

# 폭발절단용 성형폭약의 국산화 개발 현황 및 활용화 방안

## Development of Linear Shaped Charges for Explosive Jet Cutting and Application Plan

신 용길<sup>1)</sup>, 이 병일<sup>2)</sup>, 조 영곤<sup>1)</sup>, 이 익주<sup>1)</sup>

Yong-Kil Shin<sup>1)</sup>, Byung-IL Lee<sup>2)</sup>, Young-Gon Joe<sup>1)</sup>, Ick-Joo Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(주)고려Nobel화약, <sup>2)</sup>(주)E.L.TECH

---

### 초 록

철골구조물은 일반 철근 콘크리트 구조와는 달리 단순히 천공을 하고 폭약을 장약하여 기폭시키는 방법으로는 해체 또는 절단이 어렵다. 국내의 경우 최근 철골 구조로 건축되는 강교와 건축물 등이 증가하는 추세이며, 내구연한이 다하거나 구조적 결함으로 인하여 해체 대상으로 지목되는 철골구조물에 대해서는 특수한 형태의 해체 기술을 필요로 한다.

1997년 이후 국내에 철골구조물의 발파해체를 위하여 성형폭약에 의한 폭발절단기술에 관한 연구가 소개된 이후로 폭발절단력에 미치는 성형폭약의 라이너(Liner), 폭약의 종류, 형상 및 이격거리(Stand-off distance) 등에 대한 연구가 활발히 이루어졌으며, 또한 국산화를 위한 기초적인 설계변수에 관한 연구 등이 보고 된 바 있다. 현재 성형폭약의 사용범위가 철골구조물의 절단해체 뿐만 아니라 긴급구조를 필요로 하는 특수한 용도나 군사폭약의 해체, 항공산업 등 그 적용범위가 확대되고 있는 실정이다. 그러나, 성형폭약의 성능 향상 및 품질 보증을 위한 체계적인 설계 변수의 검토 설정에 관한 연구와 산업계의 적용을 위한 구체적인 결과는 보고 된 바 없는 실정이다. 그래서, 보다 체계적인 현장 적용 시험 등에 대한 연구가 효율적으로 진행될 경우 국내 고유 기술에 의한 철구조물의 절단 및 해체 공법에 획기적인 변화를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

따라서, 본 연구에서는 국산화되어 현장에 적용되고 있는 성형폭약 HAKO 제품을 기준으로 이미 국내에 알려진 성형폭약과 비교 분석하였다. 또한 보다 효율적인 산업계의 적용을 위한 각종 시험 결과 및 국산화 현황과 향후 활용 방안 등에 대하여 소개하고자 한다.

**핵심어** : 성형폭약(Linear shaped charges), 폭발절단(Explosive jet Cutting),  
HAKO[(주)고려Nobel화약 제품명], 라이너(Liner), 이격거리(Stand-off distance)

---

## 1. 서론

최근 도시 정비, 재개발, 산업설비 등의 개 보수 사업이 활발히 추진되면서 노후화 되어 안전성에 문제가 있거나 기능에 맞지 않는 구조물의 해체가 급증하고 있다. 따라서 안전하고 정확한 구조물 해체에 대한 기술개발이 요구되고 있으나 지금까지의 구조물 해체공법은 철근콘크리트 구조의 건축물을 크레인이나 파쇄기 등을 이용한 기계적인 방법과 화약을 이용한 발파해체 방법 등이 사용되고 있다.

그러나, 이러한 발파해체 공법의 대부분은 철근콘크리트 구조물의 해체에 적용되고 있어, 각종 형태의 철골구조물로 이루어진 고층 빌딩, 화력발전소, 제철제강설비, 교량, 철도, 정유화학설비, 폐선박 및 해양설비 등은 기존의 발파해체공법을 적용하는데 제한이 있게 된다. 그러므로 이전의 철구조물의 해체공법은 해체대상 구조물이 대형화, 고층화 될수록 시공성, 안전성, 경제성 등이 떨어지며 열악한 작업환경과 조건으로 많은 위험 요소들이 노출되어 철거공법으로서의 한계에 이르고 있다.

철골구조물은 콘크리트구조물이나 목재 구조물과는 달리 해체 작업에 있어서 현재까지 크게 뛰어난 방법을 채택하지 못하고 있는데 일반적으로 산소절단기, 파쇄기를 사용하여 부분적인 파쇄 및 절단을 통해 전체를 조금씩 해체하는 방법을 사용하고 있다. 그러나, 최근 발파해체공법을 응용한 소정의 크기로 특수하게 제작된 성형폭약을 철골구조물에 부착시킨 후 이를 폭발시켜서 순간적으로 철골구조물의 철판, 빔 및 기타부자재 등을 절단 해체 할 수 있는 방법이 알려져 있다.

1997년 이후, 국내에 철골구조물의 발파해체를 위한 성형폭약에 의한 폭발절단기술에 관한 연구가 소개된 이후로 폭발절단력에 미치는 성

형폭약의 라이너(Liner), 폭약의 종류, 형상 및 이격거리(Stand-off distance) 등에 대한 연구가 활발히 이루어졌으며, 또한 국산화를 위한 기초적인 설계 변수에 관한 연구 등이 보고 된 바 있다. 현재 성형폭약의 사용범위가 철골구조물의 절단해체 뿐만 아니라 긴급구조를 필요로 하는 특수한 용도나 군사폭약의 해체, 항공산업 등 그 적용범위가 확대되고 있는 실정이지만 성형폭약의 성능 향상, 품질 보증 및 산업계의 적용을 위한 구체적인 결과는 보고 된 바 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 국산화되어 현장에 적용되고 있는 성형폭약 HAKO 제품을 기존에 소개된 성형폭약과 비교 분석하였다. 또한 보다 효율적인 산업계의 적용을 위한 각종 시험 결과 소개 및 국산화 현황과 향후 활용 방안 등에 대하여 소개하고자 한다.

### 1.1 성형폭약의 폭발절단 기본이론

성형폭약에 의한 폭발절단기술이란 Fig. 1과 같이 특수한 형태의 장약 구조로 구성된 화약의 폭발과 함께 발생하는 열 및 Metal-jet에 의해서 절단대상물이 절단되는 것으로서, 화약의 폭발력이 화약 표면으로부터 직각으로 방사하는 원리를 이용하여 화약의 폭발력의 방향을 제어할 수 있는 것으로서, 화약과 금속성 liner를 뇌관에 의해 폭발시키면 Fig. 1과 같은 노이만(Neuman) 및 먼로 효과(Monroe effect)에 의한 폭풍압으로 금속성 liner는 붕괴되고 고온, 고압, 고속도의 금속jet인 미립자가 방출된다. 이러한 jet는 압력이  $2 \times 10^4$  MPa정도 되고, jet의 속도가 4,000m/sec보다도 높게 된다면 절단에 유효하고, 이것이 금속성 liner의 중앙에 집중되어 초고속의 jet로써 절단대상물을 절단하는 것이다.

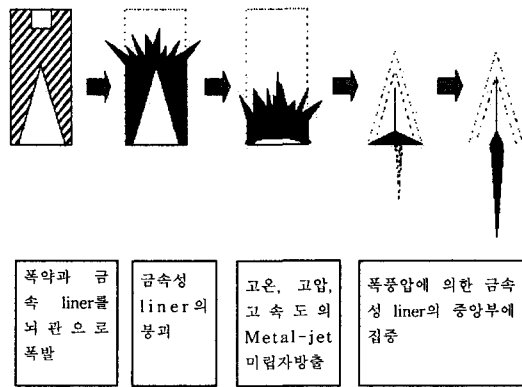


Fig. 1. Explosive jet-cutting mechanism of the shaped charges

## 1.2 성형폭약의 종류와 특성

### (1) 원뿔형 성형폭약

원뿔형 성형폭약은 Fig. 2와 같이 원뿔 또는 반구형의 금속 liner를 축을 따라 대칭으로 만든 구조로, 주로 사용되는 화약류는 RDX이며  $1,100\text{kgf/cm}^2$  이상의 압력하에서 압축된 원료를 사용한다. 특수천공 작업 및 케이블 절단을 필요로 하는 해양산업, 철을 생산하는 철강산업, 파괴를 주 목적으로 하는 군사용으로 많이 사용 된다.

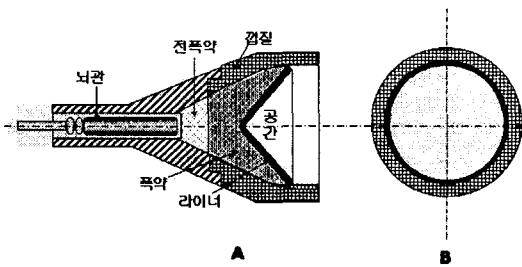
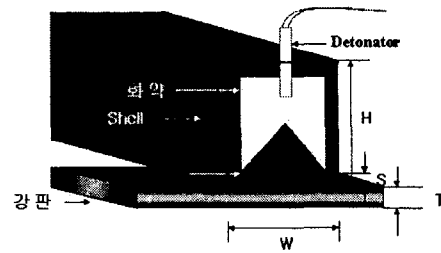


Fig. 2. Geometry of conical shaped charges

### (2) 직선형 성형폭약

직선형 성형폭약은 Fig. 3과 같이 Liner를 직선형태의 V자형으로 만든 구조로 되어 있으며, 일반적으로 90도 각도로 된 것을 가장 많이 사용하고 있다. 이때 사용되는 화약의

압출압은 최소  $562\text{kgf/cm}^2$  정도 되어야 한다. 최근에는 화약과 Liner에 유연성을 주어 절단 반경이 50mm 이상인 Flexible linear shaped charges로도 생산이 되고 있다. 비상탈출용 우주항공산업이나 H빔, I빔 및 Angle 등의 철골구조물의 폭발절단에 의한 해체공사에 응용되고 있다.



S : Stand-off distance(mm),  $\theta$  : Liner의 각도  
H : 폭약의 높이(mm), W : 폭약의 폭(mm)  
T : 강판의 두께(mm), t : Liner의 두께(mm)

Fig. 3. Geometry of linear shaped charges

### (3) 유연성 성형폭약(Flexible linear shaped charges)

유연성 성형폭약은 Pipe, Tube 등 구형 형태의 구조물을 절단할 수 있도록, 화약류와 Liner의 재질을 가소화시켜 보다 잘 휘어질 수 있도록 설계된 성형폭약이다.

일반적으로 장약되는 양은  $1,000\text{g/m}$  정도이며 주로 다양한 형태의 철구조물의 해체작업 및 로켓트 분리시스템, 비상탈출장치 등의 우주항공산업에 널리 활용될 수 있다.

## 1.3 성형폭약의 제원

Table 1.은 지금까지 국내에 소개된 영국, 러시아, 미국, 일본 등의 성형폭약 중에서 가장 우수한 성능을 가지고 있는 영국의 BLADE 성형폭약 제품의 제원을 나타내고 있다. 이때 Steel의 재질은 BS 4360/1986 Grade 43A이며, 최대 인장강도  $530\text{N/mm}^2$ ,

최대 항복(yield)강도는 380N/mm<sup>2</sup>인 것을 사용한 결과이다.

Table 1. Performance data (BLADE/ECT, UK)

Nature	Explosive Content g/m	Cutting Performance (±10%)(mm)		Minimum Bend Radius (mm)	Minimum Bend Radius (mm)
		Steel	Aluminium		
ECT 63g/m	63	3	8	50	50
BLADE 100	100	6	18	200	50
BLADE 240	240	10	30		
BLADE 450	450	15	50	300	100
BLADE 1150	1150	25	100	400	

## 2. 본 론

### 2.1 HAKO 성형폭약 개발 현황

1997년 이후 성형폭약에 대한 연구가 국내에 본격적으로 소개된 이후로 철구조물의 폭발절단 해체를 위한 성형폭약의 국산화를 위한 제품화 개발을 시작하였다. 사용되는 화약류인 PETN 및 RDX 주 원료의 가소화 및 금속성 Liner의 소재로 사용되는 Cu, Al 등의 가소화 등의 연구에 많은 노력을 기울여 현재에는 유연성 성형폭약의 제조에 대한 다양한 설계 변수를 구축하고 있으며, 현재 품질 향상을 위하여 꾸준한 기술개발을 진행 중에 있다. Fig. 4와 Fig. 5는 영국의 BRITISH AEROSPACE社에서 제조된 BLADE 성형폭약의 일반적인 형상과 당사에서 개발된 HAKO 성형폭약의 외형을 비교한 것으로서 가소화되어 사용된 화약류의 충전된 형태와 외형의 차이를 알 수 있다.

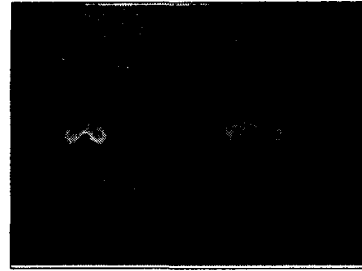


Fig. 4. Scene of the BLADE(UK)



Fig. 5. Scene of the HAKO (Koryo Nobel Explosives)

### 2.2 HAKO 성형폭약 소개

현재 국내의 일부 연구소 및 특수 목적으로 군에서 사용되는 성형폭약은 전량 해외에서 수입되어 사용되고 있는 실정이다. 따라서, 긴급 수요 발생시 수입을 위한 인.허가 절차 및 운송 기간 등을 고려하면 원활한 공급 및 사용이 어려운 실정이며 또한 고가로 수입되고 있는 국내 실정에 비추어 성형폭약의 국산화는 기술적 측면뿐만 아니라 경제성 측면에서 의미가 매우 클 것이다. 따라서, 당사 (주)고려 Nobel화약에서 생산되고 있는 HAKO 성형폭약은 철골구조물 해체 및 각종 철, 비철, 또는 페타이어 등의 절단 해체를 목적으로 다년간의 연구 및 개발을 통해 국산화에 성공한 유연성 성형폭약(Flexible Liner Shaped Charges)이며, 그 제원을 Table 2.에 나타내었다.

Table 2. Specification of HAKO

구분 종류	화약량 (g/m)	규격(mm) (LxWxH)	절단능력(mm)		절단최소반경 (mm)	
			Steel	Aluminium		
HAKO 70	70	2,000x30x20	3	8	50	50
HAKO 150	150	2,000x35x25	6	18	200	50
HAKO 350	350	2,000x40x35	10	30	200	50
HAKO 600	600	2,000x55x50	15	50	300	100

그리고, Fig. 6은 당사에서 생산되고 있는 HAKO 성형폭약의 종류별 외형을 보여주고 있으며, 어떠한 형태의 철판구조물의 절단 해체에도 적용될 수 있도록 유연성을 가지는 구조로 설계되어 있다.

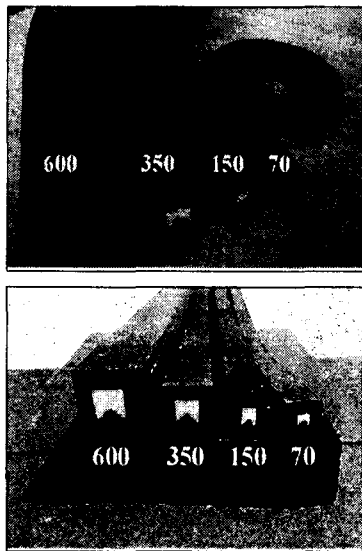


Fig. 6. View of HAKO shape charges

Fig. 7과 Fig. 8은 HAKO 성형폭약 제품의 상부 및 하부면을 보여주는 것으로서 절단 대상물의 표면 상태에 관계없이 절단하고자 하는 면에 부착시킬 수 있도록 Tape화 되어 있으며, 절단최소반경이 HAKO 70의 경우는 50mm, HAKO 600은 300mm 정도로서 어떠

한 형태의 철판구조물에도 원활히 부착되어 폭발절단이 될 수 있도록 구성되어 있다.



Fig. 7. Scene of upper face for the HAKO Flexible shaped charges

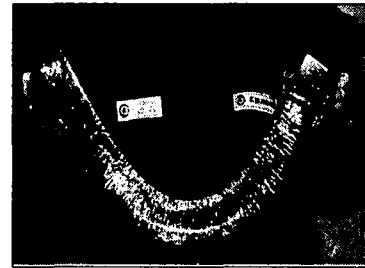


Fig. 8. Scene of bottom face the HAKO Flexible shaped charges

### 2.3 성형폭약(HAKO)의 성능 평가

#### (1) 성형폭약 원재료 구성

HAKO 성형폭약의 주된 성분은 Table 3. 및 Fig. 9의 RDX 화약과 Fig. 10의 가소화된 Cu Liner로 구성되어 있다.

Table 3. Specification of RDX

비 중	융 점	발화점	폭 속	발열량
1.82	204.1℃	245℃	8,500 m/s	1,300 kcal/kg

Table 3.은 RDX 화약의 물리적 성질을 나타낸 것으로서 기존에 사용되었던 PETN 화약에 비해서 발화점 및 폭발속도가 매우 높으며, 또한 비중도 낮아 가소제를 사용한 가소

화가 좀더 용이함을 알 수 있다.  
또한, Fig. 9는 RDX 화약의 분자식을 나타낸 것이다.

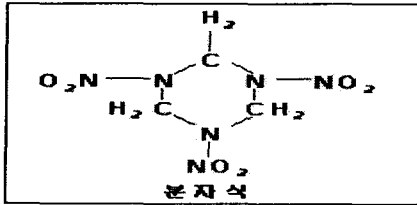


Fig. 9. Molecular formula of RDX

그리고, Fig. 10은 Cu Powder에 가소제를 첨가하여 가소화 과정을 나타낸 것으로서 이때 사용된 Cu 분말은 99.9% 이상의 것을 사용하였다.

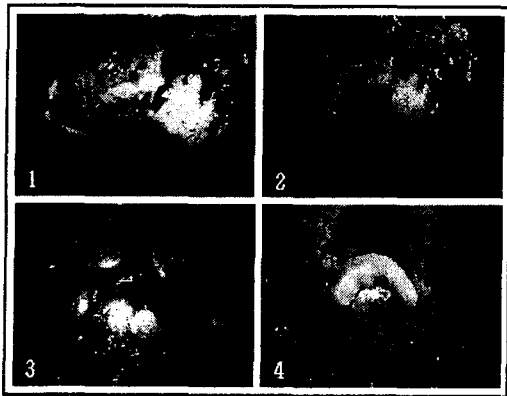


Fig. 10. Plasticizer process of Cu liner

(2) HAKO와 BLADE 성형폭약의 비교

Fig. 11은 Flexible 형태의 HAKO 성형폭약의 건전성 평가를 위하여 지름  $\phi 500$ , 두께는 10mm인 SS41C 일반 배관용 강판을 이용하여 BLADE 240 성형폭약과 HAKO 350 성형폭약을 비교 시험한 폭발절단 결과를 나타낸 것이다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 두 성형폭약 모두 균일한 절단면을 형성하고 있음을 알 수 있었다.



Fig. 11. Explosive jet Cutting by BLADE 240 and HAKO 350

(3) HAKO 성형폭약 폭발절단력 평가  
가. 후판 폭발절단 시험(직선모양 절단)

HAKO 성형폭약에 의한 폭발절단 효과를 확인하기 위하여 HAKO 600를 이용하여 두께 15mm인 SS41C 일반구조용 강재에 Fig. 12와 같이 폭발절단시험을 하였다.



Fig. 12. Explosive jet Cutting test of steel plate

Fig. 12에서 보는 바와 같이 폭발절단 깊이가 균일하게 형성되어 있으며, 절단면의 형태도 깨끗한 것으로 보아 HAKO 600 성형폭약의 폭발절단력은 일반 구조용 강재의 경우에는 일반적으로 15mm가 최적임을 알 수 있었다.

나. 유선형 폭발절단 시험

(곡선모양 절단 : Flexible Test)

HAKO 성형폭약의 유연성 정도를 확인하기 위하여 Fig. 13과 같이 두께 6mm, 10mm 인 SS41C 구조용 강판을 이용하여 폭발절단 시험을 하였다. 이때 사용된 성형폭약은 HAKO 150 및 HAKO 350을 사용하였다.

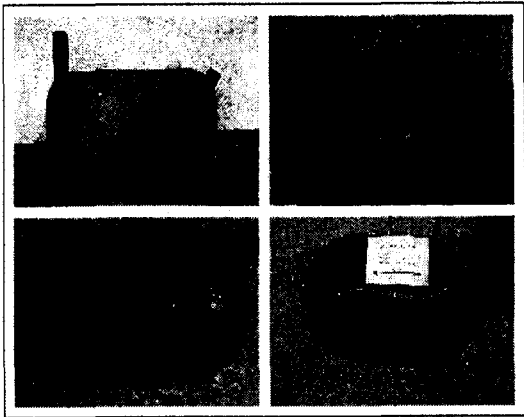


Fig.13. Explosive jet Cutting test of curve type on steel plate

Fig. 13과 같이 성형폭약을 곡선형태로 절단 시험편에 부착하여 폭발절단 한 결과 절단 형태 및 절단면이 균일하게 이루어진 것으로 보아 HAKO 성형폭약의 유연성은 매우 뛰어나다고 할 수 있다.

다. 강관 폭발절단 시험(원형모양 절단)

Fig. 14는 HAKO 성형폭약의 절단최소반경 정도를 알아보기 위하여 지름  $\phi 100$  두께 3mm인 SPS30 배관용 강관을 사용하여 폭발절단 시험을 한 결과를 나타내었다. 이때 사용된 성형폭약은 HAKO 70 이었다.

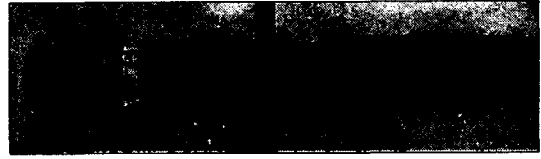


Fig.14. Explosive jet Cutting test of steel pipe

라. 강관 폭발절단 시험(Bend Test)

성형폭약 HAKO 70, 150, 350, 600 각각의 최대절단반경을 확인하게 위하여 두께 6mm 에서 15mm 까지의 SS41C 구조용 강판을 사용하여 각각의 성형폭약을 이용한 폭발절단 시험을 하였다. 그 중에서 Fig. 15는 두께 6mm 시험편에 HAKO 150을 사용하여 시험한 결과 절단최소반경이 200mm에 이르는 것으로 보아 HAKO 성형폭약의 우수성을 확인할 수 있었다.

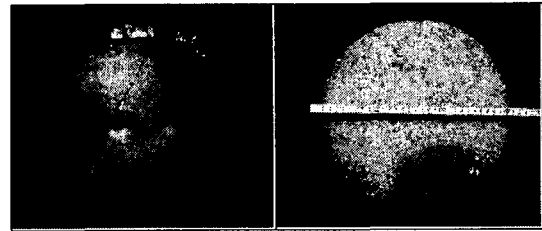


Fig. 15. Explosive jet Cutting test of circle type on steel plate

마. 철문 폭발절단 시험(Door Cutting Test)

Fig. 16은 HAKO 성형폭약의 적용 범위를 확대하기 위하여 일반적으로 널리 접할 수 있는 두께 1mm 철판 사이에 48mm 정도의 공간을 가진 사무용 및 구조용의 방호용 철문을 이용하여 HAKO 70 성형폭약을 사용하여 폭발절단 시험을 하였다.



Fig. 16. Explosive jet Cutting test of steel door

Fig. 16에서 보는 바와 같이 철문의 형태 및 위치 변화 없이 폭발절단된 결과로 보아 대테러용 및 긴급인명 구조 등을 목적으로 충분히 사용할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

#### 바. 철구조물 절단 해체 실증 시험

Fig. 17은 HAKO 성형폭약을 이용하여 특수하게 제작된 철구조물을 폭발절단 해체 한 결과를 나타낸 것이다. 이때의 제작된 철구조물은 폭이 2.0m, 길이가 4.0m 높이가 8.0m이고, 재질은 SS41인 H-Beam(150×150×10mm) 및 (300×300×15mm)과 ㄱ-형 앵글(90×90×6mm)로 구성되어있다. 본 구조물 해체에 사용된 성형폭약은 HAKO 350, 600이었다.

이때, 8개 기둥을 전도 방향 쪽으로 부분 절단하고 그 외의 부재는 전도 붕괴가 원활하게 하기 위하여 산소절단기로 절단하여 사전 취약화 시켰다.

#### (4) HAKO 성형폭약의 포장(Packing)

Fig. 18은 성형폭약 HAKO의 포장을 나타낸 것으로서 포장 BOX는 흡습을 방지하기 위하여 특수 파라핀 코팅 처리를 하여 내수성 및 보관성이 뛰어나도록 처리하였다. 그리고, 포장단위는 HAKO 70, 150, 350, 600 공히

2m 단위로 제작되어 1 BOX에는 5개(10m)로 포장되어있다.



Fig. 17. view of set and overturned steel structure

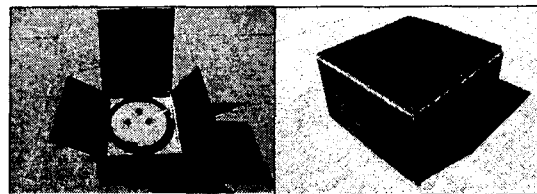


Fig. 18. Packing of HAKO shape charges

## 2.4 성형폭약 HAKO의 적용 사례

### (1) 해양경찰청 훈련 적용

금년 6월에 열린 월드컵기간 중 발생할지 모르는 해상테러에 대비하여 한.일 양국 합동으로 부산 해상에서 “한.일 합동 대테러 훈련”이 5월에 실시되었는데, 이 훈련에 당사의 HAKO 성형폭약이 선박내의 철문을 절단하여 내부로 진입하는 훈련에 사용되었다. Fig. 19는 이 훈련 과정을 보여주는 것으로서 당사 성형폭약 제품의 사용으로 최상의 훈련 효과를 나타내었고 일본 해상보안청 관계자들을 비롯한 훈련 참가자들의 많은 관심을 보였다.

### (2) 경찰특공대 훈련 적용

그동안 외국에서 수입하여 사용되고 있던 성형폭약을 경찰특공대에서는 당사 HAKO 성형폭약의 시험 및 해양특공대 훈련에 적용된 것을 계기로 당사로부터 일정량을 구매하



여 대테러 인명 구출 훈련 및 실제 작전 등에 사용하고 있다. 그리고, 각 지방경찰특공대 및 군 특수부대에서도 많은 관심을 가지고 HAKO 성형폭약에 대한 시험 참가 및 구매 의사를 밝히고 있다.



Fig. 19. Demonstration with HAKO shaped charges

### 3. 향후 활용 방안

당사의 HAKO 성형폭약은 향후에 각종 형태의 철구조물로 이루어진 발전소, 제철제강 설비, 교량, 철도, 폐선박의 해체 및 페타이어 절단, 항공기 조종사의 비상탈출, 또는 긴급한 인명 구조, 좌초된 선박 및 군사폭약의 해체 등 여러 분야에서 널리 사용 될 것으로 예상되며 또한 당사 (주)고려 Nobel화약에서도 지속적인 연구 개발을 통한 품질 향상과 보다 우수한 제품 생산에 노력을 다할 것이다. Fig. 20은 성형폭약을 사용하여 우주선 발사기지의 폭발절단해체장면을 나타낸 것이다.



Fig. 20. Demolition of steel structure with shaped charges

### 참 고 문 헌

1. 이병일, 박근순, 공창식, 김광태, 2000, 성형폭약에 의한 폭발절단기술에 관한 연구, 한국암반공학회지, Vol.10, No.4, pp 516-525
2. 이병일, 이익주, 공창식, 인영수, 박근순, 조영곤, 2000, 폭발절단력에 미치는 성형폭약 및 금속성 Liner의 가소화 영향, 대한화학발표공학회지, Vol.18, No.3, pp 89-97
3. 박근순, 2001, 가소성 선형 성형폭약의 국산화를 위한 설계변수에 관한 연구, 강원대 박사학위논문
4. Dobrushin, L.D, Volgin. L.A., 1995, Explosive cutting by linear core-shaped charges and its on-land, underwater and heavy-duty application, DVS 185, pp 131~135.
5. St. Schumann, H.U. Freund, W. Horning, 1994, Explosive Pipe Cutting by Shaped Charges in an Annular Configuration, Battelle-Institut e.V, D-6000 Frankfurt/M.