

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.3.024>

## 볼트 몸체 특정 부위 팽창을 이용한 풀림 방지 볼트 연구

김동진\* · 이웅조\*\* · 김남춘\*\*\* · 이정복\*

### The Study of Anti-Releasing Bolt Manufactured by Expanding a Particular Part of Bolt Body

Dongjin Kim\* · Yeungjo Lee\*\* · Namchun Kim\*\*\* · Jungbok Lee\*

#### ABSTRACT

The present work has suggested the design methods of the bolt body for making the anti-releasing bolts and provided the changed properties of the bolt body after explosion. To prove this work, two models of the anti-releasing bolts, M10 and M20, are produced and the expansion properties of each model are experimentally obtained. This study verify that the expansion of the bolt body is reproducible and the expansion rate could be controlled by the combination of the design factors and the anti-releasing characteristics could be quantified. It also could provide the data that would be needed to make the bolts with the anti-releasing effect.

#### 초 록

본 연구에서는 풀림방지 볼트를 설계하는 방법을 제시하고 화약 작동 후 볼트 몸체의 특성 변화에 대한 자료를 제공한다. 이와 같은 연구 결과를 증명하기 위하여 M10, M20의 모델을 제작하였고, 폭발 볼트 몸체의 특성 변화에 대한 자료는 시험적으로 획득하였다. 이를 통하여 본 연구는 볼트 몸체의 팽창은 재연성이 있으며 팽창율은 설계인자의 조합에 의해 제어될 수 있다는 것과 풀림방지 특성은 수치화 될 수 있다는 것을 입증했다. 본 연구는 또한 풀림방지 성능을 갖는 볼트를 제작하는데 필요한 자료들을 제공하고 있다.

Key Words: Anti-releasing Bolt(풀림방지볼트), Expansion Rate(팽창율), Anti-releasing Characteristics(풀림방지특성), Detonator(기폭관)

#### 1. 서 론

최근 구조물은 거대화 추세에 따라 자중이 작고 강성이 큰 강구조물로 많이 건설되고 있으며 이와 같은 특성의 구조물에는 많은 연결부위가 있기 마련이며 여기에 가장 많이 이용되는 체결 수단이 볼트이다. 볼트 체결 시 가장 문제가 되는 것은 풀림현상이며, 이를 해결하기 위한 방법

접수일 2012. 3. 8, 수정완료일 2012. 5. 15, 게재확정일 2012. 5. 21

\* 정회원, (주)한화 종합연구소 화력/탄약2실

\*\* 중신회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

\*\*\* 정회원, (주)대아테크

† 교신저자, E-mail: [gudcjfdl@hanwha.co.kr](mailto:gudcjfdl@hanwha.co.kr)

으로 용접이나 기존의 풀림방지 부품을 이용하였다. 하지만 용접은 특정 환경에서는 사용이 불가하며 기존의 풀림방지 부품은 완전한 풀림방지 기능이 없다. 이와 같은 이유로 기존의 풀림방지와는 새로운 개념인 볼트 몸체에 변형을 주어 풀림이 방지되는 볼트를 개발하였다.

풀림방지볼트는 Fig. 1과 같은 형상으로 개발하였다. M10, M20은 볼트 나사부의 크기를 의미하며, M20은 산업현장에서 가장 많이 사용되는 볼트 종류 중 하나이다. M10은 너트 체결을 하지 않고 직접 구조물을 결합하고 풀림을 방지하는 기능을 가지고 있다.

Figure 2에서 보는 바와 같이, 풀림방지볼트는 몸체에 충전된 화약이 폭발할 때 발생하는 에너지를 이용하여 볼트 몸체의 특정 부위를 팽창시켜 너트 또는 구속물 접합부의 수직틈새를 제거하여 마찰력을 높임으로써 풀림을 방지한다[1]. 이때 화약 폭발에 따른 볼트 몸체의 영향을 물리적, 화학적으로 확인하고 볼트 성능에 전혀 영향을 미치지 않는다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 풀림방지 볼트 제작을 위한 볼트 몸체 설계 방법 및 화약 폭발 후의 볼트 몸체 물성 변화, 이를 바탕으로 제작한 풀림방지볼트의 팽창특성을 M10, M20볼트의 모델별 실험을 통해 제시하였다. 실험에서 얻은 조건 별 특성값을 이용하여 시뮬레이션으로 팽창 특성을 예측하였으며 예측값과 실 팽창값과의 오차를

제시하였다. 이를 바탕으로 향후 유사모델 개발 시 실제 제품 제작 전 시뮬레이션을 통하여 시간과 비용을 줄일 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 본 연구에서는 볼트 몸체의 팽창에 영향을 미치는 화약량, 볼트 몸체 내부 형상, 볼트 몸체 재질과 같은 설계인자 조합에 따른 시험을 수행하여 각 설계인자의 영향을 분석하였으며, 소성에 따른 최대 팽창률을 해석하고 팽창 전, 후의 물리적 특성을 비교하였다.

볼트 몸체의 팽창률과 풀림방지 기능의 상관관계를 실험적으로 평가하여 특정 구간에서는 수치적으로 표현될 수 있다는 것을 제시하였으며, 이를 통해 풀림방지 성능을 팽창률 제어를 통하여 제시할 수 있도록 하였다. 풀림방지 성능 확인을 위하여 풀림 토오크 값을 측정하고, 풀림방지 시험 규격을 적용하여 시험을 수행하였다.

## 2. 풀림방지볼트 몸체 설계

### 2.1 볼트 몸체 설계

볼트 내부의 화약 충전과 폭발계열 삽입을 위하여 볼트 몸체 내 홀(hole) 가공이 필요하다. 하지만, 이와 같은 내부 홀이 볼트의 기본적인 역할인 결합 강도에 영향을 주어서는 안 된다. 따라서 응력해석을 통하여 볼트 내부 형상에 따른 응력 분포를 확인하고, 내부 형상 변경 전의 볼트와 구조강도 면에서 뚜렷한 차이가 없다는 것을 확인하였다.

강도 해석에 사용된 볼트 규격은 M20을 사용하였다. 볼트와 구조물 간의 체결은 형상, 접촉 및 마찰력을 모두 고려하여 직접적으로 유한요소 해석에 적용할 경우, 수렴성과 과도한 해석시간이 소요되므로, 이러한 방법은 비효율적이다. 따라서 본 해석에서는 볼트 스템에서 발생하는 평균 응력이 450~500 MPa 범위 내에 있도록 하기 위해 적절한 온도를 가하여 열수축이 발생하도록 하였다. 이 값은 실제 체결 토크 값이 아닌 두 모델 간의 정성적인 강도 분석을 위함이다.

일반볼트에 열 하중을 가했을 때, 최대 응력은

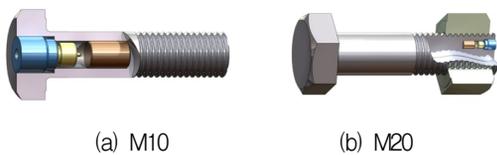


Fig. 1 Configuration of anti-releasing bolts

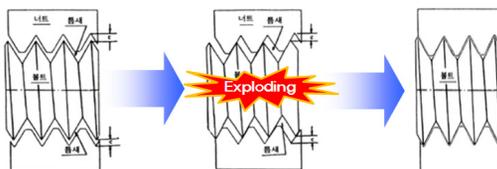


Fig. 2 Principle of anti-releasing bolt

약 1800 MPa로 나사산에서 발생하고 있다. 이 값은 볼트 재질(F10T)의 인장강도 및 항복강도를 초과하기 때문에 비선형 해석을 수행해야 하나, 일반볼트와 폭발볼트의 상대 비교를 위해 선형으로 가정하였다. 최대 변위량은 볼트부에서 0.073 mm로 계산되었다.

홀 가공된 볼트에 열하중을 가했을 때, 최대 응력은 약 1866 MPa로 나사산에서 발생하였다. 최대 응력값은 일반볼트와 마찬가지로 볼트 재질(F10T)의 인장강도 및 항복강도를 초과하기 때문에 비선형 해석을 수행해야 하나, 일반볼트와 홀 가공된 볼트의 상대 비교를 위해 선형으로 가정하였다. 최대 변위량은 볼트부에서 0.074 mm로 계산되었다.

해석결과, 홀 가공된 볼트는 화약이 삽입되는 홀에 의해 단면이 감소되어 강도가 낮아질 것으로 예상하였으나, 동일한 하중 조건하에서 강도 해석을 수행한 결과에 의하면 두 모델 간 응력 분포 및 응력, 변위가 거의 유사하였다. 따라서, 홀 가공된 볼트가 강도 측면에서 일반볼트에 비해 취약하지 않음을 확인 할 수 있었다. 해석결과를 Table 1에 나타내었다.

2.2 설계 사양

플립방지볼트는 목표 사양을 모델 M10과 모델 M20으로 설정하고, 화약 폭발 시 화염과 내부압력의 외부누출로 인한 압력손실 없도록 설계 인자를 최적화하여 제작되었다.

Table 1. Comparison of conventional bolt and anti-releasing bolt by FEM analysis

항 목		일반 볼트	홀가공 볼트	편차 [%]
전체	최대응력 [MPa]	1,800	1,866	3.60
	최대변위 [mm]	0.073	0.074	1.37
볼트 스템 부	최소응력 [MPa]	56	53	-6.18
	최대응력 [MPa]	517	517	-0.07
	평균응력 [MPa]	322	320	-0.75

모델 M10은 폭발압력에 의한 가스 후출 방지 및 격침과 홀더의 밀착을 고려하여 Fig. 3의 형상으로 제작하였으나 홀더 나사부 길이가 4 mm로 제작 되었을 때 가스 후출이 발생하였다. 이러한 가스 후출의 원인은 홀더 나사부 길이가 짧은데 있으며, 이에 나사 길이를 보강할 필요가 있었다. 초기 구성도에서 나사 길이만을 늘였을 경우 홀더부에 과도한 응력이 집중 될 수 있어, 홀더의 파단이 우려되었다. 따라서 가스 후출을 방지하면서 홀더의 응력집중을 피할 수 있는 크기를 고려하였다. 홀더의 나사 크기를 M6으로 개선했으며, 깊이를 7 mm로 크게 하였다. 개선 모델의 시험에서 격침과 홀더의 밀착이 양호하였으며 가스 후출 또한 발생하지 않았다.

모델 M20은 볼트 외경이 모델 M10보다 크고, 폭발압력에 의한 확장율을 최대화하고, 가스 유출을 막기 위해 볼트 중심이 아닌 볼트 외경쪽으로 편심이 이루어지도록 설계 되었다. 볼트 확장부의 편심을 고려하여 격침의 위치도 확장부로 편심되게 설계 제작하였다. Fig. 4의 초기시험 모델은 격침, 홀더 형상의 최적화를 통해 초기 모델에서 발생되었던 핀 후출 및 가스 누출 현상을 없앨 수 있었다.

2.3 화약 폭발 후 볼트 몸체 물성 변화[2]

볼트 몸체 특성 변화는 M20 모델에서 수행하였으며 M10 모델은 일반 볼트에 사용되는 재질

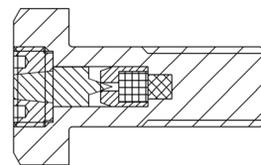


Fig. 3 Configuration of model M10

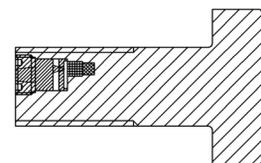


Fig. 4 Configuration of model M20

이 아닌 스테인레스 스틸을 사용하였기에 제외하였다. 본 연구에서 사용된 재료는 10T급 볼트로서 볼트의 형상은 Fig. 5와 같고 화학조성은 Table 2와 같다. 실험은 형상, 경도, 조직 변화 및 균열에 대하여 수행하였다. 폭발 전후의 형상 변화는 고성능 디지털카메라를 이용하여 전체 스케일에서 외부형상 및 내부 공극형상 변화를 관찰하였고, 정밀 변화량을 구하기 위해 주사전자 현미경을 이용하여 형상을 확인하고, 폭발로 인한 직경 변화량을 계산하였다. 폭발로 인한 경도 변화와 폭발 영향부를 확인하기 위해 비커스 경도 시험기를 통해 경도 분포를 측정하였다. 그리고 폭발 인접부 조직변화와 폭발 표면부 성분 변화를 분석하기 위해 폭발 영향부를 채취하여 2400번 연마종이로 연마한 후 1  $\mu\text{m}$  다이아몬드 서스펜션(diamond suspension)으로 최종 연마하였으며 2% Nital 용액으로 에칭하여 주사전자현미경을 통해 미세조직과 미세균열을 관찰하고 주사전자 현미경에 장착되어 있는 EDS를 통해 산화층 형성 및 특정 원소 편석 여부를 분석하였다. 또한, 폭발로 인한 수소 지연 파괴 저항성 변화의 간접적 측정을 위해 폭발 전후 시편을 채취하여 3% NaCl + 0.3% NH<sub>4</sub>SCN 의 용액에서 10 A/m<sup>2</sup>의 전류 밀도하에서 20시간 동안 장입하여 수소를 주입시키고 2차 이온 질량분석법인 SIMS를 통해 표면의 수소량을 측정하였다. 동적 SIMS 분석의 시험조건은 충격 에너지: 15 keV, 전류: 50 nA, 해석면적: 20  $\mu\text{m}^2$  이다.



Fig. 5 M20 bolt

Table 2. Chemical composition of M20 bolt

	C	Mn	Si	Mo	P	S	Nb
M20	0.201	0.79	0.212	0.0032	0.0097	0.0044	0.0006

초기 폭발 전 내부 공극의 직경은 4.88 mm였으나, 폭발로 인한 충격으로 인해 내부 공극이 불규칙하게 확장되어 최대 직경이 6.43 mm로 기존 대비 32%가량 증가하였다. 길이 방향에 따른 직경 증가 정도는 차이를 보이나, 수직 단면에서는 폭 방향으로 변형 편차 없이 원형으로 변형이 발생하였다. 외경은 단지 3% 증가에 그쳤다. 하지만 폭발 전후의 단면적은 동일하였다. 따라서 동일한 하중이 걸릴 때 그 내부에 발생하는 응력이 폭발 전후에 동일함을 알 수 있다.

폭발로 인한 변형으로 야기되는 경도 변화를 확인하기 위해 폭발부 표면 인접부에서 길이 방향으로 경도를 측정 비교하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 폭발 전은 위치에 따라 경도 차이가 균일한 반면에, 폭발 후는 공극 안쪽 모서리부의 경도가 가장 높고 점차 멀어질수록 감소한다. 폭발 전의 경도가 347 Hv 이었으나, 폭발 후에 모서리부에서 경도가 467 Hv로 34.6%의 경도 상승이 발생하였다. 길이 방향 뿐만 아니라 폭 방향으로의 경도 분포도 측정하였다. 폭발표면부에서 경도가 가장 크게 상승하였고 내부로 갈수록 경도가 감소하여 표면부에서 약 1 mm 떨어진 부분에서는 모재와 동일한 경도값을 보였다.

이를 통해 폭발영향부가 공극 표면에서 내부로 1 mm 정도로 형성되었음을 알 수 있다. 이러한 폭발 영향부는 볼트 전체 단면적의 9.5% 정도를 차지하고 있으며, 폭발 영향부의 평균경도는 384 Hv로 폭발 전 대비 약 11% 향상된 값을 보인다.

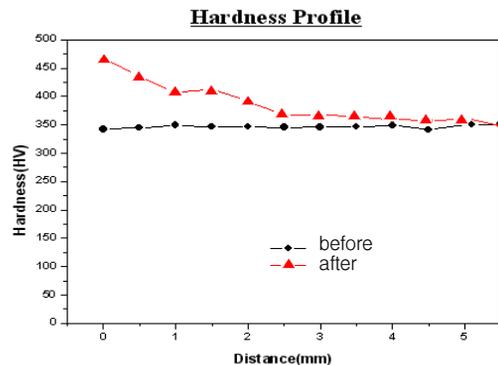


Fig. 6 Hardness distribution with distance

인장강도 또한 선형적으로 비례한다. 하지만, 인장강도는 볼트 단면적 전체에 걸쳐 작용하므로 폭발 후 인장 강도는 폭발 영향부와 폭발 미영향부의 강도의 조합으로 구한다. 폭발 후 볼트의 인장강도는 1,090 MPa로 폭발 전 대비 약 1% 향상된다. 따라서 폭발로 인한 경도변화로 일어나는 인장강도 변화가 없음을 확인할 수 있다.

Figure 7은 경도가 증가함에 따라 인장강도와 마찬가지로 피로강도도 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 관계를 통해 측정된 경도값을 이용하면 피로강도를 폭발 전 후에 대하여 계산할 수 있다. 폭발 전의 경우 723 MPa인 반면에 폭발 후에는 전체의 피로강도가 730 MPa로 약 1%상승하여 폭발 전후의 피로 강도가 거의 변하지 않는다는 것을 알 수 있다. 하지만, 일반적인 피로 파괴는 시편의 표면에서 피로균열이 발생하여 일어나므로 피로 강도는 표면 특성에 매

우 큰 영향을 받는다. 즉, 표면의 경도가 증가하거나 표면의 잔류 압축 응력이 존재 시에 피로강도가 크게 향상 된다. 따라서, 폭발표면부의 경도가 모재 대비 약 35%가량 증가함으로 인하여 폭발 후 볼트의 피로강도 또한 다소 증가할 것으로 예측된다.

M20의 볼트는 템퍼드 마르텐사이트 조직을 보인다. 폭발 후 시편의 정면부, 모서리부, 측면부 조직을 관찰한 결과 모두 마르텐사이트 조직을 가지고 있으며 조직변화는 관찰되지 않았다. 이는 Fe-C 상태도와 같이 0.2 wt% 가량의 탄소 함량을 가지는 탄소강의 경우 조직 변화를 위해서는 A<sub>1</sub>온도인 727°C 이상의 온도가 요구되어진다. 만약 폭발에 의해 발생한 열이 727°C 이상 이더라도 조직 변화를 위해서는 원자들의 확산이 일어나기 위한 충분한 시간이 요구되므로 폭발에 의한 순간적인 열로는 조직변화를 일으킬 수 없다. 따라서 내부 폭발에 의한 미세조직 변화가 없으면 미세조직 변화로 인한 기계적 물성 변화는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

NO<sub>x</sub> 계열의 폭발가스 부산물과 볼트의 화학적 반응으로 인해 폭발 표면층에 철계 산화물이 형성될 수 있다. 이러한 산화물이 볼트의 기계적 물성에 영향을 미칠 수 있으므로 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)를 통해 가스 압력이 높게 가해지는 폭발 정면부 부분이 Fe, C, O에 대한 맵핑(mapping)을 실시하여 산화층과 편석 여부를 확인하였다. 폭발 표면층에 FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 산화층이 형성될 경우 산화층 부분에서 Fe 원소분포가 다른 부분에 비해 감소하고 O 원

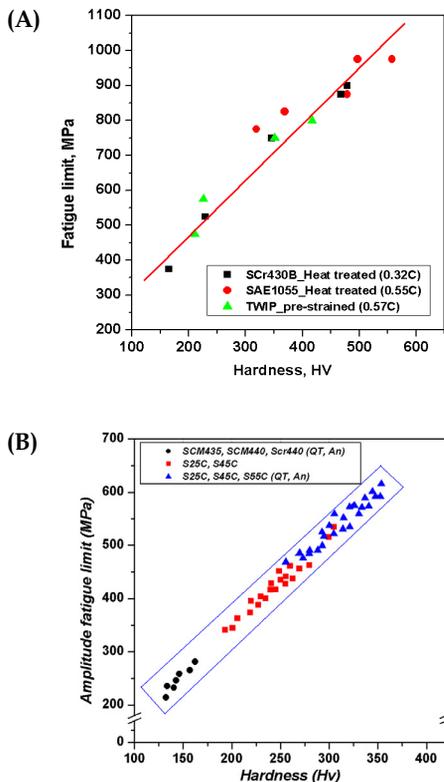


Fig. 7 Relation between fatigue strength and hardness[2]

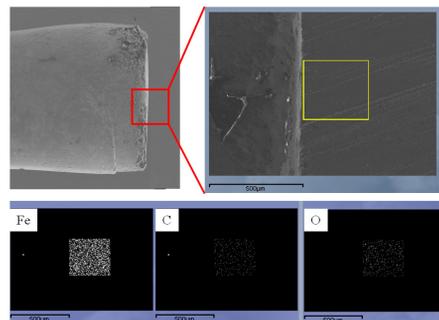


Fig. 8 EDS mapping

소 분포가 집중되게 된다. 하지만 Fig. 8과 같이 맵핑 영역 전체에 걸쳐 원소들이 균일하게 분포하고 있다. 따라서 폭발가스에 의한 산화층 형성 및 원소 편석은 발생하지 않았다.

### 3. 팽창특성

#### 3.1 실험장치 및 방법

모델 및 조건 별로 제작된 풀림방지볼트를 Fig. 9에 삽입 후 타격봉을 이용해 기폭 시킨다. 기폭은 소음 및 파편 발생을 고려하여 밀폐된 장소에서 실시하였다. 팽창된 풀림방지볼트를 회수하여 투영기 및 버니어 캘리퍼스를 이용하여 팽창된 부위의 치수를 측정하였다.

#### 3.2 M10 볼트 모델별 팽창특성[3]

M10의 모델별 성능시험결과를 보면 모델10-1에서는 확장을 104.1~105.9%을 보였고 크랙과 터짐 현상이 발생하였다. 모델10-2의 경우 확장은 104.4~109.1%였으며 확장 후 가스 후출이 발생되었다. 모델10-3의 경우는 107.1~ 111.9%의 확장을 보였고 풀림토크값도 최소 파괴토크 이상으로 양호하였다.

볼트 몸체 재료의 특성 중 SUS 630의 강성이 좋으나, 연성이 16%이므로, SUS 316에 비하여 연성 특성에서 40% 이상의 차이를 보인다. 내부 구조 중 detonator 하부 공간 크기에 따른 팽창률의 차이가 드러났다. 또한 이 시험으로 외경 확장이 107%이상일 경우 토크 시험 결과



Fig. 9 Equipment for operating bolt

700 Kg.cm이상으로 나타났으며, 이는 KS B 0551; 1996 볼트의 최소 파괴토크 673 Kg.cm(8.8급) 이상이었다.

모델M10-1은 detonator와 RDX의 약량에 관계 없이 크랙 및 터짐 현상이 발생하였다. 이는 M10의 외경과 내경의 두께 차이가 크지 않은 상태에서 약량이 많고, 볼트 몸체의 연성이 부족하여 몸체의 팽창을 견디지 못하고 크랙 및 터짐이 발생하게 되었다.

M10-1 모델에서 몸체의 연성부족으로 인한 파단 및 크랙 현상이 발생하여 2차 모델의 재료를 변경하였다. 2차 모델은 연성이 좋고, KS규격에 부합하는 재료인 SUS 316으로 선정하였다.

모델M10-2모델은 detonator만으로도 충분한 확장을 보인다. 이는 1차 모델 시험 후 인장력이 우수한 재질로 변경한 결과이다.

모델M10-3는 2차 모델과 같이 M10볼트의 내부형상을 화약 충전 깊이(D) 1 mm, 2 mm, 3 mm 구분하여 가공하고 여유 깊이에 따른 내부 및 외부 팽창량을 확인하였다. 차이점은 팽창부위를 나사쪽으로 변경하였다. 시험 결과 Detonator 만으로도 충분한 확장을 보인다. 이는 2차 모델 시험과 결과가 동일하였다.

#### 3.3 M20 볼트 모델별 팽창특성[3]

모델 M20은 3가지 대표 모델로 진행했다. 모델 20-1은 내부 확장부의 편심 위치조정과 약량을 조정하였으며, 모델 20-2는 가스 후출 방지를 위해 마개와 격침의 재질을 변경하였다. 모델 20-3은 약량조정을 통하여 팽창율을 증가시켰다.

고장력 볼트 몸체의 특성 상 확장을 증가에 한계가 있고, 지금까지 수행한 시험으로는 모델 M20-3이 가장 재연성 있는 결과를 나타내었다. 토크 시험시 1,200 Kg.cm 이상의 풀림 방지 기능을 나타내었다.

볼트의 내부형상을 Detonator와 RDX의 충전 깊이(D)를 1 mm, 2 mm, 3 mm로 구분하여 가공하고 충전량에 따른 내부 및 외부 팽창량을 확인하였다. 고장력볼트의 특성상 연성이 부족하여 가스가 후출되면서 이로 인해 내부 확장이 부족하였다.

1차모델의 확장율이 적은 원인은 마개의 가스 후출이 원인인 것이므로, 따라서 마개 나사 부 길이를 늘리고, 격침의 재료를 연성 재질로 변경하여 동작 후 격침과 홀더와의 접촉률을 높였다.

1차 모델과 같이 M20볼트의 내부형상을 화약 충전깊이(D) 1 mm, 2 mm, 3 mm로 구분하여 가공고 충전량에 따른 내부 및 외부 팽창량을 확인하였다.

격침의 재질인 Al 6061은 detonator를 작동시키지 못하였다. 따라서 재질 SUS 316으로 변경하여 시험하였고, 마개의 길이를 증가하여 가스 후출을 감소시켰다. 하지만 확장율의 증가비율은 가스 후출과는 관계가 적은 것으로 판단된다.

2차 모델과 같이 M20볼트의 내부형상을 detonator와 RDX의 충전깊이(D)를 1 mm, 2 mm, 3 mm로 구분하여 가공하고 충전량에 따른 내부 및 외부 팽창량을 확인하였으며 일정한 확장율을 보였다. 이는 2차 모델 시험보다 양호한 결과이며, 이 결과를 토대로 토크시험 시 1,200 Kg.cm 이상의 풀림방지 성능을 나타내었다.

3.4 수치모사에 의한 팽창 특성 해석[4]

M10 폭발 볼트 해석은 화약이 볼트 중앙에 삽입되므로 축대칭으로 가정하여 2D 모델을 사용하였으며, 화약량을 비롯한 경계조건 등 전반적인 해석 환경은 동일하게 유지하며, 데토 깊이에 따라 4가지의 경우에 대해 해석을 수행하였다. 구속조건으로 폭발 볼트 머리 끝 단에 모든 자유도를 구속하였다.

M20 폭발 볼트는 화약이 볼트 중앙에서 편심되게 삽입되므로 1/2대칭으로 가정하여 3D 모델을 사용하였으며, 화약량에 따라 5가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 구속조건으로 폭발 볼트 머리 끝 단에 모든 자유도를 구속하였다.

M10과 M20 폭발 볼트 모두, 실험 결과와 해석 결과는 거의 동일한 추이를 보이며, 오차율도 최대 3% 를 넘어서지 않고 있다.

이와 같은 안정적인 수치 모사 결과를 도출함으로써, 차후에는 목적 및 환경에 따라 다양한 크기 및 성능으로 생산될 풀림 방지 볼트의 선행 검증 기준을 할 수 있는 수단을 갖게 되었다.

M10 모델은 화약이 볼트 중앙에 삽입되므로 축대칭으로 가정하여 2D 모델을 사용하였으며, 화약량을 비롯한 경계조건 등 전반적인 계산 환경은 동일하게 유지하며, detonator 깊이에 따라 4가지의 경우에 대해 계산을 수행하였다.

Table 3은 M10 폭발 볼트의 계산 결과이다. 기재된 수치는 10곳의 Gauge Point 중 볼트의 확장이 가장 크게 나타난 2곳의 Gauge에서의 평균값이다. 실험 결과와 계산 결과가 최대 2% 를 넘지 않는 근소한 차이를 보일 뿐만 아니라, 깊이에 따른 확장율의 가감 또한 매우 유사한 추이를 보이며 나타나고 있다. 각 경우 별 폭발

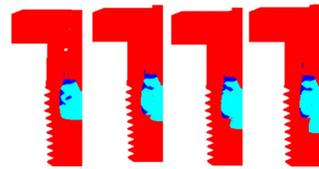


Fig. 10 Change in shape (from left CASE 1, 2, 3, 4)

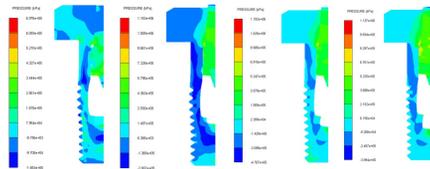


Fig. 11 Pressure distribution of each case (from left CASE 1, 2, 3, 4)

Table 3. Comparison results of experiments and analysis

데 토 깊 이 [mm]	실험 결과			해석 결과			오차율 [%]
	시 험 전 [mm]	시 험 후 [mm]	확 장 율 [%]	폭 발 전 [mm]	폭 발 후 [mm]	확 장 율 [%]	
0	7.99	9.07	113.	8.04	9.03	112	0.8
1	7.99	8.99	112	8.04	8.88	110	1.8
2	8.00	8.80	110	8.04	8.75	108	1.8
3	8.00	8.57	107	8.04	8.66	107	0

$$\text{오차율}[\%] = \frac{|\text{확장율(실험치)} - \text{확장율(해석치)}|}{\text{확장율(해석치)}} \times 100$$

이후의 변위 및 압력 분포의 결과를 각각 Fig. 10과 Fig. 11에 제시하였다.

M20 폭발 볼트는 화약이 볼트 중앙에서 편심되게 삽입되므로 1/2대칭으로 가정하여 3D 모델을 사용하였으며, 화약량에 따라 5가지 경우에 대해 계산을 수행하였다.

Table 4는 M20 폭발 볼트의 계산 결과를 정리한 것이다. 화약량에 따라 전체 5 경우의 계산을 진행하면서, 앞서 설명한 10군데의 Gauge에서 측정을 하였으며, 기재된 수치는 Gauge Point 중 볼트의 확장이 가장 크게 나타난 지점이다. 또한, 2D 축 대칭으로 진행함으로 인해 볼트의 좌, 우측 변위가 동일하다고 가정한 M10의 경우와는 달리, 좌, 우측으로 대칭되어 위치한 두 곳의 Gauge에서의 값을 합산하여 기재하였다. 폭발 이후 볼트의 변화 형상을 Fig. 12에 나타내었다.

Table 4. Comparison results of experiments and analysis

화약량 [mg]	실험 결과			해석 결과			오차율 [%] 실험치/해석치
	시험 전 [mm]	시험 후 [mm]	확장율 [%]	폭발 전 [mm]	폭발 후 [mm]	확장율 [%]	
110	16.7	17.6	105	17.3	18.8	109	3.6
120	16.7	17.8	106	-	-	-	-
130	16.7	17.8	106.	17.3	19.0	110	3.6
140	16.7	17.9	106	-	-	-	-
150	16.7	18.0	107	17.3	19.1	110	2.7
160	16.7	18.1	108	-	-	-	-
170	16.7	18.2	109	17.3	19.2	111	1.8
180	16.6	18.3	109	17.3	19.5	112	2.6

$$\text{오차율}[\%] = \frac{|\text{확장율(실험치)} - \text{확장율(해석치)}|}{\text{확장율(해석치)}} \times 100$$



Fig. 12 Shape of change (from left 110, 130, 150, 170, 180 mg)

#### 4. 팽창률 제어

##### 4.1 볼트 내부 형상에 따른 팽창률

볼트 몸체의 팽창률을 결정하는 인자는 볼트의 재료, 경도 및 형상, 화약종류, 화약량, 충전위치, 충전압력, 공이물치 형상 및 재료 등 다양하다. 하지만 본 논문에서는 볼트 재료와 화약 종류, 충전 압력, 충전 위치를 결정하고 나머지 인자를 조합하여 팽창률을 제어할 수 있는 기술을 획득했다. Fig. 13은 볼트 몸체의 내부 형상에 따른 동일 조건의 화약량과 공이물치를 사용하였을 경우의 팽창률이다.

##### 4.2 화약량에 따른 팽창률 볼트

직경 24 mm 고장력 볼트를 이용하여 약량별 팽창률을 확인하였다. Table 5에서 보듯이 일정 화약량 이하일 경우 부피 팽창이 일어나지 않았다. 이는 볼트 몸체 재질의 특성으로 부피 팽창이 일어나는 화약량 이상일 경우 화약량에 비례

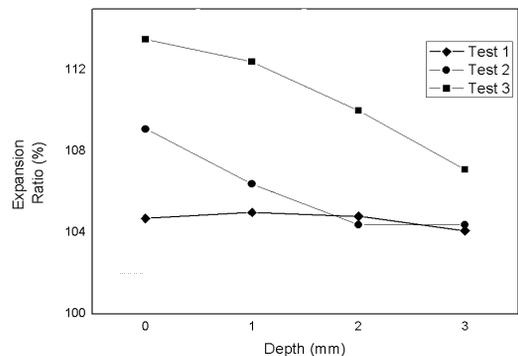


Fig. 13 Expansion rate depending on the inner shape of bolt

Table 5. Expansion rate of bolt out diameter on explosive amount

번호	화약량	팽창 후 외경	팽창률(%)
1	a	23.96	변화없음
2	a	23.98	변화없음
3	b	24.51	2.1
4	b	24.68	2.8
5	c	24.72	3.0

하여 부피가 팽창되는 것을 확인할 수 있다. 고장력볼트의 경우 강도가 매우 높아 일반 steel 재질의 볼트에 비해 팽창률이 상대적으로 낮았다.

### 5. 풀림방지 성능 측정

#### 5.1 팽창률에 따른 풀림 토크 측정

설계인자 조건에 따른 볼트몸체의 팽창률을 확인하고 팽창률에 따른 풀림 토크를 측정함으로써 팽창률과 풀림토크 값의 관계를 확인하였다. Fig. 14는 토크 측정 장비이다. 토크 측정장비에 볼트 머리부를 고정하고, 볼트와 연결되어있는 너트를 토크시험 장비를 통해 일정하게 유지하였을 때 너트의 풀림현상으로 나타나는 값을 측정하였다. Table 6은 약량 별 측정값이다.

이를 통해 화약량에 따른 풀림방지 볼트의 토크 추이를 알 수 있었다. 또한, Table 6에서 보는 바와 같이 풀림토크를 넘어서 너트가 풀

림이 시작하더라도 일정 값 이상의 값을 계속 유지하는 것을 알 수 있었다.

이는 다른 풀림방지 기능에서는 나타나지 않으며, 다른 풀림방지에서는 풀림토크 값을 넘어서면 바로 토크가 상실 된다. 본 시험으로 풀림방지기능이 한층 강화돼 있다는 것을 알 수 있었다.

#### 5.2 시험규격에 따른 풀림방지 성능 시험

기존 풀림방지 장치와의 성능비교를 위하여 현재 풀림방지 성능평가에 가장 보편적으로 적용되는 시험규격 NAS 3350과 KS R 9168으로 시험을 진행하였다. Fig. 16은 M10의 NAS 3350 규격, Fig. 17은 M20의 NAS 3350 규격에 의한 시험 전후 외관이다. 시험결과, 볼트 풀림현상이 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다.

KS R 9168은 NAS 3350보다 더욱 가혹한조건인 진동 규격으로써 주로 철도 레일 결합성능 확인에 적용되고 있다. M20 볼트의 적용 분야 가운데 하나인 철도 레일용 규격을 만족하는지

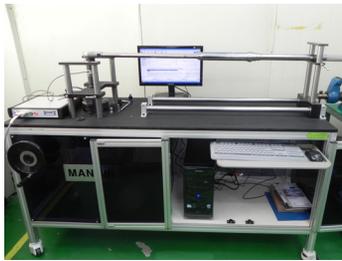


Fig. 14 Torque detection equipment

Table 6. Release Torque vs. explosives amount

약량 (RDX) (mg)	풀림토크 (Nm)	풀림토크후 유지토크(Nm)
110	151	40
120	155	50
130	160	65
140	172	70
150	192	80
160	219	120
170	241	160
180	273	170

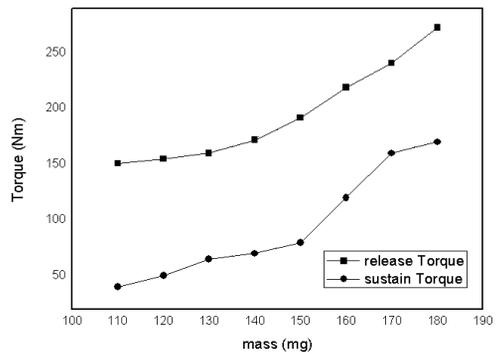


Fig. 15 Torque value and expansion rate depending on explosives amount



Fig. 16 The morphology of M10 before and after NAS3350 test

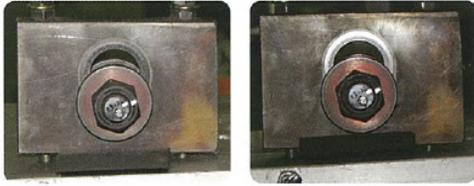


Fig. 17 The morphology of M20 before and after NAS3350 test



Fig. 18 The morphology of M20 after KS R9186 test

여부를 확인하기 위하여 시험을 수행하였으며, 그 결과, Fig. 18에서 보는 바와 같이 시험 후 풀림이 발생하지 않았다.

## 6. 결 론

볼트 몸체 특정 부위 팽창을 이용한 풀림방지의 기능을 갖는 볼트에 대한 연구를 수행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 응력해석과 실제 인장시험을 통하여 풀림방지볼트의 구조적 결합강도가 일반볼트와 동일하다.
2. 수치모사 결과와 실제 시험치와의 오차가 M10의 경우 2% 이내, M20의 경우 4% 이내로 나타난다.
3. 팽창률에 따른 풀림 토크값을 측정하여 상호 연관성을 확인한 결과, 일정 팽창영역에서 팽창률이 클수록 풀림 토크값이 커진다.
4. 볼트 내부의 화약 폭발에 의해 가해진 충격은 볼트의 구조적인 안전성과 결합강도에 영향을 주지 않는다.
5. 풀림 방지 볼트는 팽창률에 따라 풀림값을 조절할 수 있어 다양한 조건에서도 팽창률 제어를 통하여 사용할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 김동진, "화약폭발력을 이용한 풀림방지볼트," 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2010, pp.1128-1130
2. 박성혁, 김동진, "화약을 이용한 풀림방지 볼트의 특성 평가에 관한 결과 보고서," 포항공과대학교, 2010, pp.25-37
3. 김동진, 이용조, 강원규, 이정복, "볼트몸체 팽창률 제어를 통한 풀림방지 볼트 개발," 한국추진공학회 추계학술대회, 2010, pp.523-526
4. N. K. Bimbaum, M.S. Cowler, AUTODYN User Manual, 1997