

지중변전실 하부통과를 위한 터널설계 및 시공사례

A Case on Design and Construction of Tunnel for Under Passing an Underground Transformer Substation

정 동호, 문 상조, 김 선홍, 이 광재, 석 진호
Dong Ho Jeong, Sang Jo Moon, Seon Hong Kim, Kwang Jae Lee, Jin Ho Seok
(주)유신코퍼레이션 터널부

초 록

This is a case history on design and construction of tunnel for under passing an underground transformer substation. The original construction plan was cut & cover method to avoid blasting vibrations and displacements of facilities during the construction stages. But this plan was changed to tunnel because of the difficulties from construction period, cost and the required relocation site. As a results of tunnel construction, the relocation of transformer substation and replacements of transmission cables were not necessary. Therefore about 10 months of construction period and 3.5 billion wons of construction cost were saved. Additionally, quantitative criterion for blasting was provided through the results of blasting vibration analysis.

Key words : underground transformer substation, blasting vibration analysis, quantitative criterion.

1. 서 론

수도권 전철망 확충의 일환으로 실시되고 있는 분당선 제 2단계 선릉~수서간 복선 전철화 사업구간중 제3공구 선릉 정거장에 위치한 지중변전실 하부를 터널로 계획 변경하는 설계 및 시공사례이다. 당초 설계에는 지중변전실을 굴착중 변위와 굴착진동 등의 이유로 인근으로 이설할 계획이었으나, 이 지역 일대의 개발로 인하여 이설할 위치의 확보가 곤란하고 구조물 이설과 변전기기 및 공급용 케이블 교체작업에

약 21개월 이상의 공사기간이 소요될 것으로 분석되어 현 위치의 지중변전실 하부를 터널로 설계 및 시공하는 방안이 시행되었다.

이에 따라 터널 굴착시 주변 지반조건 및 상재하중을 고려한 해석을 통하여 변위 예측 및 안정성 확보 방안을 강구함과 동시에 변전기기 진동허용 기준치를 고려한 설계·시공결과를 소개하여 지하공간 확보가 용이치 않은 도심지 내 건설사례로 제시하고자 한다.

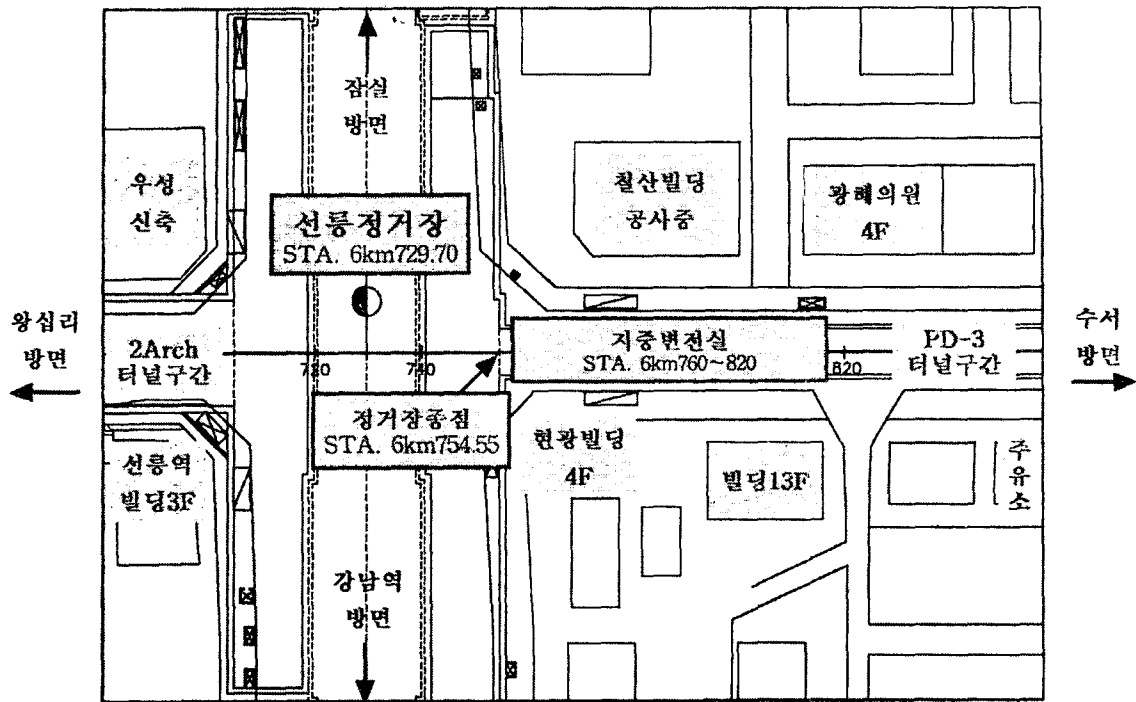


그림 1. 지중변전실 주변 평면개요도

2. 지역여건 및 지질상태

지중변전실(길이 60 m, 폭 15 m, 높이 7 m)은 그림 1과 같이 2호선 선릉정거장에서 분당 방향으로 STA.6km760~STA.6km820 지점에 위치하며 계획된 PD-3터널로 굴착 천단부와는 약 6.11~6.48 m 이격되어 있다. 또한 터널 동측 벽에서 8.5 m 이격되어 철산빌딩이 신축 중에 있어서 터널 시공시 주변 구조물과의 영향을 최소화할 수 있는 방안이 강구되어야 하는 제약 여건이 있다.

지질상태는 선캄브리아기의 경기편마암 복합체에 속하는 흑운모 호상편마암이 기반암을 이루고 있으며, 이를 관입한 중생대 유라기 흑운모 화강암이 본 지역의 북동쪽에 분포하고 신생대 제 4기의 충적층이 이를 덮고 있다. 막장관

찰 결과 암반상태는 RMR 65~80의 신선한 경암 정도로 판단되나 부분적으로 다소 풍화된 양상을 보인다.

3. 안정성 평가

3.1 해석개요

지중변전실과 신축중인 철산빌딩 및 터널 상호간의 영향 검증을 위해 안정성 해석을 수행하였으며 프로그램은 FLAC(ver 3.30)을 사용하였다. 지중변전실 동측의 철산빌딩이 선 시공중이지만 지하 최저 층까지 시공되기 전에 터널이 시공되므로 그림 2와 같이 모델링을 실시하여 철산빌딩의 지하 터파기 영향을 고려할 경우와 고려하지 않을 경우의 2가지 경우에 대하여 시공순서에 준한 해석을 수행하였다.

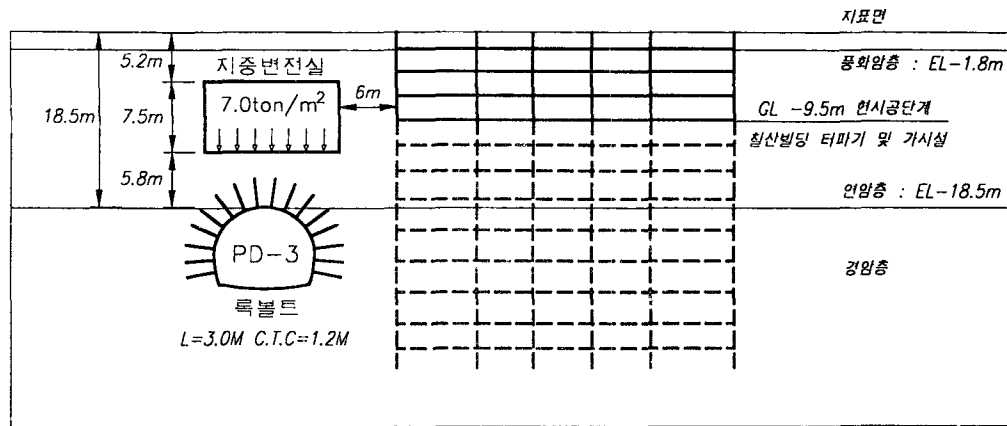


그림 2. 해석 모델 개념도

터널굴착의 막장진행에 따른 3차원 효과를 반영하는 하중분담율은 터널 굴착시 40%, Soft 슛크리트 타설시 30%, Hard 슛크리트 단계 30%로 적용하였다. 단계별 해석이 진행되는 동안 지중변전실과 터널의 변위량 추이로써 안정성 여부를 판단하고자 하며 구조물별 변위측점은 그림 3과 같다.

3.2 입력물성치

해석지반 입력물성치는 해당지역 지질조사 결과로써 표 1과 같으며, 이때 사용된 터널지보재 물성치는 표 2와 같다. 그리고 터널 벽면으로부터 약 8.5 m 이격된 칠산빌딩 지하 터파기 가시설 물성치와 변전실 콘크리트 물성치는 표 3 및 표 4를 사용하였다. 또한, 변전실내에 설

치된 기계들의 하중은 m^2 당 7t으로 모델링시 변전실 바닥부에 재하하였다.

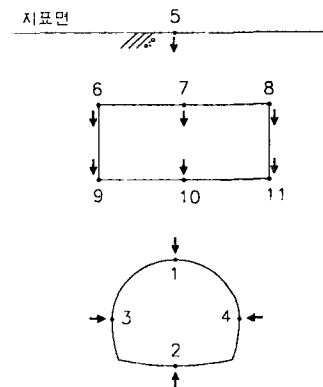


그림 3. 구조물 변위 측정점

표 1. 해석지반 입력물성치

지층 \ 물성치	탄성계수 (t/m^2)	포아송비 (ν)	내부마찰각 ($^\circ$)	점착력 (t/m^2)	인장강도 (t/m^2)	단위중량 (t/m^3)
토사층	2.04×10^4	0.32	30	10	5	1.9
풍화암층	5.63×10^5	0.29	35	20	10	2.3
연암	4.60×10^4	0.26	40	100	50	2.5
경암	1.04×10^5	0.23	45	200	100	2.7

표 2. 터널지보재 물성치

물성치 지보재	탄성계수 (t/m ²)	포아송비 (ν)	단면적 (m ²)	단면2차 모멘트(m ⁴)	비고
록볼트	1.75×10^4	-	0.0005	-	
Soft shotcrete	0.50×10^6	-	0.2	0.00067	
Hard shotcrete	1.50×10^6	-	0.2	0.00067	

표 3. 가시설물 물성치(철산빌딩 지하 터파기 공정)

물성치 가시설물	탄성계수 (t/m ²)	C.T.C (m)	단면적 (m ²)	단면2차 모멘트(m ⁴)	비고
H-beam 300×200	1.36×10^4	1.5	8.34×10^{-3}	1.33×10^{-4}	H-PILE
H-beam 250×250	1.36×10^4	1.5	9.22×10^{-3}	1.08×10^{-4}	POST-PILE
H-beam 300×300	1.36×10^4	1.5	1.20×10^{-2}	2.04×10^{-4}	STRUT

표 4. 지중 변전실 콘크리트 물성치

물성치 지보재	탄성계수 (t/m ²)	포아송비 (ν)	단면적 (m ²)	단면2차 모멘트(m ⁴)	비고
콘크리트	2.30×10^6	-	0.7	0.028583	

3.3 안정성 해석결과

터널과 지중변전실의 변위 및 지보재에 작용하는 하중은 터널벽면에서 8.5 m 이격된 철산빌딩 터파기 공사의 영향 유·무에 따라 터널 천단부와 측벽부에서 최대 2배 정도의 변위 차이를 나타내고 있다. 그러나 최대변위는 5~6 mm 내외로 미소하여 구조물들의 안정성은 유지될 것으로 판단되었다. 터널의 숏크리트에 작용하는 최대 휨압축응력 486 t/m^2 은 허용휨압축응력 720 t/m^2 이내이므로 숏크리트의 두께는 적절한 것으로 판단된다. 또한 강지보, 와이어 매쉬 등의 지보효과를 해석시에는 고려하지 않

았기 때문에 지보패턴에 의한 터널의 안정성은 유지될 것으로 판단된다. 해석결과 나타난 터널 및 지중변전실의 변위, 지보재에 작용하는 하중은 표 5 및 표 6과 같다.

4. 굴착공법 선정

굴착대상 지역의 암층은 주로 경암층을 이루고 있으므로 현 건설현황에 비추어 볼 때 발파공법이 적절하다고 판단되나, 이 공법은 진동이 수반되므로 지중변전실 구조물 및 변전기기 등에 미칠 수 있는 영향분석을 선행하였다.

표 5. 터널의 변위 및 지보재에 작용하는 하중 (단위 : mm)

위치\해석단계	터파기 미고려	터파기 고려	위치\해석단계		터파기 미고려	터파기 고려
천단연직(1)	2.5	5.0	지표침하(5)		1.0	1.4
바닥연직(2)	5.0	5.6	쏟크 리트	축력(ton)	63.4	59.0
좌측벽수평(3)	2.8	1.7		휨압축력(t/m ²)	486	430
우측벽수평(4)	2.9	0.7	록볼트축력(ton)		2.0	3.1

표 6. 지중변전실의 침하변위 (단위 : mm)

위치\해석단계	터파기 미고려	터파기 고려	위치\해석단계	터파기 미고려	터파기 고려
상판좌측(6)	1.5	2.3	바닥좌측 (9)	1.5	2.3
상판중앙(7)	1.0	1.5	바닥중앙(10)	1.7	3.2
상판우측(8)	1.2	0.8	바닥우측(11)	1.2	0.8

4.1 발파진동 허용기준분석 및 설정

지중변전실 구조물과 변전기기의 안전성을 고려한 적정 허용기준치 설정을 위해 통상 적용되고 있는 국내 발파진동 허용기준, IBM 전산장비의 진동허용기준 및 변전기기중 가장 진동에 예민할 것으로 판단된 전력 자동계전기의 사용기준 등을 분석한 후 전산센터에 적용되는 허용 진동치를 기준으로 설계하였다. 이때 종합적으로 고려된 진동허용 기준은 표 7, 표 8 및 표 9이다.

표 7. 통상 적용되고 있는 국내 발파진동 허용기준

구 분	문화재 전산센터	주택 아파트	상 가	철근콘크리트 건물 및 공장
허용진동치 (cm/sec)	0.2~0.3	0.5	1.0	1.0~4.0

시험발파시 사용된 발파진동 측정기는 Instantel Co.의 BlastMate II DS-477 및 DS-677이며, 이들은 충전식으로 운반이 용이하고 진행성분 수직성분, 점진성분 및 세 성분의

표 8. IBM 전산장비의 진동허용기준

구 분	가속도 (g)	환산속도 (cm/sec)	특 징	비 고
RMS	0.05	-	5~500Hz 범위의 진동가속도 평균치	-
Peak	0.15	0.58	진동시간 이력곡선중 순간 최대 가속도	발파적용
Mils	1.7	-	5~17Hz 범위의 독립된 진동변위 진폭	-
Shock	3g,3ms	2.80	간헐적 충격진동	발파적용

표 9. 변전기기의 전력자동계전기 사용기준

구 분	사용기준	구 분	사용기준
전압변동	-10~+20%	진 동	0.5g
주위온도	상대습도 90%	내전압	AC50/60Hz, 1500V 1분간

벡터합의 측정이 가능하다. 진동측정자료 중에서 세 성분의 벡터합을 이용하여 회귀분석을 통해 발파진동의 경향을 파악하였다. 여기서, 측정자료들의 회귀분석 과정에는 삼승근 및 자승근 환산방법을 각각 적용하였으나, 해석결과에는 큰 차이가 없었으며, 이 설계에는 상관관계가 약간 더 높은 삼승근 환산방법을 사용하였다. 그림 4는 이 지역 터널발파에 대한 환산거리와 진동속도의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 세 성분의 벡터합에 대하여 50%의 신뢰선과 발파작업의 안전율을 고려한 90%의 신뢰선을 함께 나타내었다. 한편, 본 설계에서는 안

전율을 고려하여 90% 신뢰선의 발파진동식을 설계에 적용한다.

4.2 진동영향 분석결과

지중변전실 하부 암굴착을 위해 발파공법 적용시 표 10에 제시된 바와 같이 이격거리 6.11~42.48 m 범위의 예상 진동치는 최대 지발당 장약량을 고려한 현지 시험발파 진동식을 적용하였을 때 0.124~3.742 cm/sec의 값이 예측되었다. 이는 통상 적용되고 있는 국내 발파진동 허용기준, IBM전산장비의 진동허용기준 및 변전기중 진동에 민감한 전력자동계전기의 허

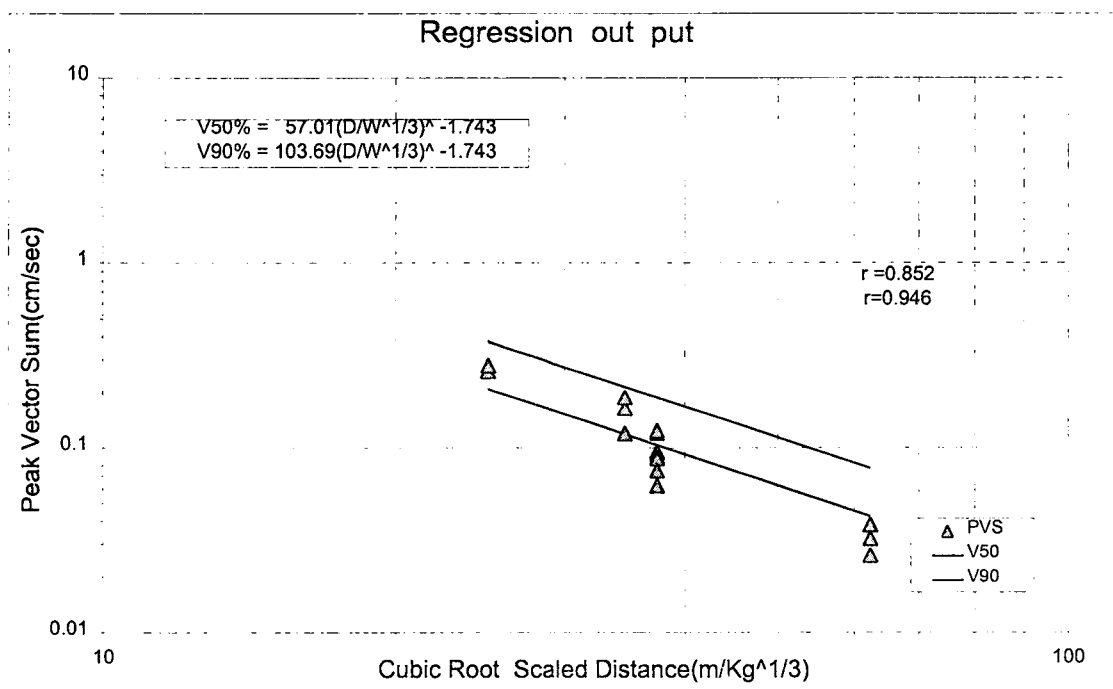


그림 4. 최대진동속도와 환산거리와의 관계

용기준 등을 종합적으로 분석한 후 설정한 설계기준치 이상으로 평가되었다. 그러므로 적정 시공을 유도하기 위하여 지중변전실 하부 끝벽 으로부터 27.75 m 이격된 6,840 m 지점까지는 발파공법 적용이 가능하고 그 이내에서는 무진동 암반절개공법이 적용되어야 할 것으로 판단 되었다.

4.3 무진동 절개공법

국내 터널 시공현장에서 시공 가능한 무진동 절개공법의 종류 및 특징은 표 11과 같다. 본 설계에서는 진동제어 발파공법이 어렵다고 판단된 구간에서만 장비의 조합성, 시공성, 경제성 등을 종합적으로 분석한 후 유압재를 이용한 절개공법으로 설계하였다.

표 10. 변전실 하부 굴착시 이격거리에 따른 발파진동 예측치

위 치	이격거리 (m)	지발당 최대장약량 (kg)		예상 진동치 (cm/sec)		비 고
		심발	확대	심발	확대	
6KM 760지점	6.11	0.75	1.314	3.742	3.628	$V = K(m/kg^{1/3})^{-n}$ • 심발발파 $K=103.69, n=1.743$ • 확대발파 $K= 72.58, n=1.743$
6KM 780지점	6.21	0.75	1.314	3.637	3.527	
6KM 800지점	6.31	0.75	1.314	3.537	3.430	
6KM 820지점	6.48	0.75	1.314	3.377	3.275	
6KM 840지점	27.75	0.75	1.314	0.268	0.259	
6KM 860지점	42.48	0.75	1.314	0.127	0.124	

표 11. 무진동 절개공법의 종류 및 특징

구 분 내 용	화학 제품의 팽창력 이용		가스압 이용	유압이용	
	CCR	팽창성 파쇄제		금속썰기	고무튜브
제품종류	•CCR/한국	•BENTONITE /스위스	•CARDON /영국	•DARDA/독일	•HRS/한국
파쇄원리	•고열 · 고압에 의한 팽창력 이용	•석회계의 규산 염을 주체로 한 무기 화합물의 경화 팽창력 이용	•액화 CO ₂ 가스가 기화되는 과정에서 발생하는 급속 가스압력 이용	•유압→피스톤 →금속썰기 전진	•유압→고무튜브→팽창
파쇄시간	•3시간 이내	•12~24시간	•즉시	•즉시	•즉시
팽창압	-	•12HIR 기준 •0.03 kg/cm ²	•0.12 kg/cm ² ~0.23 kg/cm ²	•500 kg/cm ²	•1250 kg/cm ²
천공경	φ40mm이내	φ35~75mm	φ45~65mm	φ46~48mm	φ45~102mm
시공성	•절개선과 절단면 조절곤란	•절개선과 절단면 조절곤란	•절개선과 절단면 조절곤란	•수직홀에만 주로 적용	•절개선과 절단면 자유조절
예상작업량	9m ³ /일	연암:4.6m ³ /일	연암:2.0m ³ /일 경암:1.5m ³ /일	연암:30m ³ /일 경암:20m ³ /일	경암:20~30m ³ /일

5. 시공

안정성 해석결과에 의하면 최대변위가 발생한 지점은 터널 천정부에서 5.0 mm, 하부 바닥부에서 5.6 mm가 발생하였고 변전실의 변위는 최대 3.2 mm가 발생하였다. 그러나 터널 천정부와 변전실 하부 이격거리가 6.11 m~6.48 m로 근접해 있고 암반절개 공법을 적용할 경우 막장 지보 타설시기가 지연되어 터널 변형이 증가할 가능성이 있었다. 이런 이유로 시공중 초기변위를 억제할 수 있는 강판다단그라우팅 공법을 천정부 180° 영역에 적용하여 막장의 안정성을 확보할 수 있도록 하였다. 그 결과 실제 시공시 예측된 변위는 표 12에 제시된 바와 같이 터널 천정부에서 2.0 mm, 터널 바닥부 3.5 mm, 변전실 바닥부 1.4 mm로 설계당시 예측한 변위보다 약 2.2~2.5배 적은 변위로 안전 시공을 할 수 있었다.

표 12. 측점별 안정성해석 및 예측결과

변위 측정	안정성해석	예측변위
터널 천정부 (침하)	5.0 mm	2.0 mm
터널 바닥부 (융기)	5.6 mm	3.5 mm
변전실 바닥 (침하)	3.2 mm	1.4 mm

6. 결 론

본 설계 및 시공구간의 당면문제는 지중변전실 하부 약 6.5 m 이격된 지반에 터널굴착시 터널안정성은 물론 상부 지중변전실 구조물과 변전기기 등에 손상을 주지 않는 범위 내에서 가장 경제적이고 시공성이 양호한 굴착공법을 선정하는 것이었다. 이에 따라 본 구간의 시공

은 진동영향 분석결과 해결방안으로 일정구간까지는 발파공법이 가능하고 그 이내의 구간은 무진동 암반절개공법을 적용하여야 한다는 정량적인 평가기준을 마련할 수 있었다.

이렇게 설계·시공함으로써 당초 계획은 변전실을 이전하고 터널을 시공하는 것으로 21개월의 공사기간이 예상되었으나 변경된 계획에 의해 11개월만에 공사를 완료할 수 있었다. 또한, 공사비의 경우는 변전실과 변전기기 및 전선케이블의 이전교체 작업에 소요되는 35억원을 절감하는 효과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. (주)유신코퍼레이션, 1997. 6, 변전실 하부 굴착공법 및 안정성 검토보고서. pp 137.
2. 한국철도 건설본부, 1999. 10, 철도설계·시공사례 건설 제1호. pp 1~15.
3. (주)호상테크노베이션, 1998.7, HRS공법 편람. p 120~130.
4. Itasca Consulting Group, Inc., 1996. 7, FLAC User Manul. pp 175~250.
5. Us Dept. of Transportation. (1991). Rock blasting and over break control. Federal Highway Administration. Publication No. FHWA-HI-92-001.
6. Charles H. Dowding, 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, U.S.A., pp. 10~12.
7. Per-Anders Persson, Roger Holmberg, Jaimin Lee, Rock blasting and explosives engineering, CRC Press, pp. 337~374.