

## 가소성 선형 성형폭약 제조를 위한 설계변수에 관한 연구

박근순<sup>1)</sup>, 임한욱<sup>2)</sup>

### Design Parameters for Development of Flexible Linear Shaped Charge

Keun-Soon Park and Han-Uk Lim

**Abstract.** The structures to be demolished have become diverse in types from reinforced concrete to steel. The demand for demolition of steel structures is recently increasing in Korea. Most of flexible linear-shaped charges for steel demolition are now imported from foreign countries. To determine the optimum parameters of design for domestic development of flexible linear-shaped charges, some basic experiments have been carried out and their results are summarized as follows; Copper is shown to be superior to aluminium and lead as a liner material. It is also proved that the optimum apex angle of liner is 90° in comparison with 45°, 60° and 120°. Adequate thickness of liners, standoff distance in terms of quantity of explosives are also examined. Explosives and liners are required to be plasticized in order to improve the bond between explosives and various shapes of steel structures.

**KeyWords:** Flexible linear-shaped charges, Steel demolition, Optimum parameters of design, Liner material, Standoff distance

**초 록.** 구조물의 해체 대상이 철근 콘크리트에서부터 강구조물에 이르기까지 다양화되고 있다. 이러한 강 구조물의 해체는 최근 국내에서도 증가 추세이다. 강 구조물을 해체하는데 이용되는 가소성 선형 폭약의 경우 그 대부분이 외국에서 수입되는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 가소성 선형폭약의 국산 개발을 위해 최적 설계 변수 설정을 위한 연구를 수행하였는데 그 주요 결과는 다음과 같다. 라이너 재질로는 알루미늄이나 납보다는 구리가 우수하고 그 굽힘각도는 45°, 60°, 120°보다 90°일 때 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이외에도 폭약량에 따른 라이너의 두께, 최적이격거리를 검토하였으며 폭약 및 라이너는 가소화시켜 해체 대상 강 구조물의 형태에 따라 결합력을 증대시키는 것이 효과적이다.

**핵심어:** 가소성 선형 성형폭약, 강구조물 해체, 최적설계 변수, 라이너 재질, 이격거리

## 1. 서 론

건물은 내용 년 한 즉 수명을 다 한 경우 해체하는 것이 일반적이지만 최근에는 쾌적한 환경 추구하고 협소한 토지의 효율적인 활용을 위한 재개발사업의 일환으로 수명과 관계없이 해체하는 경우가 많아지고 있으며, 앞으로 건물의 기능을 강화하고 효율성과 미적 감각을 향상시키기 위한 수단 즉 창조적 해체도 많아질 것으로 예상된다. 이와 같은 추세에 비추어 국내에서도 안전하고 정확한 구조물해체에 대한 기술개발이 요구된다. 최

근에는 선진외국에서 적용되고 있는 발파해체공법이 국내에 소개되면서 관련분야의 연구 및 공법개발이 활발히 진행되고 있는 실정이다.

그러나 이러한 발파해체 공법의 대부분은 철근콘크리트 구조물의 철거에 적용되고 있다. 따라서 여러 형태의 철구조물(鐵構造物)로 이루어진 빌딩, 화력발전소, 제철 제강설비, 교량, 철도, 정유 화학설비, 폐 선박 및 해양설비 등을 해체하기 위하여 발파해체공법을 적용하는 데는 제한이 따른다. 이러한 공법의 한계 때문에 선진외국에서는 선형 성형폭약(linear shaped charges)을 이용하여 신속하고 안전하게 철구조물을 절단 해체하고 있으며 때로는 긴급구조나 우주로켓 연료탱크 분리 등 항공산업에 이르기까지 그 적용범위가 확대되고 있다. 그러나 국내의 경우 이 분야는 아직 연구개발이 진행 중에 있으며 일부 연구소 또는 군에서 특수

<sup>1)</sup>두산중공업 건설부문 익산-장수간 고속도로 건설공사 10공구 현장소장 공학박사  
<sup>2)</sup>강원대 지구·환경공학부 교수  
접수일: 2003년 4월 4일  
심사 완료일: 2003년 5월 2일

용도로 사용하는 선형 성형 폭약은 전량 해외에서 수입하여 사용하고 있다.

일반적으로 외국의 선형 성형 폭약의 제조는 각종 특허로 그 기술의 채택이 제한되고 있으며, 또한 그 기술을 도입하는 데는 막대한 기술료(royalty)의 지불이 불가피하기 때문에 국내 제조기술의 개발이 더욱 절실히 요구되기도 한다.

이와 같은 선형 성형폭약은 1963년 Rinehart에 의하여 최초로 사용되었고, 현재 미국, 영국, 러시아, 스웨덴 및 일본 등에서는 여러 가지 상품명으로 산업현장에서 사용되고 있다.

한편 국내에서는 발파해체에 관한 상당한 연구가 진행 중이지만 성형폭약을 이용한 철구조물의 절단해체에 관한 연구는 극히 적으며 시제품 제작이나 기초실험 등으로 초기단계라 할 수 있다. 이들 연구는 주로 화약 제조회사나 몇몇 연구소 또는 개인에 의한 연구로서 연구결과가 상용화되어 철구조물 절단해체에 이용되기까지는 상당한 시간이 소요될 것으로 예상된다. 그러나 2000년대에 들어 산업설비 및 발전소 등 특수구조물의 해체 필요성이 대두됨에 따라 국내에서도 이 방면의 연구가 보다 적극적으로 추진되어야 할 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 외국제품과는 제조기술이 부분적으로 상이하면서도 적용성이 뛰어난 국산 선형 성형폭약을 개발하기 위한 목적으로 추진하였다. 이를 위하여 첫째 이들 폭약의 성능향상과 품질보증을 위한 설계변수 검토 및 설정에 관한 연구와 둘째 현장 적용 실험을 통하여 그 결과를 확인하였는데 본고에서는 지면 관계상 전자(前者)만을 먼저 발표하기로 한다.

## 2. 기초이론

선형 성형폭약(線型 成形爆藥)을 명확히 정의하기는 어려우나 먼로효과(Munroe effect)를 이용하여 폭약 아래 부분을 곡선형으로 하고 금속제 라이너(liner)를 부착하여 기폭시킴으로서 폭약의 힘을 곡선부 중앙에 집중시켜 극히 제한된 부분을 관통 또는 절단시키는 폭약이라 정의할 수 있다.<sup>1,7)</sup>

### 2.1 선형 성형 폭약의 원리

최근 외국에서 상품화된 선형 성형 폭약의 단면은 대체로 Fig.1과 같이 외피(case of sheath or housing), 공동라이너(cavity liner), 중심부 화약(explosive core)으로 구성된다.

라이너는 구리(Cu), 은(Ag), 알루미늄(Al)등으로 만들어지며, 굽힘 각도(apex angle)는 성형폭약의 종류에

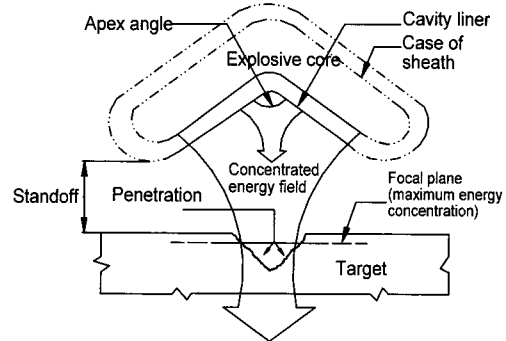


Fig. 1. Simplified shaped charge with optimum standoff for maximum target penetration.

따라 다르지만 가소성 선형 성형 폭약(flexible linear shaped charge)의 경우 대체로  $45\sim 90^\circ$ 인 것으로 보고되고 있다. 이외에도 라이너의 두께, 굽힘 부분에서 라이너의 형태, 정점 반경에 따라 성능에 영향을 미친다.

라이너는 순간적으로 폭약에너지를 집중, 방사하는 역할을 하기 때문에 높은 밀도의 재질이 요구된다. 그리고 중심화약으로는 헥소젠(RDX), 펜트라이트(PETN), 헥소니트로스틸벤(HNS)등이 사용되는데, 기폭속도는  $4,570\text{ m/sec}$  이상 되어야 한다<sup>1)</sup>. 기폭 결과 방출된 에너지가 라이너의 작용으로 집중되는 원리는 다음과 같다. 즉 성형 폭약의 밑부분에서 나온 충격파 중 수평요소는 서로 충돌되어 상쇄되지만, 수직 성분은 서로 축적되어 장약의 중심선에 집중되고 이들이 중심 축을 따라 중첩되어 압력이 극한 상태에 도달한다.

이와 같이 화약의 분해로 형성된 에너지의 집중과 라이너에서 생긴 금속 분자들의 조합으로 이루어진 고속 기류(jet) 즉 충격파는 일정한 방향으로 방출되면서 목표물을 절단하는 작용을 한다. 이 때 목표물의 변형은 충격파가 전면을 통과한 후 극히 짧은 순간 즉  $1\mu\text{s}$  내에 시작된다. Fig. 1은 고속기류가 완전히 형성되어 적당한 이격거리(standoff)를 유지할 때 철 구조물을 절단하는 모식도이다.

성형 폭약의 관통 작용이나 절단 능력은 여러 가지 요소에 의해 영향을 받게 되는데 그 대표적인 요소는 폭약의 종류, 라이너 재질, 이격거리, 목표물 즉 절단물의 물리적 특성을 들 수 있다.

### 2.2 고속기류의 형성과 영향 요소

고속기류란 대단히 높은 속도를 갖는 물질이 일정한 각도로 충돌할 때 충돌되는 두 물체의 표면에서 형성되는 기류라 정의할 수 있는데<sup>2)</sup>, 성형폭약에 의한 절단이

나 폭약에 의한 용접 등 특수분야에서만 이용된다.

**고속기류의 형성 원리**

성형폭약의 형태는 원추형(conical), 선형(linear) 및 가소성 선형(flexible linear)등이 있는데 여기서는 알기 쉽도록 원추형 성형 폭약을 중심으로 그 발생원리를 살펴보기로 한다.

Fig. 2와 같은 원추형 성형 폭약을 기폭시키면 폭광파(detonation wave)가 라이너를 통과할 때 폭약과 라이너의 접촉부에서 가속되면서 라이너가 대단히 적은 각도로 변형된다. 따라서 원추형의 오목한 부분에서는 금속질량/화약질량 비가 낮지만 그 속도는 대단히 빨라진다. 이 때 라이너 물질이 장약의 중심선(또는 중심축)상에서 한 점에 모아진다면 표면 물질은 대단히 높은 속도로 압착된다. 이 때 압착되는 물질은 고속기류를 형성하게 된다<sup>3)</sup>.

그리고 고속기류의 속도는 Fig. 3과 같이 차이를 갖게 된다. 오목한 부분 즉 앞부분에서는 6,000~10,000 m/s 정도의 높은 속도를 갖는데 비하여 맨 뒤 부분은 500~2000 m/s의 낮은 속도를 갖게 되어 슬러그(slug)를 형성한다. 따라서 앞 부분은 보다 빠른 속도로 먼 곳까지 전달되다가 그 힘이 쇠퇴하는데 그 이동거리는 대체로 직경의 몇 배에 해당된다. 고속기류가 형성되는 보다 구체적인 메카니즘은 생략하기로 한다.

**절단 대상물의 영향**

고속기류에 의한 절단대상물의 절단깊이는 호스에서 분출되는 고압수에 의한 흠뚫의 붕괴와 유사하다. 고압수의 경우 공(孔)내 깊은곳에서는 물질이 분해되어 진흙상태로 공 밖으로 밀려 나온다. 마찬가지로 성형폭약

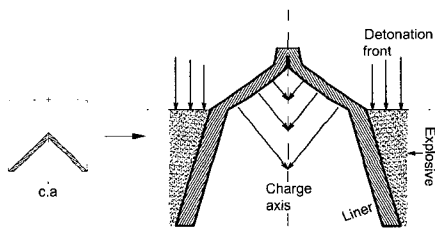


Fig. 2. Acceleration of liner during pass-age of explosive detonation wave.

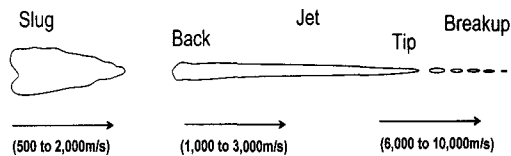


Fig. 3. Jet Configuration.

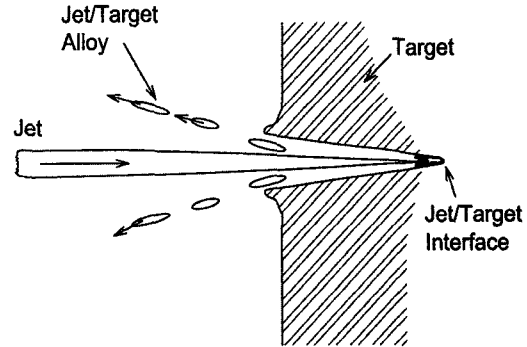


Fig. 4. Erosion of jet through target.

에 의한 금속 절단물도 Fig. 4와 같이 고속기류의 충격 속도와 고압으로 소성영역으로 변환되어 제거되는데 이때 침식 또는 절단 작용은 고속기류가 소멸되거나 완전 절단될 때까지 계속된다.

**이격거리의 영향**

이격거리란 성형폭약과 절단 대상물과의 최단거리로 일반적으로 약경으로 표시한다.

이격거리가 짧을 때는 고속기류의 길이 역시 짧아 이동에 소요되는 시간이 줄어들므로 절단대상물의 절단 깊이가 최적조건보다 낮아진다. 반대로 긴 때는 고속기류가 부분적으로 파쇄되어 각 입자들이 부분적으로 타격하게 되어 대상물의 절단에 효율적으로 이용되지 못한다.

**절단깊이**

절단깊이는 몇가지 가정과 관계식의 유도를 거쳐 최종적으로 식 (1)과 같이 주어진다<sup>2)</sup>.

$$L_p = K \cdot L_j \left( \frac{\rho_j}{\rho_T} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

여기서  $L_p, L_j$  : 각각 절단깊이, 고속기류의 길이  
 $\rho_T, \rho_j$  : 각각 절단 대상물의 밀도, 고속기류의 밀도  
 K : 성형 폭약의 제원에 따른 보정 상수

**2.3 상용 성형폭약의 종류와 특성**

상업용으로 이용되는 성형 폭약은 크게 원추형, 선형 및 가소성 선형 성형폭약으로 나누어진다. 원추형은 주로 1,055 kgf/cm<sup>2</sup>이상의 압력하에서 압축된 핵소겐을 사용하는데 주로 케이블 절단, 군용, 천공, 철강산업 및 석유 시추공이나 파이프라인 준설 작업 등에 이용된다. 선형 성형 폭약은 V자형 라이너가 90°각도를 이루는 구

조이며 사용 화약류의 압출압은 최소 562 kgf/cm<sup>2</sup> 이상 이라야 한다. 이 폭약은 주로 각종 철구조물 형태인 H 빔, I 빔, 앵글(Angle) 등의 절단과 해체공사에 이용된다. 반면에 가소성 선형 성형폭약은 파이프, 탱크, 튜브, 사이로등 구형(球形)형태의 목표물을 절단할 수 있도록 화약류와 라이너 재료를 가소화시킨 것이다.

3. 시료, 실험 장치 및 방법

이론적 검토 결과를 바탕으로 선형 성형폭약을 제조 하고 이를 이용하여 설계 변수 설정을 위한 예비실험을 실시하였다. 그리고 예비실험 결과를 바탕으로 본 실험 을 실시하였는데 그 주요내용은 다음과 같다.

3.1 시료

먼로효과에 의한 고속기류 발생에 직접적인 영향을 미치는 요소로는 폭약류, 라이너, 가소화제, 절단 시험편을 들 수 있다.

폭약류

지금까지의 연구 결과를 종합해 보면 성형폭약으로는 기폭속도가 4,570 m/s 이상의 품질이 요구된다. 따라서 국내에서 제조되는 폭약류 중 저폭속 폭약인 뉴에멀전, 고폭속 폭약인 펜트라이트, 핵소겐을 사용하였고 기폭 뇌관은 8호 전기뇌관을 사용하였는데 실험에 사용된 폭약류의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of Emulsion explosive, PETN and RDX<sup>4)</sup>.

Properties	Explosives		
	Emulsion	PETN	RDX
Detonation velocity (m/sec)	5,900	8,400	8,500
Bulk density (g/cc)	1.20	1.77	1.816
Detonation energy (kcal/kg)	1,100	1,450	1,300
Gas volume (l/kg)	830	780	798
Molecular weight	-	316.2	222.13
Ignition point (°C)	-	202~205	230
Drop sensitivity (cm)	100	17	20

Table 2. Properties of Cu, Al and Pb.

Properties	Liner source material		
	Cu	Al	Pb
Density (g/cm <sup>3</sup> )	8.93	2.69	11.34
Melting point (°C)	1,083	660.2	327.4
Boiling point (°C)	2,630	2,060	1,750

라이너

라이너의 재질은 구리, 알루미늄, 납 등이고 두께는 외국의 문헌조사 및 사전 실험결과를 바탕으로 0.3, 0.4, 0.5, 0.8 및 1.0 mm를 사용하였으며, 굽힘각도는 45°, 60°, 90°, 120°가 되도록 절단 절곡기를 사용하여 정밀 하게 제작하였다.

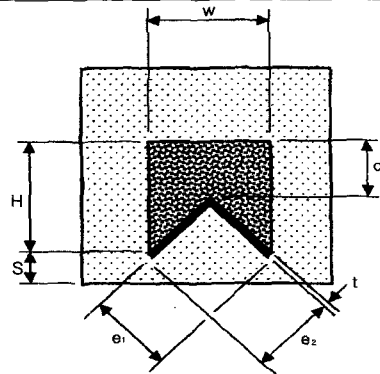
라이너의 재질에 따른 물성은 Table 2와 같다.

가소화제

가소화제란 성형폭약 자체가 유연성을 갖도록 첨가하 는 재료로서 가소화됨에 따라 절단대상이 되는 철구조

Table 3. Dimensions of L.S.C(Linear Shaped Charges).

Dimension	Type	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Remarks
Shaped charge	Length (mm)	200	200	200	200	
	Height (mm)	22	26	34	56	
	Width (mm)	29	32	40	56	
Explosive	Width (W,mm)	9	13	19	27	
	Height (H,mm)	9	14	20	27	
	Height (C,mm)	4.5	7.5	10.5	13.5	
Liner	Thick ness (t,mm)	0.4	0.5	0.8	1.0	Plasticized
	Width (E,mm)	12.7	18.4	26.9	38.2	
	Apex angle (°)	90	90	90	90	45,60, 120
Explosives Quantity (g)	14.5	32	70	133		



물에 밀착 장약을 할 수 있어 절단효과를 상승시키게 된다. 이와 같은 가소화제로는 폴리부텐(polybutene), 부틸고무(butyl rubber), 디에칠헥실세바케이트(diethylhexyl sebacate)를 일정 비율로 혼합하여 사용한다.

본 연구에서는 폭약의 가소화 및 라이너의 가소화를 다음과 같이 실시하였다. 먼저 폭약을 가소화하기 위하여 폭약으로 사용된 펜트라이트 및 헥소겐을 중량비로 85-95 %, 폴리이소부틸렌 성분이 95 % 이상인 폴리부텐을 2-7 %, 부틸고무, 천연고무, 클로로푸텐 고무를 0.5-4.0 %, 디에칠헥실세바케이트를 0.5-4.0 % 비율로 배합하여 가소화 하였다.

다음으로 구리 라이너의 가소화이다. 즉, 체(screen)의 크기 0.045 mm를 90 % 이상 통과하고, 순도 99 % 이상인 구리분말 85-95 %, 폴리이소부틸렌 90 % 이상인 폴리부텐 4-8 %, 광유(mineral oil)가 1-5 %, 디에칠헥실세바케이트가 0.5-3.0 %의 조성으로 가소화 하였다.

**절단 대상 시험편**

절단 대상 시험편으로 사용된 철판은 일반 구조용 강재인 SS41 및 SSC41의 형강을 사용하였다.

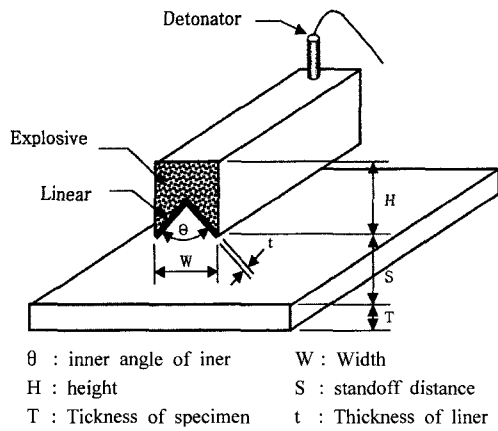


Fig. 5. Schematic diagram of L.S.C and steel plate.

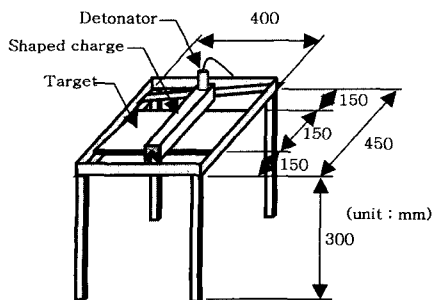


Fig. 6. Equipment setting for penetration test.

**시료의 준비 및 제작**

시료는 폭약량에 따라 4종류로 제작하였는데 그 규격 및 단면의 크기는 Table 3과 같다. 또한 본 연구에서는 예비실험 30회, 설계 변수 설정실험 96회, 이격거리 실험 15회 등 3단계로 구분하여 총 141회의 실험을 실시 하였다.

**3.2 실험장치**

시험편과 성형 폭약의 상호 연결 모식도는 Fig. 5와 같으며, 폭약시료를 정확하게 설치하고, 안전하게 기폭시킬 수 있도록 강재(鋼材)로 제작된 폭약 시료 설치대는 Fig. 6과 같다. 또한 각 시료별로 최적의 이격거리(standoff)를 결정하기 위한 실험장치는 Fig. 7과 같다.

**3.3 실험방법**

선형 성형폭약의 절단성능에 영향을 미치는 주요 설계변수를 규명하기 위하여 앞에서 설명한 바와 같이 총 141회 실험을 실시하였다.

본 실험은 폭약 원료의 혼합, 제조, 가공, 설치, 폭발시키는 위험한 과정을 거쳐야 하므로 보다 안전하고 정확한 실험을 하기 위하여 모든 실험은 (주)고려노벨화약의 폭발 실험장과 두산중공업(주)의 야외 폭발 실험장에서 적법하게 수행되었다.

**예비 실험**

성형 폭약의 기초원리인 먼로 효과의 확인과 여러 가지 설계 변수 중 영향력이 큰 요소들의 효과를 파악함으로써 설계변수 실험의 효율성 제고를 위하여 예비실험을 실시하였다. 이 때 폭약의 종류, 폭약의 양, 라이너의 재질과 굵힘각도, 두께 등을 서로 달리하면서 일반 형태, 오목한 공간(hollow cavity)형태, 라이너가 부착된 형태별로 각각 폭발력 집중실험을 하였다. 구체적인 예비실험 내역은 생략하기로 한다.

**설계변수 설정실험**

설계변수 설정 실험조건은 예비 실험을 통하여 확인

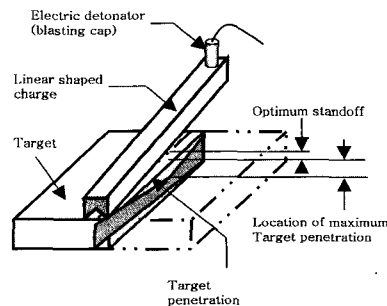


Fig. 7. Equipment setting for optimum standoff fixing.

Table 4. Test conditions of L.S.C with Cu & Al liner.

Sample No	Explosive				Liner			
	Type	Q' ty (gr/m)	Length (mm)	Q' ty (gr/ea)	Type	Thickness (mm)	Angle (°)	
1	1-1	PETN	72.5	200	14.5	Cu	0.3	60
	1-2	PETN	72.5	200	14.5	Cu	0.3	90
	1-3	PETN	72.5	200	14.5	Cu	0.4	60
	*1-4	PETN	72.5	200	14.5	Cu	0.4	90
	1-5	PETN	72.5	200	14.5	Al	0.3	60
	1-6	PETN	72.5	200	14.5	Al	0.3	90
	1-7	PETN	72.5	200	14.5	Al	0.4	60
	*1-8	PETN	72.5	200	14.5	Al	0.4	90
2	2-1	PETN	160	200	32	Cu	0.4	60
	2-2	PETN	160	200	32	Cu	0.4	90
	2-3	PETN	160	200	32	Cu	0.5	60
	*2-4	PETN	160	200	32	Cu	0.5	90
	2-5	PETN	160	200	32	Al	0.4	60
	2-6	PETN	160	200	32	Al	0.4	90
	2-7	PETN	160	200	32	Al	0.5	60
	*2-8	PETN	160	200	32	Al	0.5	90
3	3-1	PETN	350	200	70	Cu	0.5	60
	3-2	PETN	350	200	70	Cu	0.5	90
	3-3	PETN	350	200	70	Cu	0.8	60
	*3-4	PETN	350	200	70	Cu	0.8	90
	3-5	PETN	350	200	70	Al	0.5	60
	3-6	PETN	350	200	70	Al	0.5	90
	3-7	PETN	350	200	70	Al	0.8	60
	*3-8	PETN	350	200	70	Al	0.8	90
4	4-1	PETN	665	200	133	Cu	0.8	60
	4-2	PETN	665	200	133	Cu	0.8	90
	4-3	PETN	665	200	133	Cu	1.0	60
	*4-4	PETN	665	200	133	Cu	1.0	90
	4-5	PETN	665	200	133	Al	0.8	60
	4-6	PETN	665	200	133	Al	0.8	90
	4-7	PETN	665	200	133	Al	1.0	60
	*4-8	PETN	665	200	133	Al	1.0	90
32								

된 결과를 토대로 선형 성형폭약(L.S.C)실험, 가소성 선형 성형폭약 (Flexible Linear Shaped Charges, FLSC) 실험 그리고 가소화 효과를 확인하기 위한 가소화 특성 비교 실험 등으로 대별하여 실시하였는데 각 실험조건은 Table 4, Table 5 및 Table 6과 같다.

먼저 Table 4는 철판두께 3, 6, 10, 15 mm를 기준으로 폭약을 펜트라이트(PETN), 폭약량은 14.5 gr/ea (=72.5 gr/m) 등 4종류, 그 길이는 200 mm, 라이너의 재질은 구리와 알루미늄이며 굽힘 각도는 60°와 90°로, 두께는 0.3-1.0 mm이다. 그리고 Table 4에서 절단성능이 우수하게 나타난 시료 8개에 대하여 최적 이격거리 실험을 추가로 실시하였는데 그 대상은 \*로 표시된 시료이다.

Table 5. Test conditions of L.S.C with flexible Cu liner.

Sample No	Explosive				Liner			Paste ratio (%)	
	Type	Q' ty (gr/m)	Length (mm)	Q' ty (gr/ea)	Type	Thickness (mm)	Angle (°)		
1	1-1	PETN	665	200	133	Cu	4.2	90	5
	1-2	PETN	665	200	133	Cu	4.2	90	10
	1-3	PETN	665	200	133	Cu	4.2	90	15
	1-4	PETN	665	200	133	Cu	4.2	90	20
	1-5	PETN	665	200	133	Cu	4.2	90	25
2	2-1	PETN	665	200	133	Cu	4.2	45	15
	2-2	PETN	665	200	133	Cu	4.2	60	15
	2-3	PETN	665	200	133	Cu	4.2	90	15
	2-4	PETN	665	200	133	Cu	4.2	120	15
3	3-1	PETN	665	200	133	Cu	1	90	15
	3-2	PETN	665	200	133	Cu	2	90	15
	3-3	PETN	665	200	133	Cu	3	90	15
	3-4	PETN	665	200	133	Cu	4	90	15
	3-5	PETN	665	200	133	Cu	5	90	15
	3-6	PETN	665	200	133	Cu	6	90	15
	3-7	PETN	665	200	133	Cu	7	90	15
16									

Table 6. Test conditions for plastic effects.

Sample No	Explosive				Liner			Remarks	
	Type	Q' ty (gr/m)	Length (mm)	Q' ty (gr/ea)	Type	Thickness (mm)	Angle (°)		
1	1-1	PETN	72.5	200	14.5	Cu	0.4	90	Non-pl
	1-2	PETN	160	200	32	Cu	0.5	90	Non-pl
	1-3	PETN	350	200	70	Cu	0.8	90	Non-pl
	1-4	PETN	665	200	133	Cu	1.0	90	Non-pl
2	2-1	PETN	72.5	200	14.5	Cu	1.2	90	PI
	2-2	PETN	160	200	32	Cu	1.5	90	PI
	2-3	PETN	350	200	70	Cu	2.2	90	PI
	2-4	PETN	665	200	133	Cu	4.2	90	PI
3	3-1	RDX	72.5	200	14.5	Cu	0.4	90	Non-pl
	3-2	RDX	160	200	32	Cu	0.5	90	Non-pl
	3-3	RDX	350	200	70	Cu	0.8	90	Non-pl
	3-4	RDX	665	200	133	Cu	1.0	90	Non-pl
4	4-1	RDX	72.5	200	14.5	Cu	1.2	90	PI
	4-2	RDX	160	200	32	Cu	1.5	90	PI
	4-3	RDX	350	200	70	Cu	2.2	90	PI
	4-4	RDX	665	200	133	Cu	4.2	90	PI
16	* 3 Performances test per one sample								

\* PI : Plasticized explosives

Table 5는 폭약과 구리 라이너를 가소화시킨 다음 가

**Table 7.** Change of penetration depth at different quantities of explosive.

Q'ty of Explosive (gr)	Thickness of liner (mm)	Penetration depth(mm)				Test condition
		Cu liner		Al liner		
		60°	90°	60°	90°	
14.5	0.4	2.84	4.31	2.61	3.27	Type 1&2 in Table3
32	0.4	3.18	4.48	2.9	3.86	
32	0.5	5.61	8.01	2.92	3.4	Type 2&3 in Table3
70	0.5	*3.31	9.92	*2.83	6.4	
70	0.8	5.47	11.85	3.14	6.76	Type 3&4 in Table3
133	0.8	*3.72	12.15	3.35	7.47	

\* : decrease

소화제의 첨가량, 가소화된 라이너의 각도 및 두께를 달리하면서 실시한 시험용 시료이다.

그리고 Table 6은 가소화의 효과를 비교하기 위한 실험으로 폭약은 펜트라이트와 헥소겐으로 각각 가소화하지 않은 때와 폭약과 라이너를 가소화한 때 등 조건을 달리한 경우이다. 이 때 라이너의 가소화는 구리분말로 제조되었다.

이상 3가지 외에도 장약구조와 기폭뇌관의 위치가 절단깊이에 미치는 영향도 아울러 검토하였다.

**4. 실험결과 및 고찰**

절단 깊이에 큰 영향을 미치는 폭약량의 변화, 라이너의 두께, 재질 및 각도, 이격거리, 가소화된 라이너의 각도, 두께 그리고 장약구조 및 기폭뇌관의 위치 등 설계 변수 설정실험과 가소화 특성 실험 결과는 다음과 같다.

**4.1 설계 변수 실험**

Table 4 및 Table 5의 실험조건에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

**폭약량의 변화에 따른 절단 깊이**

Table 4와 같은 조건에서 얻어진 실험결과는 Table 7과 같다.

Table 7의 자료를 예로 들어 설명하면 다음과 같다. 즉 라이너의 두께가 0.4 mm로 동일하고 구리 라이너의 경우 폭약량이 14.5 gr/ca일 때 절단 깊이는 60°가 2.84 mm, 4 mm이고 90°는 4.31 mm인데 비하여, 알루미늄 라이너의 경우 동일 조건에서 각각 2.61 mm 및 3.27 mm이다.

이 때 사용한 폭약의 단면 형상은 Table 3의 1형태 및 2형태이다. 실험 결과 Table 7과 같이 동일 조건에

**Table 8.** Change of penetration depth at different liner thickness.

Q'ty of Explosive (gr)	Thickness of liner (mm)	Penetration depth(mm)			
		Cu liner		Al liner	
		60°	90°	60°	90°
14.5	0.3	2.20	2.36	0.99	1.63
14.5	0.4	2.84	4.31	2.61	3.27
32.0	0.4	3.18	4.48	2.90	3.86
32.0	0.5	5.61	8.01	2.92	*3.40
70.0	0.5	3.31	9.92	2.83	6.40
70.0	0.8	5.47	11.85	3.14	6.76
133.0	0.8	3.72	12.15	3.35	7.47
133.0	1.0	13.5	16.50	7.10	12.10

\* : decrease

서 폭약량이 증가해도 절단 깊이가 상대적으로 증가하지 않고 굽힘 각도가 60°인 때는 때때로 감소현상(\* mark)을 보이기도 한다. 즉 폭약량과 라이너의 두께간에는 적정 임계 두께가 있는 것으로 생각된다. 그리고 굽힘 각도(apex angle)가 60°인 때는 라이너 붕괴 과정에 과도한 폭발압력이 작용하여 고속기류가 집중되지 못하고 분산되기 때문인 것으로 판단된다.

**라이너 두께에 따른 절단 깊이**

Table 4의 조건에서 라이너 두께에 따른 절단깊이는 Table 8과 같다.

폭약량이 14.5 gr로 동일한 경우 구리 라이너 두께가 0.3 mm일 때 절단 깊이는 60° 및 90° 경우 각각 2.2 및 2.36 mm이며 알루미늄의 경우 각각 0.99 및 1.63 mm이다.

실험 결과 폭약량과 라이너 두께를 달리할 때 라이너 재질로는 알루미늄보다 구리가 절단깊이가 우세하며, 또 같은 재질인 경우 60°보다 90°인 때 그 영향이 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 라이너의 두께는 발생하는 고속기류의 진행과정에 큰 영향을 미친다. 예비실험과 Table 8의 결과를 종합할 때 각각의 폭약량에 대한 적정 라이너 두께는 두번째 경우 예를 들면 폭약량이 14.5 gr인 때는 0.4 mm인 것을 알 수 있다.

이 결과를 기준할 때 라이너 두께(0.4 mm)와 성형폭약의 너비(Table 3에서 그 너비는 각각 9, 13, 19, 27 mm임)의 비율은 3.7-4.4 %로서 외국의 결과 3-4 %와 비교할 때 거의 유사함을 알 수 있다<sup>2,8)</sup>.

**라이너 재질에 따른 절단 깊이**

라이너 재질이 구리인 경우와 알루미늄의 경우 절단 깊이를 Table 8에서 보면 구리가 알루미늄보다 월등히

우수한 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 구리가 알루미늄보다 비중, 용융점 및 비등점이 높아 고속기류가 좁고 깊게 형성되기 때문인 것으로 생각된다.

**라이너 각도에 따른 절단 깊이**

라이너 각도에 따른 절단 깊이는 Table 8에서 보면 라이너 재질과는 관계없이 90° 각도가 60°인 때보다 절단깊이가 우수하다. 90°인 때는 60°일 때보다 붕괴되는 라이너의 고속기류가 성형 폭약의 중심선에 효과적으로 누적, 집중되기 때문이다.

외국의 연구 결과를 보면 라이너 각도는 원뿔형 성형폭약의 경우는 42-60°이고, 선형 성형폭약은 90°가 일반적인 것으로 보고되고 있다<sup>1,6)</sup>. 본 연구에서 개발 모델로 삼았던 영국 BLADE 제품의 경우 그 값이 약 92°인 점을 고려해 보면 본 연구결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

**이격거리에 따른 절단 깊이**

최대 절단 깊이를 확보하기 위한 적정 이격거리를 구하기 위하여 폭약량과 라이너 두께를 변화시키면서 구리 및 알루미늄 라이너에 대한 이격거리 실험을 실시하였는데 한 예를 들면 Fig.8과 같다.

한편 이들 결과를 요약하면 Table 9와 같다.

위 실험 결과에서 보면 동일한 조건에서 구리 라이너의 경우 알루미늄 라이너보다 절단깊이도, 이격거리도 크게 나타난다. 이와 같은 이유는 구리의 물성이 알루미늄

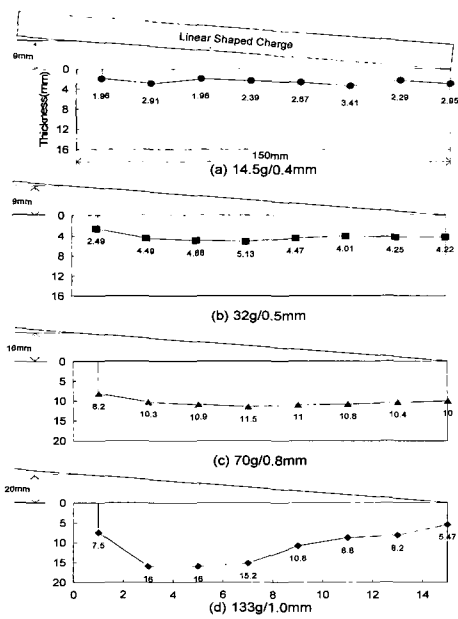


Fig. 8. Penetration depth by quantities of explosives and thickness of copper liners.

Table 9. Max. penetration depth at different conditions.

Q'ty of Explosive (gr)	Thickness of liner (mm)	Cu liner		Al liner	
		Max.P.D (mm)	S.D (mm)	Max.P.D (mm)	S.D (mm)
14.5	0.4	3.41	2.40	3.54	2.4
32.0	0.5	5.13	4.80	4.56	2.4
70.0	0.8	11.50	8.50	9.15	6.4
133.0	1.0	16.00	16.00	14.17	13.3

\* Max.P.D : Max . Penetration Depth  
S.D : Standoff distance  
Apex angle : 90°

미늄의 그것보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

**가소화제의 양에 따른 절단 깊이**

Table 5의 type 1과 같이 폭약량이 133 gr이고, 라이너 재질은 구리 분말로서 그 두께가 4.2 mm, 굽힘각도가 90°로 동일한 조건에서 단순히 가소화제의 양을 5, 10, 15, 20 및 25 %로 변화시켰을 때 절단깊이는 각각 12.15, 10.20, 8.05, 6.35 및 4.5 mm를 나타내었다. 이와 같은 결과는 폭약에 혼합된 가소화제의 비율이 증가할수록 폭약량이 상대적으로 감소되기 때문에 절단깊이가 감소된다. 따라서 성형폭약의 가소화제로 폴리부텐을 사용할 경우 가소화제의 혼합비율은 가소화 상태와 강재의 절단 깊이를 고려할 때 10-15 %가 가장 적합한 것으로 판단된다.

**가소화 라이너의 굽힘 각도에 따른 절단 깊이**

Table 5의 type 2와 같이 폭약량이 133 gr이고, 라이너 재질은 구리 분말이며 두께가 4.2 mm로 동일한 조건에서 굽힘각도가 45°, 60°, 90° 및 120°로 변화할 때 그 절단 깊이는 각각 7.16, 9.80, 12.60, 8.50 mm로서 90°일 때 가장 우수한 값을 보이고 있다. 이 같은 현상은 선형 형태일 때 라이너 표면 안쪽에서 방사되는 화약 에너지의 힘이 90°인 때 중심점에서 가장 크기 때문이다.

**가소화 라이너의 두께 영향**

Table 5의 type 3과 같이 폭약 양은 133 gr이고 라이너 재질이 구리 분말이며 각도가 90°이며, 가소화제의 양이 15 %로서 동일한 때 라이너 두께가 1, 2, 3, 4, 5, 6 및 7 mm로 변화할 경우 각각의 절단 깊이는 8.10, 12.30, 13.90, 13.50, 10.50, 10.60 및 10.68 mm를 나타내었다.

라이너 두께가 3-4 mm일 때 우수한 성능을 보이고, 두께가 그보다 크거나 적은 때는 오히려 감소 현상을 보인다. 이와 같은 이유는 폭약량과 라이너 두께와의 관계에서 최적 조건을 구해야 할 것으로 생각된다.

**장약구조 및 기폭뇌관 위치에 따른 절단 깊이의 변화**  
모든 실험조건을 동일하게 하고 다만 포장지의 유무



에 따라 동일 형상의 성형 폭약을 두꺼운 종이를 포장지로 이용한 때, 기공율이 30 %인 우레탄 폼을 포장지로 한 경우 그리고 포장지를 사용하지 않은 경우등 세 가지 조건에서 실험한 결과 절단 깊이는 각각 10.5, 11.0 및 9.8 mm로 약간의 차이를 보일 뿐이다. 그러나 우레탄폼을 사용한 경우 성능이 가장 우수하고 또 사용 및 저장이 편리하기 때문에 유리한 것으로 생각된다. 한편 기폭뇌관의 위치에 따른 영향을 검토하기 위하여 모든 조건을 동일하게 하고 폭약량을 70 gr로 하여 뇌관을 상부 선단, 성형폭약의 상부 중앙에, 그리고 측면부에 위치할 때 절단 깊이는 각각 11.5, 10.1 및 8.7 mm로서 차이를 보인다. 이와 같은 현상은 폭약의 폭발 초기에 단면과 평행하게 발생된 폭발파가 금속 라이너의 방향으로 진행되어 장착된 라이너의 원소들이 중심 쪽을 향해 이동한다는 Dobrushin 및 Schumann의 이론<sup>3,6)</sup>과 일치함을 알 수 있다.

**4.2 가소화 특성 실험**

예비실험과 설계변수 설정 실험을 통하여 폭약은 펜트라이트, 라이너 재질로는 구리, 라이너의 굽힘 각도는 90°일 때 그리고 라이너 두께와 적정 이격거리는 폭약량에 따라 달라짐을 확인하였다.

따라서 여기서는 Table 6의 조건에서 실험한 결과를 고찰하기로 한다. 펜트라이트와 헥소젠 그리고 라이너를 가소화하지 않은 경우와 한 경우로 구분하고 실험한 결과는 Table 10과 같다.

**폭약의 종류와 가소화 유무에 따른 절단 깊이**

폭약의 종류와 가소화 여부에 따라 절단깊이를 구분

하면 동일 조건에서 가소화하지 않은 펜트라이트 > 가소화된 펜트라이트 > 가소화하지 않은 헥소젠 > 가소화된 헥소젠 순서이다.

펜트라이트와 헥소젠 두 종류 모두 가소화하지 않은 경우가 가소화한 경우보다 절단깊이가 우수하다. 이와 같은 이유는 혼합되는 가소제의 비율만큼 폭약량이 감소되며, 또 가소제가 폭약의 기폭작용을 부분적으로 제어하기 때문인 것으로 보인다. 또한 펜트라이트의 입자가 헥소젠 입자보다 미세하기 때문에 화약의 종류에 따라 차이를 보이는 것으로 생각된다.

**이격거리의 영향**

가소화된 펜트라이트 폭약과 구리분말 라이너를 사용하여 Table 6의 type 2 조건에서 가소성 선형 성형폭약의 이격거리 실험을 실시하였다. 이 때 라이너 각도는 90°이며 폭약량과 라이너 두께 변화에 따른 실험 결과는 Table 11과 같다.

가소화되지 않은 동일 폭약량과 비교할 때 폭약량이 14.5, 32.0 및 70.0 gr인 때는 거의 비슷하며, 133 gr인 때는 가소화되지 않은 경우가 약간 큰 값을 보이거나 전반적으로 가소화 유무에 따른 이격거리 변화는 크지 않은 것으로 확인되었다. 국산 선형 성형폭약을 개발하기 위하여 표준모델로 삼았던 영국 BLADE 제품의 경우 폭약량이 20, 48, 90, 230 gr일 때 규격별 이격거리는 각각 5.0, 8.0, 12.0 및 18.0 mm이다.

이들의 폭약량이 금번 실험기준과 서로 차이를 보이고 있어 절대적인 비교는 어렵지만 상대적으로 비교해 볼 때 그 이격거리는 서로 유사한 것으로 확인되었다.

**Table 10.** Effects of plasticity on penetration depth.

Q' ty of Explosive (gr)	No-plasticity		*Plasticity	
	Thickness (mm)	P. depth (mm)	Thickness (mm)	P. depth (mm)
PETN				
14.5	0.4	4.1	1.2	3.82
32.0	0.5	7.5	1.5	6.45
70.0	0.8	12.2	2.2	11.13
133.0	1.0	17.17	4.2	15.2
RDX				
14.5	0.4	2.98	1.2	2.50
32.0	0.5	5.16	1.5	3.73
70.0	0.8	8.63	2.2	6.10
133.0	1.0	13.67	4.2	10.31

\* plasticity means plasticized explosive and liner

**Table 11.** Effects of standoff distance on penetration depth.

Q' ty of Explosive (gr)	Thickness of liner (mm)	*Max.P.D (mm)	**S.D (mm)
14.5	1.2	3.27	2.4
32	1.5	4.55	4.8
70	2.2	8.4	8.5
133	4.2	13.61	13.3

\* Max.P.D : Max Penetration Depth

\*\* S.D : Standoff distance

**5. 결 론**

성형폭약의 성능은 여러 가지 원인에 의해 결정되지만 그 중에서도 폭약의 종류, 장약량, 라이너의 재질, 두께 및 각도, 이격거리, 가소화제의 혼합 비율 등이 중요한 설계변수로 확인되었다.

본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 주요 설계변수 및 실험조건이 동일할 때 폭약의 종류로는 폭약의 폭속이 빠르고 성형이 용이하며 마찰이나 충격에 비교적 둔감한 폭약이 선정되어야 한다. 국산화약을 기준으로 할 때 펜트라이트 및 핵소겐이 뉴에멀전보다 효과적이다. 그러나 입도가 상대적으로 굵은 핵소겐은 펜트라이트보다 부분적으로 성능이 저하됨을 확인하였다.
- 2) 라이너 재질은 구리가 알루미늄이나 납보다 더욱 효과적으로 나타났다. 이와 같은 이유는 비중, 용융점, 비등점 및 탄성계수 등 금속학적 특성과 화학적 조성상 고속기류가 좁고, 깊게 형성되기 때문이다. 그리고 라이너의 굽힘 각도는 45°, 60°, 90°, 120° 등 조건을 달리한 경우, 90°일 때 가장 절단깊이가 우세함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 폭약 표면에서 직각으로 방사된 에너지가 중앙부에 누적, 집중되기 때문이다. 한편, 라이너의 적정 두께는 설계약량과 가소화에 따라 차이를 보였으며, 가소되지 않은 펜트라이트를 사용하여 설계약량을 각각 72.5, 160, 350 및 665 g/m로 하였을 때 구리라이너의 적정 두께는 각각 0.4, 0.5, 0.8, 1.0 mm이었다. 반면에 가소화된 펜트라이트일 때는 그 두께가 1.2, 1.5, 2.2, 4.2 mm임을 확인하였다. 폭약의 절단 효과면에서는 가소되지 않은 경우가 가소화된 경우보다 효과적이지만, 절단 대상 구조물의 형상에 맞추어 압착시킬 수 없는 문제가 있다.
- 3) 모든 조건이 동일할 때 적정 이격거리는 폭약의 양과 라이너의 재질에 따라 차이를 보였다. 즉 가소화된 펜트라이트를 설계약량 72.5, 160, 350 및 665

g/m로 하고 가소화된 구리 라이너를 사용한 경우 그 이격거리는 각각 2.4, 4.8, 8.5, 13.3 mm이다.

- 4) 여러 형태의 철구조물에 효과적으로 압착시켜 절단 성능을 향상시키기 위해서는 폭약의 가소화가 요구되며, 가소화제의 첨가량은 폭약중량의 10~15 %가 효과적이다.

## 감사의 글

본 연구수행을 적극적으로 지원해 주신 (주)고려노벨화학 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Barbour, Richard T., 1981, Pyrotechnics in Industry, McGraw-Hill, Inc. 41-72.
2. Cooper, Paul W., 1989, Explosives Engineering, Wiley-VCH Inc. 435-440, 253-273.
3. Dobrushin L.D., Volgin. L.A., 1995, Explosive cutting by linear core shaped charges and its on land, underwater and heavy-duty applications, DVS 185, 131-135.
4. Mader, Charles L., 1998, Numerical Modeling of Explosives and Propellants, CRC press LLC, 31-162.
5. Reinhart, D., Pirson, D., 1966, Explosion treatment of metals, Moscow, Mir p396.
6. St. Schumann, H. U. Freund., W. Horni ng., Explosive Pipe Cutting by Shaped Charges in an Annular Configuration, Battelle-Institut e.V., D-6000 Frankfurt/M.
7. Walters W.P., Zukas J. A., 1998, Fundamentals of Shaped Charges, CMC Press, Baltimore, MD. 1-89.
8. 小林茂雄, 構造物の發破解體に關する研究, 1993, 28-61.

### 박근순



1994년 강원대학교 산업대학원  
자원공학과 공학석사  
2001년 강원대학교 대학원  
지구시스템공학과 공학박사

Tel: 063-352-6510  
E-mail: gspark@doosanheavy.com  
현재 두산중공업(주) 익산~장수간 고속  
도로 제10공구 현장소장

### 임한욱



1966년 서울대학교 공과대학  
자원공학과 공학사  
1980년 서울대학교 공과대학  
자원공학과 공학석사  
1985년 서울대학교 공과대학  
자원공학과 공학박사  
1996~1998년 강원대학교 공과대학장  
겸 동 산업대학원 원장  
Tel: 033-250-6253  
E-mail: hulim@kangwon.ac.kr  
현재 강원대 지구·환경공학부 교수