

소음 및 진동을 고려한 도심지 내 대단면 수직구 발파설계 사례 -싱가포르 Transmission Cable Tunnel EW2 공구-

김지연¹⁾, 이 효¹⁾, 김도훈¹⁾, 고태영^{1)*}, 이승철¹⁾

Blasting Design for Large Shaft in Urban Area Considering Noise and Vibration -Singapore Transmission Cable Tunnel EW2-

Julie Kim, Hyo Lee, Dave Kim, Tae-Young Ko, Simon Lee

Abstract With increasing needs in power, Singapore is requiring stronger power transmission. Singapore Transmission Cable Tunnel is underground tunnel for transmission system installation such as 400 kV cable. This Transmission Cable Tunnel is 35 km long in total. The North-South Transmission Cable Tunnel is 18.5 km long and there is a total of three (3) contracts; NS1, NS2 and NS3 in respect of the design and construction. The East-West Transmission Cable Tunnel is 16.5 km long, and also there is a total of three (3) contracts; EW1, EW2 and EW3. Among of them, SK E&C has been awarded and operating contract EW2 and NS2. In scope of works, each contract has 3 to 4 shafts which connect aboveground and underground high volt cable and those shafts are used as TBM launching shafts during construction. Transmission Cable Tunnel is undercrossing middle of Singapore and most of shafts are located in urban area. Thus, optimal blasting design satisfying high blasting efficiency as well as blasting vibration limit of Singapore is highly required. Blasting design for large shaft of Singapore Transmission Cable Tunnel follows blasting vibration limits in Singapore and reflects our blasting engineering skills. With Singapore Transmission Cable Tunnel Contract EW2, it is expected that our excellent blasting engineering and performance skills can be delivered to the world.

Key words Singapore Transmission Cable Tunnel, Shaft, Blasting Design

초 록 싱가포르 전력구 터널 건설공사는 싱가포르 내의 전력수요 증가에 대응하기 위해 지하에 400kV의 고압 전기 케이블 등 송전설비 설치를 위한 터널을 건설하는 공사이다. 본 전력구는 총연장 35km의 터널로서 18.5km의 North-South Line의 3개 공구(NS1, NS2, NS3)와 16.5km의 East-West Line의 3개 공구(EW1, EW2, EW3)로 나누어 건설된다. 총 6개의 공구 중 SK건설은 EW2 공구와 NS2 공구를 수주하여 현재 시공중이다. 본 프로젝트의 과업 중 지상과 고압 송전 케이블 터널을 연결하는 수직구가 공구당 3~4개소가 있으며, 시공 중에는 TBM 발전용으로 활용된다. 지하 전력구는 싱가포르 내 도심 한복판을 가로질러 건설되며, 수직구 또한 대부분 도심지 내에 있어 수직구 굴착 시 발파 효율의 극대화와 동시에 싱가포르 소음 및 진동 기준을 만족하는 최적의 발파 설계가 요구된다. 싱가포르 전력구 터널 EW2 공구의 수직구 발파는 현지 허용 진동속도기준을 준수하고 국내의 우수한 발파 설계기술을 적용하여 설계되었으며 본 설계를 통하여 국내의 우수한 발파 설계 및 시공 기술을 전파할 좋은 기회가 될 것으로 기대된다.

핵심어 싱가포르 전력구 터널, 수직구, 발파설계

¹⁾ SK건설

* 교신저자 : tyko@sk.com

접수일 : 2013년 6월 10일

심사 완료일 : 2013년 6월 23일

게재 승인일 : 2013년 6월 27일

1. 서론

싱가포르 전력구 터널 건설공사는 싱가포르 내 전력수요 증가 및 발전용량 확대에 따른 송전기반을 강

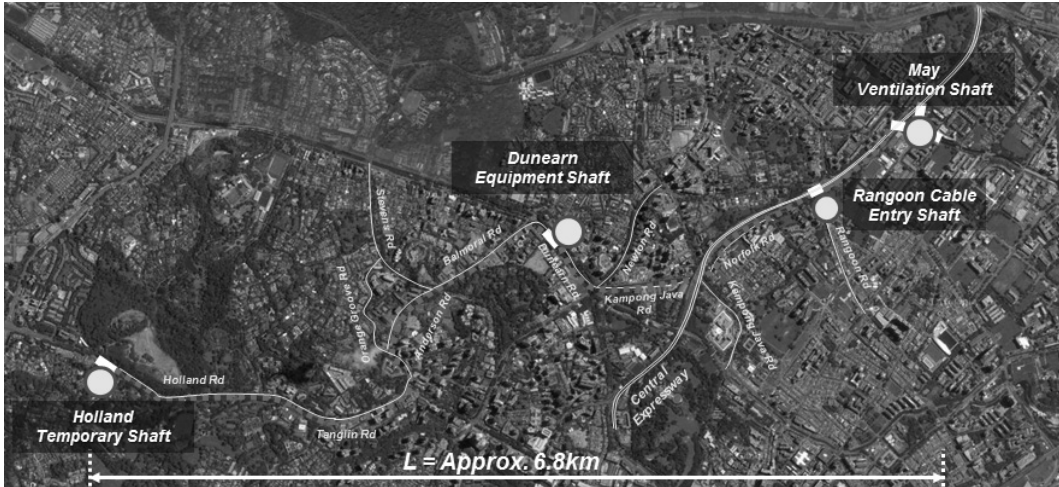


그림 1. EW2 공구 노선도.

화하기 위해 지하 전력구 터널을 건설하여 400kV의 고압 전기 케이블 등 송전설비를 설치하는 공사이다.

본 전력구 터널의 총연장은 35km이며, Gambas Avenue에서부터 May Road까지 싱가포르의 남북을 가로지르는 총 18.5km의 NS Line 3개 공구 (NS1, NS2, NS3)와 Ayer Rajah에서 Paya Lebar까지 싱가포르의 동서 방향을 가로지르는 총 16.5km의 EW Line 3개 공구 (EW1, EW2, EW3)로 나누어 건설된다.

본 프로젝트의 과업 중 지상과 고압 송전 케이블 터널을 연결하는 수직구가 공구당 3~4개소가 있으며, 공사 중에는 TBM 발진 및 회수용으로 활용된다. 수직구 직경은 약 12~18m이며, 상부 토사구간은 지중 연속벽(Diaphragm wall) 및 기계 굴착으로 건설되며, 하부 암반구간은 발파에 의한 굴착방법과 임시지보재로 록볼트, 슛크리트, 그리고 영구지보재로 콘크리트 라이닝이 설치된다.

특히 EW2 공구는 싱가포르 내 도심 한복판을 가로질러 건설되며, 수직구 또한 대부분 도심지 내에 있다. 수직구 주변으로는 주거지역 및 상업지역 등이 있어 발파에 의한 진동 및 소음으로 인한 민원 유발 요인이 상시 존재하고 있다.

본 논문은 발파 효율의 극대화와 동시에 싱가포르 환경규제를 만족하도록 소음/진동을 저감할 수 있는 수직구 발파 설계 사례로 내경 12~18m의 대단면을 반원의 2회 분할 발파로 설계하여 수직구 안정성 확

보뿐만 아니라 굴착 사이클 타임을 최적화하였다.

2. 싱가포르 Transmission Cable Tunnel EW2 공구 개요

SK건설이 수행 중인 EW2 공구는 Singapore Power Group 산하 Singapore Power Asset (SPPA)에서 발주한 전력구 공사로, 그림 1과 같이 싱가포르 도심을 동서 방향으로 가로지르는 Holland Road에서부터 May Road까지 전체 연장이 약 6.8km인 내경 6.0m의 TBM 터널, 지상 운영건물과 지하 전력구를 연결하는 수직구 4개소, 수직구와 전력구를 연결하는 NATM 터널, 그리고 지상 운영 건물 3개소 등으로 구성되어 있다.

EW2 공구는 총 4개의 수직구가 위치하고 있으며, 4개의 수직구 중 1개소 (Holland 수직구)는 공사용으로 사용되며, 3개소는 영구적인 구조물로서 활용될 계획이다. 수직구는 공사 중 TBM의 발진 및 회수를 위한 작업구로서 활용되며, 운영 중에는 지상 변전소에서 지하 전력구로의 400kV 고압 전기 케이블의 인입, 환기 및 방재 등의 용도로 활용된다. 그림 2에 EW2 공구의 수직구 모식도를 나타내었다.

수직구의 단면은 모두 원형이며, 크기는 용도에 따라 내경 12~18m로 다양하다. 수직구의 깊이는 약 60~70m이며, 각 수직구의 주요 제원은 표 1과 같다.

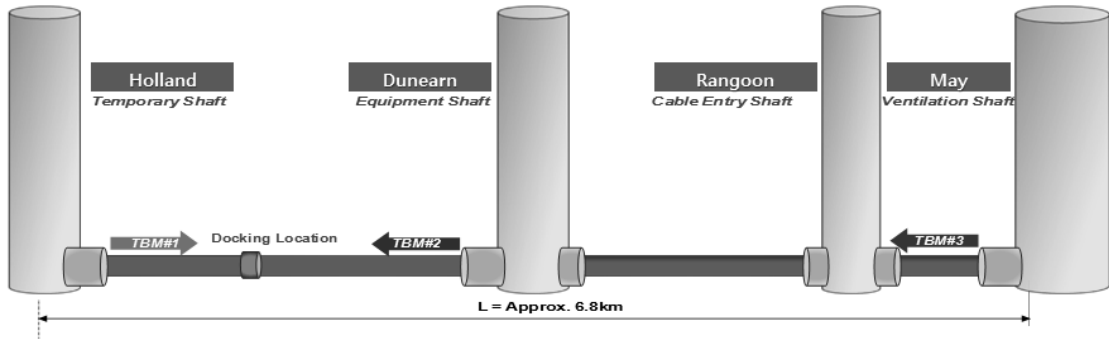


그림 2. EW2 공구 수직구 모식도.

표 1. 수직구 제원

	Holland 수직구	Dunearn 수직구	Rangoon 수직구	May 수직구
용도	임시 구조물	영구 구조물	영구 구조물	영구 구조물
크기 (내경)	14m	14m	12m	18m
깊이	59m	68m	62m	58m
기타	TBM 발진/회수	TBM 발진/회수	-	TBM 발진

표 2. 풍화도에 따른 Bukit Timah Granite 암반등급 분류(SPPA, 2011a)

Grade	Designation	Description	Basis for Assessment
I	Fresh to Faintly Weathered	No visible sign of weathering, or weathering limited to the surface of major discontinuities	Intact strength, unaffected by weathering. Not broken easily by hammer - rings when struck. No visible discoloration
II	Slightly Weathered	Penetrative weathering developed on open discontinuity surfaces but only slight weathering of rock material	Not broken easily by hammer - rings when struck. Fresh rock colors generally retained but stained near joint surfaces.
III	Moderately Weathered	Weathering extends throughout the rock mass but the rock material is not friable	Cannot be broken by hand. Easily broken by hammer. Makes a dull or slight ringing sound when struck with hammer. Stained throughout
IV	Highly Weathered	Weathering extends throughout rock mass and the rock mass is friable	Core can be broken by hand. Does not slake in water. Completely discolored.
V	Completely Weathered	Rock is wholly decomposed and in a friable condition but the rock texture and structure are preserved	Original rock texture preserved. Can be crumbled by hand. Slakes in water. Completely discolored.
VI	Residual Soil	A soil material with the original texture, structure and mineralogy of the rock completely destroyed	Original rock structure completely destroyed. Can be crumbled by hand

3. 지반조건

싱가포르 지질은 크게 서부의 Jurong Formation, 중북부의 Bukit Timah 화강암, 동부의 Old Alluvium (고결 충적층)으로 구분된다. Bukit Timah 화강암은

풍화도에 따라 6등급으로 구분되며, 주요 특성은 아래의 표 2와 같다. 일반적으로 GI에서 GIII까지는 암반, GIV에서 GVI까지는 토사 (Residual Soil)로 구분된다.

Old Alluvium은 신생대 제4기에 형성된 충적층으

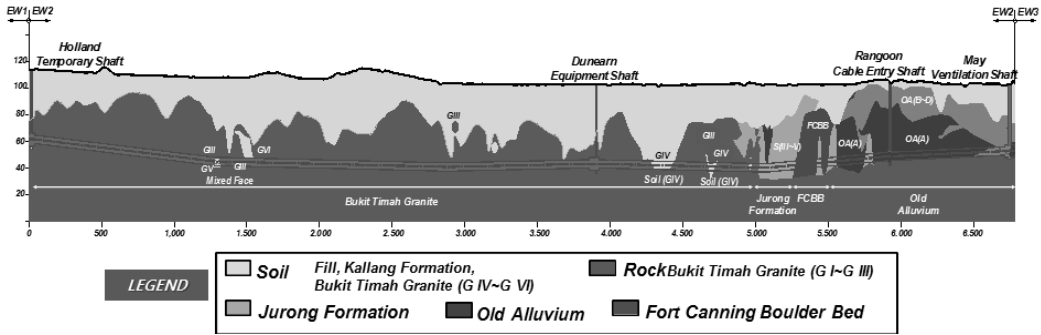


그림 3. EW2 공구 지층 종단면도.

로서, 고결도의 정도, 즉 SPT-N 값에 따라 5개의 등급 (A/B/C/D/E)으로 구분되며, 사질 실트층 (Sandy Silt), 사질 점토층 (Sandy Clay), 실트질 모래 (Silty Sand)로 구성되어 있다.

EW2 공구의 지반조건은 그림 3과 같이 Holland 수직구와 Dunearn 수직구는 Bukit Timah 화강암이 분포하고 있으며, Ragoon 수직구와 May 수직구는 Old Alluvium 지역에 있다.

Old Alluvium 및 Bukit Timah 화강암의 토사 (Residual Soil)가 위치하는 구간은 지중연속벽 및 기계 굴착 공법으로 시공되며, Bukit Timah 화강암 GI~GIII의 암반층은 발파에 의한 굴착 공법과 임시지보재인 록볼트, 슛크리트, 그리고 영구지보재로 콘크리트 라이닝이 적용되었다.

Bukit Timah 화강암 (GI~GIII)의 일축압축 시험 결과, GI에서 일축압축강도의 값이 최대 250MPa까지 나타나, 수직구 굴착 시 일부 구간에서는 매우 강한 압축강도를 가지는 암반을 조우할 것으로 예상되었다.

4. 수직구 발파 설계

4.1 수직구 주변 보안물건 및 발파 진동 기준

이미 서술된 바와 같이, Bukit Timah 화강암 GI에서 GIII의 암반층은 발파로 굴착되며 Holland 수직구와 Dunearn 수직구의 지질 특성상 하부에서의 발파가 예상된다. 발파 수행 시 주변에 피해가 없도록 각별한 주의가 필요하며 보안물건의 진동기준을 준수하여야 한다. 두 개의 수직구 중 Dunearn 수직구 주변



그림 4. Dunearn 수직구 주변 지장물 현황.

으로 주요 주거 건물 및 상가들이 위치하며 그 현황은 그림 4와 같다.

싱가포르 역시 국내와 같이 구조물 용도별 발파진동속도 허용기준을 가지고 있으며, EW2 공구에 적용된 발파 진동속도 허용기준은 표 3과 같다.

이에 주요 보안물건의 수직구로부터의 최소이격거리, 최대 지발당 장약량에 따른 발파 진동 영향을 고려하여 수직구 발파 설계를 수행하였다.

4.2 발파진동 추정식

도심에서 불가피하게 수행되는 발파로 인한 환경피해를 저감하고, 시공성 및 경제성을 향상시키기 위해서는 현장의 여건 및 지반조건 등을 고려한 효율적인 발파설계가 필수적이다. 이를 위해 발파공사 시행 전에는 반드시 시험발파를 통하여 발파진동 추정식을 산정하고, 시공성과 경제성 및 인근 보안물건의 안전성 등을 종합적으로 검토하여 적정발파공법을 적용하

표 3. EW2 공구 발파 진동속도 허용기준 (SPPA, 2011b)

Utility	Installation	Maximum Allowable Peak Particle Velocity (mm/s)
Gas	All	25
Electricity	Power Stations	13
	Sub-stations (major)	13
	Sub-stations (minor)	25
	Underground Cable Joints	13
	Underground Cables& Pylon foundations	25
Water	Non Water Retaining Structures & Water Mains	25
	Water Retaining Structures	13
	Water main Tunnel	13
Drains & Sewers	All	25
Highways	All	25
Telecom utilities	All	25
Housing estates, schools, other structures/buildings Private properties	All (Useless specifically stated otherwise)	25
LTA/SMRT ¹⁾	Railway structures	25
Ancient Monuments	All	13
Medical Centre / Hospitals	All (Unless agreed otherwise)	5
Places of Worship	All significant structures (Unless agreed otherwise)	5
	Less than 2 days old	5
Fresh concrete	2 to 8 days old	25
	More than 8 days old	20
Slopes and Retaining walls	All (Unless Analyzed)	5

¹⁾ LTA : Land Transportation Authority (육상교통국)
 SMRT : Singapore Mass Rapid Transit (싱가폴지하철공사)

여야 한다.

그러나 설계 단계에서 이러한 절차 수행에는 현실적으로 적용하기에 무리가 있으므로, 효율적인 발파 설계수행을 위하여 발파 진동예측을 위한 설계단계에서의 진동 추정식 결정이 필요하다. 발파진동을 예측할 수 있는 일반적인 발파진동 추정식은 다음과 같다.

$$v = K \left(\frac{D}{W^\beta} \right)^\alpha \quad (1)$$

여기서, v : 진동속도(mm/s)
 D : 폭원으로부터의 거리(m)
 W : 지발당 장약량(kg)

K : 발파진동 상수

β : 장약지수

α : 감쇠지수

이 식에서 K, α는 지질조건, 발파방법, 화약류의 종류에 따라 변화되는 현지 상수(site constant)로, 시험 발파에 의한 계측결과를 분석하여 그 현장에 적합한 발파진동 추정식을 구하는 것이다. 이 발파진동 추정식에서 β = 1/2 인 경우, 즉 D/W^{1/2}를 자승근 환산거리(Square Root Scaled Distance), β = 1/3 인 경우 즉 D/W^{1/3}를 삼승근 환산거리(Cube Root Scaled Distance)라 한다.

미국의 경우 U.S Bureau of Mines은 자승근(β

표 4. 주요 보안건물에 대한 허용 진동속도

주요보안건물	수직구로부터 최소이격거리	허용진동속도	비고
ESSO Petrol Station	약 50m	25mm/s	Gas
Chancery Court	약 55m	25mm/s	Housing estates, schools, other structures/buildings, private properties
Home Nursing Foundation	약 42m	5mm/s	Medical Centre / Hospitals

=0.5)이 대부분의 암반 조건에 적절하다고 제안하였으며 현지 상수를 아래와 같이 제안하였다(Siskin et al., 1980).

$$K = 1244, \alpha = -1.45$$

이 외에도 세계 각국마다 발파 상수를 달리 산출하였으며, Hong Kong Mines and Quarries Division에서의 현지 상수는 아래와 같다(Wong and Pang, 1992).

$$K = 644, \alpha = -1.22$$

국내의 경우, 설계단계에서 예비검토를 위한 발파 진동 추정식에는 국토해양부 도로설계기준(2012) 및 도로공사 노천발파 설계·시공 지침(2006)에서 제시한 아래 상수를 사용하며 이때의 진동속도의 단위는 kine(cm/s)으로 계산된다.

$$K = 200, \alpha = -1.6, \beta = 0.5$$

이와 같이 나라마다 현지 지반조건에 맞게 각기 다른 상수를 적용하여 진동속도를 계산하고 있다. 싱가포르 역시 현지에서 일반적으로 사용되는 발파진동 추정식과 발파 상수 및 지수가 있으며, 내용은 아래와 같다(SPPA, 2011b).

$$v = KW^\alpha D^\beta \tag{2}$$

여기서, K = 700 (현지 상수)
 α = 0.7 (현지 상수)
 β = -1.5 (현지 상수)
 W = 지발당 장약량(kg)

D = 발파원으로부터의 이격거리(m)
 v = 진동속도(mm/s)

앞서 4.1절에서 언급된 수직구 주변 건물에 대하여, 수직구 발파 지점으로부터의 최소이격 거리(m)와 각 구조물의 허용 진동속도(mm/s)는 다음의 표 4와 같다.

4.3 발파 설계 상세

수직구 발파는 노천 채광 발파와 같이 수직 발파 작업으로 이루어진다. 노천 채광은 잘 파쇄된 광석을 최대한 많이 생산하면서 발파로 인해 노출된 암반사면의 붕괴 위험성을 최소화하여야 한다는 두 가지 상반된 요구에 직면한다. 수직구 역시 중력 반대방향으로의 버력 처리를 보다 효율적으로 수행할 수 있도록 암석을 잘 파쇄시키면서 굴착면의 안정성 및 설계 단면을 확보하여야 한다는 두 가지 요구를 만족하게 해야 한다. 이러한 요구를 만족하게 하면서 발파진동기준을 만족하는 수직구 발파 설계를 다음과 같이 수행하였다.

뇌관 설계

싱가포르의 수직구 발파 시 모든 발파공의 뇌관 시차를 직접 계산하여 뇌관을 배치하지 않고, 한 공당 2개의 뇌관(전폭용 뇌관, 연결용 뇌관)을 설치하여 무한시차가 가능하도록 시공하는 것이 일반적이다. 즉, 공저부에 전폭용 뇌관 1개를 설치하고 공 끝에 연결용 뇌관 1개를 설치하여, 이 연결용 뇌관을 다음 발파공에 연결한다. 전폭 뇌관의 기폭으로 발파공이 발파되면 다음 발파공에 연결된 연결용 뇌관이 차례로 기폭되며, 다음 발파공을 순차적으로 발파시키는 방식이다. 이러한 방식을 사용하게 되면 한 공당 뇌관이 1~2개가 소요된다.

상기의 뇌관 연결방법에 따른 기폭 방식의 장점은

많은 공에 대해 무한 시차가 가능하여 설계가 쉽고, 지발당 장약량을 줄여 진동을 저감할 수 있다는 점이다.

반면, 상기의 뇌관 연결방법은 많은 단점을 가지고 있다. 주요 단점은 첫째, 연결용 뇌관이 공마다 배치되어 불필요한 뇌관비용이 발생하여 공사비가 증가하며 둘째, 뇌관의 연결이 느슨해지거나 전 단계 공의 불발 때문에 전체 불발의 가능성이 존재하고 셋째, 설계에서 고려하지 않은 순발로 인해 발파진동이 예상보다 커질 위험이 있으며, 마지막으로 지발의 발파공 배치가 좌우 대칭으로 순발에 의한 비석 때문에 Cut-off 현상이 발생할 수 있다.

그리하여 본 사례에서는 수직구 발파 설계에 전자 뇌관을 적용하여 기존 전기 또는 비전기 뇌관보다 안정적이고 정확한 초시를 제공하고, 전자뇌관의 무한 시차 장점을 이용해 지발당 장약량을 줄여 진동을 저감시켰으며, 공당 1개의 뇌관을 적용하여 뇌관 불발 때문에 전체 불발의 위험을 사전에 제거하였다.

분할 발파 설계

본 공사의 수직구의 경우 내경이 12~18m의 대단면을 가지기 때문에 반원의 2회 분할 발파로 설계하였다. 분할 발파를 통해 수직구 안정성 확보는 물론 굴착 사이클 타임을 최적화하여 공기를 단축할 수 있을 것으로 판단되었다. 예를 들어 한 단면에서 발파로 인한 버럭처리 작업을 수행할 때 다른 단면에서 숏크리트나 록볼트 작업이 가능한 것으로 가정하였다.

심발 설계

수직구의 심발부는 진동 저감에 매우 효과적이고 장공 천공으로 연속 작업이 용이한 대구경 무장약공 (Large Burn Hole, D = 400mm)을 적용하였다. 이는 터널에서의 평행공 컷트(Paralled Hole Cut)와 유사한 공법으로 최초의 폭발을 위한 자유면을 형성하기 위해 대구경 무장약공을 배치하는 것이다. 대구경 무장약공을 심발부에 적용할 경우, 대구경 천공을 위해 일

표 5. 주요 보안건물에 대한 예상 진동속도

주요보안건물	수직구로부터 최소이격거리	허용진동속도	설계최대지발당 장약량
ESSO Petrol Station	약 50m	25mm/s	1.2kg/delay
Chancery Court	약 55m	25mm/s	1.2kg/delay
Home Nursing Foundation	약 42m	5mm/s	1.2kg/delay

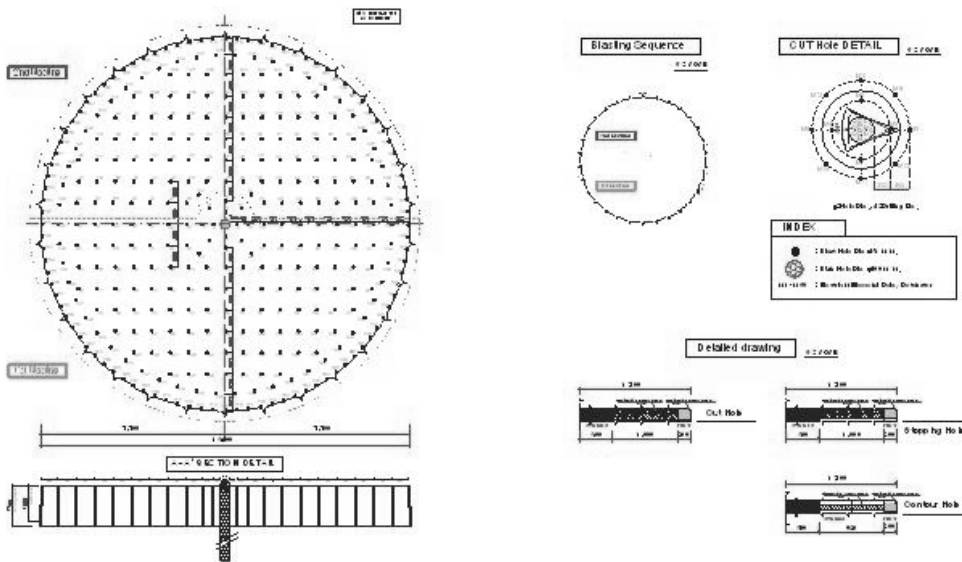


그림 5. 수직구 발파패턴도.

반 발파공 천공장비에 비해 룯드가 큰 별도의 장비 투입이 필요하지만, 한 번 장비가 진입하여 수십m를 미리 천공해 놓으면 다음 여러 회의 굴진에도 기존 무장약공을 자유면으로 사용할 수 있기 때문에 장기적으로 굴진 효율이 향상되는 장점이 있다.

심발부 무장약공과 발파공과의 이격거리는 300mm를 적용하였다. Langefors & Kigström(1973)에 따르면 파쇄가 양호하게 실시되고 소할현상을 방지하기 위한 최소 저항선(B)은 대구경 무장약공의 직경(D)의 1.5배 이하를 유지하여야 하므로 설계된 대구경 무장약공과 발파공 사이의 이격거리($B = 300\text{mm} \leq 1.5D = 1.5 \times 400\text{mm} = 600\text{mm}$)는 적정한 것으로 판단된다.

확대공 및 외곽공 설계

주변 확대공 간격은 800~900mm 로 설계하고 외곽공 공간격은 450~550mm으로 설계하였다. 외곽공 발파 시 우리나라에서 정밀폭약을 사용하는 것과 달리, 싱가포르는 일반 폭약의 약량을 줄여 외곽공에 적용하거나 라인드릴링(Line-drilling), 프리스플리팅(Presplitting)을 함께 적용하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 방법은 미끌이 발생할 가능성이 크고 공간격이 작은 라인드릴링에 많은 천공시간이 소요되게 된다. 그리하여 당사에서는 우리나라와 마찬가지로 정밀폭약을 사용하는 것으로 설계하여 미려한 설계 단면을 확보하고 발파효율을 높이도록 설계하였다.

진동기준을 만족하는 발파설계

최대 지발당 장약량은 주변 보안건물을 고려하여 1.2kg/delay로 설계하였으며, 이는 허용 진동속도를 충분히 만족하는 것으로 나타났다(표 5).

설계된 수직구의 표준 발파패턴도는 그림 5와 같다.

5. 결론

싱가포르 Transmission Cable Tunnel EW2 공구의 수직구 발파는 현지 허용 진동속도기준을 준수하고 국내의 우수한 발파 설계기술을 적용하여 설계되었다. 발파공사 시행 전에는 반드시 설계에 적용된 표준 발파패턴 및 공법을 기준으로 시험발파를 시행할 것이며 그 결과에 따라 현지 암반별 발파진동 추정식(K, α)를 구하여 발파설계를 수정 및 보완하여 변경할 예정이다. 또한, 공사 수행 중 설계 당시 파악되지 않은 민원인을 파악하여 허용 진동속도를 만족하는 발파를 수행할 것이다.

본 프로젝트를 통하여 국내의 우수한 발파 설계 및 시공 기술을 전파할 좋은 기회가 될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 2006, 도로공사 노천발파 설계·시공 지침.
2. 국토해양부, 2012, 도로설계기준.
3. Langefors, U and Kigström, B, 1973, The Modern Technique of Rock Blasting, John Wiley and Sons, New York.
4. Siskin, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W., and Dowding, C.H., 1980, Structure response and damage produced by ground vibrations from surface mine blasting, USBM Report RI 8507, USA.
5. SPPA, 2011a, Geotechnical Interpretative Baseline Report, Design and Construction of East-West Transmission Cable Tunnel Contract EW2.
6. SPPA, 2011b, Material and Workmanship Specification, Design and Construction of East-West Transmission Cable Tunnel Contract EW2.
7. Wong, H. N. and Pang, P. L. R., 1992, Assessment of Stability of Slopes Subjected to Blasting Vibration, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, Hong Kong, pp. 119.



김 지 연
SK건설

Tel: 02-3700-9348



이 효
SK건설

Tel: 02-3700-9348
E-mail: hyolee@sk.com



김 도 훈
SK건설

Tel: 02-3499-1685
E-mail: hy0795@sk.com



고 태 영
SK건설

Tel: 02-3499-1589
E-mail: tyko@sk.com



이 승 철
SK건설

Tel: 02-3700-8683
E-mail: sclee-a@sk.com