

전자뇌관과 다단장약을 이용한 발파 사례 연구

고태영¹⁾, 신창오¹⁾, 이 효^{1)*}, 이승철¹⁾

A Case Study on Multiple-deck-charge Blasting with Electronic Detonators

Tae Young Ko, Chang Oh Shin, Hyo Lee and Seung Cheol Lee

Abstract A TBM launching shaft in DTL2 Contract 915 site is located in a typical hard Bukit Timah granite formation and lots of blasting work is required for shaft sinking. The original blast design used the electric detonator and ANFO blasts consisting of 30 holes per one blast with 1.5 m depth of drilling hole. However, significant delay of work and poor progress were expected due to the limitation of the number of blasting hole and strict vibration regulation on retaining systems. To overcome such constraints, an efficient new blasting method which can improve productivity and satisfy vibration limit was required. The revised blast design, using triple-deck blasts with electronic detonators and cartridge emulsion explosives, gives better construction performance and can reduce construction time. Such a new blasting technique can be effectively used for similar underground projects in the future where the volume of rock blasting is significant.

Key words Multiple-deck-charge, Electronic detonator, Blasting efficiency

초 록 싱가포르 DTL2 C915 건설공사 중 TBM 발전을 위한 개착구간의 암발파 공사를 위해 당초 전기뇌관과 ANFO로 발파시공이 계획되었으나 1회 발파공수 제한 및 가시설에 대한 엄격한 진동관리 규정 등으로 인해 작업공정이 많이 지연되어 TBM 발전을 위한 예정된 공기를 준수하지 못하는 것으로 검토되었다. 따라서 암발파 공법의 효율을 개선하고 1회 발파공수 및 파쇄면적의 최대화를 위해 다단장약이 검토되었으며, 다단장약의 효율성을 높이기 위해 정밀성이 장점인 전자뇌관이 선정되었다. 다단장약 적용으로 천공장이 길어짐에 따라 커지는 암반 구속력에 대응하기 위해 폭약의 위력을 증대시키는 방안으로 Emulsion Cartridge 폭약을 적용하였다. 그 결과 발파효율과 시공성을 개선함과 동시에 가시설의 안정성을 확보할 수 있었다.

핵심어 다단장약, 전자뇌관, 발파효율

1. 서 론

싱가포르 Downtown Line(DTL) 2단계공사는 싱가포르의 북서부 Bukit Panjang역과 남동부 Rocher역을 연결하는 총 연장 16.6km의 도심 지하철 공사로, 12개의 정거장으로 이루어져 있으며 2015년 완공을

목표로 하고 있다. 발주처는 싱가포르 육상교통(Land Transport Authority, LTA)로서, 육상교통망을 통합 연계하고, 육상교통 정책 업무를 총괄·기획하고 있는 싱가포르 교통부 산하기관이다.

싱가포르 DTL 2단계공사 C915공구는 총 10개 공구 중 유일하게 역사가 포함되지 않고 터널구간으로만 구성되어 있으며, 싱가포르에서 가장 높은 Bukit Timah Hill을 통과하는 구간으로서 인접한 Beauty World Station(C916공구)과 Hillview Station(C913공구)을 단선 병렬터널로 연결하는 공사이다(그림 1).

¹⁾ SK건설

* 교신저자 : hyolee@sk.com

접수일 : 2012년 12월 1일

심사 완료일 : 2012년 12월 14일

계재 승인일 : 2012년 12월 20일

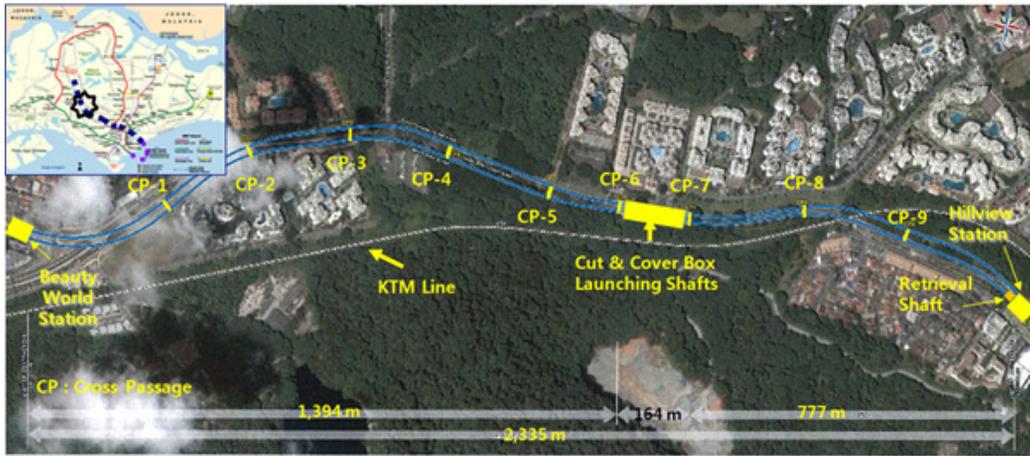


그림 1. Downtown Line 2단계공사 915공구 노선 현황.

본 공사는 2 곳의 TBM 발진수직구(Launching Shaft)를 포함한 Cut & Cover 구조물(폭 30m, 길이 164m) 1개소와 3기의 Slurry Shield TBM을 이용한 총 연장 2.3km의 단선병렬터널, 그리고 Drill & Blast를 이용한 9개의 피난연락갱(Cross Passages)을 굴착하는 것으로 되어있다.

Cut & Cover 구조물 구간은 전체 굴착 중 암반층이 약 17% 정도 차지하고 있어, 많은 양의 발파(약 15,600m³)를 수행해야 한다(그림 2). 싱가포르의 경우, 발파 시공 사례가 많지 않아 도심지에서의 발파 작업이 매우 어려운 공사 중의 하나로 인식되어 있으며 대부분의

발파는 ANFO 폭약 및 전기뇌관 방식으로 하루에 많은 양의 발파작업을 수행하기 어려운 것으로 파악되었다. 또한 SBP wall, king post, strut, decking 등의 가시설에 대해서도 안정성 유지를 위하여 발파 진동 관리기준으로 30cm/sec를 따라야 한다.

본 현장에서는 이러한 현지 Practice를 적용할 경우 발진수직구의 굴착작업에 공기가 상당히 많이 소요될 것으로 판단되어 발파진동과 소음을 최소화하고 발파 효율을 최대로 획득할 수 있는 방안을 검토하여 전자 뇌관 및 다단장약을 이용하여 1회 발파로 4.5m 깊이 까지 굴착하는 방안을 선정하였다.

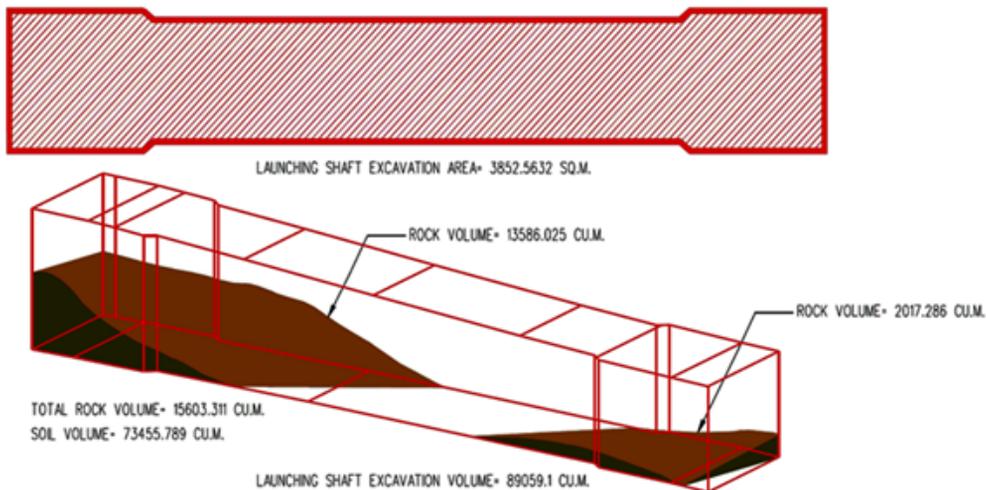


그림 2. Cut & Cover 구간에서의 발파 굴착량.

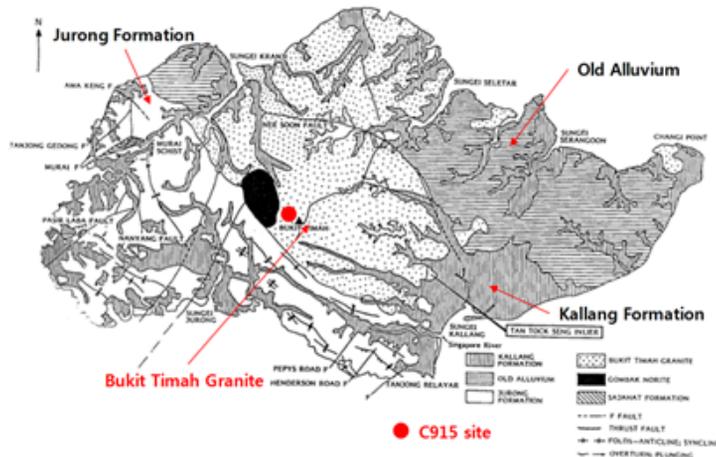


그림 3. 싱가포르 지질도.

2. 지질조건

싱가포르의 지질은 서부의 Jurong Formation(퇴적암) 및 Kallang Formation(연약지층), 중부의 Bukit Timah Granite(화강암층), 동부의 Old Alluvium(충적층 계열), 남부 해안의 Kallang Formation으로 구성되어 있으며, C915공구는 Bukit Timah Granite 지역에 위치하고 있다(그림 3).

Bukit Timah Granite의 일반적인 특성은 열대성 기후로 인한 다량의 우수 침투에 의해 생성된 토사층이 깊게 분포하고 있으며, 부분적으로 풍화가 진행되지 않은 핵석(Corestone) 및 불규칙한 기반암선이 나타나고, 100MPa 이상의 일축압축강도를 갖는 암반이 불규칙하게 분포한다.

Cut & Cover 구조물 구간의 지질상태는 Kallang formation, Residual Soil의 토사층과 Bukit Timah Granite가 주로 이루는 암반층으로 이루어져 있으며, TBM 발진수직구 구간은 특히 심성암인 Bukit Timah Granite가 매우 발달된 구간이다.

3. 전자뇌관과 다단장약

3.1 시공방법의 비교

당 현장의 Cut & Cover 굴착 구간은 굴착 → 버려 처리 → Strutting 공중을 반복하여 작업을 진행하고 있다. 굴착공종 중 암굴착구간 당초 시공방법은 현지

의 Practice인 전기뇌관과 ANFO를 사용한 발파공법이었으나, 다음과 같은 단점이 발견되었다.

- 전기뇌관 사용시 가시시설의 진동관리기준을 만족하기 위한 1회 발파공수가 30공으로 제한
- 큰 발파진동을 유발하는 폭약류인 ANFO 사용
- 좁은 공간에서의 비효율적인 작업공정

이로 인해 암발파 구간의 작업공정이 많이 지연되어 TBM 발진을 위한 예정된 공기를 준수하지 못하는 것으로 검토되었으며, 발파 진동 관리기준을 만족하면서 동시에 시공효율을 증대시킬 수 있는 굴착방안 제시가 필요하였으며, 설계를 위해 고려해야 할 주요 인자들은 아래와 같다.

- 2회/1일(10am~06pm)에 가능한 장약량 및 지연 시차 결정.
- 1회 최대 발파 심도 결정
- 최적의 효율을 고려한 발파 단수 선정
- 정밀한 다단 발파를 위한 뇌관 선정
- 발파진동 제어를 위한 폭약의 선정
- 버력의 비산 억제를 위한 Covering System 선정
- 천공 정밀성 및 천공시간 단축을 위한 천공장비 선정

발파공법의 개선을 위해 1회 발파공수 및 파쇄면적을 증대시키는 것이 가장 효과적이어서 다단장약을 이용한 발파공법이 검토되었으며, 다단장약의 효율성

표 1. 당초 및 변경된 발파공법의 장단점

| 발파공법 | 당초 (전기뇌관, ANFO) | 변경 (전자뇌관을 이용한 다단장약, Emulsion Cartridge) |
|------|--|--|
| 장 점 | <ul style="list-style-type: none"> 싱가포르에 가장 많이 사용되는 방식으로 작업자가 쉽게 사용가능하다. | <ul style="list-style-type: none"> 1회 발파공수 증대 진동이 저감됨 발파효율이 증대됨 시공성이 향상됨 |
| 단 점 | <ul style="list-style-type: none"> 가시설에 대한 진동기준을 만족하기 위해서는 1회 발파공 수가 30공으로 제한되는 것으로 검토됨 | <ul style="list-style-type: none"> 싱가포르에 처음 사용하는 방식 전자뇌관이 전기뇌관에 비해 가격이 높음 |

을 높이기 위해 정밀성이 장점인 전자뇌관이 선정되었다. 다단장약의 적용으로 천공장이 길어짐에 따라 커지는 암반 구속력에 대항하기 위해 폭약의 위력을 증대시키는 방안으로 Emulsion Cartridge 폭약을 적용하였다. Emulsion Cartridge 폭약은 ANFO에 비해 폭약류 성능이 뛰어나서 발파효율이 높아지고 발파 진동이 저감되는 장점이 있다(Olofsson, 1988).

싱가포르에서 버력의 비산방지를 위해 실시되는 Covering은 2~3m 두께의 토사 복토가 일반적이나, 전자뇌관과 다단장약을 이용한 발파공법으로 변경함에 따라 대단면의 발파면적을 토사로 복토하는 것은 비효율적임으로 파악되어 Covering 방식을 토사 복토에서 Tatami와 Tire mat로 변경하였다. 표 1에 당초 및 변경된 발파공법에 대한 장단점을 요약하였다.

3.2 전자뇌관

산업용 폭약의 발달과 더불어 산업용 뇌관의 발달에 있어서도 더욱 안전하고 정밀하며 또한 환경 유해적인 요소를 저감하는 방향으로 개발되어 왔다. 최근

개발된 전자뇌관의 경우 자체 IC회로(Electronic Chip) 및 제어장치를 내장하여 기존 뇌관에 비해 더욱 우수한 정밀성, 안전성 등에 대한 효과가 있다(Persson et al., 1993).

전자기폭시스템은 기존의 전기나 비전기식 기폭방식과는 달리 사용자가 1ms 단위로 임의의 뇌관별 초시 부여가 가능하여 1회 발파가능한 발파공수가 전기 뇌관에 비해 약 10배 이상 많아진다. 또한, 초시오차도 1,000ms까지는 0.1ms이하, 그 이상에서는 1%미만으로 일반 기폭시스템에 비해 월등히 우수하여 진동파형의 간섭 및 중첩효과를 배제할 수 있어 진동수준이 저감되는 장점이 있다(Miller & Martin, 2007).

3.3 전자뇌관을 적용한 다단장약 발파 설계

다단장약 발파 설계는 전자뇌관 특성을 활용하여 가시설 안정성을 유지하면서 시공효율을 최대한 높이는 데 중점을 두었다. 천공장은 strut 사이의 높이와 작업공간을 고려하여 4.5m로 결정하였으며, 단(deck)수는 시험발파를 통하여 3개로 선정하였다. 그림 4는 3

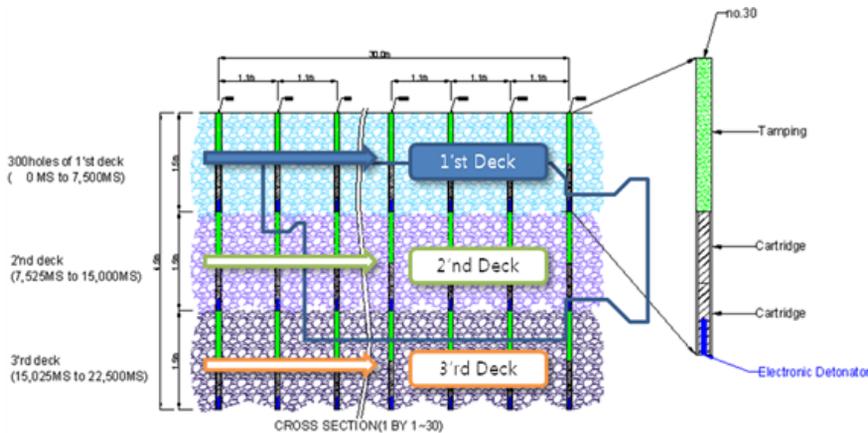


그림 4. 3단 다단장약 발파 설계 모식도.

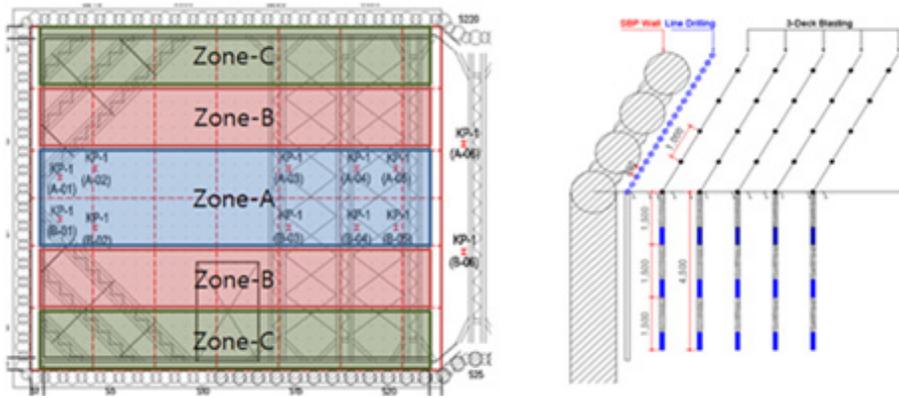


그림 5. Cut & Cover 구조물의 발파영역.

단 다단장약 발파 설계의 모식도로서 전자뇌관의 정교한 초시 제어를 통하여 1단부터 3단까지 순차적으로 발파된다.

1회 발파공수는 장약 및 Covering 시간을 고려하여 233공으로 선정하였으며, Cut & Cover 구조물 중 TBM 발진수직구(24m×32m)를 3개의 영역으로 나누어 발파하는 것으로 계획하였다(그림 5).

표 2에 Cut & Cover 구조물 중 TBM 발진수직구(24m×32m)의 1회 Strut 깊이인 4.5m 발파구간에서의 당초와 변경된 발파설계를 비교하였다.

3.4 CYCLE TIME 분석

Cut & Cover 구조물 중 TBM 발진수직구(24m×32m) 구간의 1단의 Strut 깊이인 4.5m를 굴착하는데 대하여 전기뇌관과 전자뇌관의 시공 소요공기를 비교하였

을 때, 버력 처리시간을 동일하게 가정하면 전자뇌관을 사용한 3단 다단장약 발파 공법을 적용하는 것이 약 21일 단축되는 것으로 분석되었으며, 5단의 Strut 깊이를 모두 고려하면 약 105일이 단축되는 것으로 분석되었다. 당 현장에서 발파굴착은 1일 2회 발파라는 제약조건이 있는데, 이러한 제약조건이 전기뇌관과 전자뇌관 소요공기 차이의 가장 큰 원인이라고 할 수 있다. 또한 전자뇌관을 적용하면서 버력의 비산방지를 위해 실시되는 대단면 Covering의 시간을 축소하기 위해 Covering 방식을 토사 복토에서 Tatami와 Tire mat로 변경하였다.

아래의 표 3은 TBM 발진수직구(24m×32m) 구간의 1회 Strut Level인 4.5m의 심도를 발파하기 위한 Cycle Time을 비교한 것이다.

표 2. 당초 및 변경된 발파설계

| 구 분 | | 당초 (전기뇌관, ANFO) | 변경 (전자뇌관, 다단발파, Emulsion Cartridge) |
|--------------------------|-------|---------------------|--|
| Excavation | Area | 24m×32m | 24m×32m |
| | Depth | 4.5m | 4.5m |
| Drilling Depth per round | | 1.5m/step | 4.5m/step |
| Burden and Spacing | | 1.1m | 1.1m |
| 발파영역 | | 24영역 | 3영역 |
| Nos. of Drilling Holes | | 2,097(699ea×3steps) | 699 |
| Nos. of Detonator | | 2,097(699ea×3steps) | 2,097(699ea×3decks) |
| Total Drilling Length | | 3145.5m | 3,145.5m |
| 최대 가능한 1회 발파공수 | | 30 | 233 |
| 최대 가능한 1회 발파 뇌관연결 갯수 | | 30 | 699(233×3decks) |

표 3. 당초와 변경된 공법의 Cycle Time 비교

| 구 분 | | 당초 (전기뇌관, ANFO) | 변경 (전자뇌관, 다단발파, Emulsion Cartridge) |
|---------|------------------------------|--------------------|--|
| 총 천공수 | | 2,097공(699공×3step) | 699공 |
| 전체 발파영역 | | 72구간(24구간×3step) | 3구간 |
| 천공장 | | 1.5m | 4.5m |
| 1회 발파 | 최대 발파공수 | 30공 | 233공 |
| | 천공시간 | 0.25일 | 1.5일 |
| | 장약 시간 | 0.125일 | 1일 |
| | 발파시간 (Covering 및 환기시간 포함) | 0.125일 | 0.5일 |
| | 합계 | 0.5일 | 3일 |
| 전체 | 발파 소요기간 | 36일(0.5일×72구간) | 9일(3일×3구간) |
| | 버력처리 | - | 6일 |
| | Strutting | 6일 | 6일 |
| | 1단 Strut 설치시 Cycle Time | 42일 | 21일 |

4. 결론

싱가포르 DTL-2 C915 건설공사 중 Cut & Cover 구조물 구간에서의 암발파 공사를 위해 당초 현지 Practice인 전기뇌관과 ANFO를 이용하여 시공하기로 하였으나, 시공효율을 개선하기 위해 전자뇌관을 이용한 다단장약 발파 및 Emulsion Cartridge으로 변경하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 1일 2회 발파와 가시설 진동관리기준 만족이라는 제약조건에서 시공효율을 최대한 높이기 위해 전자뇌관을 이용한 다단장약 발파를 고려하였으며, 시공 결과 1strut 깊이인 4.5m를 굴착하는 데 당초 전기뇌관과 ANFO를 이용한 발파공법에 비해 약 21일 정도 굴착공정이 단축되는 것으로 분석되었으며, 5단의 Strut 깊이를 모두 고려하면, 약 105일 정도 굴착공정이 단축되는 것으로 예측할 수 있다.
- 2) 천공장은 Strut 간 높이와 작업공간을 고려하여 4.5m로 결정되었으며, 발파단(Deck) 수는 시험발파결과 굴착효율 및 차후 버력처리 작업 등을 감안하여 3단(3Deck)으로 선정하였다.
- 3) 폭약류는 싱가포르 현지에서는 ANFO를 많이 사용하나, 다단장약 발파공법의 적용으로 인해 천공장이 길어짐에 따라 커지는 암반 구속력에 대하여 발파효율을 증진시키기 위해 Emulsion Cartridge로

변경하였다.

- 4) Covering은 당초 전기뇌관으로 소규모 면적을 발파 할 때는 토사 복토를 하였으나, 전자뇌관을 이용한 대규모 면적 발파에서는 토사 복토에 시간이 과다하게 투입되어 Tatami 및 Tire mat로 변경하였다.

향후 싱가포르에서 발주될 지하철 및 터널 등의 프로젝트에서 발파가 필요한 공정이 많을 것으로 예상되며, 발파 공정의 효율을 증대시키기 위해서는 이러한 신기술과 효과적인 발파 공법의 적용이 많이 필요할 것이다. 당 현장에서 적용된 전자뇌관을 이용한 다단장약 발파 공법이 이러한 신기술 적용의 좋은 출발점이 되기를 기대해 본다.

참고문헌

1. Miller, D. and D. Martin, 2007, A review of the benefits being delivered using electronic delay detonators in the quarry industry, Proc. Quarrying 2007 Conference, Hobart, Tasmania, pp. 1-15.
2. Olofsson, S., 1988, Applied explosives technology for construction and mining, Arla, Sweden: Applex, pp. 304.
3. Persson, P., R. Holmberg, and J. Lee, 1993, Rock blasting and explosives engineering, New York: CRC Press, pp. 540.



고 태 영
SK건설

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



신 창 오
SK건설

Tel: 010-8718-2310
E-mail: coshin@sk.com



이 효
SK건설

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



이 승 철
SK건설

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