

# 모서리 분리형 폭발볼트 설계인자 및 분리특성

## Design and Separation Characteristics of an Explosive Bolt

김 동 진\*      이 응 조\*\*  
Dong-Jin Kim      Yeung-Jo Lee

### ABSTRACT

The present work is described the design factors and separation mechanism of ridge-cut explosive bolt in order to optimize the stage separation characteristics. Characteristics of test samples would differ depend on the detonating devices, the shape and size of bolt body, the amount of loading explosives, and the confinement conditions of bolt. Based on the results from these experimental factors, it appears to optimal condition of ridge-cut explosive that the amount of loading explosive seems to be near 110mg of RDX, the height of loading explosive is 3.5mm, the thickness of bolt is 3.9mm, and the degree of ridge is approximately 120°

주요기술용어 : 휴대용 무인기, 비디오카메라, OSD, Video Overlay, GPS

### 1. 서 론

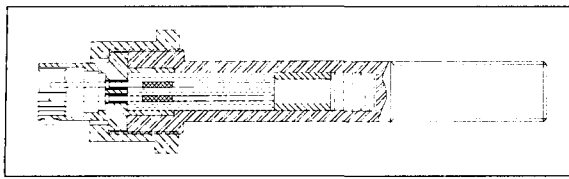
폭발볼트는 화약의 폭발력에 의해 결합되어진 두 개의 구조물을 분리 또는 방출기능을 가진 미사일, 항공기, 우주선, 수중 수송 시스템의 중요한 부품으로써 충전화약을 기폭시키는 기폭장치의 구조에 따라 일체형과 분리형으로 크게 분류할 수 있다<sup>1</sup>. 그러나 어떠한 형태의 폭발볼트는 필수적인 요구조건은 일반적인 볼트와 동일하게 두 구조물을 결합하는데 필요한 강도와 사용환경에서 받게되는 충격, 진동 등에 대한 내

구성을 갖추면서 분리기능이 요구될 때 반듯이 분리가 실현될 수 있는 높은 신뢰도를 가져야 한다.

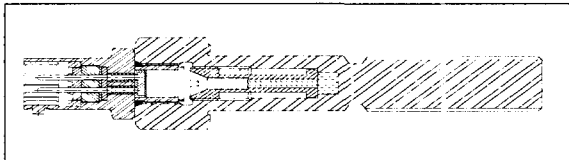
폭발볼트 예정절단면의 모양에 따라서는 일반형과 모서리 분리형(Ridge-cut) 볼트로 나눌 수 있다. 일반형 폭발볼트의 외형은 그림 1(a)과 같다. 이와 같은 일반형 폭발볼트는 화약의 폭발압에 의하여 절단면이 파열되면서 분리가 일어나지만 그림 1(b)의 모서리 분리형 폭발볼트는 예정 절단면을 예측하여 절단면 부위에 인위적으로 모서리를 만들어 줌으로 화약폭발에 의해 생성된 충격파가 이 부위에서 상호작용을 일으켜 절단이 이루어지도록 설계한 볼트로서 일반형에 비해 적은 화약량으로 깨끗하고 재현성 있는 분리면을 얻을 수 있다.

\* (주)한화 중앙연구소 주임연구원

\*\* 국방과학연구소 기-4-7 선임연구원



(a)



(b)

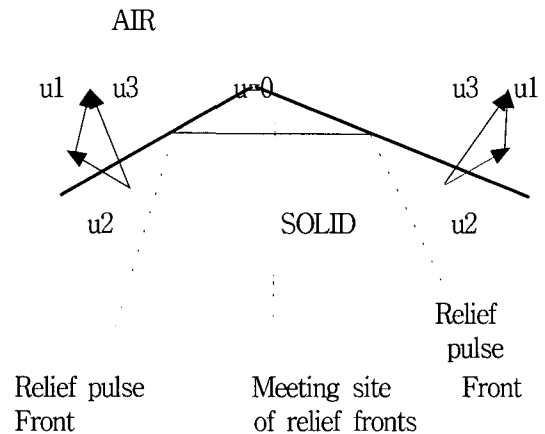
[그림 1] 일반형볼트와 모서리분리형볼트비교

모서리 분리(Ridge-cut)란 한쪽에 돌출된 ridge를 가진 금속재료의 반대쪽에서 고폭약을 기폭하였을 경우에 ridge가 둘로 갈라지는 형태의 파괴가 생기는 것을 의미하는데<sup>23</sup> 이는 고전적 파괴이론이나 탄성파 이론에 의해 설명되지 않는다. 그림 2와 같은 금속 경계에서의 이완펄스의 경로를 보자. 입사 충격펄스가 ridge를 향해 전파되어 경계에 부딪히면 이완펄스는 각면에서 방향이 서로 다른 입자속도가 높은 영역을 만든다. 입사 충격펄스가 ridge의 끝에서 소멸되는 시점에서 그 부분은 어떠한 응력도 존재하지 않지만 이완펄스에 의해 입자속도가 높은 영역은 ridge 각을 2등분하는 선을 따라서 공통적인 경계를 갖게 됨으로써 이 선을 따라 일어나게 된다<sup>4</sup>.

모서리 분리형 폭발볼트 설계시 고려되어야 할 사항은 볼트형상(외경, 내경크기), 충전화약량, ridge 형상 및 위치 특히 예정된 절단면에서 깨끗한 절단을 얻기 위해 계면에서의 충격파 반사현상을 고려하여, 최적의 ridge를 설계해야 한다.

본 연구에서는 기계적 특성이 우수하면서 분리시

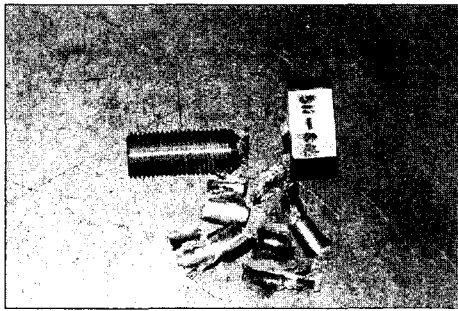
주위 구조물에 악영향을 주지 않는 저충격형 폭발볼트로 개발된 모서리 분리형 폭발볼트를 기폭장치, 볼트모양, 충전화약량 및 구속환경에 따른 설계 및 분리 특성에 중요한 인자를 찾아내어, 기존의 일반형 볼트와 비교 분석하였다.



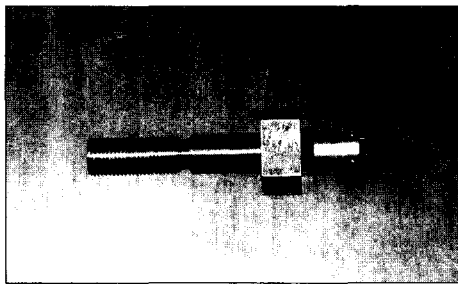
[그림 2] Mechanism of Ridge-cut by Meeting of Relief Fronts

## 2. 기폭장치

폭발볼트의 기폭장치로 기폭기(Detonator) 및 착화기가 사용된다. 기폭기가 사용된 폭발볼트는 볼트몸체에 충전된 화약을 기폭기가 직접 폭발시키는 반면 착화기는 주장약까지의 화약 연결 Train이 요구된다. 저충격형 폭발볼트인 모서리 분리형 폭발볼트는 착화기를 적용하였으며 그 이유는 기폭기가 기폭되면서 발생하는 충격파 및 위력이 과대하여 볼트 분리시 파편생성 및 주위 구조물에 악영향을 주기 때문이다. 그림 3은 기폭장치를 기폭기(a)와 착화기(b)를 적용하여 볼트 몸체에 미치는 위력을 비교 시험한 그림이다.

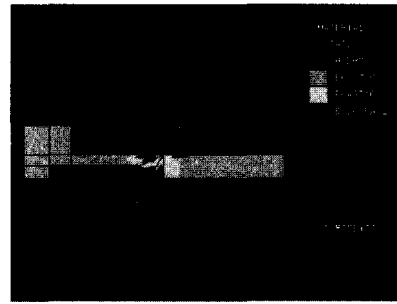


(a)

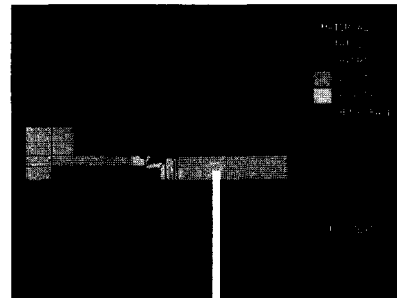


(b)

[그림 3] 기폭장치에 의한 볼트몸체 파괴형상



(a)



(b)

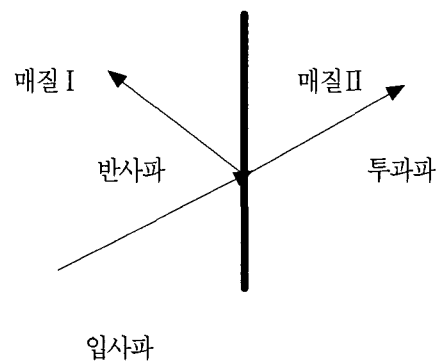
[그림 4] 폭발볼트 절단시 응력분포

### 3. 볼트모양

볼트형상에 따라서 볼트를 일반형과 모서리 분리형으로 나눈다. 일반형인 경우는 화약의 폭발압에 의해 절단 예정선이 파열됨으로써 볼트의 분리가 일어나는 반면 모서리 분리형은 절단 예정선에 충격과 상호작용 현상이 일어나도록 모서리를 만들어 줌으로써 같은 크기의 볼트라도 적은 화약량으로 절단이 가능하다. 볼트 외형설계는 충격과 이론에 근거하여 설계되었지만 볼트 구속환경, 화약특성, 화약밀도 및 충전화약 크기(직경·높이)등에 따라 절단이 일어나지 않는 경우가 많다. 본 연구에서는 볼트 몸체의 외형을 수차에 걸친 설계 변경에 의해 사양을 확정하였다. 그림 4

의 경우 (a)는 일반형의 파열형태이고 (b)는 모서리 분리형 볼트의 절단형태이다.

그림 4은 AUTODYN 시뮬레이션 프로그램<sup>5</sup>을 이용하여 얻은 결과이다. 볼트내 화약이 폭발할 때 발생



[그림 5] 매질 밀도차에 의한 입사파 거동

되는 응력은 그림 5에서와 같은 거동을 보인다. 매질1은 볼트몸체이고 매질2는 볼트를 구속하는 주변이다.

응력파는 불연속 계면을 만나면 아래와 같이 투과 및 반사된다. 금속은 압축응력보다는 인장응력에 의해 절단이 이루어 진다<sup>6</sup>.

$$\delta_T = \frac{2\rho_2c_2}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} \delta_I \quad (1)$$

$$\delta_R = \frac{\rho_2c_2 - \rho_1c_1}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} \delta_I \quad (2)$$

$\delta_T$ 는 투과파이고  $\delta_R$ 는 반사파이다. 반사파는 인장응력의 특성을 갖는다. 따라서 몸체 설계시 볼트주위의 구속환경도 함께 고려되어야 한다.

#### 4. 충전화약량

폭발볼트의 분리는 볼트내 충전된 화약에 의해 일어난다. 충전화약이 과 장약일 경우 분리시 주위 환경에 악영향을 미칠 뿐 아니라 파편생성의 원인이 된다. 충전화약이 약 장약이 될 경우 분리가 일어나지 않는다. 화약량에 따른 폭발위력은 식(3)에서 확인할수 있다. 표 1은 모서리 분리형 폭발볼트 개발시 수행하였던 약량시험결과이다.

표 1의 결과로 화약량에 따라서 볼트의 분리가 크게 좌우되지만 화약량 이외의 조건도 볼트 분리에 결정적 역할을 하고 있다는 것이 판명되었다. 화약의 폭발압력은 Jones & Hino의 식<sup>7</sup>을 인용하면 다음과 같다.

$$P_d = 0.000424 \rho_e \cdot v_e^2 (1 - 0.543 \cdot \rho_e + 0.193 \cdot \rho_e^2) \quad (3)$$

[표 1] 충전화약 약량조정 시험결과

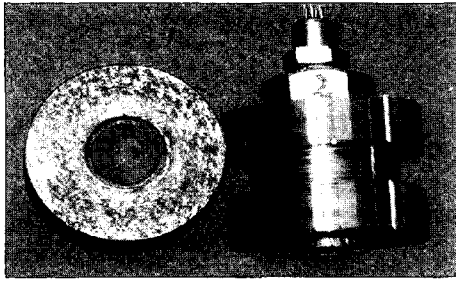
약 량 (mg)	시험 수량	절단 수량	미절단 수량	절단 확률 (%)
70	3	0	3	0
80	2	0	2	0
90	4	0	4	0
100	24	14	10	58
110	60	58	2	97
120	48	42	6	86
130	6	5	1	83

$P_d$ 는 화약의 폭발압력이고  $\rho_e$ 는 충전화약의 밀도  $v_e$ 는 폭속, 단위는  $\text{kgf/cm}^2$ 이다. 동일한 밀도를 갖더라도 볼트몸체에 충전되는 모양에 따라서 효과적인 절단면을 얻을수 있는데 화약직경과 높이(D/h)를 조절함으로써 가능하다. D/h의 최적값을 얻기위해선 볼트 구속환경 설계시 함께 고려되어야 하며 D/h를 변수로 하여 여러 조건에서 시험하여 볼트의 절단 현상을 확인하여야 한다. 본 연구에서는 D/h값이 0.7(5/3.5mm)일 때 가장 양호한 결과를 나타내었다.

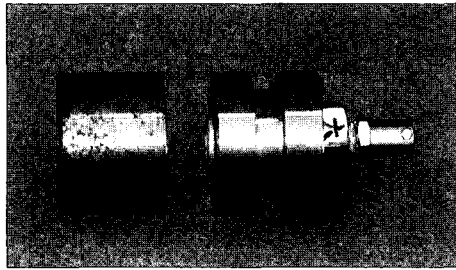
본 연구에 사용된 볼트의 재질은 17-4PH(SUS630)로 열처리 조건을 경도에 따라 달리하였다. 볼트 몸체를 열처리한 후 절단시험을 한 결과 분리를 일으킬수 있는 화약량은 경도가 낮을수록 증가하였다.

#### 5. 구속환경

폭발볼트의 구속환경에 따라 볼트의 절단 모양은 크게 달라진다. 모서리 분리형 폭발볼트는 응력집중현상이 볼트구속환경에 따라 달라지므로 볼트 설계시 함께 고려되어야 한다. 그림 6(a), (b)의 절단면은 그림 7(a), (b)의 구속환경에서 얻은 것이다.

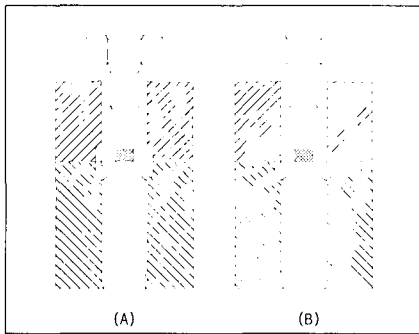


(a)



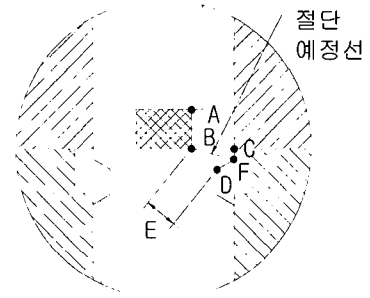
(b)

[그림 6] 구속환경에 따른 절단특성



[그림 7] 구속치구

그림 7(a) 경우 분리에정선의 상·하부는 밀도가 낮은 공기와 접해있는 반면 그림 7(b)는 상부에 볼트 몸체의 밀도와 비슷한 물질이 접해있고 하부는 공기와 접해있다. 식(1), (2)에서 볼수 있듯이 인장파는  $\rho c$ 에 의해 크기가 결정된다. 이론적으로 고찰하면 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.



[그림 8] 모서리 분리형 볼트의 절단예정선

분리에정선 상부에서 발생하는 충격파는 볼트외부의 구속환경으로 투과파의 형태로 소실되면서 볼트 몸체의 파괴에는 관여하지 않는다. 이와는 반대로 절단예정선 하부에서 발생하는 충격파는 볼트외부의 구속이 없기 때문에 다시말하면 큰 밀도차이 때문에 대부분이 다시 반사되어 인장응력을 형성하게 된다. 그림과 같은 절단예정선을 얻기위하여 다음과 같은 식을 적용할수 있다.

$$\frac{AC}{V_S} + \frac{CB}{V_S} = \frac{AB}{V_E} + \frac{2BD}{V_S} \quad (4)$$

$V_S$ 는 볼트몸체에서의 충격파 속도이고  $V_E$ 는 화약의 폭발속도이다. 식(4)에서 화약 약고와 볼트 벽두께를 변수로 하여 최적의 절단조건을 찾을수 있다. 본 연구에서는 화약 약고(AB)는 3.5mm, 볼트 벽두께는 3.9mm 모서리 각도(<CFD)는 120°가 가장 양호하였다.

## 6. 결론

저충격형 폭발볼트인 모서리 분리형 폭발볼트 개발

에 고려되어야 할 설계요소인 기폭장치, 볼트모양, 충전화약량 및 구속환경을 볼트 분리시 분리면의 특성에 따라 최적화 하였다. 최적화 조건에서 제조된 볼트는 분리시 절단면이 깨끗하고 파편이 생기지 않았다. 본 연구는 이론적 접근과 더불어 많은 시험결과를 토대로 이루어 졌다. 이론적으로 얻을 수 있는 자료는 극히 단순화시킨 조건에서 얻은 결과이므로 실 적용시 많은 보정이 이루어져야 한다. 이와 같은 보정은 설계요소를 변수로 하여 많은 시험을 함으로써 얻을 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. K.O.Brauer, Handbook of Pyrotechnics, Chap.5, (1974).
2. M.A. Meyers and L.E.Murr, Shock Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Metals, Plenum Press, NY, p249(1981)
3. R. Knislow, High-Velocity Impact Phenomena, Academic Press, NY, p 93(1972)
4. E.F. Poncelet, Theory of Ridge-Cut, Stanford Research Institute Report 006-54(1984)
5. N. K. Bimbaum, M.S. Cowler, AUTODYN User Manual,(1997)
6. M.A Meyers and G. Ravichandrn, Dynamic Behavior of Materials, University of California Press, San Diego, chapter7,(1989)
7. Rune Gustafsson, Swedish Blasting Technique, SPI, Gothenburg, Sweden(1973)