

성형폭약에 의한 폭발절단기술에 관한 연구

이병일¹⁾ · 박근순²⁾ · 공창식³⁾ · 김광태⁴⁾

A Study of Explosive Jet-cutting Technology by Linear Shape Charges

Byung-IL Lee¹⁾, Keun-Sun Park²⁾, Chang-Sig Kong³⁾ and Kwang-Tae Kim⁴⁾

ABSTRACT Recently, the demand for pollution-free demolition work of old reinforced concrete and steel structure has rapidly increased as the redevelopment of urban area has been accelerated. This study deals with linear shape charges for explosive jet cutting on steel structure. We have tested material and shape of steel structure, characteristics of thickness and strength, shape of linear shape charges, type of shape charges, cumulative charges, type of liner, stand-off distance, detonation method, effect of sound and vibration by air blast in explosive jet cutting method. So, We developed linear shape charges in order to take advantage of optimum explosive jet cutting condition. Shape charges were made of PETN explosives. We obtained the experimental formula to decide the amount of explosive needed for thickness of steel structure plate. There are prospects for application of the explosion cutting technology under the open space conditions for dismantling the steel structure and steel bridge, scrapped old boats, which are going out of service.

Key words : cumulation theory, detonation blast noise, detonation cord, explosive jet cutting, linear shape charges, stand-off distance

초 록 최근, 도시 재개발과 산업설비 개·보수에 따른 노후화된 콘크리트 및 철구조물에 대하여 환경 공해가 발생하지 않는 해체 기술 개발에 대한 요구가 급증하고 있다. 본 연구는 철구조물의 폭발절단 해체를 위한 성형폭약을 개발하기 위하여 폭발절단 효과에 영향을 주는 요소인 대상 구조물의 재질 및 형상, 두께와 강도 특성, 성형폭약의 형상, 폭약의 종류, 장약량, liner의 종류, stand-off distance, 성형폭약의 폭 및 너비, 기폭방법에 따른 영향과 폭발 절단시 발생하는 폭풍압에 의한 진동 및 소음의 영향 등을 검토함으로써 폭발절단 최적조건을 선정하였다. 따라서, 본 연구를 통해 얻어진 폭발절단기술은 강교, 공장, 폐선박 등의 해체에도 적용될 것이다.

핵심어 : 충전이론, 폭풍압, 도폭선, 폭발절단, 성형폭약, 유효거리

1. 서 론

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 기술 개발이 요구되고 있다¹⁾. 지금까지의 구조물 해체 작업은 크레인, 파쇄기 등의 기계적인 방법에 의존해 왔으나 진동, 소음, 분진 등의 생활 환경 공해로 많은 문제점을 야기시키고 있다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 해체공법에 관심이 높아지면서 압쇄 공법, Water Jet 등의 건설 기계공법의 도입과 함께 선진 외국에서 적용되고 있는 발파해체공법이 국내에 소개되면서 최근 관련 분야

의 연구 및 개발이 활발하게 이루어지고 있는 실정이다.

그러나, 이러한 발파해체공법의 대부분은 철근 콘크리트 구조물에 적용되었으며, 철골 구조물내의 H빔과 I빔 등과 같은 주요 구조지지부재의 순간 절단 작업에는 많은 위험과 어려움이 있었다. 이러한 문제는 구조물의 발파해체에 있어서 철근 콘크리트의 인장강도를 없애는 절단방법이 아니고 콘크리트의 압축강도를 없애는 방식의 폭발방법이 핵심 기술이었기 때문이다²⁾. 만일 철골, 파이프, 형강 등의 철구조물을 절단 해체하려고 할 때 기존

1.3) 정회원, 한국중공업(주) 기술연구원 선임연구원

2.4) 정회원, 한국중공업(주) 토목기술영업부

접수일 : 2000년 5월 2일

심사 완료일 : 2000년 6월 22일

의 철근콘크리트 구조물에 적용되었던 기술을 적용하게 된다면 시공성, 경제성, 안전성 측면에서 한계에 부딪히게 될 것이다.

따라서 본 연구에서는 철구조물의 주 구성 요소인 후관 및 형강을 폭발절단하기 위한 폭발절단용 성형폭약을 개발하고 폭발절단 실험을 통하여 구조물의 재질별, 두께별, 형상별로 폭발절단 최적 조건을 선정한 후, 폭발절단시 발생하는 진동 및 폭풍압 등의 영향을 조사하여 적용 분야에 따른 응력 해석 및 구조 해석을 통해 건축물 및 철구조물의 발파해체 공법에 획기적인 변화를 꾀하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 철골구조물 폭발절단을 위한 Shape Charge 기술

2.1.1 개요

철골구조물은 일반 철근 콘크리트 구조와는 달리 단순히 천공을 하고 폭약을 장약하여 기폭시키는 방법으로는 해체 또는 절단이 어렵다. 국내의 경우 최근 철골 구조로 건축되는 건축물이 증가하는 추세이며 구조적 결함으로 인하여 해체 대상으로 지목된 당산 철교 등과 같은 경우는 특수한 형태의 해체 기술을 필요로 하였다³⁾. 1990년 이후 국내에 발파해체공법이 소개된 이후로 철골 구조물에 대한 발파해체는 수행된 적이 없지만 최근 산업 설비 등의 해체와 같이 향후에는 급속히 증가할 것으로 예상된다.

2.1.2 Shape Charge 기술

폭발절단기술이란 Fig. 1의 (a)와 같이 특수한 형태의

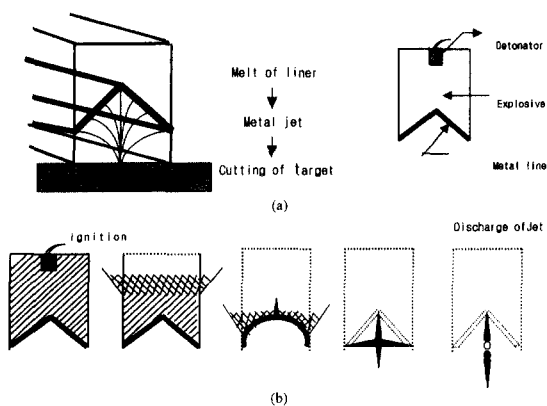


Fig. 1. Explosive jet-cutting mechanism of the shape charges.

장약 구조로 구성된 화약의 폭발에 의해서 절단대상물이 절단되는 것으로서 화약과 금속성 liner를 뇌관에 의해 폭발시키면, Fig. 1의 (b)와 같은 노이만 및 먼로 효과 (Neuman and Monroe effect)에 의한 폭풍압으로 금속성 liner는 붕괴되고 고온, 고압, 고속도의 금속 jet인 미립자가 방출된다. 이것이 금속성 liner의 중앙에 집중되어 초고속의 jet로써 절단대상물을 절단하는 것이다⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 폭발절단 효과에 영향을 주는 요소인 대상구조물의 재질 및 형상, 두께와 강도 특성, 성형폭약의 형상, 폭약의 종류, 장약량, liner의 종류, stand-off distance, 성형폭약의 폭 및 너비, 기폭방법에 따른 영향과 폭발절단시 발생하는 폭풍압에 의한 진동 및 소음의 영향 등을 검토함으로써 폭발절단용 성형폭약의 건전성을 평가하고자 한다.

2.1.3 성형폭약에 의한 폭발절단 이론

폭발절단용 성형폭약의 충전변수와 충전 이론(Cumulation Theory)의 주된 원리에 대해서 Dobrushin⁴⁻⁵⁾ 등은 금속제 liner를 따라 발생된 jet의 충돌로 인하여 고압이 만들어지고, 이때 liner를 구성하고 있는 금속 재질의 강도는 무시될 수 있으며, liner는 이상적인 비압축 유체라는 가정에 기초를 두고 축 대칭으로 충전된 화약의 보다 세밀한 분석을 통해 Cumulation(누적)의 동적 이론이 성립될 수 있다고 하였다. 이러한 조건은 만약에 금속 liner를 따른 jet의 충돌로서 jet의 압력이 2×10^4 MPa이 되고, jet의 속도가 4,000 m/sec보다도 높게 되면 유효하게 된다고 할 수 있다.

Fig. 2는 원추형의 금속 liner와 충전되어 있는 jet의 형상으로 인해 단면을 따라 축 대칭으로 형성된 충전 단

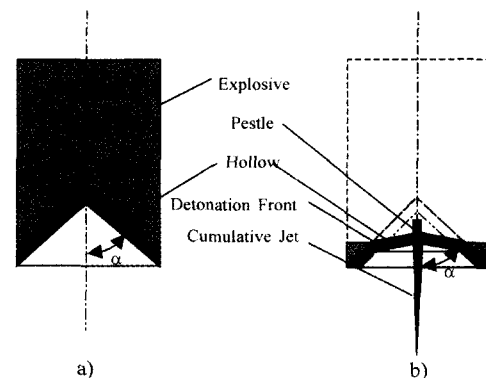


Fig. 2. Cross-section of the axisymmetrical cumulative charge with the conical metal hollow (a) and schematics of the cumulative jet formation (b).⁴⁾

면의 개략도를 나타낸 것이다. 초기에 단면과 평행하게 발생된 폭발파가 금속 liner의 방향으로 화약을 따라 지나면, 충전되어 있던 liner의 원소들은 바깥으로 분출되어 중심 쪽으로 이동한다. 충돌하는 동안 고속도의 jet는 liner 재료의 안쪽 층의 강한 흐름으로 인해 형성되며, 금속 liner의 관통 없이 liner 바깥 층의 낮은 속도의 Pestle(공이)를 따라 흐른다. 만약에 jet의 속도가 4,000 m/sec 이상이라면 폭발절단 원리는 다음과 같은 Hydro-Dynamic식으로 설명할 수 있다.⁴⁾

Barrier penetration depth

$$L = 1 \sqrt{\rho_j / \rho_b} \tag{1}$$

Barrier penetration velocity

$$U = V_j (\rho_b / \rho_j + 1) - 1/2 \tag{2}$$

Jet velocity

$$V_j = V_0 \text{ctg} (\alpha/2) \tag{3}$$

L : Jet Length
 ρ_j, ρ_b : The density of the jet and barrier metals
 V_0 : The liner pressing out velocity
 α : half of the liner cone opening angle

식 [1]에 의하면 절단깊이는 축적된 jet의 길이와 jet와 절단 대상물의 밀도의 루트에 비례한다. Jet의 늘어난 부분 즉 확장부가 움직임에 따라 가장 큰 절단 깊이가 장진 축으로부터 절단대상물이 어떤 초점거리 즉 stand-off distance가 될 때 형성된다. 또한, jet의 침투율은 liner 재료의 밀도에 의존하게 되는데, 실질적으로 위의 Hydro-Dynamic 이론을 만족시킬 수 있는 폭발절단용 성형폭약의 Liner의 적정 재질로서는 Cu와 Al, Mg 등의 금속을 들 수 있으며, 폭발절단용으로 적정한 화약은 높은 폭발속도를 가진 Hexogen, Octogen, 혹은 다른 CIS Analogues와 같은 타입의 화약을 사용할 필요가 있다.

본 연구에 사용된 금속제 Liner는 99.99% 순수 Cu powder에 일정량의 가소화제를 첨가하여 Paste화 시킨 것을 사용하였고, 장진된 화약은 RDX, HMX, Emulite 등과 제조 공정 동안 1.71-1.74 g/cm³ 로 압축시켜서 paste화 된 PETN 화약을 사용하였다. 이때 사용된 화약의 폭발속도는 4,000 m/sec 이상이 되도록 하였다. 성형폭약의 축적된 jet로 인한 절단 변수들의 실험적인 결정은 Pulse Radiography method²⁾에 의해 결정되며, 평균적으로 초기에 형성되는 jet의 속도는 2,200~3,500 m/sec 정도이고 이것은 원추형의 금속 liner를 가진 성형폭약의 속도보다는 낮다.

2.1.4 성형폭약의 주요 변수

화약의 폭발에 의한 금속 jet 미립자의 유동에 따른 절단 효과에 영향을 주는 요소들은 Fig. 3에 표시한 것과 같이 대상 철판의 재질 및 강도, shape charge 형성, 폭약의 종류, 장약량, liner의 종류, stand-off의 거리, 성형폭약의 높이 및 폭, 기폭 방법 등을 들 수 있다.

본 연구에 사용된 폭발절단용 성형폭약의 주 구성원인 화약은 비중이 1.7 g/cm³, 폭속이 7,000 m/sec, 폭발압력 (Pd)이 219.68 kbar 이상인 PETN 도폭선 화약이었으며, 이때 사용된 PETN은 Pentrite를 니트로 글리세린과 혼합한 것으로서 발화점은 185~190°C이며 폭발열이 1,400 kcal/kg인 것을 사용하였다. 또한 본 연구에 사용된 liner는 금속 Cu, Al, Mg 판재 및 가소화된 Cu였으며, 두께는 0.3~1.0 mm로 변화시켜서 liner의 형상, 두께, 재질 등에 따른 영향을 검토하기 위하여 다양한 형태의 liner를 제작하여 사용하였다.

그리고, 화약을 둘러싸는 장전 Shell 및 케이스는 제작이 용이한 재질 중에서, 내경이 50 mm, 두께가 6 mm인 Plexiglass 파이프와 일반 hard paper를 사용하였고 또한 shell이 없는 모양의 성형폭약을 제작하여 폭발절단하는 방법도 병행하여 실험하였으며, 이외에도 기공율이 30%인 우레탄 폼 타입의 케이스도 제작하여 실험하였다. 또한 본 연구에 사용된 폭발절단용 시험편은 일반 구조용 강재인 SS41 및 SS41C 등의 후판 및 각형 강관 등을 사용하였으며, 철판구조용으로 폭넓게 사용되고 있는 7자 angle에 대해서도 실험하여 폭발절단 효과를 알아 보았다. Fig. 4 및 Table 1은 본 연구에 사용된 폭발절

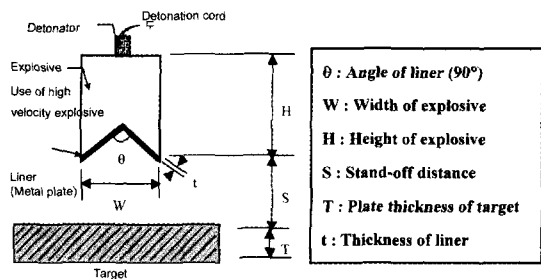


Fig. 3. A shape and variable of shape charges.

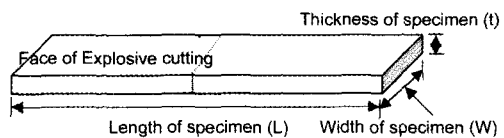


Fig. 4. The schematic of explosive jet-cutting specimen.

Table 1. The shape and type of explosive jet-cutting specimen.

Shape	Thickness (mm)	Size (L×W)	Material
Plate	3~25	50×25	SS 41
Steel plate tube	5~8	-	SPS30
Angle	6~12	6×6, 7.5×7.5	-

Table 2. The mechanical property of explosive jet-cutting specimen.

Specimen	Tensile Strength kg/mm ² (Mpa)	Yield Strength kg/mm ² (Mpa)	Remarks
SS 41	41(402)	25(245)	-
SSC 41	41~55(402~539)	25(245)	-
SPS 30	30(294)	24(235)	-

단 시험편의 규격 및 형상을 나타내고 있으며, Table 2는 사용된 폭발절단 시험편의 기계적 특성을 나타내고 있다.

2.2 성형폭약에 의한 폭발절단 시험 방법 및 설계

2.2.1 성형폭약의 제조

본 연구에 사용된 성형폭약은 Fig. 5의 (a)와 같이 절단 대상물의 두께, 재질, 형상에 따라 도폭선의 사용 길이를 결정한 후 PETN 도폭선을 일정한 형상으로 배열하여 만든 다발에 뇌관을 설치하여 이것을 절단대상물의 절단선상에 배열하고, 이 상태에서 도폭선의 둘레면에 0.5~5.0 mm 두께로 점토 성분의 찰흙이나 고무재료를 덮어 기폭시키는 형태로 된 것과, Fig. 5의 (b)와 같이 PETN Paste 화약 및 금속제 Cu liner 등으로 구성된 특수한 형태의 장약 구조 및 기폭 형태로 된 것을 제작하여 실험하였다.

2.2.2 예비실험

일반적으로 알려져 있는 성형폭약에 의한 폭발절단 효과를 확인하기 위하여 가장 널리 활용되고 있는 PETN 도폭선으로 폭발절단시험을 하였다. 두께 2.4 mm SS

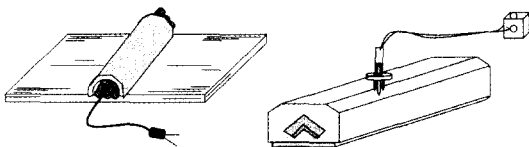


Fig. 5. Detonation cord type shape charges and linear shape charges.

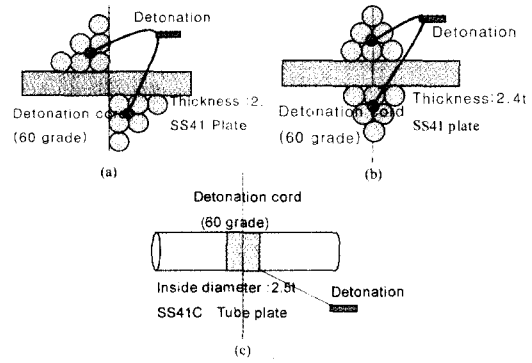


Fig. 6. A variable explosive jet-cutting method: (a) Shear (b) time interface (c) tube cutting.

41 일반구조용 후판을 사용하여 grade 60 도폭선(15 g/m)의 폭발에 의한 전단효과에 의하여 대상시험편이 절단될 수 있도록 도폭선의 배열을 Fig. 6의 (a)와 같이 대상 시험편에 3열로 3층 배열하여 폭발절단 실험을 통해 절단능력을 시험한 결과 폭발에 의한 전단능력의 교차에 의한 시험편의 굽힘 현상이 관찰되었으며, 절단면에는 약 0.5 mm 가량 폭발에 의해 절단되는 것을 알 수 있었다. 또 한편으로는 도폭선의 폭발시간을 달리하여 Fig. 6의 (b)와 같이 배열하여 실험한 결과, 폭발시간의 차이에 의하여 시험편 상부 부분에 부착된 도폭선 화약의 폭발에 의하여 시험편 하부에 부착된 도폭선이 분리되어 적정 절단효과를 얻기가 어렵다는 것을 알 수 있었다.

그리고, Fig. 6의 (c)와 같이 SS41C 튜브에 대한 폭발절단 효과를 알아보기 위하여 튜브에 도폭선을 배열하여 시험한 결과 폭발절단에서 필수적으로 요구되는 Neuman효과가 분산됨으로 인해 적정 절단효과를 얻을 수 없었다.

따라서, 위와 같은 PETN 도폭선 화약에 의한 폭발절단 예비실험을 통하여 폭발력의 집중방법과 절단 대상 시험편의 균일성, 사용되는 화약량의 조정 등의 기초자료를 얻을 수 있었다. 또한 성형폭약에 의한 폭발절단에서 필수적으로 요구되는 Neuman효과가 충분히 발휘될 수 있는 성형폭약의 구성 방법 및 대상시험편의 두께, 형상 등의 변수를 체계적으로 고려해야 한다는 결과를 얻었으며 본 연구에서는 위와 같은 예비 실험의 결과를 토대로 최적의 절단효과를 얻을 수 있는 방법을 찾을 수 있었다.

2.3 성형폭약에 의한 폭발절단 실험 결과 및 고찰

2.3.1 장약구조의 영향

폭발절단용 성형폭약의 경우 화약을 둘러싼 shell의

재질은 PVC pipe, hard paper, No shell 등이 고려되었으나, PVC 및 hard paper로 제작된 경우에는 shell 내부에 화약을 장진한 후 금속제 liner의 부착시 형태가 쉽게 변형되었다. 그리고, shell을 사용하지 않은 경우에는 PETN과 점토류를 혼합하여 성형폭약을 제작하였고 바깥쪽에는 기타 재질을 부착하지 않은 채로 폭발절단 시험을 하였다. 그 결과, 절단능력을 좌우하는 금속 liner, 시험편과 성형폭약과 절단대상 시험편의 최적 유효 거리인 stand-off distance, liner의 각도, 화약의 종류와 같은 변수들을 고정 한 상태에서는 절단효과에 미치는 Shell의 영향은 없는 것을 알 수 있었으며, 단지 성형폭약에 장진되는 화약의 양 즉, 장전밀도가 일정하다면 절단효과에는 큰 영향이 없는 것을 알 수 있었다.

2.3.2 뇌관위치의 영향

폭발절단용 성형폭약의 뇌관의 위치에 따른 절단효과를 알아보기 위하여 Fig. 7과 같이 기타의 실험조건을 동일하게 한 후 뇌관을 성형폭약의 측면부, 상부 선단, 상부 중앙에 설치하여 폭발절단 시험 후 절단 홈의 너비와 깊이를 정량적으로 비교하였다. 실험 결과 뇌관을 상부 선단에 설치한 경우가 가장 우수한 결과를 나타내었으며, 측면부에 설치한 경우에 가장 나쁜 결과가 나타나는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 (폭발절단 효과에 미치는 주 영향은 화약의 폭발에 따른 폭굉압의 세기 여하에 달려 있으므로 화약의 폭발에 의해 초기에 단면과 평행하게 발생된 폭발파가 금속 liner의 방향으로 진행되어 충전된 liner의 원소들이 중심쪽을 향해 이동한다) 는

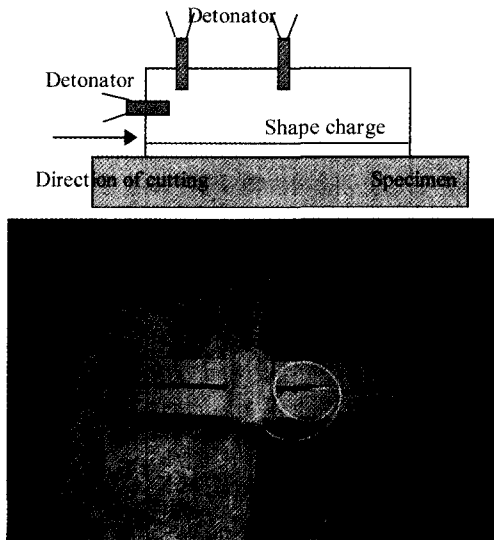


Fig. 7. The location of detonator.

Dobrushin 및 Schumann^{4,5)}의 이론에 근거하여 화약의 폭발에 의한 금속제 liner에서의 metal jet의 발생은 성형폭약의 선단부에서 시작하는 것이 훨씬 유효하다고 사료된다.

2.3.3 Liner의 두께 및 재질이 절단 효과에 미치는 영향

일반적으로 폭발절단용 성형폭약에 사용될 수 있는 금속 liner의 재질로서는 최소의 폭발열에 의하여 metal jet가 가능한 연질 금속제인 Cu, Al, Mg, Fe합금과 plastic 등을 들 수 있으나 본 연구에서 사용된 Liner의 사양은 Table 3과 같다.

Liner의 각도가 30°에서 90°로 증가할수록 절단의 폭 및 깊이는 증가하는 경향을 보이지만 주어진 조건하에서는 그다지 큰 차이를 나타내지 않는 것을 확인할 수 있으며, liner의 재질에 의한 영향은 폭발속도가 7,000 m/sec 이상의 폭발력이 금속제 liner를 순간적으로 타격할 경우 고속의 metal jet화 경향은 Cu가 Al 및 Fe보다 우수한 것으로 보고⁶⁾되고 있으며, 특히 plastic 재질의 경우는 순간적인 온도 상승에 의해 jet화가 되기 전에 절단 대상물에 부착되어 절단효과에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

또한, Fig. 8에는 liner의 두께와 절단 깊이와의 관계를 나타내고 있는데 liner의 두께가 증가할수록 절단깊이는 상대적으로 증가하지만 liner의 두께가 0.5 mm이상이

Table 3. The material, thickness and angle of liner.

Material	Thickness (mm)	Angle (°)	Cutting Depth (mm)
Cu series	0.3~0.5	30, 45, 90	3~25
Al series	0.3~0.5	30, 45, 90	3~20
Fe series	0.3~0.5	30, 45, 90	3~15
Plastic series	0.5	45, 90	5

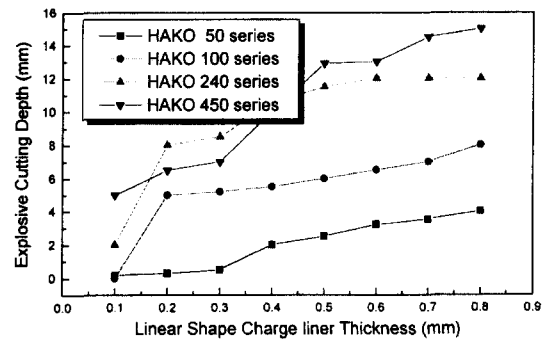


Fig. 8. Relation of liner thickness and cutting depth.

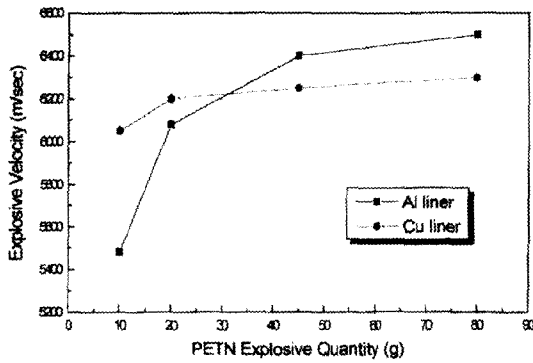


Fig. 9. Variation of explosive velocity by liner material.

면 크게 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 9는 liner의 재질을 Al과 Cu로 하였을 경우의 폭발속도 변화를 관찰한 결과 PETN 화약량이 증가할수록 폭발속도는 상대적으로 증가하고, Cu보다는 Al을 liner로 사용하였을 경우가 훨씬 폭발속도가 큼을 알 수 있었다. 이것은 PETN 화약이 폭발하여 liner를 순간적으로 타격하는 속도는 용융온도가 Cu보다는 Al이 낮다는 데 기인한다고 사료된다.

따라서 liner의 특성이 절단능력에 미치는 영향을 보다 자세히 알아보기 위하여 PETN 도폭선 화약을 사용하여 liner의 두께, 재질, 각도 등에 변화를 주어 조사하였다. 그 결과 두께 0.5 mm의 Cu계 금속제 liner를 90°로 가공한 성형폭약이 가장 절단 능력이 뛰어나며, 성형폭약을 사용하여 금속구조물의 폭발절단시에는 화약의 양, 종류, 대상 시험편과 성형폭약의 거리 등이 중요한 변수가 됨을 알 수 있었다.

2.3.4 Stand-off Distance가 절단효과에 미치는 영향

성형폭약과 절단 대상물과의 유효거리가 절단능력에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 Fig. 10과 같이 PETN 도폭선 화약(40 g/m)을 가지고, 일반 구조용 강재로 많이 사용되는 두께 10 mm SS41 후판에 대하여 liner가 가지는 변수는 동일하게 한 후 유효거리인 stand-off distance를 0.2~1.0 mm까지 변화시켜 폭발절단 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

동일한 두께의 절단 대상 시험편에 있어서는 거리가 멀어질수록 절단능력은 떨어진다. 이와 같은 결과는 화약의 폭발에 의한 폭발력이 liner를 고속, 고열로 metal-jet를 형성시킨 뒤에는 절단능력을 좌우하는 것은 liner의 두께 및 화약의 양에 우선 지배를 받는다는 Reinhart 및 Kudinov의 이론^{7,8)}과도 잘 일치한다. 따라서, 본 연구에

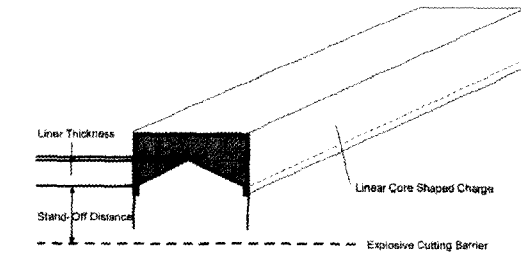
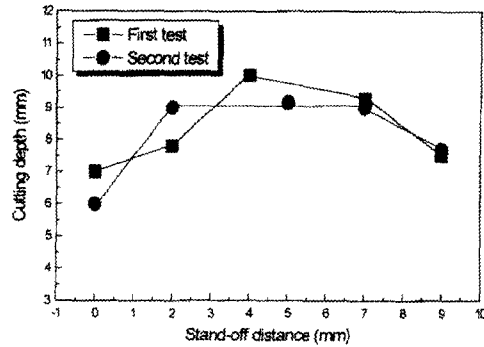


Fig. 10. Relation of stand-off distance and cutting depth.

서 가장 적절한 stand-off distance는 5 mm임을 알 수 있으며, 그 이상과 이하의 거리에서는 절단효과에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

2.3.5 절단효과에 미치는 화약의 영향

본 연구에서는 Emulite, PETN, RDX, HMX 등의 폭발속도가 큰 화약을 동일한 규격 (15×180×15 mm)의 절단 대상 시험편에 적용하여 시험한 결과 폭발속도가 큰 화약일수록 절단 효과가 뛰어난을 알 수 있었다. 또한 Emulite 100에 PETN의 배합에 따른 영향은 PETN의 함량이 증가하면 할수록 절단효과는 뛰어나지만 그 차이는 미미하여 육안으로 구분하기는 어려웠다. 따라서, 본 연구에서는 폭발속도가 가장 뛰어나고 가소화 시키기에 용이한 PETN, RDX 91%와 가소제(비화약 : Polyisobutylene 2.1%, Motor oil 1.6 % 및 di(2-ethyl hexyl) Sebacate 5.3%)가 9% 함유된 Composition C-4 화약이 일반 강구조물의 폭발절단용 성형폭약으로 적합하다고 사료된다.

그리고 Fig. 11은 일반 구조용 강재로 사용되고 있는 SS41, SS41C, SPS30-35 등의 절단 대상 시험편을 사용한 경우의 화약량과 절단두께와의 관계를 나타낸 것이다. PETN 도폭선 화약의 함량이 증가할수록 steel plate의 폭발절단 두께는 증가하였으며, 그 중에서도 각형 강관인 SPS30-35의 재질이 일반 구조용 후판인 SS41,

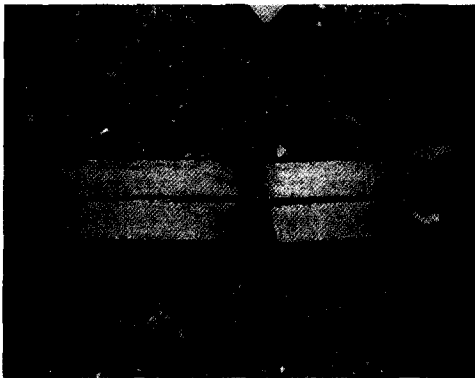
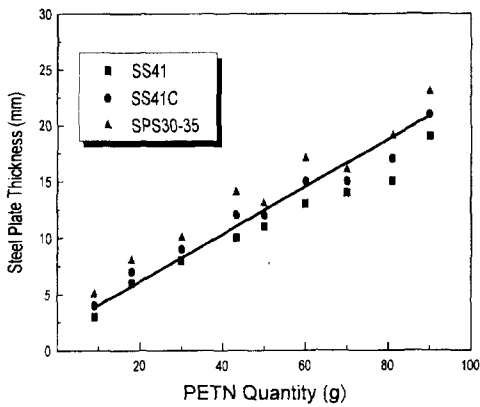


Fig. 11. Relation of cutting thickness and explosive quantity.

SS41C보다도 동일한 화약량에서는 훨씬 우수함을 알 수 있었다. 이것은 절단 대상시험편 자체의 야금학적인 특성 즉 열처리의 유무, 잔류 응력의 상태, 표면 상태 등에 기인한다고 사료된다.

2.3.6 폭발절단시 폭발압과의 관계

일반적으로 발파에 의한 소음은 공기를 매질로 하여 전파되는 파동 중에서 사람의 귀에 들리는 즉 가청영역의 주파수를 가지는 파동을 말한다. 그러나 가청영역이 아닌 저주파의 진동도 사람의 귀에는 들리지 않지만, 건물을 진동시켜 2차적 소음을 발생시키거나 균열을 전파시키게 되므로 가청영역의 진동보다 오히려 더 위험하다. 가청영역의 소음과 저주파의 파동을 통틀어 발파풍압 즉, 폭발압(暴風壓 : 발파소음, 발파풍압) 이라 부르는데, 발파에 의한 풍압(dB: L)과 소음(dB: A)의 관계를 살펴보면 발파에 의한 발파 풍압의 세기는 압력의 단위나 사람의 청감 보정을 가하여 음압 수준(dB) 단위로 표현할 수 있다.⁹⁾

이 두 단위 사이의 관계는 다음과 같다.

$$dB = 20 \log(P/P_0)$$

P = 과압 (psi)

P₀ = 기준치로서 사람이 인지할 수 있는 최저의 음압 (2.9 × 10⁻⁹ psi)

이러한 두 단위는 소음과 같은 가청 영역에서 생각할 때는 구별을 해야 한다. 즉, 압력의 단위는 소리의 압력 그 자체를 가리키고 있으며, 주파수에 관계없이 일정하다. 그러나 소음의 dB(A)단위는 주파수에 따른 사람의 청감에 따라 보정을 가한 값이다. 이는 발파 풍압의 측정시 측정 대상 주파수 영역에 따라 적절한 보정을 하여야 한다는 것을 의미한다. 그리고, dB(L)은 음압의 크기 LEVEL을 표시 한 것으로, 폭발로 인하여 공기압으로 표출되는 폭발압으로 인한 공기의 압력으로 그 크기가 결정되며, dB(A)는 음압의 크기도 주파수 크기가 달라지면 인체에 느끼는 감각적 크기가 달라지기 때문에 중심 주파수를 1,000 Hz 기준으로 하여 등청 감도 곡선에 의거 보정된 소음치로써 통상적으로 국내·외 환경소음 기준은 dB(A)를 의미한다.

Fig. 12는 본 연구에서 PETN 화약량을 변화시켜 발생하는 폭발압 즉 소음 및 진동을 측정 한 결과이다. 이것은 폭발절단 시험장으로부터 30 m 및 60 m 지점에서 폭발압 및 진동 측정용 전용 장비인 Blastmate III DS677 및 Minimate를 이용하여 측정 한 값이다. Fig. 12에서 알 수 있는 것과 같이 소음 및 진동치 모두 PETN 화약량이 증가할수록 비례하여 증가하며, 30 m보다는 60 m에서 소음 및 진동치 값이 적은 것을 알 수 있다.

특히 PETN 화약량이 20g까지는 급격히 증가하다가 20 g을 기준으로 완만하게 증가하는 것으로 보아 일반적인 발파의 경우 발생하는 폭발압과는 달리 성형폭약에 의한 폭발절단의 경우에는 화약의 폭발에 의한 liner의 용융, 형성된 metal jet의 절단 대상물과의 반응 등에 의한 복잡한 mechanism에 의해 폭발압이 발생되기 때문으로 사료된다.

그리고, Table 4는 폭발압의 크기에 의한 구조물 및 인체 반응을 음압 level로 나타낸 것으로서, 일반적으로 화약을 사용한 폭발절단 및 발파의 경우에는 지반 진동 및 인체에 미치는 폭발압 및 진동의 영향을 고려하여야 한다. 따라서, 본 연구 결과인 Fig. 12에서 나타난 평균적인 소음값 109 dB(L) 및 진동 값 1.5 mm/sec은 미광 무국의 허용 한계치내에 들어감으로써 성형폭약을 사용하여 폭발절단한 경우 인체 및 구조물에 미치는 영향은 크

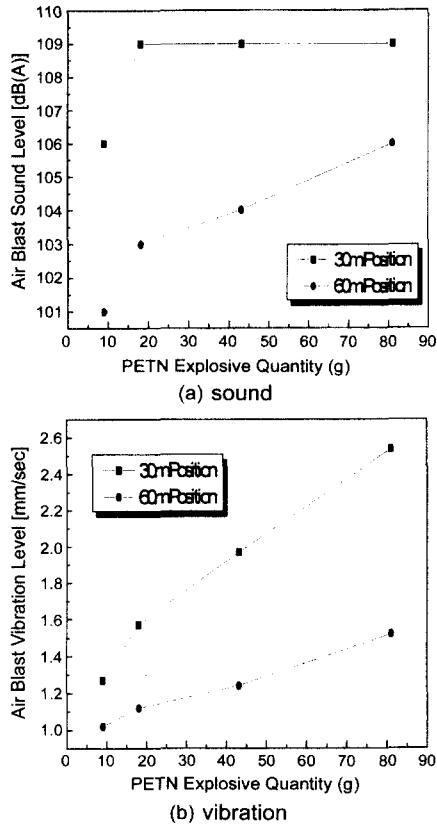


Fig. 12. Relation of PETN explosive quantity and air blast level : (a) Sound (b) vibration.

Table 4. Structure and body reaction by air blast level (dB(L)).

dB(L)	psi	← 구조물 및 인접 영향
180	3	← 구조물 손상
170	0.95	← 대부분 유리창 깨짐
150	0.095	← 일반 유리창 깨짐
140	0.030	← 피해 한계
130	9.5×10^{-3}	← 미 광무국 허용 한계치
120	3×10^{-3}	← 미 광무국 안전 수치
110	9.5×10^{-4}	← 고통 한계
70	9.5×10^{-6}	← 불편 한계(창문 움직임)
60	3×10^{-6}	← 일상적인 대화
40	3×10^{-7}	← 병실
20	3×10^{-8}	← 속삭임
0	3×10^{-9}	← 가청 한계

지 않다고 사료된다.

3. 결 론

철구조물의 주 구성 요소인 후관 및 형강에 대하여도 폭선 화약 및 특수하게 제작된 성형폭약을 이용하여 재질별, 두께별, 형상별로 폭발절단 실험을 통해 화약의 폭발에 의한 절단 효과에 영향을 주는 요소들인 대상 철판의 재질 및 강도, shape charge 형상, 폭약의 종류, 장약량, liner의 종류, stand-off distance, 기폭방법과 폭발절단시 발생하는 진동 및 폭풍압 등의 영향에 대한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서의 성형폭약의 liner와 화약은 99.99% Cu 분말에 10% 이내의 일정량의 가소화제를 첨가하여 paste화 된 것과, 폭발속도가 평균 8,500 m/sec를 유지하는 PETN powder를 1.71~1.74 g/cm³으로 압축시켜서 paste 시킨 것이 최적의 폭발절단 효과를 나타내었다.

(2) 폭발절단용 성형폭약 외부 케이스인 shell의 재질은 PVC Pipe, hard paper, No shell 등이었으나 절단 효과에 미치는 shell의 영향은 없으며, 성형폭약에 장전되는 화약의 양이 일정하다면 절단효과에는 큰 영향이 없는 것을 알 수 있었다.

(3) 뇌관의 위치에 따른 절단효과는 뇌관을 상부 선단에 위치하게 한 경우가 가장 우수한 절단 효과가 나타남을 알 수 있었다.

(4) Liner의 두께와 절단 깊이와의 관계는 liner의 두께가 증가할수록 절단깊이는 증가하지만 liner의 두께가 0.5 mm 이상이면 큰 차이가 없으며, 성형폭약에 장전되는 화약량 즉, 장전밀도가 증가할수록 폭발속도는 상대적으로 증가함을 알 수 있었다.

(5) 두께 10 mm 이하의 후관을 폭발절단하기 위하여 20 g의 PETN 성형폭약을 사용하였을 경우 30 m 지점에서 측정된 폭풍압은 109 dB(L) 값을 얻음으로써 미국 광무국에서 규정한 안전 수치 내임을 알 수 있었다.

4. 기 타

본 연구를 통해 제작된 폭발절단용 성형폭약은 4건의 산업재산권을 취득함으로써, 향후 철구조물의 폭발절단 해체 및 배관 보수, 재활용을 위한 Ingot Mould와 페타이어의 절단 등에 적용할 수 있으며, Fig. 13과 같이

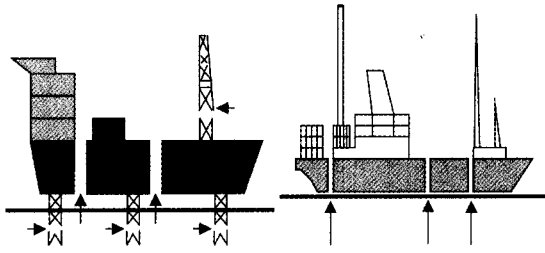
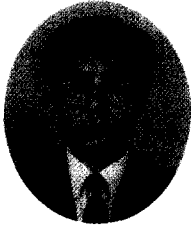


Fig. 13. The schematic of a scrapped ship.

FRP 폐선 및 운반선, 유조선 등의 절단 해체에도 각광을 받을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. 황현주, 1991, 폭파해체공법, 대한토목학회지 39.4, 9~15.
2. Y. Kasai, 1988, Demolition Methods and Practice, Chapman and Hall.
3. 한국건설기술연구원, 1988, 건축물의 해체공법에 관한 비교 연구, 연구보고서, 88-AD-2.
4. 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.
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.
6. Nakashio, Seki, Fujimoto, 1991, Study on Scrapping Old FRP Boats by an Explosive Cutting, 日本中國火藥(株) 研究報告, No. 34.
7. Reinhart, D. Pirson, 1966, Explosion treatment of metals, Moscow, Mir, 396p.
8. Kudinov, V.M, Volgin, L.A, Koroteev A.Ya., 1981, Devices based on linear core-shaped charges for the main pipelines cutting, Proc. of Iind meeting on explosion working of Materials. Novosibirsk, Sept, 239~241.
9. 이정인, 발파진동, 발파풍압 및 비석의 조절을 통한 안전발파, 대한토목학회지, 41.1, 99~117.



이 병 일

1986년 부산대학교 공과대학 금속
공학과, 공학사
1988년 부산대학교 공과대학 금속
공학과, 공학석사
1997년 부산대학교 공과대학 금속
공학과, 공학박사

Tel : 055-278-3760

E-mail : bilee@hanjung.com

현 재 한국중공업(주) 기술연구원 용접기술연구실 책임
연구원



박 근 순

1994년 강원대학교 대학원 자원공
학과, 공학석사
2000년 강원대학교 대학원 자원공
학과, 박사과정 수료

Tel : 02-513-6470

E-mail : b-n-t@hanmail.net

현 재 한국중공업(주) 건설사업본부 토목기술영업부 차장



공 창 식

1989년 충남대학교 공과대학 재료
공학과, 공학사
1991년 충남대학교 대학원 재료공
학과, 공학석사

Tel : 055-278-3762

E-mail : cskong@hanjung.com

현 재 한국중공업(주) 기술연구원 용접기술연구실 선임
연구원



김 광 태

1991년 연세대학교 공과대학 토목
공학과, 공학사

Tel : 02-513-6471

E-mail : commate@hanmail.net

현 재 한국중공업(주) 건설사업본부 토목기술영업부 과장