

선균열과 상부 심뺨기를 이용한 환경 친화적 터널발파공법

A Tunnel Blasting Method Favorable to the Environment, which Utilizes Pre-splitting & an Upper Center Cut.

김일중 · 김영석¹⁾ · 기경철²⁾

Il-Jung Kim, Yeong-Seok Kim and Kyoung-Chul Ki

¹⁾전북대학교 ²⁾한국산업인력공단

Abstract

The cut is placed high up in the section, the 1st stoping holes below the cut, and divided all the holes located below the 1st stoping holes into a certain area with longitudinal section, to lower pollution made from tunnel blasting.

With the sequential blasting machine, after I first blasted holes around the cut holes by a pre-splitting method, blasted the cut area and the 1st stoping holes. The 1st and 2nd stoping holes divided areas are initiated gradually to free face upwards made by the cut. Especially, I pre-splitting contour holes previous blast the before stoping holes from the contours.

The ground vibration from the earth surface just over the advance face decreased about 42.0% compare with the down blasting method under the condition of equal charge weight per delay.

I controlled the crack and over break of the mother rock by pre-splitting contour holes before blast the first stoping holes from the contours. The peak values of noise and air blast by blasting decreased about 10dB more than the down blasting method. the noise and air blast diminished gradually as a round. The throw distance of the fly rock was decreased about 55%.

Keywords : over break, pre-splitting, ground vibration, noise, air blast, throw distance.

1. 서 론

각종 에너지와 폐기물의 지하 저장 시설과 에너지 전달을 위한 공동구 시설, 지상의 많은 교통량을 분산하고 물동량의 신속한 이동을 위해 지하철이나 철도 및 고속철도 그리고 국도 및 고속도로 등의 도로 터널이 건설되고 있으며 지하 공간에서 수많은 발파작업이 진행되고 있다.

지하공간의 확보를 위해서는 대부분 화약을 사용한 발파공법이 널리 이용되고 있다.

그러나 화약을 사용하는 암반발파공법을 채택하는 경우 시공의 효율성과 환경침해 및 각종 피해발생에 유의해야 한다.

지하공간 확보를 위한 시공의 효율성을 높이기 위해서는 1회로 발파당 굴진장을 증대시켜야 하고, 환경침해 및 피해발생을 억제하기 위해서는 발파에 의한 지반진동, 소음, 폭풍압

및 분진발생 등 발파공해를 저감시켜야 한다. 그러나 일반적으로 1회로 발파당 굴진장을 증대시키면 발파공해가 커지고, 발파공해를 저감시키면 1회로 발파당 굴진장이 감소되는 상호상반된 관계가 있다.

1자유면을 갖는 터널발파의 효율성은 심빼기 발파에 크게 좌우되는데, 종래에는 경사공 심빼기 공법(v-cut)^{6,7)}이나 수평방향 소구경의 무장약공 2~3개를 자유면으로 활용하는 번 커트(burn-cut)¹⁾를 사용해 왔으며, 최근에는 대형 천공장비를 사용하여 대구경의 무장약공 3~4개를 자유면으로 하는 실린더 커트(cylinder cut)공법이 활용되고 있다.

최근에까지 터널굴착 발파에서 심빼기 부분을 막장 가운데 부분에 위치시켜 심빼기 발파를 실시하고 있다. 그리고 심빼기 확대발파 부분은 심빼기한 부분을 자유면으로 하여 발파하며, 확대 형성된 자유면을 중심으로 하여 거의 동심원적인 좌·우·상·하 방향으로 막장 확대발파가 진행되었다. 따라서 높은 소음과 폭풍압이 발생하고, 파쇄된 암석이 원거리까지 비산하기도 하며, 터널상부 지표면에 다른 방향보다 높은 지반진동이 전달된다³⁾.

일반적으로 노천발파에서는 법면쪽의 모암을 보호하고, 여굴을 감소시키며, 매끄러운 법면을 형성하기 위해서 법면공을 법면 전열공보다 먼저 조절발파하여 선균열(pre-splitt ing)⁴⁾을 형성시킨 후에 법면 전열공을 기폭하는 방식을 채택하기도 한다. 그러나 최근까지의 터널 발파공법에서는 소음과 폭풍압 발생이 증폭되는 문제가 야기됨으로서 사실상 벽공을 먼저 선균열 발파하고 벽공 전열공을 이후에 발파하는 것은 배제되고 있다.

상기와 같이 터널발파시 발생하는 지반진동, 소음 및 발파풍 등의 발파공해 저감, 터널의 모암보호와 여굴발생을 억제할 수 있을 것으로 판단되는 신 발파패턴을 실제 현장에 적용

하여 이들을 확인하고, 굴진율, 파쇄암의 비산거리, 천공 및 장약시간에 대해서도 연구 검토하고자한다.

2. 지질 및 암석물성

본 지역은 주로 주라기의 화강암류를 기반암으로 하고 있으며, 주로 흑운모 화강암의 형태를 나타내고 있다.

본 터널발파패턴의 현장시험 및 시공은 광주월드컵 경기장 주변도로 연결도로망 개설공사 터널공사 일부구간으로서 암반의 물성은 Table 1의 범위와 같다.

Table 1. Some physical properties of rock

Uniaxial Compressive Strength (kgf/cm ²)	1110~1380
Tensile Strength (kgf/cm ²)	60~80
P-wave Velocity (km/s)	3.60~4.65
S-wave Velocity (km/s)	1.76~2.44
Young's Modulus (x10 ⁵ kgf/cm ²)	3.55~4.35
Specific Gravity	2.52~2.60
Poisson's ratio	0.22~0.26
Internal Friction Angle(°)	52~62
Cohesion force(kgf/cm ²)	134~178

3. 터널발파 시험

본 터널발파는 상부 반단면의 단면적이 약 80m²인 단면에서 주변여건상 1.60m를 굴진하기 위한 신 발파패턴과 비교 발파패턴을 각각 적용하여 현장시험을 실시하였다.

3.1 천공

현장시험에서 무장약공은 직경 105mm, 장약공은 모두 직경45mm(d1)로서 2-boom 점보

드릴을 사용하여 천공하였다.

Fig.1은 신 발파방법의 천공패턴이며, Fig.2는 비교 발파방법의 것이다. Table 2는 본 발파패턴의 위치별 천공치수를, Table 3은 천공 조건 및 시간을 나타내고 있다.

(1) 심빼기 선균열공

Fig.3은 신 발파패턴의 심빼기 부분을 나타내고 있다. 신 발파패턴의 심빼기 2차 선균열공은 심빼기 부분 좌우에 위치하며, 1차 선균열공은 천반부의 설계굴착선으로서 공간격(S2)은 모두 발파공 직경 d1의 약11배인 0.5m로 하였다. 심빼기 부분의 외곽부에 위치하는 선균열은 심빼기 발파에 의한 진동의 전파를 차단하고 천반부의 여굴발생을 억제하기 위한 것이다.

심빼기 선균열공의 천공장은 1.70m로서 천반부는 확천량(look-out)을 20cm로 하여 경사 천공하였으며, 그 외 부분은 막장에 수직으로 천공하였다.

(2) 심빼기공 및 심빼기 확대발파공

Fig.3에서 보는 바와 같이 이들 공은 무장약공 주변에 위치하고 있으며, 1, 2차 선균열공들의 내부에 무장약공과 평행으로 막장에 1.70 m 깊이로 수직 천공하였다.

Fig.4는 비교 발파패턴의 실린더 컷(cylinder cut)를 나타내고 있다.

(3) 막장 확대발파공

Fig.5의 신 발파패턴에서 보는 바와 같이 막장 확대발파 부분은 1, 2차로 나뉜다.

1차 막장 확대발파공의 저항선(B5)은 실제 약0.65m이나 2차선균열과는 약0.5m이다. 공간격(S5)은 약1.23B5인 0.80m, 2차 막장 확대발파공의 저항선(B6)은 0.75m 이며, 공간격(S6)은 (1.20~1.27) B6인 0.90~0.95m로서 굴진 막

장면에 1.70 m 깊이로 수직 천공하였다.

비교 발파패턴은 일반적으로 실시하고 있는 Fig.2와 같다.

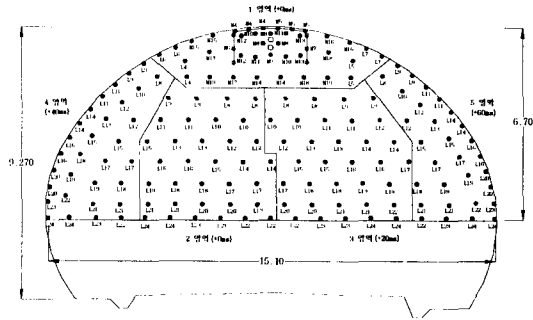


Fig. 1. Blast holes array and ignition pattern of new blasting pattern

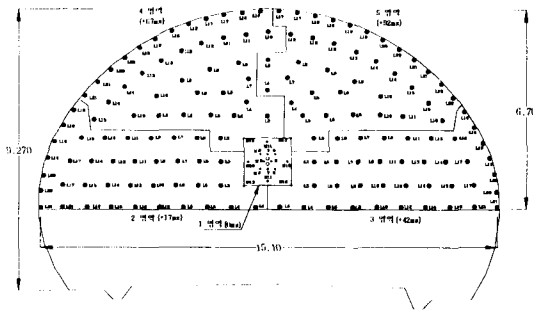


Fig. 2. Blast holes array and ignition pattern of comparative blasting pattern

(4) 설계굴착선공 및 그 전열공

Fig.5에서 설계굴착선공의 간격(S8)은 발파공 직경의 약13.3d1인 0.60m로서 확천량 20cm를 유지하여 굴진 막장면에 경사 천공하였고, 설계굴착선공과 그 전열공과의 간격(B7)은 0.60m로서 S8/B7=1.0의 관계가 있다. 그리고 설계굴착선공 전열공의 간격(S7)은 B7/S7=0.8의 관계인 0.75m로서 약1.70m 깊이로 굴진 막장면에 수직 천공하였다.

(5) 바닥공

Fig.5에서 보는 바와 같이 저항선(B8)은

0.50m, 바닥공간의 간격(S9)은 약1.7B8인 약 0.85m, 좌우측공은 0.75m이며, 확천량 20cm로 하여 1.70m 깊이로 경사 천공하였다. 비교 발파패턴의 공간격은 약0.80m이다.

3.2 장 약

Table4는 터널발파시험을 위한 발파공의 장약조건을 나타내고 있는 것으로서 신·비교 발파패턴의 심빼기공은 MegaMITE-I을 발파공당 0.9375kg, 신 발파패턴의 심빼기 확대발파공당 0.75kg, 비교 발파패턴은 0.9375kg, 신 발파패턴의 1,2차 선균열공과 비교 발파패턴의

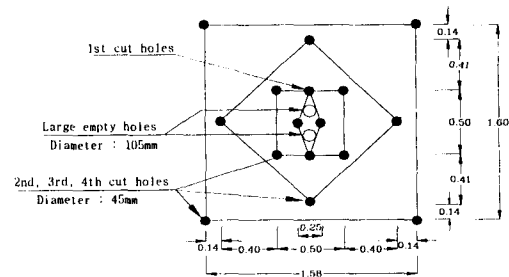


Fig. 4. Center cut part of comparative blasting pattern

Table 2. Hole space, burden and sub-drilling in new blasting pattern

Classification	Space (m)	Burden (m)	Sub-drilling (m)
1st, 2nd PS holes	S2=0.50	-	0.10
Cut holes	S1=0.25	B1=0.25	
	S2=0.50	B2=0.15	
	S3=0.40	B3=0.30	
	S4=0.70	B4=0.50	
1st stoping enlarge holes	S5=0.80	B5=0.65	0.10
2nd stoping enlarge holes	S6=0.90 ~ 0.95	B6=0.75	
Contour holes	S8=0.60	B7=0.60	
Before holes from contour	S7=0.75	-	
Floor holes	S9=0.85	B8=0.50	

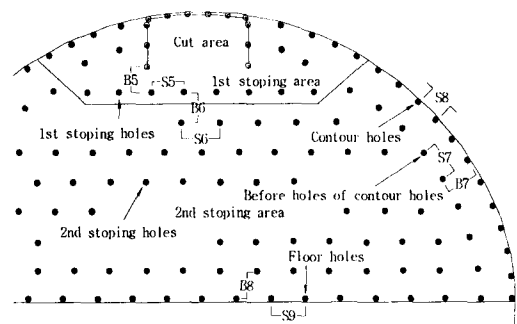


Fig. 5. Drilling of new blasting pattern

Table 3. Drilling condition for tunnel blasting test

Items	New blasting pattern	Compa. blasting pattern
1.Length of drill holes(m)		
Large empty holes	1.75	1.75
Other holes	1.70	1.75
2.Number of drill holes		
1st, 2nd PS holes	16	-
1st cut (empty holes)	4(+2)	4(+2)
2nd, 3rd cut holes	8	12
1st stoping holes	12	94
2nd stoping holes	88	
Contour holes	30	36
Floor holes	19	20
Total	179	168
3.Total length(m)	308.35	294.56
4.Specific drilling(m/m ³)	2.2998	2.1969

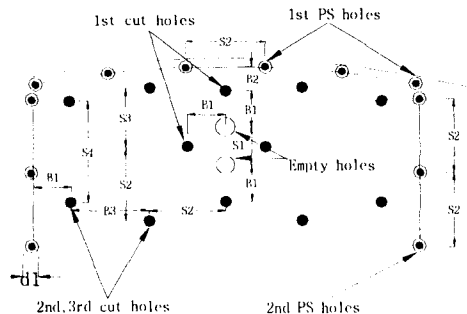


Fig.3 Center cut part of new blasting pattern

벽공은 공저에 0.375kg과 상부에 FINEX-I(정밀폭약) 0.200kg을 장약하였다. 그리고 나머지 발파공들은 MegaMITE -I을 발파공당 0.750kg씩 장약하였다.

Fig.6은 신·비교 발파방법의 장약패턴을 나타내고 있다.

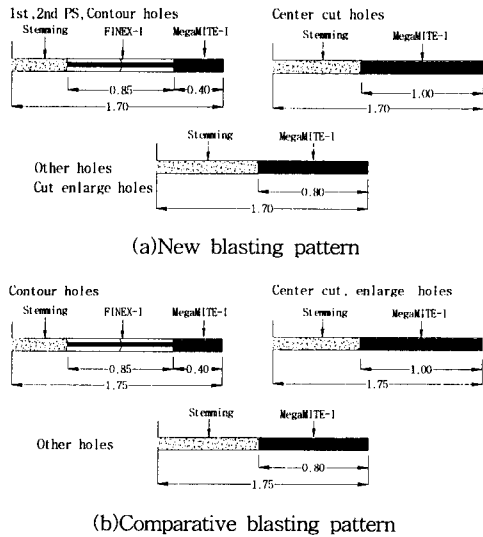


Fig. 6. Charge pattern for tunnel blasting test

3.3 기 폭

기폭방법은 크게 비다단식 기폭방법과 다단식 기폭방법으로 구분할 수 있으며, 비다단식 기폭방법은 조합 가능한 전기식 지발뇌관이나 비전기식 지발뇌관의 자체지연시차만을 이용한 전기식 또는 비전기식 기폭방법이며, 다단식 기폭방법은 전기식 지발뇌관의 자체지연시차와 다단식 발파기를 이용한 전기식 다단 발파기 기폭방법, 비전기식 지발뇌관의 자체지연시차와 비전기식 공외 시차지연뇌관을 이용한 비전기식 다단 기폭방법이 있다. 상기의 모든 기폭방법은 신 발파패턴에 적용 가능하다.

일반적으로 기폭방법은 터널의 모암상태와 터널단면의 크기 및 주변상황에 맞춰 적절하게 선택하여 이용할 수 있는데, 일정한 크기와 발파공수를 갖는 터널단면의 경우, 발파공해를

최소화해야만 하는 상황에서는 전기식 지발뇌관을 사용한 전기식 다단 발파기 기폭방법이나 비전기식 지발뇌관을 사용한 비전기식 다단 기폭방법을 이용할 수 있다.

그러나 누설전류, 정전기, 무선전파가 존재하는 경우에는 안전사고를 예방하기 위해서 비전기식 지발뇌관을 사용한 비전기식 다단 기폭방법을 이용하는 것이 바람직하다.

본 시험발파에서는 전기식 다단발파기 기폭방법을 사용하여 상부 반단면을 1회로 기폭시켰다.

Table 4. Charge condition for tunnel blasting test

Items	New blasting pattern	Compa.. blasting pattern	Max. charge weight/delay (kg)	
			NBM	CBM
1.1st, 2nd PS			1.725	-
Contour holes	0.200	0.200		
FINEX-I(kg)				
MegaMITE-I (kg)	0.375 (48holes)	0.375 (36holes)	1.150	1.150
total(kg)	27.60	20.70		
2.Cut holes(kg)	0.9375 (4holes)	0.9375 (4holes)	1.875	
Cut enlarge holes(kg)	0.750 (8holes)	0.9375 (12holes)	1.500	1.875
total(kg)	9.750	15.00		
3.Other holes (kg)	0.750 (117 holes)	0.750 (114 holes)	1.500	1.500
total(kg)	87.75	85.50		
Total(kg)	125.10	121.2		
Specific charge weight (kg/m ³)	0.9330	0.9039		

(1) 영역분할 및 기폭시차

신 발파패턴의 현장시험은 Fig.1과 Fig.5에서 보는 바와 같이 심빼기 부분과 1차 막장 확대 발파부분을 1영역, 2차 막장 확대발파부분의

일부와 바닥공의 일부를 각각 2, 3영역, 2차 막장 확대발파부분의 일부와 벽공의 일부, 벽공 전열공의 일부 및 바닥공의 일부를 각각 4, 5영역으로 종방향(從方向) 즉, 일방향(一方向) 분할하였다.

비교 발파패턴은 Fig.2와 같이 천공하고, 심빼기 부분을 1영역, 막장 확대발파공의 일부, 벽공의 일부, 벽공 전열공의 일부 및 바닥공 부분을 각각 2와 3영역, 막장 확대 발파공의 일부, 벽공의 일부 및 벽공 전열공의 일부를 각각 4 및 5영역으로 심빼기 부분을 중심으로 방사상(放射狀) 분할하였다.

신 발파패턴의 각 영역별 시차 조절에 있어서 1과 2영역의 시차는 100ms(2영역 800ms으로 시작, 1영역 700ms로 끝)이고, 나머지 영역의 시차는 20ms로 하였다.

또한 5영역까지 공의 지연시간은 60ms가 소요됨에 따라 터널발파의 심빼기공의 첫 번째로 기폭되는 공저뇌관의 자체 지연시간은 단선(cut-off)을 방지할 수 있는 80ms로 하였다.

(2) 기폭순서

Fig.7은 신 발파패턴에 있어서 굴진 막장의 기폭순서를 나타내고 있다. 심빼기 부분은 1차 선균열공①이 2차 선균열공② 보다 먼저 기폭되며, 1, 2차 선균열 발파 후에 심빼기 부분③을 기폭 시켰다. 다음에 형성된 2자유면을 이용하여 1차 막장 확대발파부분인 ④, ⑤ 및 ⑥을 차례로 기폭 하였다. 그리고 2차 막장 확대 발파부분인 막장 확대발파공⑦의 일부와 벽공⑧ 및 벽공 전열공⑨의 일부가 차례로 기폭 되는데, 각각의 분할 영역에서 ⑦, ⑧ 및 ⑨를 잇는 선상의 발파공을 순서대로 터널 바닥 쪽으로 내려가면서 차례차례 기폭 하였다. 그리고 맨 나중에 바닥공⑩을 기폭 하였다.

Fig.8은 신 발파패턴의 막장굴착순서 측면도로서 Fig.8(a)는 심빼기 부분과 1차 막장 확대 발파부분을 기폭한 후 2차 막장 확대발파부분

의 상부에 자유면이 형성된 상태를 나타내고 있다. Fig.8(b)는 천반쪽을 자유면 방향으로 하여 2차 막장 확대발파가 이루어진 상태이며, Fig.8(c)는 맨 나중에 바닥공을 기폭한 후 새로운 막장이 형성된 상태를 나타내고 있다.

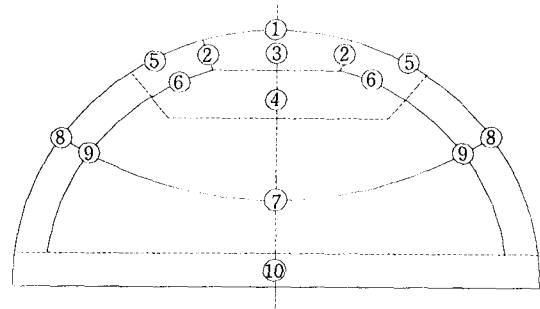


Fig. 7. Firing sequence for new blasting pattern

3.4 발파 및 발파공해 계측

터널 입구로부터 약55m 굴진된 상태 하에서 신 발파패턴과 비교 발파패턴으로 각각 10회씩 시험발파를 실시하였다. 시험구간의 터널막장 천반으로부터 직상부 지표면까지의 거리는 약39~45m범위에서 지반진동속도를 계측하였고, 터널 입구 전방 약80m 거리에서 소음 및 발파풍을 계측하였다.

터널발파시 지반진동과 소음 및 발파풍은 Canada Instantel사에서 제작한 DS-077 1대와 DS-677 2대를 사용하였다.

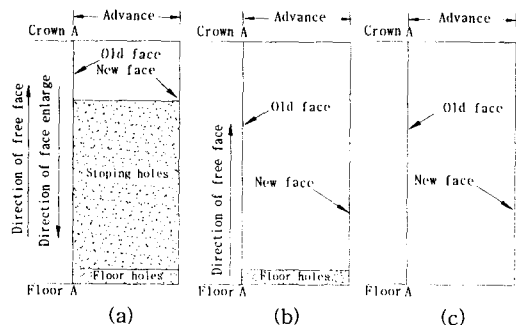


Fig. 8. Advance for new blasting pattern

4. 터널 발파시험 결과 및 고찰

4.1 지반진동

Fig.9는 터널 발파시험에서 영역분할과 발파 방향 및 진동의 주(主)전파방향을 나타내고 있다. Fig.9(a)에서 보는 바와 같이 신 발파패턴의 기폭은 1영역인 상부의 심빼기 부분과 상부를 향하여 1차 막장 확대발파부분을 먼저 발파한 후 2, 3, 4 및 5영역의 상부에 위치하는 발파공들이 천반방향을 향해 기폭하게 된다. 이 때 터널 바닥방향으로 막장이 확장되면서 진동이 주로 터널 하부방향으로 전파된다.

Fig.9(b)에서 보는 바와 같이 비교 발파패턴의 기폭은 1영역인 중심부의 심빼기 부분을 먼저 발파한 후 이를 중심으로 좌우상하 방향으로 배치된 발파공들이 심빼기 부분을 향해 기폭하게 된다. 이때 심빼기 부분 좌우측에 위치하는 발파공들의 기폭으로 진동이 주로 좌우측으로 전파되고, 심빼기 부분 상부방향에 위치하는 발파공들의 기폭으로 천반방향으로 막장이 확장되면서 진동이 주로 터널 상부방향으로 전파된다.

터널 발파 시험시 계측한 터널 막장 직상부 지표면에서의 지반진동은 Table5에 나타낸 바와 같다. 비교 발파패턴의 경우에 2.936~3.630mm/s의 범위로서 평균 3.27mm/s이었으나, 주 진동전파방향의 영향으로 신 발파패턴의 경우에는 1.622~2.283mm/s의 범위로서 약 41.9% 감소된 평균 1.90mm/s이었다.

신 발파패턴의 지발당 최대장약량은 디커플링 장약한 1,2차 선균열 발파시 1.725kg이었으나, 발파진동 이력곡선을 관찰한 결과 선균열 발파에 의한 지반진동이 높게 발생되지 않고, 지발당 장약량이 1.50kg인 다른 부분 발파에서 진동의 최대값에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Fig.10은 터널 막장 직상부 지표면에서 계측

한 신 발파패턴과 비교 발파패턴의 전형적인 발파진동 벡터합의 경향을 나타내고 있다.

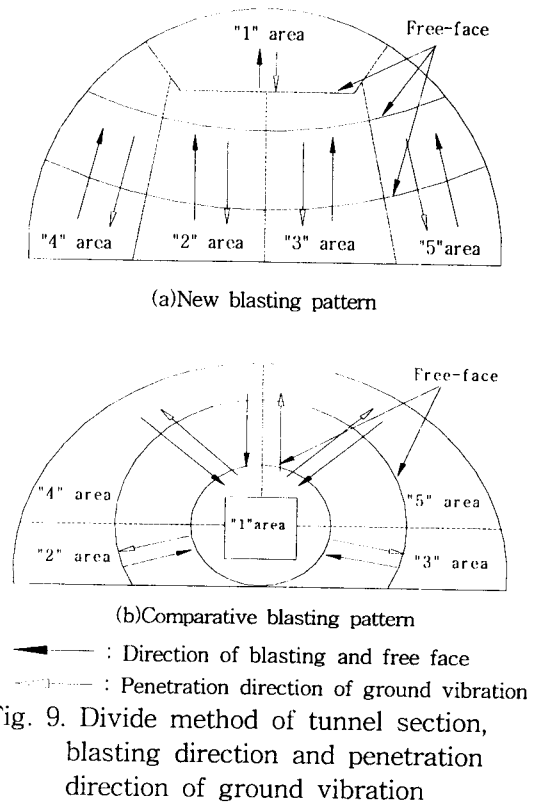


Fig. 9. Divide method of tunnel section, blasting direction and penetration direction of ground vibration

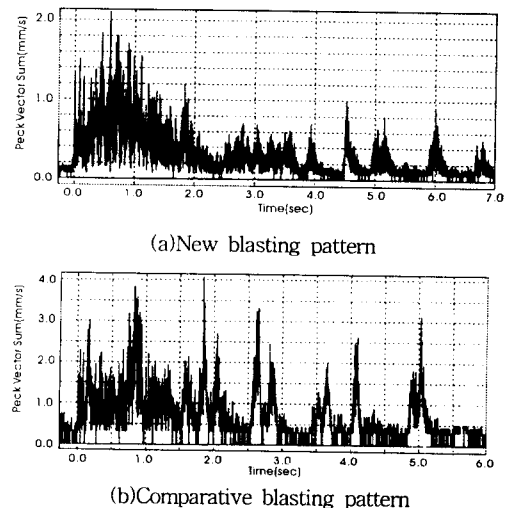


Fig. 10. Tunnel blast vibration time histories

Table 5. Pollution monitored for tunnel blasting test

Blasting Cycle Number	Ground Vibration Velocity (mm/sec)		Noise (dBA)		Air Blast (dBL)	
	New Blasting Pattern	Comparative Blasting Pattern	New Blasting Pattern	Comparative Blasting Pattern	New Blasting Pattern	Comparative Blasting Pattern
1	1.813	3.225	86.6	91.2	123	136
2	1.622	3.250	87.6	99.2	122	135
3	1.763	3.325	85.8	99.8	124	136
4	2.125	3.155	89.6	103.2	126	134
5	2.283	3.323	86.8	94.2	126	132
6	2.166	2.936	89.8	102.2	125	130
7	1.865	3.220	87.6	97.4	125	135
8	1.745	3.500	86.4	96.2	124	137
9	1.910	3.630	86.8	97.2	127	140
10	1.668	3.132	87.4	98.0	125	131
Average	1.900	3.270	87.44	97.86	124.70	134.60

Fig.10(a)에서 보는 바와 같이 신 발파패턴은 발파가 진행되어 가면서 진동이 감소되어 가는 경향을 나타내고 있으나, Fig.10(b)의 비교 발파패턴은 간헐적으로 높은 진동이 발생되고 있다. 이는 발파시 발생하는 진동의 주(主)진파방향의 영향으로 판단된다.

따라서 터널노선의 상부 지표면에 발파에 의한 지반진동의 피해가 예상되는 보안물건이 위치하고 있을 때, 신 발파패턴을 터널현장에 적용함으로써 효과적으로 지반진동을 저감시킬 수 있으며, 터널의 전단면을 1회로 발파하는 경우에 터널 주변에 미치는 전반적인 지반진동 역시 효과적으로 제어할 수 있을 것이다.

4.2 소음 및 발파풍

발파작업에서 발생하는 소음과 발파풍은 폭약의 폭발로 인한 것이며, 폭약이 발파공내에 완전히 구속된 상태에서 폭발했을 경우는 발파공 밖에서 폭발했을 경우나 전색이 불완전

한 상태에서 폭발했을 경우에 비해 소음과 발파풍이 작게 발생된다.¹⁾ 또한 적절치 못한 저항선과 지발당 장약량도 높은 소음과 발파풍을 발생시키는 요인이다.

터널막장의 발파조건은 노천발파와 달리 5개의 면(막장정면, 천반, 바닥, 좌우측 벽면)이 막혀 있어 지향계수(directionality factor)가 크게 됨으로서 높은 소음과 발파풍이 터널 밖으로 전파된다.

Fig.11은 신 발파패턴의 소음과 발파풍의 저감 메카니즘을 나타내고 있으며, Fig.9(a)에서와 같이 분할된 모든 영역의 발파방향은 터널의 천반부를 향하고 있다. Fig.11(a)와 같이 상부공의 발파로 배면파괴가 발생한다 해도 파쇄암의 자유낙하나 전색물 이탈의 확율이 적어서 상부 자유면이 파쇄암으로 덮혀 있거나 폭약이 대기중으로 노출되지 않고 발파공 내부에서 정상적으로 기폭되기 때문에 높은 소음과 발파풍이 발생하지 않는다.

Fig.11(b)에서와 같이 벽공을 먼저 선균열

발파하여 벽면에 불연속면을 형성시킨 다음 벽공 전열공들을 기폭 하였다.

막장 확대발파공 1의 기폭으로 막장 확대발파공 2로의 균열이 전파될 수도 있으나, 막장 확대발파공 2의 상부압반은 원위치에서 이탈되거나 자유낙하 할 확률이 낮다.

또 막장 확대발파공 2가 벽공의 전열공 1보다 먼저 기폭되는 경우에 벽공의 전열공 1로의 균열이 전파될 수도 있지만, 벽공의 전열공 1과 벽공 선균열 발파에 의해 형성된 불연속면 사이를 연결하는 균열이 발생되지 않으나 발생 된다 해도 벽공의 전열공 1의 상부 압반은 원위치에서 이탈되거나 자유낙하 하지 않아 벽공 전열공 1이 기폭될 때 소음과 발파풍이 증폭되지 않는다.

또 막장 발파공 2와 벽공의 전열공 1이 동시 기폭되는 경우에도 약간의 배면파괴만 발생할 뿐 벽공 전열공 2의 상부 압반이 원위치에서 이탈되거나 자유낙하 하지 않기 때문에 벽공 전열공 2가 다음에 기폭될 때 발파공 내

부에서 정상적으로 폭약이 폭발하게 되어 소음과 발파풍이 증폭되지 않는다.

또한 Fig.14(a)의 신 발파패턴에서와 같이 파쇄암이 막장에 밀착하여 쌓이므로 발생하는 소음과 발파풍을 파쇄암이 차단하는 역할도 한다.

Fig.9(b)의 비교 발파패턴의 발파와 자유면 방향에서 보는 바와 같이 심빼기 부분을 중심으로 좌우측 2와 3영역은 좌우측으로 기폭이 되지만 나머지 영역은 주로 하향으로 기폭되는 시스템이다. 이러한 기폭 시스템은 이전공의 발파로 인해 측부나 상부에 위치하는 다음 발파공의 전색물이 빠져나와 무전색 상태가 되거나, 배면파괴가 발생되어 파쇄암이 자유낙하 되거나 저항선이 짧아지고, 심하면 폭약이 발파공 밖으로 노출된 상태에서 기폭되는 경우도 발생된다.

따라서, 이러한 원인이 비교 발파패턴의 높은 소음과 폭풍압을 발생시키는 기구라고 생각된다.

Fig.12는 갱구전방 약 80m에서 측정한 소음과 발파풍의 전형적인 이력곡선이다. Fig.12(a)의 신 발파패턴에서 소음과 발파풍은 발파가 진행되면서 서서히 감소되어 가는 경향을 나타내는 반면에, Fig.12(b)의 비교 발파패턴에서는 높은 소음이 지속적으로 발생하고 있으며, 발파풍은 발파가 종료될 때까지 간헐적으로 높게 발생하는 특징을 나타내고 있다.

터널시험발파에서 측정한 소음과 발파풍은 Table5에 나타낸 바와 같다. 비교 발파패턴으로 발파한 경우 소음은 91.2~103.2 dBA의 범위로서 평균 97.86dBA인데 비해 신 발파패턴의 경우는 85.8~89.8dBA의 범위로서 비교 발파패턴보다 약10.6% 감소된 약87.44dBA이다. 발파풍은 비교 발파패턴의 경우 130~140dBL의 범위로서 평균 134.6 dBL인데 비해 신 발파패턴의 경우는 122~127dBL의 범위로서 비

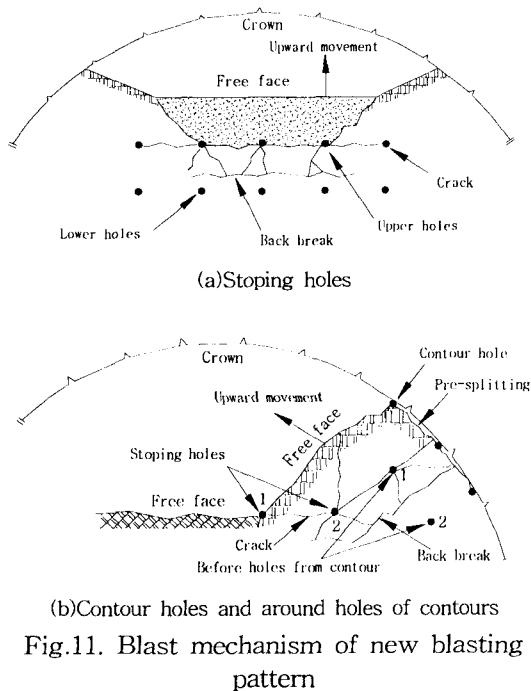


Fig.11. Blast mechanism of new blasting pattern

교 발파패턴보다 약7.4%감소된 124.7dB이다.

따라서 신 발파패턴의 소음과 발파풍은 비교 발파패턴에 비해 약10dB정도 감소된다. 즉 신 발파패턴의 음(音)이나 압(壓)의 세기가 비교 발파패턴에 비해 약3.16배 낮게 발생한다는 의미한다. 신 발파패턴의 터널발파공해 저감 메카니즘으로 터널발파시 발생하는 소음과 발파풍을 비교 발파패턴보다 현저하게 저감 할 수 있었다.

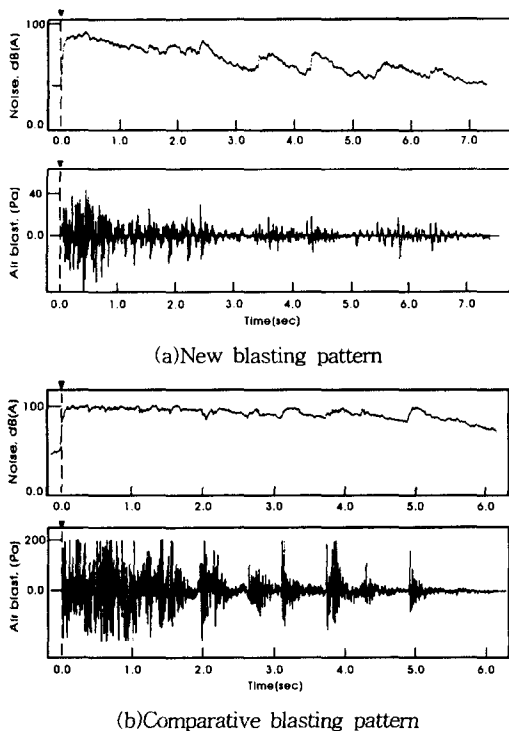


Fig. 12. Blast noise and air blast in the tunnel blasting test

4.3 비산거리

터널발파에서의 비산거리는 버력처리 시간과 관계되므로 싸이클 타임(cycle time)에 영향을 미치게 된다. 비산거리는 파쇄암의 초속(初速)과 비산각도에 영향을 받는다. 일반적으로 암반발파에서 파쇄암의 초속과 비산거리는 비장약량과 발파공의 상태에 영향을 받는다.⁵⁾

신 발파패턴은 선균열에 의해 형성된 불연속면의 영향으로 심빼기 부분만의 경우 비장약량은 비교 발파패턴의 약55%정도 이다. 또한 신 발파패턴에 있어서 발파공들의 배열과 발파방향 및 기폭순서 역시 원거리 비산 억제 요인으로 작용하고 있다.

신 발파패턴의 심빼기 부분이 막장 상부에 위치하므로 심빼기 발파시 상부방향의 비산각도를 고려하지 않으며, 비교 발파패턴은 심빼기 부분이 막장 아래에 위치하므로 심빼기 발파시 상부 방향의 비산각도를 고려한다. 파쇄암의 비산거리를 이론적으로 산출하는데 있어서, 신 발파패턴의 심빼기는 식(1)을, 비교 발파패턴의 심빼기는 식(2)를 유사하게 적용할 수 있다. 그리고 임의의 각으로 상향 비산할 때, 비산석의 최고 높이는 식(3)에 의해 구할 수 있다.

$$L_1 = V_h \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1)$$

$$L_2 = V_u \cos \theta t \quad (2)$$

$$H = \frac{V_u^2 \sin^2 \theta}{2g} \quad (3)$$

$$-h = V_u \sin \theta t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (4)$$

$$L_{\max} = V_u \cos \theta \left[\frac{V_u \sin \theta + (V_u^2 \sin^2 \theta + 2gh)^{1/2}}{g} \right] \quad (5)$$

여기서

L_1, L_2 : 비산거리(m)

V_h, V_u : 수평, 상부방향 초속(m/s)

g : 중력 가속도(m/s²)

θ : 비산각도(°)

H : 비산석의 고도(m)

h : 심빼기공의 높이(m)

L_{\max} : 최대 비산거리(m)

터널의 상반 높이는 약6.70m, 심빼기공의 위치는 신 발파패턴의 경우 바닥으로부터 6.15m, 비교 발파패턴의 경우 1.60m에 위치한다. 또 심빼기 부분의 비장약량이나 천공조건이 같다고 가정하면 $V_h = V_u$ 의 관계가 된다.

일반적으로 파쇄된 암석의 비산속도는 약 5~50m/s정도이나²⁾, 두 가지 발파패턴에 의한 시험에서 실제 최소 비산거리는 약15m, 최대 비산거리는 약42m이었으므로 비석의 초속을 14~25m/s의 범위로 가정하였다.

비교 발파패턴에서 심빼기 위치와 천반의 높이를 고려한 비산석의 최고 높이(H_{max})와 최대 비산각도(θ_{max})는 식(3)을 이용하여 구하였고, 최대 비산거리(L_{max})를 산출하기 위해서 식(4)로부터 t 를 구해 식(2)에 대입하여 식(5)를 이용하였으며, 이들을 각각 산출하여 Table6에 나타냈다.

Fig.13은 상부 반단면의 높이가 6.70m로 한정된 터널내부에서 신·비교 발파패턴의 심빼기 발파에서 비산속도와 비산거리와의 관계를 나타내고 있는 것으로서 파쇄암의 비산속도가 빠를수록 원거리 비산한다. 터널과 같은 한정된 공간내에서의 원거리 비산은 비산속도가 빠를수록 낮은 각도(θ_{max})로 비산하고, 비산속도가 느릴수록 높은 각도로 비산해야 원거리까지 비산하게 된다.

또한 초기 비산속도가 빠를수록 신 발파패턴 비교 발파패턴과의 비산거리의 차이가 크게 되는 경향이 있다.

신 발파패턴에 의한 터널발파 시험에서 직경 약10cm 정도로 파쇄된 암석의 비산거리는 16~22m의 범위이고, 비교 발파패턴의 경우에는 약39~45m의 범위였다.

터널 심빼기 방법이 동일한 조건하에서 이론적으로 Table6에서와 같이 신 발파패턴에 의한 파쇄암의 비산거리(L_1)는 비교 발파패턴

에 의한 비산거리(L_{max})의 약64% 정도이나 시험결과는 약45% 정도였다. 이는 신 발파패턴의 심빼기공의 비장약량과 다른 발파공들의 기폭방향이 비교 발파패턴과 상이하기 때문일 것이다.

Table 6. The throw distance with the initial velocity and the throw angle

Initial velocity V_h, V_u (m/s)	14	15	20	25	Practical throw distance (m)
Throw distance L_1 (m)	15.7	16.8	22.4	28.0	16~22
Throw angle θ_{max} (°)	45.6	41.8	30.0	23.6	
Throw distance L_{max} (m)	21.5	24.5	37.9	50.2	39~45

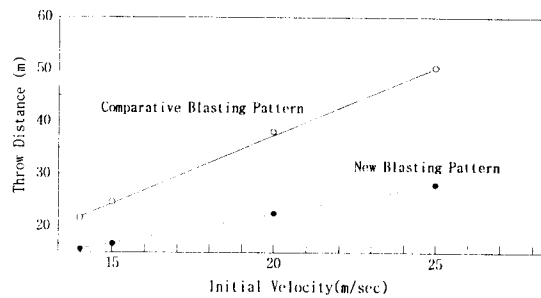


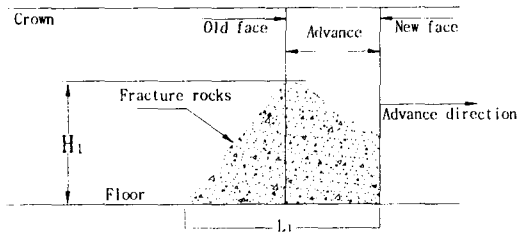
Fig. 13. Extreme distance on new blasting and blasting pattern

Fig.14(a)는 신 발파패턴, (b)는 비교 발파패턴의 터널 굴진막장에서 발파된 암석의 이동 형태를 나타내고 있다. Fig.14에서 보는 바와 같이 한 막장에서 발파된 암석이 동일 체적일 때 신 발파패턴에 있어서 최대 비산거리 L_1 이 비교 발파패턴의 L_{max} 보다 짧은 반면에 폐석의 퇴적고 H_1 이 H_2 보다 높게 된다.

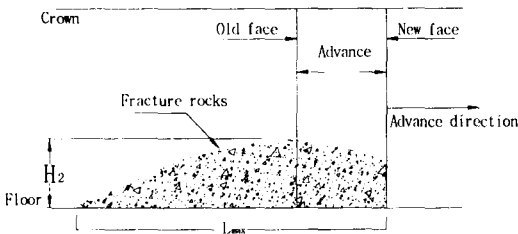
실제 측정된 비산거리로 미루어 볼 때 비산석의 초속은 신 발파패턴의 경우 약20m/s이내, 비교 발파패턴의 경우 약25m/s이내로 추정된

다.

따라서 신 발파패턴으로 터널발파 할 경우 비교 발파패턴 보다 버력처리에 소요되는 시간이 단축되어 더 경제적인 것이다.



(a) New blasting pattern



(b) Comparative blasting pattern

Fig. 14. Piling form of fracture rocks

4.4 기타

(1) 굴진율

Table3에서와 같이 신 발파패턴의 천공장은 1.70m이고, 비교 발파패턴은 1.75m이며, 굴진장은 1.60m이다.

굴진율은 천공장에 대한 굴진장의 비로서 나타내는데, 신 발파패턴에 의한 굴진율은 약 92.2~95.1%의 범위로서 평균 약 93.8%이고, 비교 발파패턴은 약 86.8~93.4%의 범위로서 평균 약 91%이다. 따라서 신 발파패턴의 굴진율은 비교 발파패턴에 비해 평균 약 2.8% 정도 높았다.

(2) 천공시간

신 발파패턴의 총 천공수는 179공이고, 비교 발파패턴은 168공이다. 점보드릴 2-boom을 사용하여 천공하였으므로 Table3에서 보는 바와

같이 신 발파패턴의 천공시간은 평균 129.2분이고, 비교 발파패턴은 129.4분으로서 두 가지 발파패턴의 천공시간은 같았다.

신 발파패턴의 천공수가 비교 발파패턴의 천공수보다 11공이 많으나 신 발파패턴의 발파공 배열상 drill boom을 이동시켜 정확한 위치에 고정시키는데 소요되는 시간이 비교 발파패턴보다 절약되었고, 비교 발파패턴의 천공장이 약간 길었기 때문에 신 발파패턴과 비교 발파패턴의 천공시간이 비슷하게 소요된 것으로 판단된다.

(3) 장약시간

숙련된 5명의 장약수가 장약작업을 실시하였다. 뇌관배열에서부터 결선작업이 종료되는 동안 소요된 시간은 신 발파패턴의 경우 44~58분의 범위로서 평균 53분, 비교 발파패턴은 71~88분의 범위로서 평균 80분 정도로서 신 발파패턴이 약 27분 단축되었다.

신 발파패턴의 발파공 배열과 분할된 영역별 기폭순서가 뇌관배열을 쉽게 할 수 있도록 분포되어 있으며, 장약 작업시 작업자들이 영역별로 상부에서 하부로 동시에 내려오면서 장약작업을 실시할 수 있어서 작업자들 간의 상호 교차로 인한 작업방해가 없고, 장약후 결선작업이 용이하므로 신 발파패턴의 장약공의 수가 비교 발파패턴보다 11공이 많았으나 뇌관배열에서부터 결선작업까지 소요되는 시간이 비교 발파패턴에 비해 단축되었다.

(4) 여굴방지 및 모암보호

터널발파시험 후 굴진 막장을 관찰하였다. 모암의 상태가 비교적 양호하여 두 가지 패턴은 벽공의 천공 자국이 모두 양호한 상태로 관찰되었다. 그리고 신 발파패턴은 벽공들 사이가 비교적 평탄한 면을 형성하고 있었으나 비교 발파패턴은 많은 요철이 발견되었다.

형성된 터널벽면으로의 새로운 균열전파 여부에 대해서는 규명하기 어려웠으나 신 발파패턴은 벽공을 선균열 발파함으로써 벽공 전열공이나 막장 확대발파공들의 기폭으로 발생되는 진동이나 균열이 모암으로의 전파를 차단하여 모암손상을 억제하는 효과와 여굴 발생을 효과적으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

동일한 현장에서 발파패턴을 달리하여 터널 발파시험을 실시하였다. 시험결과를 발파공해와 비산거리, 굴진율, 발파작업시간, 모암보호와 여굴 발생의 측면에서 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1)터널 단면을 소정의 영역으로 분할하고, 영역별 시차와 전기식 뇌관 자체의 지연시차를 이용하여 반단면 1회로 발파시 지반진동의 크기를 조절할 수 있었으며, 터널막장 상부 지표면의 지반진동은 비교 발파패턴에 비해 약 42.0% 감소했다.

2)발파시 발생하는 소음과 발파풍은 비교 발파패턴에 비해 약10dB 감소되었다. 특히 1회 발파하는 동안 소음과 발파풍은 시간 경과에 따라 감소되어 소멸되어 가는 효과를 얻었다.

3)소음과 발파풍의 증가 없이 벽공과 그 전열공보다 먼저 선균열 발파할 수 있었으며, 선균열 발파로 평탄한 벽면 형성과 모암손상을 최소화하고 여굴 발생을 최소화 할 수 있을 것이다.

(4)굴진율은 약93.8%로서 비교 발파패턴에 비해 약2.8% 증가했고, 터널내 파쇄암의 비산거

리는 비교 발파패턴보다 약55% 감소되었다.

(5)천공시간은 비교 발파패턴과 비슷했으나 장약작업의 시간을 단축할 수 있었다.

특히 동일한 위치에서의 장약작업으로 작업자의 안전성을 확보할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 기경철, 김일중, 2002, 산·학인을 위한 발파공학, 동화기술, pp.250~253.
2. 김정진 감수, 1993, 신발파핸드북, 원기술, p.450
3. 서영춘, 양형식, 하태욱, 2001, 터널발파의 진동전달 특성에 관한 연구, 대한화약기술학회, vol.19, No.1, pp.41~51.
4. Calvin, J. K. and Edward, J. W., 1990, Surface Blast Design, Prentice-Hall, London, pp.217~229.
5. Charles, H. D., 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice-Hall, London, p.193.
6. Stig, O. O., 1991, Applied Explosives Technology for Construction and Mining, Applex, Sweden. pp.131~159.
7. U. Langefors and B. Kihlstrom, 1979, The Modern Technique of Rock Blasting, A Halsted Press, New York, pp.180~228.