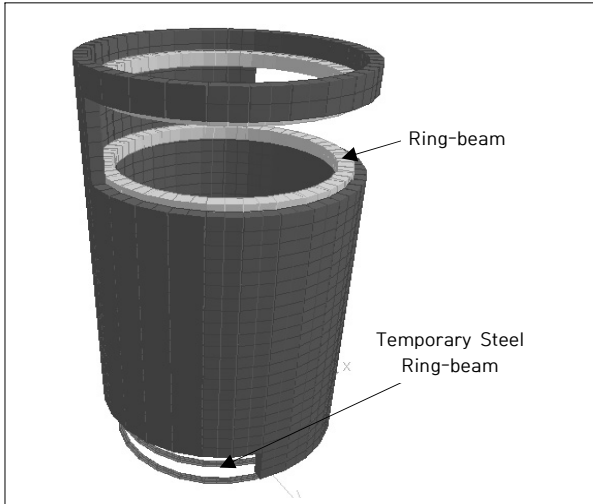


그림 4. D-wall 및 Ring-beam 3D 모델링

D-wall 시공방법 및 차수 그라우팅 계획 변경이 요구되었다.

따라서 변화하는 심도에 따라 D-wall 판넬 길이를 달리하여 굴착 효율성을 증대시켰고, 그림 4와 같이 3D 유한요소 해석을 통해 내부의 콘크리트 Ring-beam 외에도 Temporary Steel Ring-Beam을 추가로 설치하여, 하부의 캔틸레버로 거동하는 판넬의 작용토포에 저항하도록 하였다. 또한, 차수에 대한 기준이 엄격한 현지 특성을 고려하여, 투수시험 결과에 따라 파쇄대 등 차수처리가 요구되는 구간에 2열 MFC(Micro Fine Cement) Fissure Grouting을 약 2m간격으로 적용하여 요구되는 투수계수 ( $1 \times 10^{-7}$  m/sec)를 만족하도록 설계하였다(그림 5).

#### 4. NATM 구간 Lining 설계

NATM 터널구간은 D-wall하부 수직갱 및 각 수직구별로 자재 및 TBM조립과 반출을 위한 너비 12.8m와 높이 13.0m를 가지는 횡갱구간과 너비 10.0m와 높이 9.2m를 가지는 접속갱 구간이 해당된다. 터널의 라이닝은 1차 강

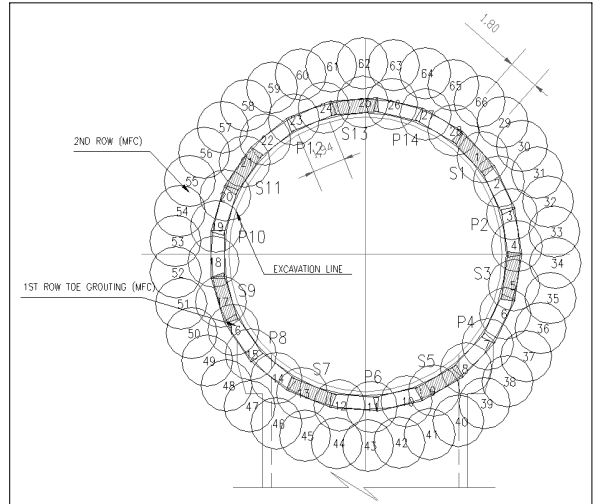


그림 5. Fissure grouting 계획 및 시공전경

섬유 보강 슛크리트 라이닝(Steel fiber reinforcement shotcrete lining)과 2차 현장타설 콘크리트 라이닝으로 계획되었다. 터널에 대한 안정성은 Q-system을 이용하여 굴착면의 암반상태 평가를 수행하였다. 또한, 3차원 FLAC 모델 수치해석을 통해 지반안정성 평가를 실시하였다.

표 2와 같이 결정된 Q 값에 따라 지보패턴을 달리하여 설계하였고, RQD값이 10이하인 GIV Bukit Timah Granite 구간은 횡갱 입구의 상반부에 포어폴링(forespoling) 및 강 지보재(Steel Rib)을 배치하여 작업 구역의 지반안정성을

표 2. 라이닝 지보패턴 설계(Enlargement Tunnel)

Structure	Q	TOP Heading				Bench And Invert			
		Bolt spacing (H.xV.)	Rockbolt length (m)	Shotcrete thickness (mm)	Round Length (m)	Bolt spacing (H.xV.)	Rockbolt length (m)	Shotcrete thickness (mm)	Round Length (m)
Enlargement	>40	1.8m x 1.8m	3.6	100SFERS*	1.8	1.8m x 1.8m	3.6	100SFERS*	3.6
	10-40	1.8m x 1.5m	3.6	150SFERS*	1.5	1.8m x 1.5m	3.6	150SFERS*	3.0
	1-10	1.5m x 1.5m	3.6	150SFERS*	1.2	1.5m x 1.5m	3.6	150SFERS*	2.4
	<1	1.2m x 1.2m	3.6	200SFERS*	1	1.2m x 1.2m	3.6	200SFERS*	2

\*SFERS : Steel Fiber Reinforcement Shotcrete

증가시키고, 시공시 막장 면에 발생하는 변위를 최소화 하도록 설계하였다(그림 6).

## 5. TBM 터널 설계

### 5.1 TBM 장비선정

본 현장에서는 과거 시공사례 및 과업구간의 지반조건 등을 고려하여 TBM장비를 선정하였으며, 토압식(Earth

Pressure Balance)에 비해 상대적으로 디스크 커터의 마모가 적으며 복합지반에 효과적으로 적용할 수 있고, 굴진 시 고수압에 효과적으로 대응할 수 있는 이수식(Slurry) 쉴드 TBM 을 선정하였다. 0.5~4.5RPM의 Cutter Head 회전속도를 가지는 직경 6.88m의 TBM이 굴착에 운용되며, 32개의 Jack을 통해 세그먼트로부터 얻는 TBM 최대 추력(Thrust Force)은 51,200kN이다. 그림 7에서는 본 과업에 적용되는 TBM의 면판설계 상세를 보여주고 있다.

Mandai~Tagore 구간에서 출현하는 복합지반 및 단층대 탐사를 위해 Probe-dilling을 실시한 뒤, 필요에 따

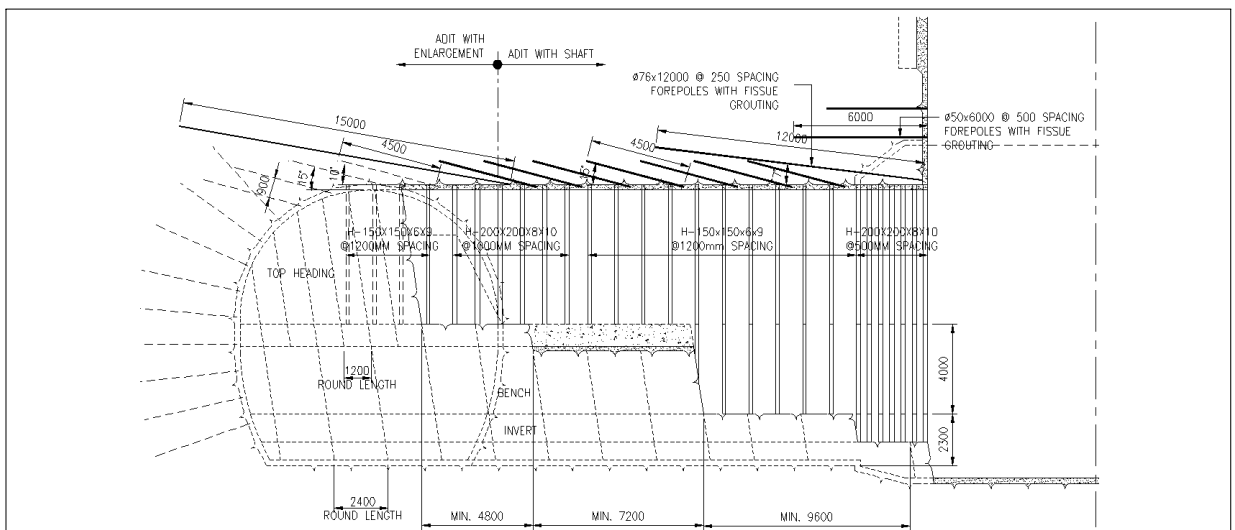
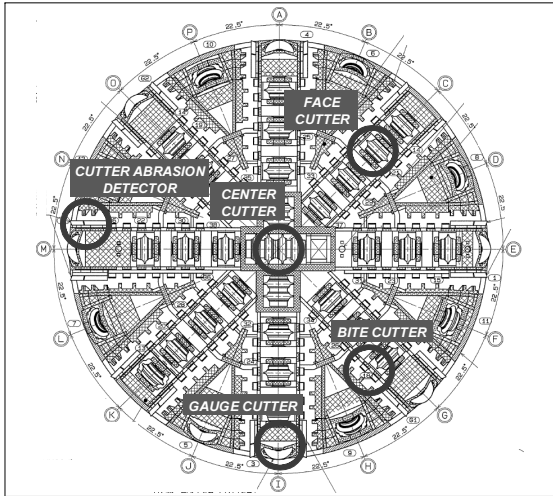


그림 6. Adit & Enlargement Tunnel 지보 형상 설계



Cutter Size	19"
Disc Cutter Spacing	Center: 101mm, Face: 84mm
Nos. of Center Cutter	double ring (4sets) for rock (Cone type cutter for soil)
Nos. of Face Cutter	single type, 38pcs
Nos. of Gauge Cutter	single type, 2pcs
Nos. of Cutter Bit	Scraper: 112+16pcs (gauge)
Opening Ratio	26% (32% for soil & mixed)

그림 7. 이수식 실드 TBM 면판 설계

라서는 효과적인 Intervention 작업을 위해 갱내 그라우팅 장비에 의한 약액주입 공법을 적용하여 굴진면의 안정성을 확보함은 물론, Double Air Lock System 으로 장비 주행 정지 없이 Intervention 작업을 진행하여 굴진율 향상을 도모할 예정이다(그림 8).

### 5.2 세그먼트 라이닝 설계

세그먼트 라이닝(Segment Lining)은 암반구간 뿐만 아니라 잔류토사구간, 복합지반 등 다양한 지질학적 조건에 적합하도록 A.M Muir Wood와 DJ. Curtis의 연속체

모델 해석 및 Erdmann-Duddeck의 구조체 해석(Bedded-Beam)에 기초하여 수행되었으며, 설계 시 고려한 하중은 토압과 수압 이외에도 세그먼트 Handling, Stacking, Demoulding등의 제작과정과 TBM Thrust Load, 세그먼트 Erection 및 Grouting Pressure 등 시공과정의 하중을 고려하여 Lining의 두께와 철근량을 계산하였으며, 터널 굴진구간의 복합적인 지반조건의 압축계수 확인을 위한 2D Plaxis 모델 해석이 추가적으로 수행되었다.

당 현장의 세그먼트는 그림 9과 같이 300mm의 두께와 1400mm의 폭을 가지는 5개의 일반 세그먼트와 1개의 키 세그먼트(Key-segment)로 구성되어 있으며 직볼트(Strait

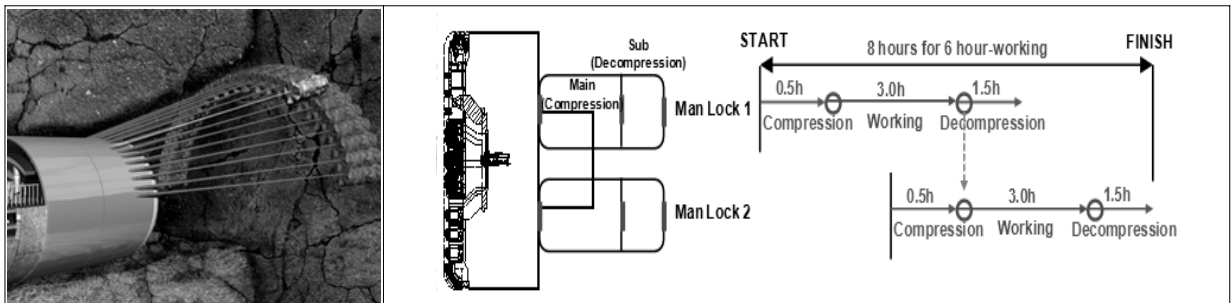


그림 8. 막장 지질 계측 보강 및 Man Lock 시스템 개요

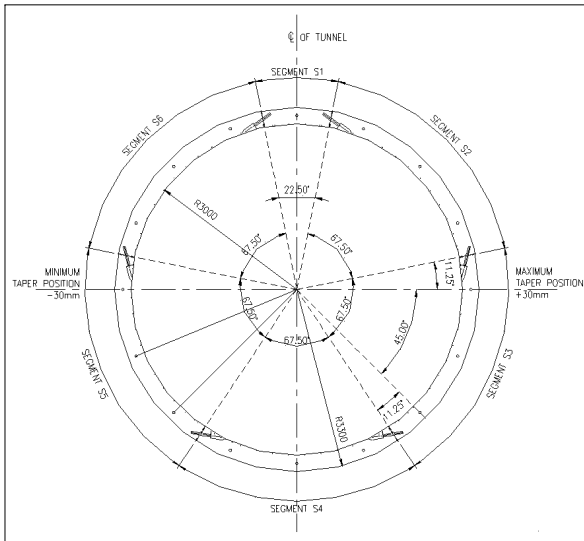


그림 9. 세그먼트 라이닝 디자인 상세

Bolt) 결합식 Precast Concrete 라이닝 방식이다. 세그먼트 볼트 결합은 조립공정이 간단하여 시공성이 탁월하고 체결력 또한 우수한 경사형(Inclined) 볼트가 적용되었으며 1개의 세그먼트 라이닝은 원주방향으로 11개소, 방사 방향으로 12개소의 총 23개소의 볼트 결합으로 이루어져 있다. 접합부는 차수효과를 극대화하기 위해 EPDM(Ethylene

Propylene Diene Monomer) 가스켓 및 수팽창 지수재 (Hydrophilic Seals)의 복합구조형태의 차수 대책을 수립 하였다.(그림 10)

## 6. M&E 및 Architectural 3D Design

### 6.1 Cable 3D 모델링

Adit 및 Enlargement Tunnel을 따라 설치되는 Main EHV Cable의 배치는 Tunnel 구간의 설계 반영에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 그림 11과 같이 수직구에서 접속경 및 횡경구간의 3D모델링을 실시하여, TBM 운영시 간섭될 수 있는 문제점을 사전에 검토하고, 향후 실시설계시 변경되는 터널 단면에 유동적으로 적용시킬 수 있도록 하였다.

### 6.2 건축 구조물 3D 모델링

각 수직구의 상부에 시공되는 환기동(Ventilation building) 및 장비동(Equipment building)은 D-wall의 일부를 Cut

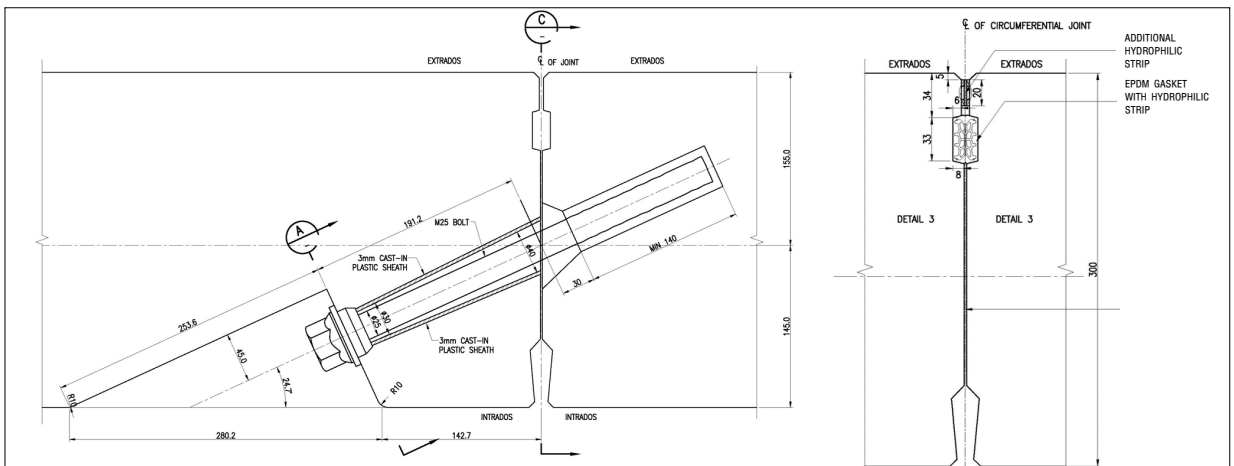


그림 10. 세그먼트 결합부 상세

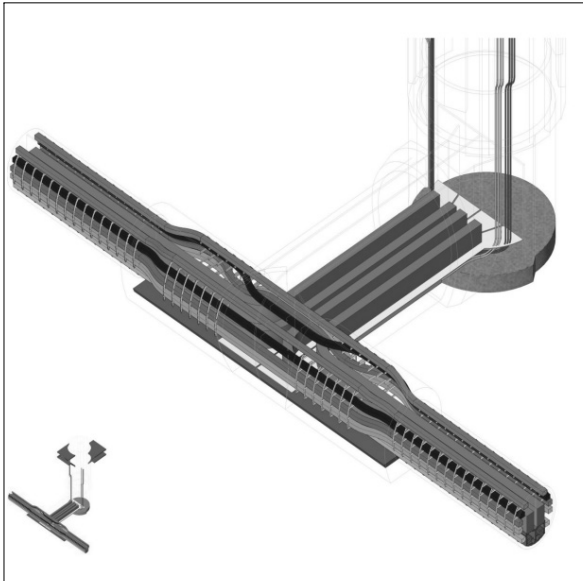


그림 11. 터널 구간 Cable 배치 3D 모델링

off 하여 건물의 지하 구조 및 케이블을 인입시키는 구조이다. 따라서 복합적인 지하 구조물과 지상 건물의 효율적 계획수립은 물론, 외형적인 디자인 또한 발주처가 요구하는 개념을 담도록 구상하기 위해 3D Facade Design을 그림 12과 같이 실시하였다.

## 7. 결론

본 고에서는 당사가 수행하는 싱가포르 NS2 공구의 지질학적 특성 및 프로젝트에 대한 전반적인 개요와 기술부분에 대하여 간략하게 소개하였다. 2013년 5월 말 기준 시공 현황으로는 3개 수직구 중 2 개소의 D-wall 시공이 완료되었고 현재 마지막 Tagore 수직구의 D-wall 시공 및 Ang Mo Kio 수직구의 굴착이 동시에 진행 중이다. 향후 NATM 터널 설계에 대한 발파 승인 및 시공계획 제출을 준비 중이며 2014년 3월에 TBM Initial Driving을 목표로 TBM Plant 설계 및 Segment 실시설계가 진행되고 있다.

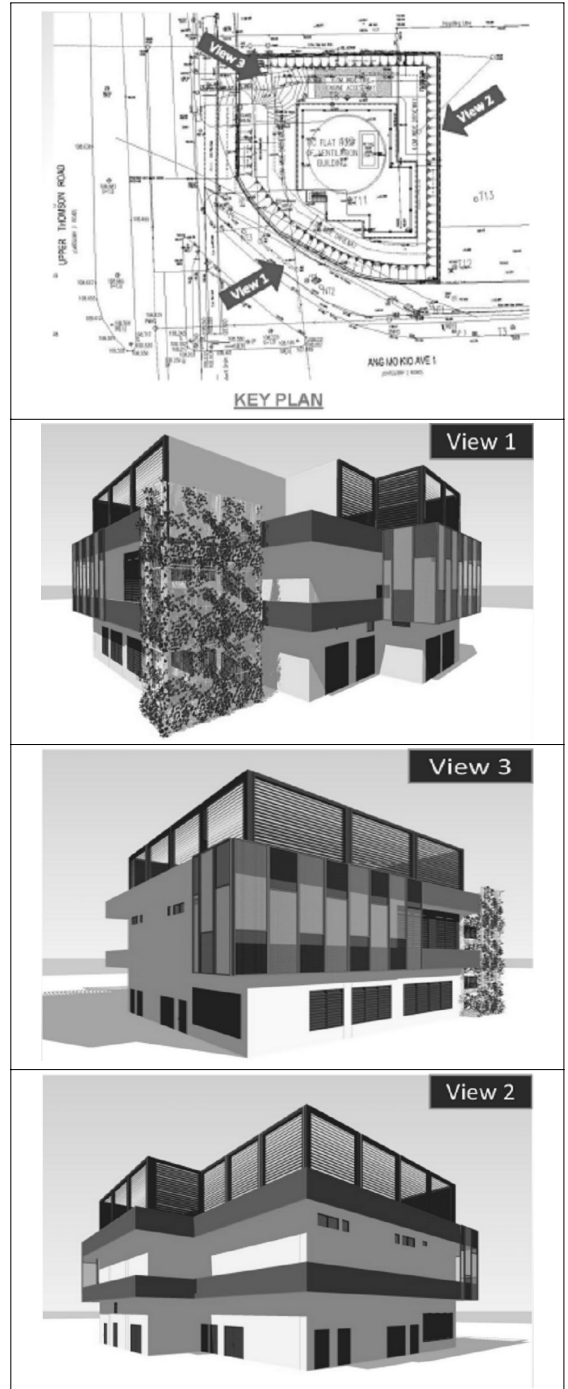


그림 12. Ang Mo Kio 환기동 Facade 3D 모델링



싱가포르 Transmission Cable Tunnel 프로젝트는 입찰 당시 SK건설(주) 이외에도 국내외 여러 건설사가 입찰에 참여하였으며 특히 그중에서도 한국의 건설사가 6 공구 중 4 공구를 수주하여 국내 지하공간 및 터널에 대한 뛰어난 기술력을 입증한 계기가 되었다고 할 수 있다. 하지만 향후 본 공사의 완공까지는 많은 기술적인 문제뿐만

아니라 국내와는 상이한 건설 환경 및 현재 호황인 싱가포르 건설시장에서의 전문인력 수급의 어려움 등 다방면의 과제에 당면할 것으로 예상된다. 따라서 추후 시공상의 Trouble Shooting 사례 및 설계 개선사항에 대해 향후 본지에 게재하여 공유할 수 있기를 기대해 본다.