

# 4장. 싱가포르 Transmission cable tunnel contract EW2 현장 소개-수직구를 중심으로



**도은수**  
SK건설(주)  
Infra ENG'G 2팀



**이상현**  
SK건설(주)  
Infra ENG'G 2팀



**최완규**  
SK건설 싱가포르  
EW2공구



**박양수**  
SK건설(주)  
Infra ENG'G 2팀



**손영진**  
SK건설(주)  
Infra ENG'G 2팀

## 1. 프로젝트 개요

싱가포르 전력구 터널 건설공사는 싱가포르 내 전력수요의 증가와 발전용량 확대에 따른 송전기반을 강화하기 위해 지하 전력구 터널을 건설(남북 3개공구-NS 18.5km,

동서 3개공구-EW 16.5km)하는 프로젝트이다. 발주처는 싱가포르에서 전력 및 가스 공급과 배송 사업을 수행하는 Singapore Power 산하 기관인 SP Power Assets(SPPA)이며, 싱가포르의 전체의 전력 배급 및 네트워크를 관리하는 기관이다.

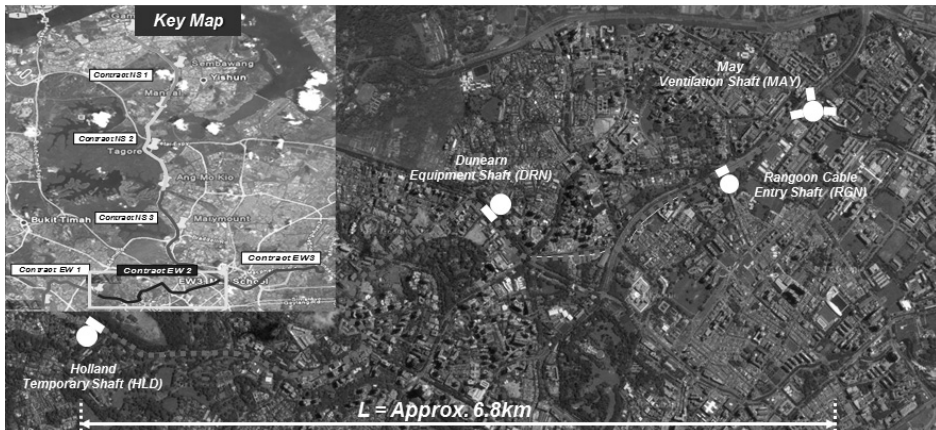


그림 1. 싱가포르 Transmission cable tunnel contract EW2 구간 노선도

SK건설(주)는 NS 3구간과 EW 3구간의 총 6 공구 중 NS2 및 EW2 구간을 담당하고 있으며, EW2 공구는 East-West line의 중간인 Holland 수직구에서 May 수직구까지 잇는 총 6.8km 연장의 터널 구간(내경 6.0m TBM 터널)이다.(그림 1참조) 이외 지상 운영건물과 지하 전력구를 연결하는 수직구 4개소, 수직구와 전력구를 연결하는 NATM 터널, 그리고 지상 운영 건물 3개소 등으로 구성되어 있다.

표 1. 프로젝트 개요

Project Title	Design and Construction of East-West Transmission Cable Tunnel Contract EW2	Client	SPPA (SP Power Assets Limited)
Project Schedule	Oct 2012 ~ Dec 2016 (51 months)	Type of Contract	Design and Build

4개의 수직구 중 1개소 (Holland 수직구)는 공사용으로 TBM 발진 후 되메움 예정이며, 3개소는 영구적인 구조물로써 활용될 계획이다. 수직구는 공사 중 TBM의 발진 및 회수를 위한 작업구로써 활용되며, 운영 중에는 지상 변전소에서 지하 전력구로의 400kV 고압 전기 케이블의 인입, 환기 및 방재 등의 용도로 활용된다. 수직구의 단면은 모두 원형이며, 크기는 용도에 따라 내경 12~18m로 다양하다. 수직구의 깊이는 약 60~70m이며, 각 수직구의 주요 제원은 표 2와 같다.

표 2. 수직구 제원 및 현황

Description	Holland Shaft	Dunearn Shaft	Rangoon Shaft	May Shaft
Inner Diameter(m)	12	14	12	18
Depth (m)	59	68	61	59
Geological Condition	Fill/G(VI) to G( I )	Kallang/G(VI) to G(II)	Kallang/G(VI) to G( II)	Kallang/OB-OA
Related Structures	Backfill	Equipment Building (1 basements+2 storeys)	Cable Entry Building (1 basement+1 storey)	Ventilation Building (1 basement+2 storeys)
	1 Adit (temporary)	2 enlargement (permanent)	1 Adit (permanent)	3 enlargement tunnels (permanent)

수직구를 중심으로 입찰당시의 설계와 실제 시공시 변경된 부분을 수직구의 굴착, 발파, 차수 그라우팅으로 나누어 자세히 설명하도록 하고, 먼저 지질조건을 제시하여 전반적인 이해를 돕도록 하겠다.

## 2. 지질 조건

EW2 구간의 지질은 서부의 Bukit timah granite(화강암층), 중부의 Jurong formation(퇴적암) 및 Kallang formation(해상 점토층), 그리고 동부의 FCBB층 및 Old alluvium(충적층 계열)으로 다양하게 구성되어 있다.

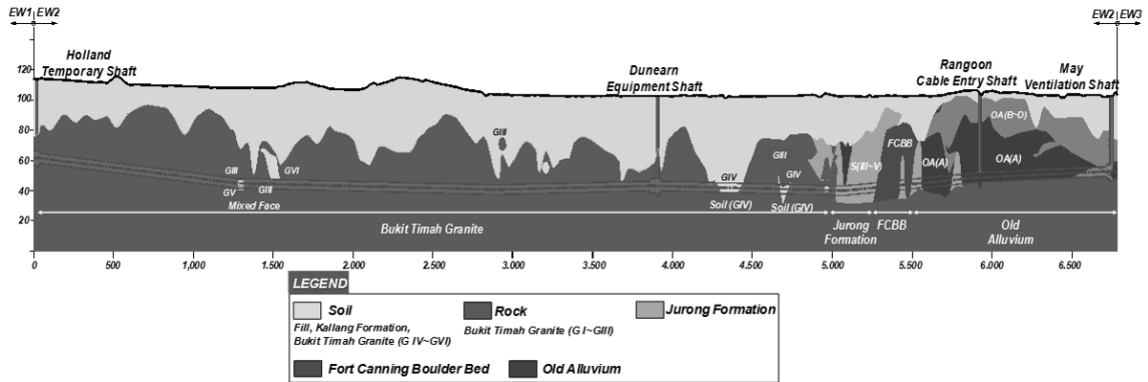


그림 2. EW2구간 지층단면도

Holland 수직구에서 Dunearn 구간은 주로 Bukit timah granite 구간을 통과하며 상부에 Kallang formation이 위치하고 있으며 중앙에 G-IV와 G-V가 교호로 나타나는 fracture zone이 분포하고 있다.

표 3. Bukit timah granite 지반정수

Description	Minimum Design Parameters					
	G(VI)	G(V)	G(IV)	G(III)	G(II)	G(I)
Bulk Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	18.5	19.5	23		24	
Effective Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	5		50	100	200	
Effective Angle of Friction ( $\phi'$ )	30	32	40	45	50	
Undrained Shear Strength (kN/m <sup>2</sup> )	5N and $\leq$ 250	4N and $\leq$ 400	15,000	25,000	> 50,000	
			10,000 (mass strength)		>10,000 (mass strength)	
Undrained Young' s Modulus (MN/m <sup>2</sup> )	2N	2N and $\leq$ 200	750	2,000	5,000	
Permeability (m/s)	$10^{-7}$					-

May 수직구에서 Dunearn구간은 Old Alluvium, FCBB, Jurong formation, Bukit timah granite 구간이 차례로 나타나며 특히 Rangoon에서 Dunearn구간은 G-V가 노선 전반에 넓게 분포하고 있고, 상부에는 Kallang formation이 두껍게 차지하고 있어 TBM 터널 굴진시 주의가 요구된다.

### 3. 수직구 굴착

#### 3.1 지하연속벽 시공방법 변경

본 구간의 수직구는 지하연속벽(이하 연속벽) 설치 후 계획심도까지 굴착하여 바닥 슬라브 및 영구벽체를 시공하는 것으로 구성되어 있으며 연속벽 벽체는 120년 내구수명을 요하는 영구 구조물로 활용된다.

암반 구간의 수직구는 연속벽을 G3 암선(Rock head level)에 약 0.5m 근입하고, 토사구간(Old Alluvium)은 설계 및 시공성을 고려하여 panel 설치 심도를 결정하였다.

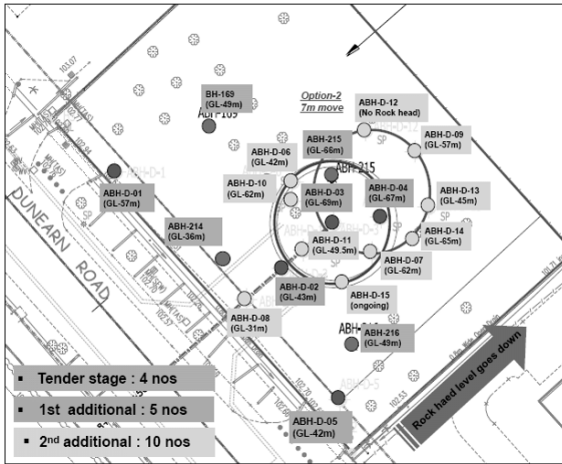
연속벽 시공에서 수직구 내부로 물이 유입되는 것을 막기 위해 입찰단계에서 방수막 공법(Water stop)이 제안되었다. 현장 지반조건 및 공기단축을 위해 여러 번의 협의를 통해 방수막 공법보다 효과적인 Over-cutting 공법을 변경제안하여 적용하였다. 두 공법을 비교하여 표 4에 정리하였다.

표 4. 수직구 굴착공법 비교

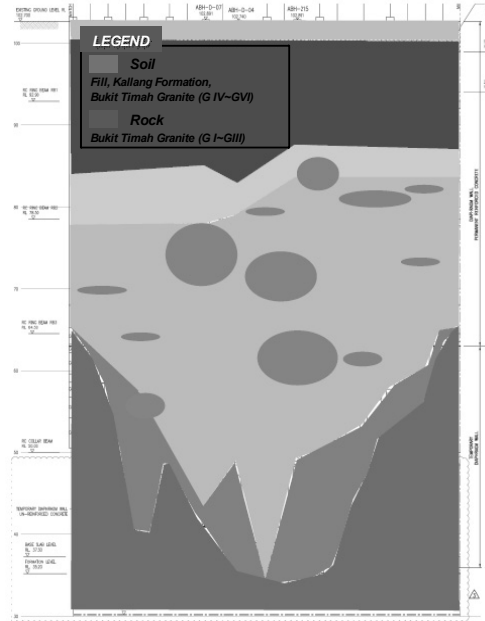
	입찰단계(방수막 공법)	시공단계(Over-cutting 공법)
개념도		
방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>방수막 공법은 고무재질의 Water stop과 stop-end 튜브로 구성되어 연속벽 패널사이 조인트 형성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Primary panel에 인접한 경화된 콘크리트를 커터로 절삭하고 Secondary panel에 콘크리트를 타설하여 밀실한 콘크리트 조인트 형성</li> </ul>
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>지수판이 패널 사이에 설치</li> <li>비굴착지반이나 튜브의 손상발생시 누수 원인</li> <li>패널 사이 약 375mm 비굴착 지반이 존재</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>stop-end up 과정이 생략되어 시공성 우수, 공사기간 단축가능 및 긴 침투경로로 방수 우수</li> <li>경화된 콘크리트 굴착을 위한 장비추가</li> </ul>
결론	<ul style="list-style-type: none"> <li>차수, 공기, 시공성 측면에서 Over cutting 공법이 방수막 공법보다 우수</li> <li>Over-cutting 적용시, 연속벽 내부로 물이 유입되더라도 그라우팅이 용이</li> </ul>	

### 3.2 Dunearn 수직구 위치변경 및 접속부 변경

Dunearn 수직구의 경우 25m 이상의 급격한 암선 변경으로 최적의 위치 결정을 위해 15공(1차 5공, 2차 10공) 이상의 추가 시추조사(입찰시 4공)를 수행하였으며 boulder 및 암선 분포 현황을 고려하여 최종 위치를 결정하였다.(그림 3. 참조) 암선 변경에 따라 각각의 Panel에서 확인시추를 통해 정확한 지층확인 후 연속벽 Panel의 길이를 달리하여 굴착 효율성을 증대시켰다. 또한 상부 연약 해상점토의 특성을 고려, trench 안정성 확보를 위해 Jet grouting을 연속벽 내외로 시공하였다.



(a) 위치이동



(b) 지질분포

그림 3. Dunearn 수직구 위치이동 및 지질분포

또한, off-line shaft에서 on-line shaft로 TBM터널의 선형을 변경하여, 접속터널을 삭제하였으며 확대터널의 연장을 최적화하여 공기 단축은 물론 불리한 지반조건에서 발파 및 굴착을 최소화 하여 시공 중 발생할 수 있는 위험요소를 최소화 하였다.(그림 4참조)

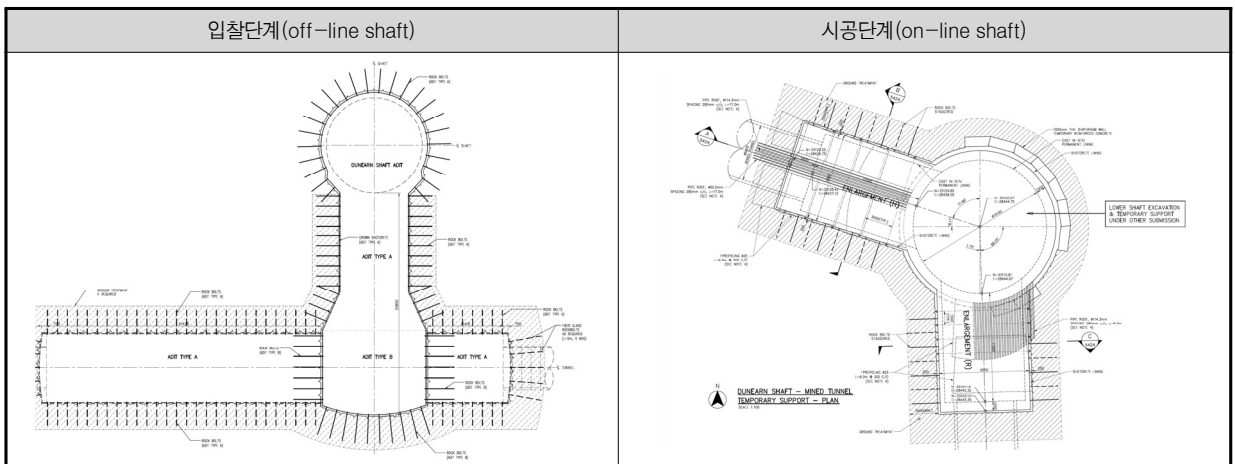




그림 4. Dunearn 수직구 접속부 변경

## 4. 차수 그라우팅

수직구 굴착 중 차수성 확보를 위해 연속벽에 설치된 steel pipe를 활용 연속벽 바닥에서 굴착심도까지 Fissure grouting을 수행하여 설계시 요구된 투수계수를 확보하도록 하였다. 입찰단계에서 시멘트 그라우팅을 적용하였으나, 시공시 지하수 유입량이 매우 많은 구간에서는 차수성이 우수한 에멀전 그라우팅(라텍스 계열)으로 변경 적용하였다. Fissure grouting 단계 때 연속벽에 미리 심어 놓은 강관을 통해 수직구 굴착 전 연속벽 바닥면 하부에 주입하였다. 그라우팅 전 시험 그라우팅을 통해 지하수 특성을 확인하고 형광염료를 주입하여 수직구 내부에서 누수되는 부분을 체크하였다.

표 5. 에멀전 그라우팅 공법 개요

<p>시공사진</p>		
<p>공법개요</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수직구 굴착전 Fissure grouting 단계에서 강관을 통해 에멀전을 이용한 차수그라우팅 수행</li> <li>• 굴착 이후 지하수 유입구간에서 에멀전을 이용한 차수그라우팅 수행</li> </ul>	
<p>공법순서</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 천공</li> <li>③ Fissure grout 수행</li> <li>⑤ Final grout 수행</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>② Fissure grout 시험(형광염료를 이용)</li> <li>④ 지반보강(숏크리트 타설 및 록볼트 설치)</li> </ol>
<p>장점</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유동성이 크고 침투력이 좋아서 다양한 현장에서 적용 가능</li> <li>• 고압 또는 고수압 조건에서도 차수가능</li> <li>• 환경에 무해한 친환경 공법</li> </ul>	
<p>단점</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공사비 고가</li> <li>• 햇빛이나 자외선에 노출시 품질 저하</li> <li>• 온도에 민감하여 운반이나 저장시 냉동상태유지 필요</li> </ul>	

## 5. 발파

### 5.1 발파 지반 특성

Holland 수직구의 발파굴착 대상암반은 대체로 Bukit timah granite가 주류를 이루고 있으며 노출암을 기준으로 풍화상태가 보통~약간(Moderately~Slightly)수준이었으나 절리 간 Silt와 점토질을 함유하고 있었다. 설계당시 일축압축

강도가 최대 250MPa까지 예측되었으나 실제 시공과정에서 암반강도는 45~60MPa정도로 평가되었다. 불연속면은 J1(69/79), J2(72/322)와 J3(76/44) 크게 3개의 복합 절리군이 분포하고 있었으며 막장면의 상태는 습한상태로 지엽적으로 절리틈을 따라 지하수가 유출되는 것이 관찰되었다. 그림 5는 발파암반 노출 후 약 2.5m굴착이 진행된 후 수행된 결과자료이다.

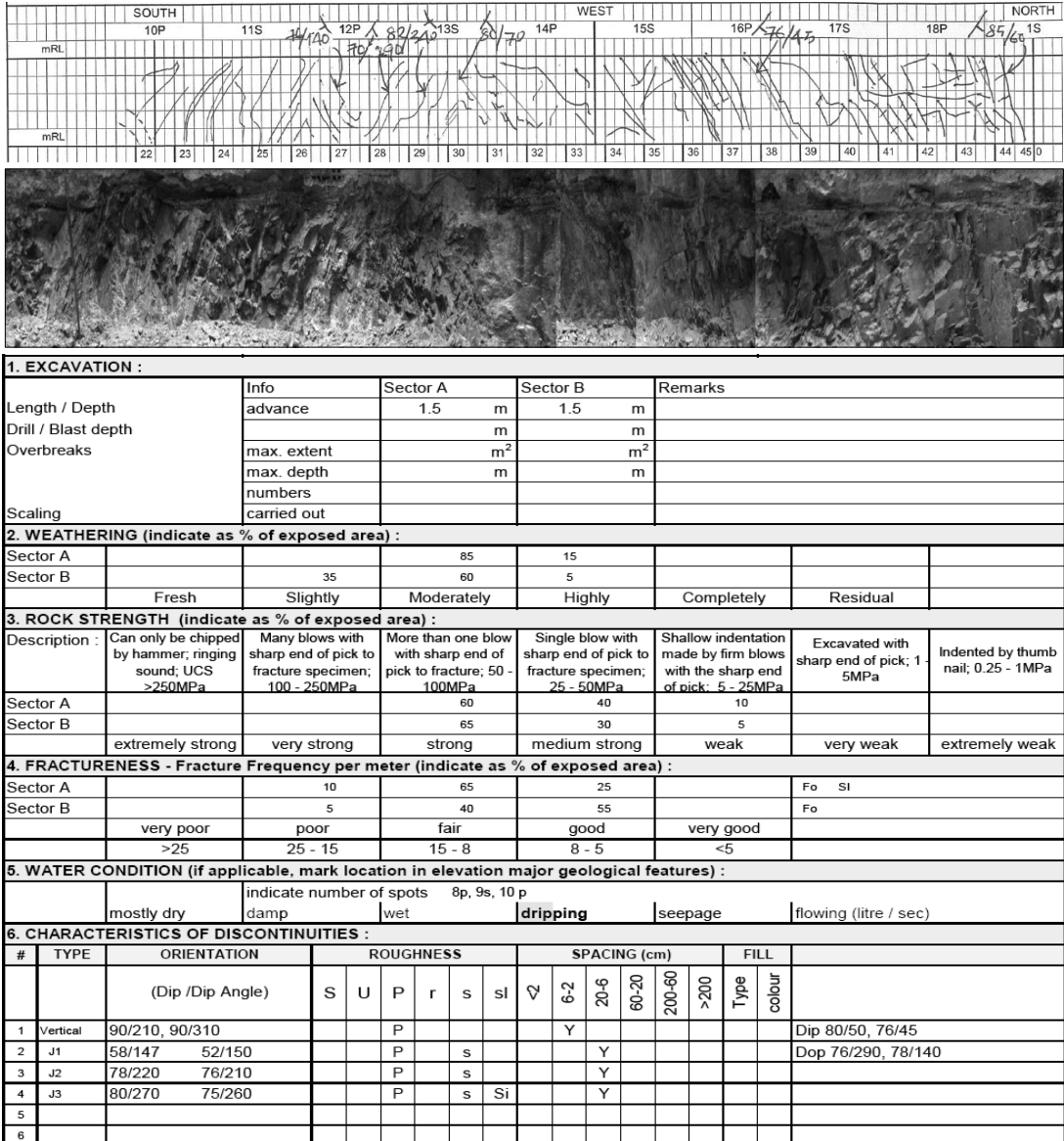


그림 5. 지질검층자료(Holland 수직구 Mapping 결과)

## 5.2 주변 주요 시설물 현황 및 허용진동기준

입찰단계의 한정된 여건에서 발파 설계를 수행하는 것은 현장의 지반조건, 장비 상황, 공정 현황 등을 반영할 수 없기 때문에 실제 발파를 수행할 때 현장 상황을 반영한 설계 조정이 불가피하다. 설계 당시 주요 지장물 이격거리가 Dunearn 수직구는 약 40m, Holland 수직구는 약 90m로 파악되어 Dunearn의 최근접 지장물(ESSO Petrol Station)을 중심으로 허용진동속도를 만족하는 설계를 수행하였다. 그러나 실제 착공 후 각 지역의 매설 케이블 및 수도 시설을 파악한 결과, Holland에서 약 9m 이격된 지점에 전력 케이블 접속부(Cable Joint)가 매설되어 있었으며 진동기준은 13mm/s로 매우 까다로운 수준이었다. 그러나 다행스럽게도 이 케이블은 지표면 근처에 존재하였고 수직구 발파 지점은 심도 40 m 이상의 지역에서 실시되었기 때문에 심도를 고려한 이격거리는 최종적으로 40m가 되었다.

표 6. 수직구별 주변 시설물과의 이격거리 및 허용 진동수준

주요 지장물	최소이격거리		허용 진동속도	비고
	입찰단계	시공단계		
Underground Cable Joint	미반영	40m	13mm/s	Holland
ESSO Petrol Station	50m	60m	25mm/s	Dunearn
Chancery Court	55m	56m	25mm/s	Dunearn
Home Nursing Foundation	42m	73m	5mm/s	Dunearn

## 5.3 발파설계 및 시공결과 비교

입찰단계에서의 발파패턴은 D365~400mm 1공의 대구경 무장약공을 확장하는 발파패턴으로 설계하였으나 현장 장비 섭외와 수직구로부터 장비 입출고에 대한 인허가 문제로 실제 시공에서는 직경 D76mm\*4공의 무장약공을 활용한 심발 패턴으로 바뀌었다. 또한 굴착에 따라 슛크리트 두께와 라이닝 관련 제원의 변경으로 수직구 직경이 당초 15.4m에서 12.5m로 축소되었다. 그 외 시공시 변경 사항은 표 7과 같다.

표 7. 발파패턴 비교(Holland 수직구)

구 분	입찰단계	시공단계
내경	15.4m	12.5m
대구경 무장약공	D365~400mm* 1공	D76mm* 4공
굴진장/천공장	1.5m/1.7m	2.0m/2.2m
최대지발당장약량	2.4kg/delay	1.7kg/delay
굴진효율	88%	91%

변경된 설계로 Holland에서 수행한 발파작업 결과, 평균 천공장 2.2m에 대해 평균 굴진장은 2.0m로 평균 굴진효율은 약 91%였다. 발파 후 평균 파쇄입도는 20~30cm로 전반적으로 매우 양호한 발파결과를 얻을 수 있었다.

Ring beam 구조물과 인접한 구간의 경우, 외곽선 굴착선을 예정 굴착선에서 내측으로 30~50cm이격시켜 시공하여



발파작업으로 인한 콘크리트 구조물의 손상을 최소화하였다. 주변 지장물에 대한 진동 수준을 파악하기 위하여 Ring beam 구조물, 전력 케이블 접속부, Dempsey road에 위치하고 있는 식당건물 등 매 발파 시 총 6개 지점을 선정하여 계측작업을 수행하였으며 계측 결과 모든 지장물에 대하여 허용 진동기준을 만족하였다. 주요 지장물에 대한 계측 결과는 표 8과 같다.

표 8. 발파 계측결과 정리

주요 지장물	날짜	발생값	진동기준
Ring Beam Three	2014.01.07	13.21mm/s	PPV of Max 50mm/s at 50 to 100Hz or PPV of max 150mm/s at higher than 100Hz
	2014.01.21	9.65mm/s	
Hoarding between Shaft & 400 KV Joint Bay	2013.10.11	7.11mm/s	13mm/s
	2013.12.19	2.54mm/s	
400 KV Joint Bay (Road Side, Holland Rd.)	2013.10.11	5.72mm/s	13mm/s
	2014.01.07	8.86mm/s	
400 KV Joint Bay (Centre Median, Holland Rd.)	2013.10.11	4.06mm/s	13mm/s
	2014.01.07	No event*	
Canteen (Dempsey Rd.)	2013.10.11	3.81mm/s	25mm/s
	2014.01.07	1.91mm/s	
Sister House	2014.01.07	1.40mm/s	25mm/s
	2014.01.25	0.76mm/s	

\*No event: 0.3mm/s 이하



(a) 바닥정리 및 측량



(b) 천공 작업



(c) 장약 및 결선



(d) 발파 및 버려처리 작업

그림 6. 단계별 발파시공사진

## 6. 결론

본 고에서는 당사가 수행하는 싱가포르 EW2 공구의 지질학적 특성 및 프로젝트에 대한 전반적인 개요와 수직구에 대한 입찰설계와 시공단계에서의 차이를 중심으로 소개하였다. 입찰단계에서 확인이 불가능한 지반조건의 변경에 따라 Dunearn 수직구의 위치를 변경하고, 지하 연속벽 시공방법의 변경을 통해 공기단축 및 시공품질 개선이 가능하였다. 입찰단계에서 확인이 불가능한 지장물을 반영하여 발파설계 패턴을 변경하였으며, 변경된 설계로 평균 굴진효율은 88%에서 91%로 높은 굴진 효율로서 보다 효율적인 공정관리가 가능하게 되었다.

2014년 10월 기준 시공 현황은 Holland와 May는 연속벽, 수직구, Mined tunnel 굴착 작업과 TBM 초기굴진

이후 본굴진 중이다. Dunearn은 연속벽 완료 후 Blasting을 이용한 하부 수직구 굴착 및 Mined tunnel 상반 굴진 중에 있으며, Rangoon은 상 하반 Adit 및 Enlargement tunnel 굴착이 완료되었으며 현재 shaft base slab 및 permanent wall 작업 중이다. 또한 TBM 도달후 2차 발진을 위한 temporary work을 동시에 준비하고 있다. Dunearn의 경우 TBM 3호기 발진준비를 위해 Thrust frame 및 cradle, 후방 대차 layout 등의 설계가 진행되고 있다.

싱가포르 Transmission cable tunnel 프로젝트는 입찰당시 SK건설(주) 이외에도 국내외 여러 건설사가 입찰에 참여하였으며 그중에서도 특히 한국 건설사가 6공구 중 4공구를 수주하여 국내 지하공간 및 터널에 대한 뛰어난 기술력을 입증한 계기가 되었다고 할 수 있다.