

## 조절발파를 위한 성형폭약의 제작과 성능 평가

김정규<sup>1)</sup>, 양형식<sup>1)\*</sup>, 김종관<sup>2)</sup>

### Development and Performance Evaluation of Shaped Charge for Controlled Blasting

Jung-Gyu Kim, Hyung-Sik Yang, Jong-Gwan Kim

**Abstract** The shaped charge were made for identifying the effect of controlled blasting using relatively low VOD explosive for cutting rock mass with changing quality and thickness of metal liner. The metal liner was attached on both sides of a charge for directional cutting, when the shaped charge exploded in rock mass. Also, a efficiency of shaped charge was identified by concrete member experiment. And a center guide used for maintaining stand-off between shaped charge and hole wall. A case of Fe liner of thickness 0.8mm formed the deepest notch of experiments and the directional cutting of concrete member was identified.

**Key words** Controlled blasting, shaped charge, Center guider, Concrete member

**초 록** 성형폭약의 조절발파 효과를 확인하기 위하여 정밀폭약에 금속라이너의 재질과 두께를 달리하여 상대적으로 폭속이 작은 암석 절단용 성형폭약을 제작하였다. 성형폭약이 암반 내부에서 기폭될 때 방향성 절단을 유도하기 위하여 폭약 양쪽으로 금속라이너를 부착하였다. 또한 콘크리트 부재 실험을 통하여 성형폭약의 성능을 확인하였고 성형폭약과 공벽과의 적정 이격거리를 유지하기 위한 센터 가이드를 제작하였다. 실험결과 0.8 mm 두께의 Fe 라이너가 장착된 성형폭약을 사용할 때 가장 깊은 노치가 형성되었고, 콘크리트 부재의 방향성 절단을 확인할 수 있었다.

**핵심어** 조절발파, 성형폭약, 센터 가이드, 콘크리트 부재, 방향성 절단

#### 1. 서 론

일반적으로 성형폭약은 금속을 절단하기 위한 목적으로 자주 사용된다. 그러나 외국의 경우 오래전부터 성형폭약을 암반에 적용해 왔다. 성형폭약의 암반 적용은 1988년 Sweden의 Bjarnholt(1988)로부터 시작되었으며, Per-Anders Persson에 의해 Linear shaped charge로 명명되었다. 이는 공벽에 15mm~20mm 깊이의 노치를 형성시키는 것으로 알려져 있다(Persson, 1994). 또한

Luo and Shen(2006)은 Inner shaped charge와 매우 흡사한 형태의 Linear shaped charge에 대한 실내 실험 및 현장실험을 통해 폭약의 성능을 검토한 예가 있다.

본 연구에서는 고폭속 폭약이 아닌 정밀폭약을 사용하여 양방향으로 기폭이 가능한 성형폭약을 제작하였고, 콘크리트 부재의 절단 실험을 수행하면서 성형폭약의 조절발파효과에 대하여 고찰하였다. 성형폭약은 구리와 철 라이너에 비교적 폭속이 적은 조절발파용 폭약을 사용하여 제작하였다. 또한 폭약이 콘크리트 부재와 일정한 거리(stand-off distance)를 유지할 수 있는 센터 가이드와 기폭방향을 조절할 수 있는 방향유지 다짐봉을 사용하여 실험하였다.

<sup>1)</sup> 전남대학교

<sup>2)</sup> 한국광물자원공사

\* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2016년 9월 21일

심사 완료일 : 2016년 9월 26일

게재 승인일 : 2016년 9월 27일

## 2. 성형폭약

성형폭약(shaped charge)은 1888년 Charles E. Munroe에 의해 처음으로 제안되었다. 폭약 아래 부분을 곡선형으로 하고 금속제 라이너(liner)를 부착하여 기폭하면 폭약의 힘이 곡선부 중앙에 집중되어 목표물을 관통 또는 절단시킬 수 있는데 이를 먼로 효과(Munroe effect)라 한다. 성형폭약은 먼로 효과를 이용한 폭약이라 정의할 수 있다(Grady, 1995).

### 2.1 성형폭약 구조

먼로효과를 효과적으로 얻기 위하여 폭약의 아래 부분을 오목하게 하고, 여기에 금속, 유리 또는 세라믹과 같은 물체로 얇게 피복시키는데 이것을 라이너(Cavity liner)라고 부른다. 그러나 최근에는 주로 구리, 납, 알루미늄과 같은 금속재료를 사용하여 일정한 각도를 유지시키는데 대체로 이들의 각은 45°~95°이다. 한편 폭약으로는 헥소젠(RDX), 펜트라이트(PETN), 헥사니트로 스틸벤(HNS) 등과 같이 기폭속도가 고속이어야 한다. 그리고 이를 제품으로 형상화시키기 위해서 폭약과 라이너를 한 덩어리로 감싼 외피(housing or sheath)로 구성된다.

### 2.2 성형폭약 원리

폭약의 분해로 형성된 에너지 집중과 라이너에서 생긴 금속 분자들의 조합으로 이루어진 고속기류(jet) 즉,

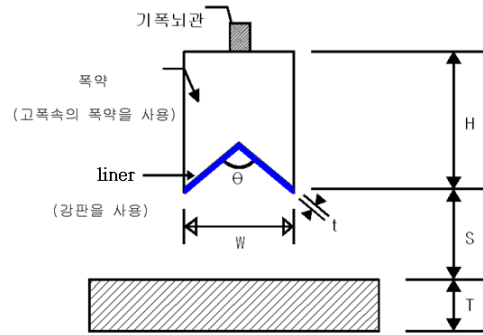


그림 1. 성형폭약의 구성요소.

충격파는 일정한 방향으로 방출되면서 목표물을 절단하는 작용을 한다. 성형폭약의 관통효과나 절단효과는 여러 가지 요소에 의해 영향을 받게 되는데 크게 라이너, 폭약 및 기폭, 고속기류의 형성 등을 들 수 있다. 라이너의 영향은 라이너의 재질, 두께, 각도 등이며, 폭약 및 기폭에 의한 영향으로는 폭약의 종류, 약량, 형상 등을 들 수 있고, 고속기류의 형성으로 인한 영향요소로는 이격거리 등을 들 수 있다(Barbour, 1981). 그림 1은 절단효과에 영향을 주는 요소들을 표시한 그림이다. 여기서  $\theta$ 는 라이너의 정각, W는 폭약폭, H는 폭약높이, S는 이격거리, t는 라이너의 두께, T는 부재의 두께이다.

### 2.3 양방향 성형폭약 설계

일반 강재 절단용 성형폭약의 경우 그림 2(a)와 같이 한쪽방향으로 금속라이너가 삽입된 반면 실험에 사용된

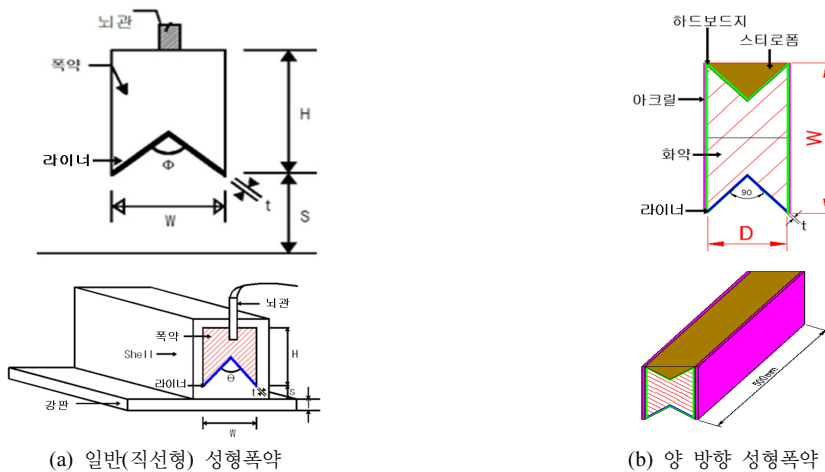


그림 2. 성형폭약 설계.

표 1. 성형폭약 홀더 제원

(약장 50cm 기준)

폭약량(g)		100	80	비 고
W : 폭약폭(mm)		12.3	11.0	
H : 폭약높이(mm)		24.6	22.0	
W' : 환산 폭약폭(mm)		17.2	15.4	
라이너 두께(t)	3.7~4.4%	0.64~0.76	0.57~0.68	
	3.0~4.0%	0.52~0.69	0.46~0.62	

\*일반 성형폭약의 폭약폭(W')과 높이(H') 비 = 1 : 1

\*동일 폭약량 기준 양방향 성형폭약 폭(W)과 환산 폭약폭(W') 비 = 1 : 1.4

성형폭약의 경우 공 내부에서 양 방향으로 기폭이 가능하도록 그림 2(b)와 같이 2개의 금속라이너를 사용하였고 아크릴판과 스티로폼을 사용하여 라이너가 움직이지 않도록 고정하였다.

2.4 강건설계를 이용한 인자 및 수준 설정

양방향 성형폭약의 최적 성능이 발휘되는 조건을 확인하기 위하여 성형폭약이 기폭할 때 발생하는 노치 깊이에 영향을 미치는 인자와 수준을 설정하고 직교배열을 이용하여 실험을 설계하였다. 실험계획으로 수준을 설정할 경우 1차로 간격을 넓게 잡고, 후속 정밀실험에서 수준간격을 좁혀 잡도록 해야 하지만 다음과 같은 특성으로 인해 인자 수준을 설정하였고, 기존 논문에서 확인된 성형폭약의 최적 조건인 라이너 각도는 90°로 설정하여 성형폭약을 제작하였다(이병일 외, 2000).

폭약(뉴화이텍스, 메가텍스)

강관절단에 사용되는 고퍍속 폭약류가 아닌 일반 터널 및 노천발파에서 사용되는 6,000m/sec 이하의 산업용 폭약으로 비중 1.25g/cm<sup>3</sup>, 폭속 6,000m/s의 에멀전 폭약과 비중 1.0g/cm<sup>3</sup>, 폭속 4,400m/s로 smooth blasting 용으로 사용되는 정밀폭약을 선정하였고, 실험에 사용될 콘크리트 부재의 크기와 국내에서 생산되는 정밀폭약 최소 약량이 100g임을 감안하여 폭약량은 80g으로 설정하였다.

라이너(Fe, Cu)

강재 절단에 사용하는 성형폭약은 Cu라이너를 사용했을 때 가장 효과가 좋은 것으로 알려져 있으나(박근순

과 임한욱, 2003) 콘크리트 부재에 대한 경우 Fe라이너가 가장 넓은 크레이터를 형성한다고 보고된 바 있다(정우진 외, 2007). 본 논문에서는 Cu라이너와 Fe라이너 두 종류를 사용하였고, 라이너 두께는 성형폭약 너비(W)에 대한 라이너 두께(t) 비인 3.7%~4.4%(Cooper, 1989), 3.0%~4.0%(박근순과 임한욱, 2003)를 적용할 경우 최소 0.46mm~0.76mm 범위의 라이너 두께를 적용해야 하기 때문에 0.5mm와 0.8mm 두께의 라이너를 사용하여 실험하였다. 표 1은 폭약량에 따른 폭약 폭과 높이 그리고 적용 라이너 두께에 대한 제원표이다.

직교배열

실험에 사용된 인자와 수준은 폭약종류 2수준(에멀전 폭약, 정밀폭약), 라이너 종류 2수준(Cu, Fe), 라이너 두께 2수준(0.5 mm, 0.8 mm)로 L<sub>4</sub>(2<sup>3</sup>)의 직교 배열을 선택하였다. 표 2는 성형폭약 성능 실험에 사용된 인자들

표 2. 성형폭약 성능실험 설계변수의 인자 수준

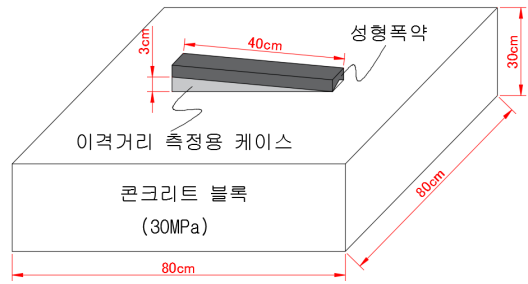
인자 수준	폭약 종류	라이너 종류	라이너 두께(mm)
1	에멀전	Fe	0.5
2	정밀	Cu	0.8

표 3. 성형폭약 성능실험 직교배열 L<sub>4</sub>(2<sup>3</sup>)

실험 Case	인자		
	폭약 종류	라이너 종류	라이너 두께(mm)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1



(a) 성형폭약 설치



(b) 실험 준비 모식도

그림 3. 성형폭약을 이용한 노치형성 실험 준비.

표 4. 성형폭약 성능실험 조건

실험 번호	인자	폭약 종류	라이너 종류	라이너 두께(mm)
1		정밀	Fe	0.5
2		정밀	Cu	0.8
3		에멀전	Fe	0.8
4		에멀전	Cu	0.5

의 수준을 나타낸 것이다. 인자의 수준은 실험의 제원을 고려하여 결정하였다. 이러한 수준으로 각 인자별 수준을 정하여 행렬 형태로 표시한 성형폭약 성능실험의 직교 배열표는 표 3과 같다.

### 3. 콘크리트 부재를 이용한 성형폭약 성능실험

직교배열표에 나타난 4가지 조건에 대하여 성형폭약 성능실험을 진행하였다. 그림 3과 같이 0.8m×0.8m×0.3m 콘크리트 부재위에 이격거리(stand-off distance) 측정용 케이스와 성형폭약을 설치하고 표 4와 같은 조건으로 실험을 진행하여 콘크리트 부재에 생성된 노치 깊이를

측정하였다. 실험에 사용된 콘크리트 부재는 28일 이상 양생하여 제작하였고, 슈미트헤머 테스트 결과 평균 30 MPa의 강도가 측정되었다. 성형폭약은 약장 40cm, 약량 80g을 사용하여 제작하였다.

#### 3.1 성형폭약 성능 실험결과

성형폭약 기폭 후 콘크리트 부재 표면에 생성된 최대 노치 깊이와 그때의 성형폭약과의 이격거리를 측정된 결과 Case 3에서 최대 노치 깊이가 22mm가 측정되었고, 이격거리는 4가지 실험Case 모두 8mm~14mm 사이로 비슷한 값을 나타내었다. 실험결과는 그림 4와 표 5에 나타내었다.

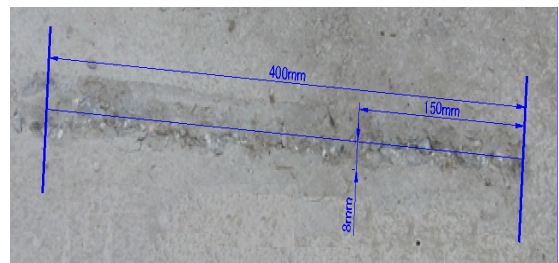
#### 3.2 강건설계를 이용한 결과 분석

그림 5는 노치 깊이에 영향을 미치는 인자들의 주효과 분석 그래프이고 그림 6은 교호작용을 나타내는 그래프이다.

인자들의 최적수준은 주 효과의 추정치를 사용하여 결정할 수 있고, 인자수준의 효과는 전체평균으로부터



(a) 성형폭약 기폭 후 노치형성



(b) 이격거리 및 노치깊이 측정

그림 4. 성형폭약을 이용한 노치형성 실험 결과.

표 5. 성형폭약 성능실험 결과

실험 Case	폭약 종류	라이너 종류	라이너 두께 (mm)	노치 깊이 (mm)	SD (mm)	비 고
1	정밀	Fe	0.5	8	11	
2	정밀	Cu	0.8	9	14	
3	에멀전	Fe	0.8	22	11	
4	에멀전	Cu	0.5	14	8	

\*SD(Stand-off Distance): 최대 노치 깊이가 발생한 지점과 성형폭약과의 수직거리

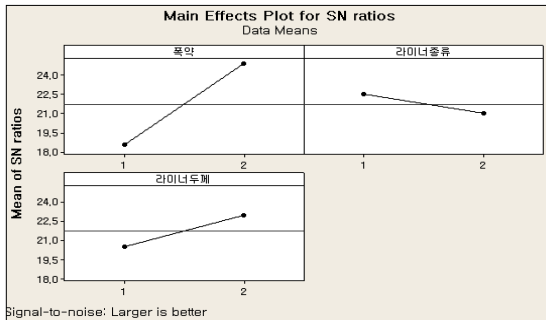


그림 5. 주효과 분석 그래프.

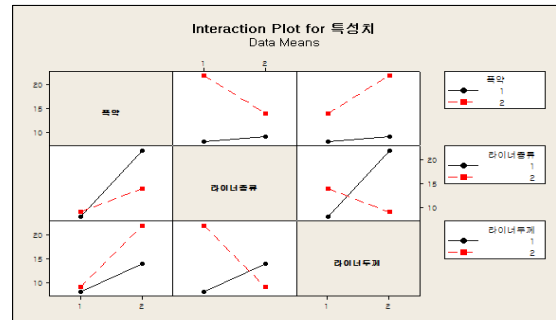


그림 6. 교호작용 분석 그래프.

표 6. S/N비 및 평균분석 결과

수준	인자	폭약 종류	라이너 종류	라이너 두께	Total	mean
	S/N	1	18.57	22.46		
	2	24.89	21.00	22.97		
	Delta	6.32	1.46	2.48		
	Rank	1	3	2		

표 7. 간이분석 결과

수준	인자	폭약 종류	라이너 종류	라이너 두께	Total
*DF		1	1	1	3
*SS		90.25	12.25	20.25	122.75
*MS		90.25	12.25	20.25	122.75
기여도(%)		73.52	9.98	16.5	100

\*DF : 자유도, \*SS : 제곱합, \*MS : 제곱평균

그 인자의 수준에 대한 편차로 정의 된다. 인자들의 최적 조합은 수준(Level)에서 최댓값을 나타내는 인자들을 서로 조합하여 파악 할 수 있다(김호성 외, 1992). 표 6은 S/N와 평균에 대한 반응 표(Response table)이다. 여기서, 델타(Delta)는 수준 별 S/N비 값의 최댓값에서 최소값의 차이를 나타낸 것이고, 순위(Rank)는 인자의 순서를 나타낸 것이다.

제곱합은 원래의 값에서 평균을 빼서 나온 편차값들을 제곱하여 모두 더한 값이다. 제곱평균은 원래값과 평균값과의 차이를 제곱한 값의 합을 자유도로 나누어준 것을 말한다. 평균자승이라고도 부르고 분산의 의미를 갖는다. S/N비의 최적수준의 조합은 폭약 종류 2수준(에멀전), 라이너 종류 1수준(Fe), 라이너 두께 2수준(0.8mm)일 때 노치 두께 값의 S/N비가 최적인 되는 조

합임을 알 수 있다. 표 7은 노치 두께에 대한 각 인자들을 간이분석한 결과이다. 분산분석 시 각 인자 증가장 낮은 제공평균을 가지는 인자에 해당하는 제공합을 풀링 (Pooling) 시킴으로서 오차분산에 대한 근사적인 추정치를 얻을 수 있다. 그러나 본 해석은 오차(Error)를 제외하고 각 인자들이 노치 깊이에 미치는 기여도만 검토하는 간이분석법을 사용하였다. 인자의 기여도는 제공평균의 전체 합에 대한 각 인자의 제공평균 값의 비율 %로 표현한 것이다. 총 제공 합에 기여하는 정도가 높을수록 그 인자는 최종통계량에 미치는 능력이 크다. 노치 깊이에 대한 기여율은 폭약 종류 73.5%, 라이너 두께 16.5%, 라이너 종류 9.98%로 나타났다.

#### 4. 성형폭약을 이용한 콘크리트 부재의 방향성 절단 실험

##### 4.1 실험개요

성형폭약의 조절발파 효과를 확인하기 위하여 콘크리트 부재에 양방향 성형폭약을 삽입한 후 기폭실험을 진행하였다. 라이너 설치 방향으로 폭력이 작용될 때 콘크리트 부재의 방향성 절단 유무를 확인하였다. 터널의 외곽공 및 노천의 법면발파에 적용하기 위하여 smooth blasting 공법에 사용되는 정밀폭약을 사용하여 성형폭약을 제작하였다. 콘크리트 부재가 절단되는 최소 성형폭약의 약량을 확인한 후 동일한 일반폭약과의 파쇄 양상을 비교하였다.

#### 4.2 실험부재 설계

##### 콘크리트 부재

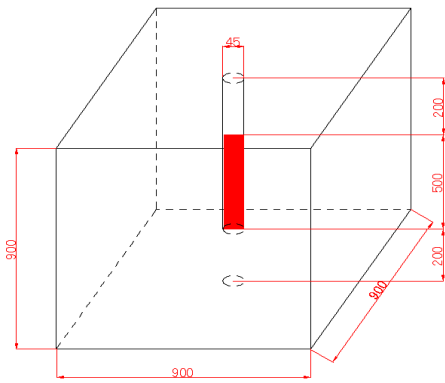
콘크리트 부재는 그림 7(a)와 같이 0.9m×0.9m×0.9m 크기에 중앙에는 Ø45mm 발파공이 0.7m 형성되어 있고, 28일 이상 양생시켜 슈미트헤머 테스트 결과 평균 28 MPa의 강도가 측정되었다(그림 7(b)).

##### 양방향 성형폭약

콘크리트 부재의 크기를 감안하여 약장 50cm에 약량 100g부터 60g까지 줄여가면서 성형폭약을 제작하였다. 라이너 종류는 주효과 분석에서 확인한 Fe라이너(90°)를 사용하였고, 라이너 두께는 표 8과 같이 폭약 폭에 비례하여 0.8mm와 0.5mm를 사용하였다. 폭약종류는 에멀전 폭약으로 제작한 성형폭약이 우수한 성능을 보였지만 본 실험에서는 조절발파가 목적이기 때문에 정밀폭약으로 제작한 성형폭약을 사용하였다. 방향성 절단 실험에서 사용되는 성형폭약의 경우 공벽과 이격거리 범위가 10~13mm로 설계되었는데(표 8) 앞에서 성형폭약(정밀폭약) 성능실험에서 확인한 최대 노치 깊이가 형성된 이격거리 범위가 11~14mm 범위로 측정되어 발파공 내부에 양방향 성형폭약을 적용할 경우 공벽에 최대 노치깊이가 생성될 것으로 판단된다.

##### 센터 가이드, 방향유지 다짐봉

양방향 성형폭약을 공 내부에 적용하기 위하여 두 가지 장치가 필요하다. 첫 번째로 성형폭약과 대상체 사이의 적정 이격거리(stand-off distance)를 유지시켜줘야



(a) 콘크리트 부재 설계모형



(b) 슈미트 헤머 테스트

그림 7. 콘크리트 부재 제작.

표 8. 폭약량(폭약 폭)에 따른 성형폭약의 적용 라이너 두께 설정

시료 No.	폭약량 (g)	폭약 폭(W) (mm)	환산 폭약폭(W') (mm)	라이너(t) 두께 (mm)	이격거리 (mm)	비고
1	100	12.3	17.2	0.76 (0.8적용)	10.2	성형폭약
2	70	10.3	14.4	0.63 (0.5적용)	12.2	
3	60	9.5	13.3	0.58 (0.5적용)	13.0	
4	60	9.5	-	-	-	일반폭약

\*공통 적용사항 : 라이너 종류(Fe), 라이너 각도(90°), 폭약종류(정밀폭약), 약장(50cm), 전색(20cm)

\*이격거리(Stand-off distance): 공벽과 성형폭약과의 거리

\*라이너 두께 : 폭약폭의 3.0%~4.4% 중 4.4%인 최대값 적용(S/N비 최적조합 : 0.8mm>0.5mm)

$$W' = W \times 1.4, t = W' \times 0.044$$

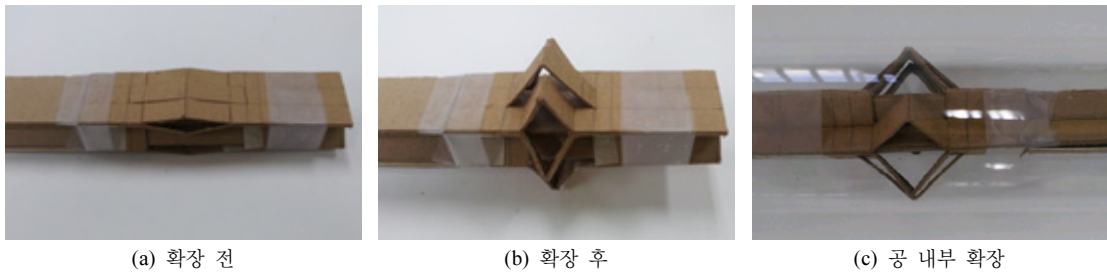


그림 8. 센터가이더.

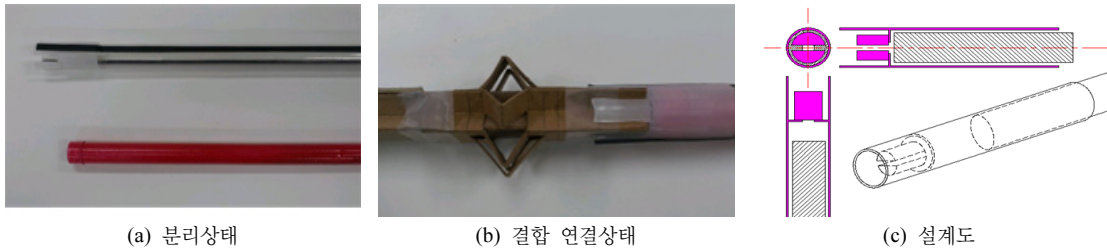


그림 9. 방향유지 다짐봉.

하고, 장공발파의 경우 다수의 성형폭약을 연결해주는 센터 가이더, 두 번째로 성형폭약을 발파공 속에 삽입할 때 발파 대상체의 절단방향과 성형폭약의 라이너 방향을 일치시키기 위한 방향유지 다짐봉이 필요하다(김정규, 2011). 센터 가이더는 4방향으로 공벽과 밀착될 수 있도록 확장성지지편부가 장착되어 있고, 성형폭약을 결합할 수 있는 연결구 기능이 있다(그림 8). 방향유지 다짐봉은 입구부에 홈이 있어 공속에서 성형폭약의 위치를 조절할 수 있고, 2중 봉으로 설계되어 방향을 유지한 상태로 센터 가이더를 확장시켜 벽면에 고정시킬 수

있다(그림 9).

#### 4.3 방향성 절단 실험결과

콘크리트 내부에 각각 다른 폭약 4종류를 넣고 실험한 결과 폭약량 100g과 70g 을 사용한 경우 파쇄 정도의 차이가 있을 뿐 두 경우 모두 완파되어 방향성 절단을 판단할 수 없었다(그림 10(a)~(b)). 폭약량 60g을 사용한 경우 그림 10(c)와 같이 라이너가 부착된 방향으로 콘크리트 부재가 이등분으로 분리 되었다. 동일 폭약량 60g에 라이너가 없는 경우 그림 10(d)와 같이 방향성 절단이 되

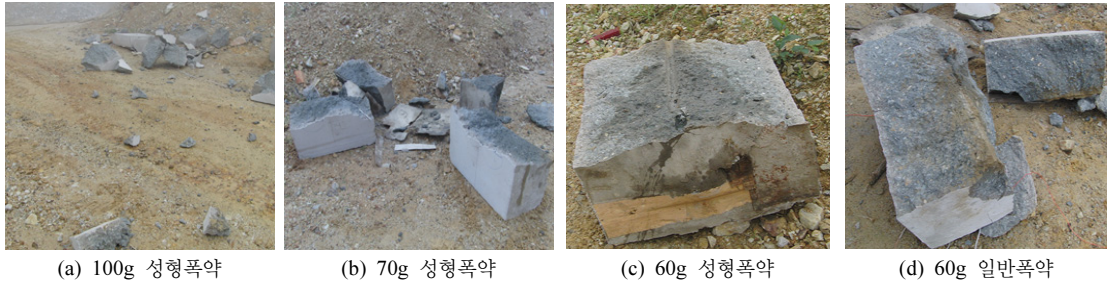


그림 10. 방향성 절단 실험 결과.

지 않고 성형폭약 70g을 사용했을 때와 비슷한 파괴 양상이 나타났다.

## 5. 결론

성형폭약의 조절발파 효과를 확인하기 위하여 양방향 성형폭약, 센터 가이드, 방향유지 다짐봉을 사용하여 실험하였다. 양방향 성형폭약의 성능을 평가하기 위하여 콘크리트 부재 표면에 생성되는 노치의 깊이를 특성치로 산정하고 강건설계를 이용하여 주효과를 분석한 결과 에멀전폭약-Fe라이너-두께 0.8mm가 최적 조합으로 확인되었고, 기여도는 폭약종류 73.5%, 라이너 종류 10%, 라이너 두께 16.5%로 평가되었다. 콘크리트 부재의 실험결과 양방향 성형폭약 60g을 사용하여 콘크리트 부재의 방향성 파단 효과를 확인하였다. 본 연구 결과 양방향 성형폭약의 암반적용 가능성을 확인하였고 터널의 외곽부 및 노천의 법면발파에 적용할 경우 조절발파효과를 기대할 수 있을 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. 김정규, 2011, 공 내부 성형폭약을 이용한 터널의 여굴 저감 방안에 대한 연구, 전남대학교 석사학위논문.
2. 김호성, 양형식 외, 1992, 강건설계를 이용한 품질공학, 민영사
3. 박근순, 임한욱, 2003, 가소성 선형 성형폭약 제조를 위한 설계변수에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 13, No. 3, pp. 225-234.
4. 이병일, 이주익, 공창식, 인영수, 박근순, 조영근, 2000, 폭발전단력에 미치는 성형폭약 및 금속성 Liner의 가소화 영향, 대한화약발파공학회지, Vol. 18, No. 3, pp. 89-97.
5. 정우진, 석철기, 김광일, 2007, 폭발공학, 정담미디어, pp. 281-290.
6. Barbour, R. T., 1981, Pyrotechnics in Industry, McGraw-Hill, Inc., pp. 41-72.
7. Bjarnholt, G., Holloway, D.C., Wilson, W.H., and Maki, K., 1988, Smooth Wall Blasting Using Notched Boreholes - A Field Study, Swedish Detonic Research Foundation, Report DS 1988:3. Stockholm, Sweden.
8. Cooper, P. W., 1989, Explosive Engineering, Wiley-VCH, Inc. pp. 435-440, pp. 253-273.
9. Grady, S. M., 1995, Explosive Devices of Controlled Destruction, Lucent Books Inc., pp. 70-79.
10. Luo Y. and Z. Shen, 2006, Study on orientation fracture blasting with shaped charge in rock, Journal of University of Science and Technology Beijing, Vol. 13, pp. 193.
11. Persson, P., R. Holmberg and J. Lee, 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press Inc., pp. 274-285.

1. 김정규, 2011, 공 내부 성형폭약을 이용한 터널의 여굴 저





**김 정 규**

전남대학교 대학원 에너지자원공학과  
박사

Tel: 062-530-0823  
E-mail: evangelong@hanmail.net



**양 형 식**

전남대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062-530-1724  
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr



**김 종 관**

광물자원공사 기술기획팀

Tel: 033-736-5514  
E-mail: jkkin@kores.or.kr