

## 가스팽창분리형 볼트 분리거동 해석 연구

이용조\*

### A Study of Interpretation of Separation Behavior in Gas Expansion Separation(GES) Bolt

Yeung Jo Lee\*

#### ABSTRACT

The present work has been developed the study of interpretation of separation behavior in gas expansion separation(GES) bolt which has the separation characteristics without fragmentation and minimum pyro-shock during the operation of the explosive bolt. In order to obtain the performance of minimum pyro-shock, the present work used non-compressive material instead of separation explosives. The use of the interpretation processor could be extensively helped to design the shape and the amount of explosives in the explosive bolt having complex geometry, and to analyse the separation behavior during the operation. It is also proved that the GES bolt is the most suitable the separation system necessary to minimum pyro-shock and non fragmentation compare with others.

#### 초 록

본 논문은 기존 폭발볼트의 기능을 그대로 유지하면서 분리시 발생하는 파편 및 충격파의 악작용을 완벽히 제거할 수 있는 가스팽창분리형 볼트의 분리거동에 관한 연구이다. 가스팽창분리형 볼트는 분리화약을 사용하지 않고 압력카트리지의 압력만 이용하여 분리가 이루어지게 개발된 파이로 장치로써, 분리거동을 수치해석 함으로써 볼트의 설계인자를 최적화할 수 있었다. 수치해석 및 시험 결과에서 노치는 썩기형태를 가지며 내부 홈 깊이가 분리면과 일치하는 모델이 가장 좋은 분리현상이 나타났다. 본 연구에서 제시한 볼트 설계인자의 최적화 방법은 향후 다른 종류의 폭발볼트와 같은 파이로 장치 설계에 기초자료를 제공할 수 있다.

Key Words: Gas Expansion Separation Bolt(가스팽창분리형 볼트), Pyro-Shock(파이로 충격), Design Factor(설계인자), Separation Behavior(분리거동)

#### 1. 서 론

† 2004년 11월 5일 접수 ~ 2005년 1월 11일 심사완료

\* 종신회원, 국방과학연구소 추진기관부

연락처, E-mail: yeungjolee@nate.com

첨단 무기 및 장비에 필수적으로 사용되는 결합 및 분리기능을 갖춘 부품들은 다양한 종류와

모양으로 개발되어 왔다. 이와 같은 기능을 가진 부품으로 대표적인 것이 폭발볼트이다.

폭발볼트란 화약의 폭발력에 의해 결합되어진 두 개의 구조물을 분리 또는 방출하는 파이로 테크닉 장치이다. 주로 우주선, 미사일, 항공기, 수중 수송 시스템에서 발사작동, 단 분리, 외부 탱크 방출, 추력이 소모된 모타 분리 등 많은 부분에 다양하게 사용된다. 하지만 폭발볼트의 경우 화약의 폭발력에 의해 분리되는 특성 때문에 분리시 파편 및 충격이 발생하는 단점을 갖고 있다[1]. 폭발볼트 분리시 발생하는 파편은 설계인자의 최적화를 통하여 거의 완벽하게 없앨 수 있게 되었지만, 충격파의 악작용은 현재의 기술력으로는 제어하기가 어렵다. 파이로 충격(pyro-shock)은 짧은 지속시간, 높은 주파수, 높은 충격량을 갖는 특징을 갖고 있다. 즉 수백 g에서 수만 g의 가속도 값을 가지며 그 지속시간은 10~30 ms 이내로 짧다. 이와 같은 특징을 갖는 충격파는 주변의 전자장치 및 기계장치의 손상과 오작동을 유발하여 시스템 실패의 원인이 되기도 한다.

GES 볼트는 기존의 폭발볼트의 기능을 그대로 유지하면서 분리시 발생하는 파편 및 충격파의 악작용을 거의 제거한 볼트이다. GES 볼트는 볼트에 결합된 압력카트리지에서 발생하는 압력을 이용하여 볼트 몸체를 절단시키는 메카니즘을 갖고 있다. GES 볼트 설계시 고려된 설계인자는 볼트 절단면 면적, 볼트 절단부위 형상, 착화기 압력, 볼트몸체 재질, 볼트몸체 경도, 볼트몸체 내부 형상이었다. 볼트절단부위 형상 및 몸체 내부 형상은 AUTODYN이라는 파괴거동을 전문적으로 해석하는 Software를 사용하여 다양한 형상에서 수치해석을 통하여 결정하였다[2]. 수치해석을 통해 실제 제작할 모델을 결정하였고 이 모델을 실제 제작하여 다른 설계인자를 최적화 하였다.

압력카트리지에서 발생하는 압력을 극대화하기 위하여 볼트몸체 내부의 빈공간은 비압축성 액체를 충전하여 최적화 하였다. 또한 결합에 요구되는 결합강도는 볼트몸체의 재질과 절단

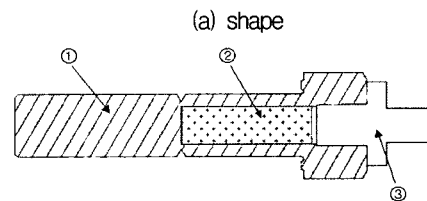
단면적을 최적화하여 얻었을 수 있었다. 볼트분리에 필요한 압력카트리지 위력은 10 cc CBT(Closed Bomb Test)로 상대적 평가를 통하여 결정하였다.

## 2. GES 볼트 설계 및 해석

### 2.1 볼트몸체 형상 설계

볼트몸체 형상을 설계하기 위하여 여러 가지 모델을 AUTODYN Software를 이용하여 수치해석 하였다.

수치해석에 사용된 전제조건은 i)볼트내부에 작용하는 압력은 모든 방향에서 동일하며 ii)지속되는 시간 또한 해석이 완료될 때 까지 계속 유지된다. iii)볼트 내부의 빈 공간은 비압축성 액체로 완전히 충전되어져 있다. Fig. 1은 GES 볼트의 형상이다.



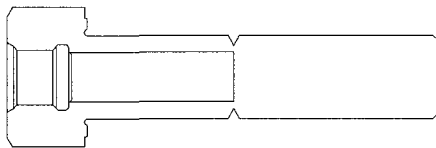
(1) 볼트 몸체 (2) 비압축성 액체  
(3) 압력카트리지

(b) model

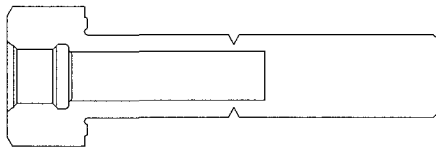
Fig. 1 A shape and model of GES bolt

볼트 몸체 형상 설계시 고려하여야할 설계인자는 노치형상, 노치와 볼트내부 홈 깊이의 관계이다. Fig. 2는 수치해석에 사용된 모델들이다. 모델(a)은 노치는 썩기 형태이고 내부 홈 깊이가 분리면과 일치, 모델(b)은 노치는 썩기 형

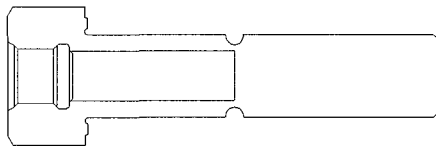
태이고 내부 홈 깊이는 분리면 보다 깊게 형성된 경우, 모델(c)은 노치는 라운드 형태이고 내부 홈 깊이가 분리면과 일치, 모델(d)은 노치는 라운드 형태이고 내부 홈 깊이가 분리면 보다 깊게 형성된 형태이다.



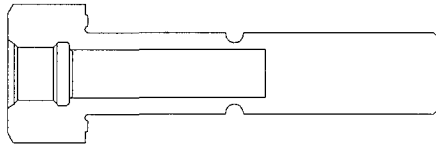
(a) notch type 1



(b) notch type 2



(c) round type 1

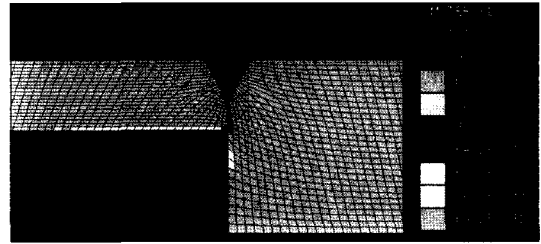


(d) round type 2

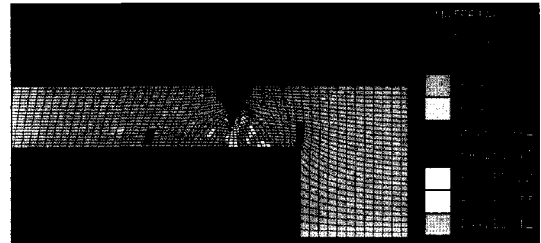
Fig. 2 Shapes of model used the present interpretation work

Figure 2의 (a), (b)모델과 (c), (d)모델은 볼트 분리면 외부의 형상에 따른 응력 분포를 확인하기 위하여 쐈기형과 라운드형으로 설계하였다. 또한 Fig. 2의 (a), (c)와 (b), (d)의 경우는 분리면과 볼트 내부 홈과의 깊이 관계를 비교하기 위하여 설정하였다.

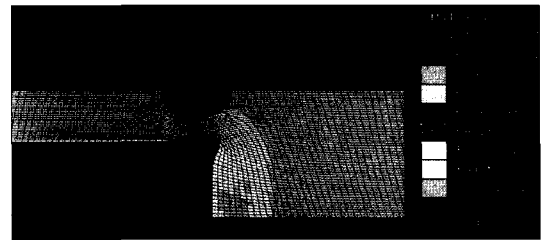
수치해석 결과는 Fig. 3과 같다.



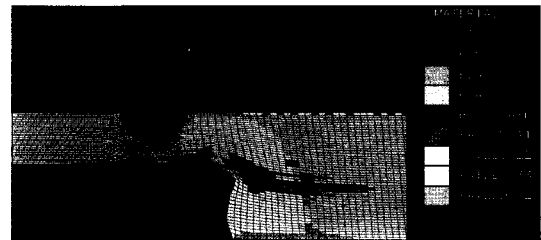
(a) notch type 1



(b) notch type 2



(c) round type 1



(d) round type 2

Fig. 3 Failure modes in four different models

해석결과 Fig. 3(a)의 경우 쐈기 부분과 내부 홈 밑 부분에서 분리 예정면을 따라 최단거리로 응력집중현상이 나타났으며 다른 부분에서는 거의 응력이 나타나지 않았다. 즉 볼트내부에서 생성된 압력이 볼트 몸체 분리에 아주 효율적으로 사용되고 있다고 해석할 수 있다. (b)의 경우

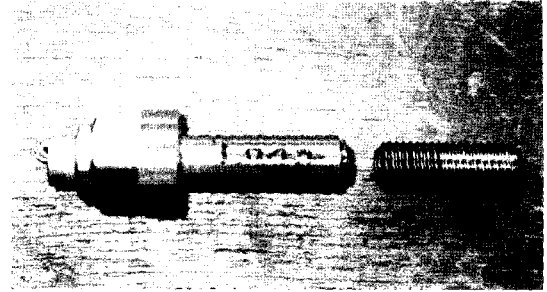
볼트 내부에서 생성된 압력이 볼트 홈 밑면에 우선 충격을 준 후 점차 노치부분에서 응력이 집중되는 현상을 보였다. 이와 같은 결과는 볼트 몸체 분리에 필요한 압력이 (a)의 경우보다 더 커야 한다는 것을 보여준다. 왜냐하면 볼트 밑면에 집중된 응력은 볼트 분리에 사용될 수 없기 때문이다. (c)의 경우는 (a)의 경우처럼 볼트 내부 홈 밑면과 노치 부분에서 예정 분리면을 따라 응력이 집중되었지만 (a)보다 응력이 노치부의 여러 곳으로 분포되어 나타난다. 즉 분리시 볼트몸체의 분리면이 깨끗하지 않고 요철이 발생할 가능성이 있다는 것이다. 마지막으로 (d)의 경우는 네 가지 해석모델 중 가장 나쁜 분리현상이 나타날 것으로 해석 되었다. 분리시 응력 집중현상이 먼저 볼트 몸체 밑면에서 발생되었으며 노치면에서도 응력이 집중되지 못하고 산만하게 분포되었다.

동일조건하에서 수치해석 결과 라운드형 보다 쉐기형에 응력집중현상이 더욱 잘 일어나는 것과 노치형상과 볼트 홈 내부 깊이가 응력집중현상에 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

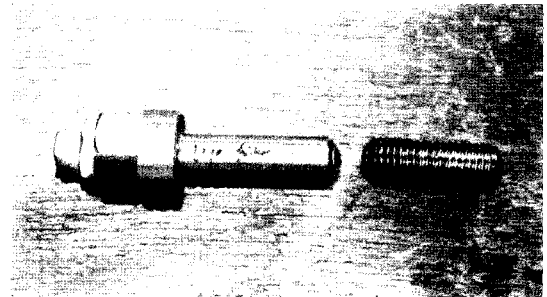
그러나 각 모델별로 실제로 가공된 제품에 대한 인장하중 시험에서는 거의 동일한 인장강도를 얻어 노치의 모양과 분리면과 내부 홈 깊이에 따른 영향이 나타나지 않았다. 이와 같은 이유는 실제 인장하중 시험은 기계적 인장력을 이용하여 시험하였고 해석에 사용된 것은 짧은 시간에 볼트 몸체 전체에 균일한 힘이 작용하도록 설정한 압력을 사용하였기 때문이다. 즉 시간에 따른 변형률의 차이 때문이라고 판단된다.

Figure 4는 쉐기형과 라운드형으로 제작한 볼트의 실제 분리시험 결과이다.

쉐기형의 경우 분리면의 요철이 거의 생기지 않고 깨끗하게 절단되었다. 하지만 라운드형의 경우 분리면이 노치부분과 일치하는 모델은 깨끗한 분리면을 얻을 수 있었지만 (d)의 경우에는 분리면에서 심한 요철이 생겼다. 이와 같은 현상은 simulation 결과와 정확히 일치하였다



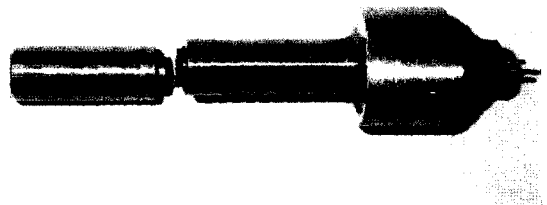
(a) notch type 1



(b) notch type 2



(c) round type 1



(d) round type 2

Fig. 4 Morphology in different models after separation test

## 22 절단 단면적 결정

시스템 적용시 요구되는 결합강도를 충족시키기 위해선 볼트몸체의 재질 및 분리면의 단면적을 설계인자로 하여 몸체를 설계하여야 한다. 본 연구에 사용된 GES 볼트는 1 ton의 하중을 견딜 수 있도록 설계되었는데 설계근거는 다음과 같다. 볼트재질의 인장강도 값을 얻기 위하여 기계적 인장시험을 수행하였으며 약 110 kgf/mm<sup>2</sup>을 얻었다. 따라서 1 ton의 하중을 견디기 위해 분리면의 면적은 이론상 12 mm<sup>2</sup>이 되어야 하고 이를 만족하기 위하여 분리면의 내경과 외경을 결정하였다.

## 23 압력카트리지 몸체 설계

압력카트리지가 잘못 설계될 경우 Fig. 5와 같은 현상이 나타난다.

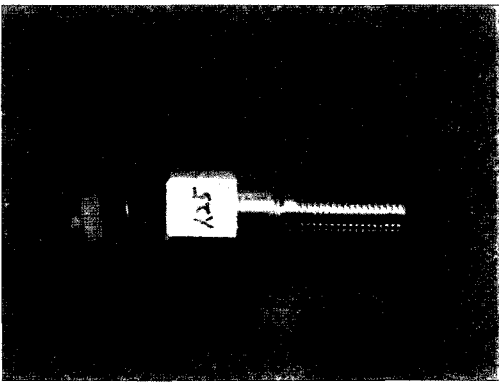


Fig. 5 Morphology in wrong design of pressure cartridge after operation

Figure 5의 경우처럼 GES 볼트의 경우 압력카트리지에서 발생된 압력은 볼트내부에서 동일하게 작용한다. 따라서 압력카트리지 몸체의 가장 약한 부위는 볼트몸체의 분리면 보다 더 높은 기계적 강도를 유지하도록 설계되어야만 한다.

## 24 압력카트리지 위력결정

GES 볼트는 압력카트리지에서 발생하는 압력으로 볼트몸체가 분리된다. 따라서 압력카트리지에

서 발생시키는 압력은 볼트에 외력이 존재하지 않는 한 볼트가 견딜 수 있는 최대 하중 값보다 큰 값이어야 한다.

압력카트리지가 발생시키는 압력 값은 10 cc CBT(Closed Bomb Test)를 통하여 상대적 값을 얻을 수 있다. 먼저 식을 단순화하기 위하여 볼트내부에서 발생하는 기체를 이상기체로 가정하였고 이상기체 상태방정식에 의해  $PV = P'V'$ 의 관계를 도출하여 이용하였다. 실제 압력카트리지의 압력 값은 10 cc CBT의 경우 약 20%이내의 편차를 나타내기 때문에 시험온도는 계산에서 제외하였다.

$P'$ 은 볼트의 인장하중과 분리면의 면적을 통하여 얻을 수 있다. 즉 1 ton의 하중을 견디는 볼트의 단면적이 12 mm<sup>2</sup>일 경우  $P'$ 의 값은 다음과 같은 식에서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P' &= 1000 \text{ kg}/12 \text{ mm}^2 = 83 \text{ kg}/\text{mm}^2 \\ &= 118000 \text{ psi} \\ V &= 10 \text{ cc} \end{aligned}$$

$P$ 와  $V'$ 은 일종의 설계인자로서 인식되어야하며 기술적 최적화에 의해 결정하여야 한다. 이유는 현재 국내에서 개발된 압력카트리지의 압력은 10 cc CBT로 측정할 경우 최대 5000 psi 이하이기 때문이다. 압력과 부피의 관계식에서 압력카트리지에서 발생시킬 수 있는 압력이 정하여져 있기 때문에 볼트내부 빈공간의 크기를 조절함으로써 압력카트리지의 위력을 결정하여야 한다.

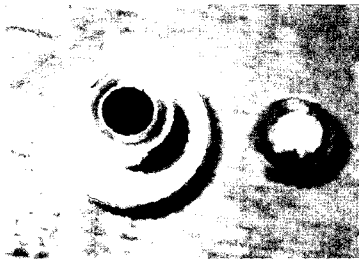
압력카트리지의 위력  $P$ 는 10 cc에서 3000 psi로 고정하였고 볼트내부의 부피는 비활성 유체의 양을 조절하며  $PV$ 의 관계식에서 얻은 이론적 값인 0.25 cc 이하로 조절하였다.

실제 시험결과 동일 압력카트리지를 사용하여 볼트내부 크기를 달리하여 시험하였을 경우 볼트내부를 빈 공간으로 두었던 경우와 비활성 유체를 충전하여 빈공간은 0.25 cc 이하로 하였을 경우 볼트내부가 빈 공간이었을 경우 볼트의 분리가 일어나지 않았던 반면 비활성 유체로 볼트 내부의 부피를 조정할 경우는 분리가 일어났다.

### 3. 시험결과 및 토의

#### 3.1 분리시험

AUTODYN으로 수치해석 하여 최적 모델을 선정하고 선정된 모델을 바탕으로 실제작하는 볼트몸체의 외형을 결정하였다. 볼트 분리면의 면적은 요구하중을 견딜 수 있도록 볼트재질의 인장강도와 분리면의 내경 외경을 최적화하여 결정하였다. 압력카트리지의 위력은 3000 psi/10 cc로 결정하였으며 볼트 내부 빈공간은 PV 관계식에서 결정하였다. Fig. 6은 설계인자들의 최적화에 의해 만들어진 볼트의 분리현상 결과이다. Fig. 6(a)에 보인바와 같이 (a) 모델에서는 해석결과와 같이 분리면이 깨끗하게 나타났으며, d 모델은 분리면이 상당히 걸치게 나타났다[Fig. 6(b)].



(a) model a



(b) model d

Fig. 6 Morphology of separation plane in model d after separation test

#### 3.2 Pyro-Shock 시험

분리시 발생되는 파이로 충격은 가속도 센서를 이용하여 측정하였다. Fig. 7은 시험에 사용된 시험치구이다.

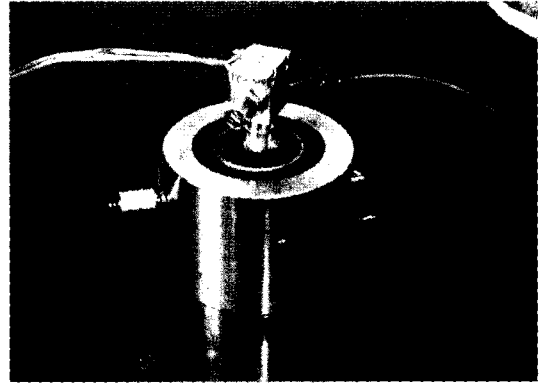


Fig. 7 Measuring equipment of pyro-shock

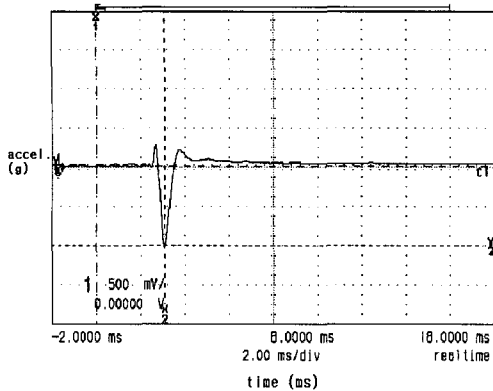
기존의 폭발볼트는 분리시 수천에서 수만g달하는 가속도가 측정되었다. 하지만 GES 볼트의 경우 측정된 가속도는 파이로 충격이라고 할 수 없을 정도로 작은 값이었다. Fig. 8은 폭발볼트와 GES 볼트의 파이로 충격 측정 그래프이다.

그래프에서 보듯이 폭발볼트의 경우 분리시 5000 g 이상의 값을 보인 반면 GES 볼트의 경우 10 g 이하의 값을 얻었다. 따라서 GES 볼트는 분리시 파이로 충격을 발생하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다

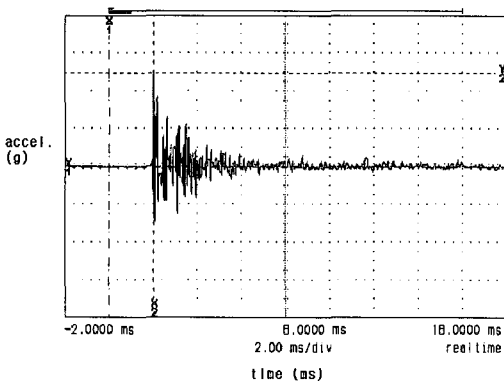
#### 3.3 토의

GES 볼트는 분리시 파편 및 충격파의 악작용이 없는 이상적인 분리장치이다. 하지만 볼트의 기본 조건인 기계적 결합력이 기존의 폭발볼트보다 약하다는 단점이 있다.

GES 볼트 개발에 사용된 설계인자의 최적화는 이와 같은 단점을 보완하고 최적의 볼트를 설계할 수 있는 방법을 제시한다.



(a) GES bolt



(b) Ridge-Cut explosive bolt

Fig. 8 Graphs of pyro-shock data

노치의 경우 응력집중이 잘 일어날 수 있는 썰기형이 바람직하며 노치와 볼트내부 홈 깊이를 일치시킴으로써 예정 분리면에 응력이 가장 잘 집중되도록 할 수 있다.

GES 볼트의 기계적 인장강도는 노치 형상 및 볼트내부 홈의 깊이에 영향을 받지 않고 분리면의 면적에만 영향을 받기 때문에 요구된 인장강도를 만족하기 위해선 볼트 내경 및 노치부분 외경의 최적화가 필요하다.

압력카트리지의 위력은 요구된 기계적 강도에 따라서 조정되어야 하지만 압력카트리지 자체의

한계 때문에 볼트내부 부피와의 관계에서 최종 결정되어야 한다.

#### 4. 결 론

GES 볼트 설계시 설계에 고려되어야 하는 설계인자에 관하여 살펴보았다. 각각의 설계인자를 최적화함으로써 분리시 파편 및 충격파의 악작용이 없는 볼트의 개발이 가능하다. 설계인자를 최적화함에 있어 가장 먼저 고려에 두어야 하는 것은 GES 볼트가 견디어야 하는 기계적 강도이다. 볼트 특성상 압력카트리지에서 발생하는 압력에 의해 분리현상이 일어나므로 기존 폭발볼트처럼 높은 인장강도가 요구되는 시스템에는 사용되지 못한다. 하지만 일정크기 이하의 인장강도가 요구되는 시스템에는 효과적으로 사용될 수 있다. 요구되는 인장강도에 따라 볼트 분리면의 단면적이 결정된다. 단면적이 결정된 후 최적 몸체형상을 설계하기 위하여 먼저 동일 단면적을 갖는 여러 가지 형상의 볼트몸체를 수치해석을 통하여 결정한다. 볼트내부 부피와 압력카트리지의 위력의 상호 최적화를 통해 압력카트리지의 위력을 결정한다.

볼트 몸체 외부형상은 라운드형보다 썰기형이 보다 많은 응력집중을 나타내어 양호한 분리결과를 얻을 수 있었으며 볼트내부 형상 또한 분리면과 일치시켰을 경우가 더 나은 결과를 얻었다. 이와 같은 현상은 AUTODYN 수치해석과도 동일하였다.

#### 참고 문헌

- [1] Meyers, M.A. and Murr, L.E., "Shock Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Metals," Plenum Press, New York, 1981, pp.51-63

- [2] 이응조, "해석프로시저를 이용한 리치컷형 폭 발볼트 분리기구 해석, 한국추진공학회지", 제8권, 2호, 2004, pp.102-114