

# 개방형 프레임 구조물의 볼트 조인트 강도설계

이진민<sup>†</sup> · 이민욱<sup>\*</sup> · 조수길<sup>\*</sup> · 구만회<sup>\*\*</sup> · 김학인<sup>\*\*</sup> · 이태희<sup>\*\*\*</sup>

## Strength Design of Bolt Joints for an Open Frame Structure

Jin Min Lee, Min Uk Lee, Su Kil Cho, Man Hoi Koo, Hak In Gimm and Tae Hee Lee

**Key Words :** Open frame structure(개방형 프레임 구조물) Bolt joint(볼트조인트), Bolt strength analysis(볼트강도해석)

### Abstract

An open frame structure is fastened by bolt joints for strength and shock attenuation. Therefore the full finite element model of an open frame structure should be properly modeled including bolt joints for strength analysis of the frames and joint assemblies which are operated under multi-loading conditions such as driving, drop, inertia and torsional loads. Then the joints and frames must satisfy the specified allowable strength constraints. Because the full finite element model has a large number of elements to perform strength analysis, a detailed fine bolt analysis seems to be very expensive. Therefore bolts of the full finite element model are approximately modeled by constraints equations to constrain degree of freedoms between adjacent nodes. However, the constraints equation method can exaggerate stress results at the constrained nodes. Thus a detailed bolt analysis and a theoretical/experiential formula of bolts for a worst bolt joint are performed using reaction force applied both bolt and bolt joint. Finally, the results from the two methods are compared and discussed to verify the safety of the open frame structure.

### 기호설명

- $F_{Axial}$  : 볼트의 축방향 하중(axial force of bolt)  
 $F_{Shear}$  : 볼트의 전단 하중(shear force of bolt)  
 $K_B$  : 볼트의 강성(stiffness of bolt)  
 $K_J$  : 조인트의 강성(stiffness of joint)  
 $K_t$  : 응력집중계수(stress concentration coefficient)  
 $F_p$  : 예하중(preload)  
 $L_X$  : 외부하중(external load)

### 1. 서론

전투시에 사용되는 차량은 보통 주행 시 발생하는 다양한 하중조건에 대해 구조적으로 안정성을 확보하며, 피탄 공격이나 폭발에 의한 충격과 및 파편에 의한 피해를 최소화하는 설계가 요구된다.

기존의 전투용 차량은 두꺼운 판재만 용접하여 연결하기 때문에 구조적으로 안정성은 확보되지만 피탄이나 폭발에 의한 충격과 전달(shock propagation)에 의한 인적, 물적 피해가 상대적으로 컸다.

이와 같은 내충격 문제를 해결하기 위해 최근에는 Fig. 1 과 같이 알루미늄 프레임과 베이스 구조(base structure)에 의한 기본형상에 패널 및 다양한 조인트(joint) 기술에 의해 내충격성이 강화된 구조 설계 방법을 이용하여 구조적인 안정성은 확보하면서 피탄이나 폭발에 의한 충격과 전달을 최소화하는 개방형 구조설계가 수행되고 있다.

---

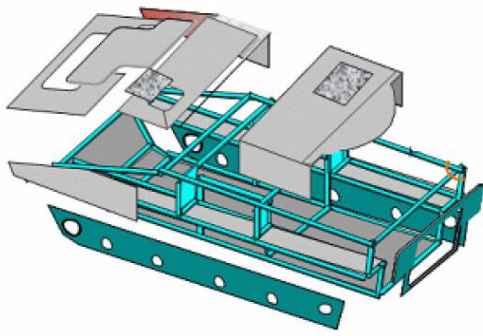
<sup>†</sup> 한양대학교 기계기술연구소  
E-mail : jmlee79@hanyang.ac.kr

<sup>\*</sup> 한양대학교 대학원 자동차공학과

<sup>\*\*</sup> 국방과학연구소

<sup>\*\*\*</sup> 한양대학교 기계공학부

---



**Fig. 1** Frame-panel structure

University of Nevada Las Vegas(UNLV)의 Army Research Lab.에서 개방형 구조설계에서 사용되는 볼트조인트에 대한 실험과 해석을 통해 용접에 비해 볼트조인트의 우수한 내충격성을 검증하였고,<sup>(1)</sup> 유한요소모델(finite element model)을 이용한 볼트조인트의 설계를 수행하였다.<sup>(2)</sup>

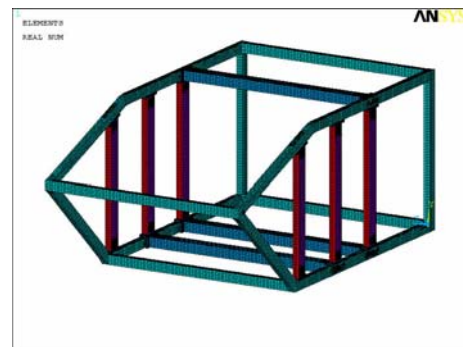
본 연구에서 볼트조인트를 설계하기 전에 프레임 구조물(frame structure)의 설계가 선행되어야 한다. Lim 과 Yoo 등은 주행 시 발생하는 다양한 하중조건에 대해 위상최적설계(topology optimization)를 이용하여 프레임 멤버를 배치하고, 최적설계(design optimization)를 통해 프레임 단면의 형상 및 두께를 결정하였다.<sup>(3)</sup>

본 논문에서는 다양한 하중조건에 대하여 프레임 구조물의 볼트조인트 설계 및 검증을 수행하기 위해 프레임과 볼트조인트의 전체 유한요소모델(full finite element model)을 구현한다. 전체 유한요소모델은 요소(element) 개수가 많아 상세한 볼트 해석을 수행하기가 어렵기 때문에 전체 모델에서 볼트의 체결은 자유도 구속 기법을 통해 근사적으로 해석을 수행하여야 한다. 실제 볼트는 나사산(screw thread)의 다수의 사면이 조인트의 나사산과 접촉하는 반면에 자유도 구속 기법은 한정된 절점(node)에서만 강제체결로 연결되어 있기 때문에, 자유도가 구속된 절점에 과장된 응력값이 예측된다. 실제 볼트에 작용하는 응력을 잘 모사할 수 있는 정확한 응력값을 얻기위해 가장 위험한 대표 볼트조인트를 선정해 볼트와 볼트조인트에 작용하는 반력(reaction force)을 통해 상세 볼트해석과 볼트 이론/경험식<sup>(4-7)</sup>으로 도출한 응력값을 분석하여 프레임 구조물의 안정성을 검증하고, 설계안을 제시한다.

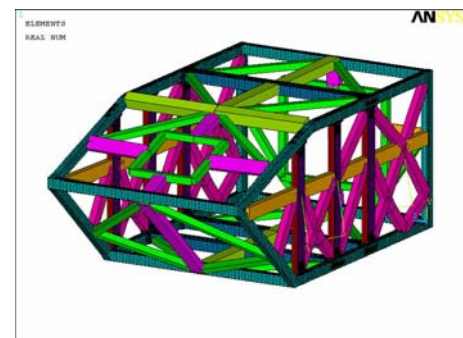
## 2. 프레임 구조물의 전체 유한요소모델 해석

### 2.1 프레임과 볼트조인트 형상

프레임 구조물의 기본적인 형상을 유지하기 위해 주 프레임(main frame)은 용접을 통해 연결을 하고, 현가장치(suspension system)가 연결되어 있는 프레임과 보강재 역할을 하는 프레임은 옆 부분의 패널(side panel)에 가해지는 피탄 또는 폭발의 충격에 의한 충격파의 전달을 최소화하며, 조립 및 해체가 가능하도록 볼트조인트로 연결한다. Fig. 2 와 같이 현가장치가 직접 연결되어 있어 주행중의 주행, 낙하, 관성, 비틀림 하중을 직접 받거나 영향을 많이 받을 것으로 예측되는 프레임과 볼트조인트는 각각 셸요소(shell element)와 솔리드요소(solid element)로 전체 유한요소모델을 구현한다. 또한 나머지 프레임들은 Fig. 3 과 같이 빔요소(bean element)를 이용하여 연결한다. Fig. 4 는 프레임과 프레임을 연결하는 T 모양의 볼트조인트 형상 및 보조 프레임 연결상태를 나타낸다.



**Fig. 2** Full finite element model of frames and joints using shell and solid elements



**Fig. 3** Connection of other frames using beam elements

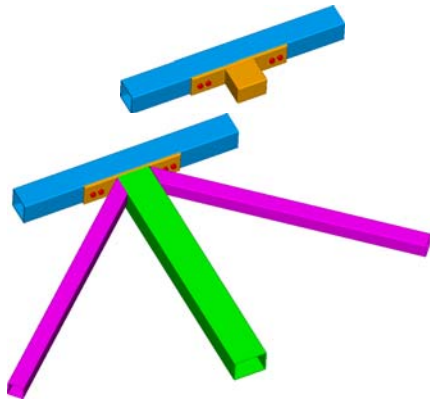


Fig. 4 Shape and layout of frame and bolt joint models

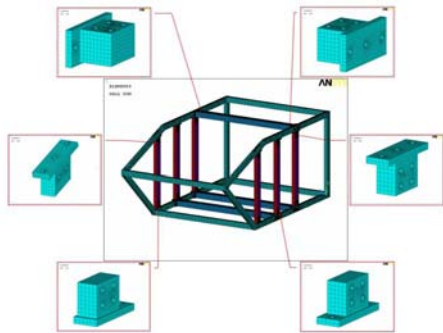


Fig. 5 Bolt joints of full finite element model

Table 1 Material property of aluminum and steel

	Aluminum	Steel
Young's modulus (GPa)	71.9	200
Poisson's ratio	0.33	0.29
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2850	7850

Fig. 5 는 위치에 따른 볼트조인트의 형상을 나타낸다. 전체 개방형 프레임 구조물은 총 18 개의 볼트조인트로 구성된다. 모든 프레임과 볼트조인트의 재료는 알루미늄(aluminum)이고, 볼트의 재료는 Class 번호 10.9 의 철(steel)이다. Table 1 은 각 재료들의 물성치를 나타낸다. 허용응력은 각 재료의 최소 보증강도와 항복강도를 고려하여 알루미늄 재료는 330MPa, 볼트 재료는 1000MPa 로 선정한다.

2.2 프레임 구조물의 전체 유한요소모델의 해석  
볼트조인트의 구멍은 볼트로 체결되어 구조물을 지탱하며 주행중의 다양한 하중조건에 대해 구조적인 안정성을 확보해야 한다. 여기서 6 개의 주행하중, 낙하하중, 전후 관성하중, 좌우 관성하중, 4 개의 비틀림 하중 등 총 13 개의 하중조건이 적용된다. 또한 볼트의 머리(head)부분이 구조물의

외부로 노출되면 피탄과 폭발의 충격에 큰 피해를 입을 수 있기 때문에 볼트의 머리는 구조물의 내부에 위치할 수 있도록 볼트조인트를 설계한다.

전체 유한요소모델의 요소의 개수는 약 12 만개 이고, 차후에 최적설계에도 이용되기 때문에 18 개의 볼트조인트에 대해 상세 볼트해석을 수행하기 어렵다. 따라서 볼트와 볼트조인트의 체결 방법은 절점들 간의 자유도를 구속시키는 구속식(constraints equation) 방법을 이용한다.

13 개의 하중조건에서 프레임과 볼트조인트에서 발생하는 최대 분미세스 응력(maximum von Mises stress) 결과를 Table 2 에 나타낸다. 6 개의 주행하중과 낙하, 전후 관성, 좌우 관성하중에 대하여 프레임과 조인트, 볼트 모두 허용응력을 현저하게 위배한다. 하지만 볼트와 볼트조인트 간의 자유도 구속은 강제적인 체결이기 때문에 자유도가 구속된 절점에서 과장된 응력값이 예측된다.

실제 상세 볼트 조인트 응력해석은 가장 위험한 대표 볼트조인트에 대하여 수행한다. Fig. 6 은 선정된 대표 볼트조인트의 위치를 나타낸다. 자유도 구속 기법을 이용한 절점체결 시에도 볼트 조인트에 작용하는 반력의 합력은 실제 볼트체결과 유사하다는 생 베낭의 원리(Saint Venant's principle)를 가정하여 각 하중조건에 대하여 볼트와 볼트조인트에 작용하는 반력을 도출한다. 이 반력을 상세 볼트모델의 외력으로 작용하여 볼트 조인트 상세 해석을 수행하고 볼트 이론/경험 식을 통해 볼트와 볼트조인트에 작용하는 분미세스 응력결과와 비교한다.

Table 2 von Mises stress results with respect to various loading conditions

Load	Aluminum & Steel	
	Al (330Mpa)	St (1000Mpa)
Driving_1	2472	5551
Driving_2	2481	5554
Driving_3	1254	3132
Driving_4	1252	3136
Driving_5	1133	2914
Driving_6	1131	2910
Drop	2760	8761
Inertia_FR	1269	2199
Inertia_RL	3505	7226
Torsional_1	109	279
Torsional_2	110	279
Torsional_3	94	239
Torsional_4	95	239

Unit : MPa

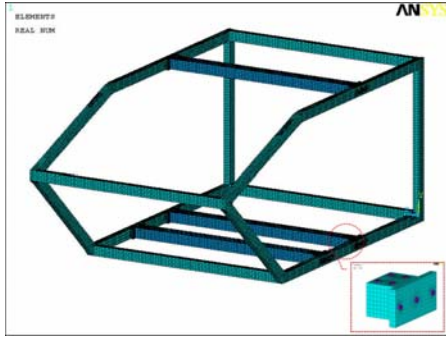


Fig. 6 Location of representative bolt joint

대표 볼트조인트는 주 프레임과 하부 프레임 (bottom frame)을 연결하는 조인트로 6 개의 주행하중과 낙하, 전후 관성, 좌우 관성하중에 대하여 볼트와 볼트조인트 모두 허용응력을 위배하며 주행하중 5 번과 6 번, 전후 관성하중에 대하여 최대 위배응력이 작용하는 조인트이다.

### 3. 볼트 이론/경험식에 의한 응력결과

볼트에 작용하는 응력은 크게 축방향(axial), 전단(shear), 비틀림(torsional) 응력으로 나눌 수 있다. 이 중 비틀림 응력은 다른 응력에 비해 작은 값이고, 윤활 등의 방법으로 감소시킬 수 있기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않고, 축방향, 전단 응력만 고려하여 응력결과를 분석한다.

#### 3.1 예하중의 적용

볼트에 작용하는 응력은 외부 하중 외에도 예하중에 큰 영향을 받는다. 예하중은 볼트 체결 시 미리 하중을 주어 볼트에는 인장하중을, 조인트에는 압축하중을 적용시키는 방법이다. 예하중은 안전계수를 고려하여 볼트 보증강도의 40~65% 주는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 볼트의 재질이 비교적 우수한 10.9 Class 를 사용하기 때문에 보증강도의 50% 에 해당하는 예하중을 적용한다.

#### 3.2 축방향 응력의 계산

예하중이 적용된 볼트의 축방향 응력을 계산하기 위해서 식(1)과 같이 축방향 하중을 구한다.<sup>(6,7)</sup>

$$F_{Axial} = F_P + \frac{K_B}{K_B + K_J} + L_X \quad (1)$$

$F_P$  는 예하중이고,  $L_X$  는 외부하중이다.  $K_B$  와  $K_J$  는 각각 볼트와 조인트의 강성을 나타내고 식 (2)와 같다. 볼트의 강성계수는 인장봉의 처짐 식으로부터 유도되고, 나사산이 있는 부분과 없는 부분의 강성으로 분리하여 계산된다.<sup>(6,7)</sup>

$$\frac{1}{K_B} = \frac{1}{\frac{l_t}{A_t E_t} + \frac{l_s}{A_s E_s}}, \quad K_J = d E A e^b \left( \frac{d}{l_m} \right) \quad (2)$$

여기서 아래첨자  $t$  는 나사산이 있는 부분이고,  $s$  는 없는 부분이다.  $d$  는 볼트지름이고,  $l_m$  은 조인트의 조임길이이다.  $E$  는 물체의 탄성계수이고, 계수인  $A$  와  $b$  는 재질의 푸아송 비  $\nu$  에 따라 다르며  $A = 0.79670$ ,  $b = 0.63816$  을 사용한다.<sup>(7)</sup>

#### 3.3 볼트 머리의 응력집중

볼트에 걸리는 응력을 이론적으로 계산할 때 일정하다는 가정을 하게 된다. 하지만 볼트 형태의 특성상 응력집중현상이 발생하고 이를 고려해야 한다. Fig. 7 은 실제의 응력분포를 나타낸 것으로 가운데 부분의 응력 분포보다 더 높은 곳이 존재하는 것을 알 수 있다. 특히 볼트머리의 끝단 부분과 나사산이 존재하는 부분에 큰 응력집중현상이 일어난다. 그 중 볼트머리 부분의 응력집중이 조금 더 크므로 본 연구에서는 볼트머리의 응력집중만을 고려하였다.

식 (3)은 응력집중을 고려한 응력이다. 응력집중계수인  $K_t$  는 볼트머리 지름  $d$  와 볼트머리와 볼트 Shank 부분의 라운딩(rounding) 되어있는 반지름  $r$  의 함수이다.<sup>(6,7)</sup>

$$\sigma = K_t \sigma_{Axial}, \quad K_t \cong A \left( \frac{r}{d} \right)^b \quad (3)$$

#### 3.4 전단응력의 계산

Z 축이 볼트길이 방향의 축이고 X, Y 축이 볼트길이 방향에 수직인 축이라 가정한다. X 축과 Y 축의 합력과 수직력에 의한 마찰력의 차이가 전단력을 발생시킨다. 이를 식으로 표현하면 식 (4)와 같다.<sup>(6,7)</sup>  $\mu$  는 마찰계수이다.

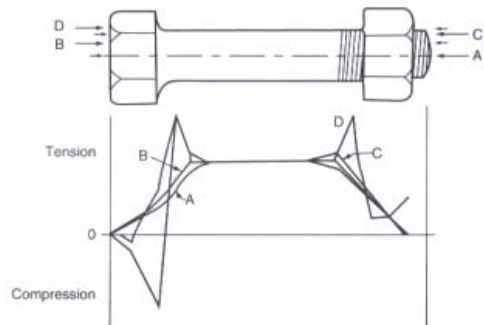


Fig. 7 The magnitude of the tensile stress along four lines parallel to the axis of the bolt

$$F_{\text{Shear}} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} - \mu \times F_{\text{Axial}} \quad (4)$$

전단 하중에 볼트의 단면적을 나누면 전단응력을 구할 수 있다.

### 3.5 조인트에 작용하는 응력 계산

볼트의 나사산과 맞물리는 조인트의 나사산 역시 응력집중현상이 발생하는 부분 중 하나이다. 특히 이번 연구에서 조인트의 재질이 알루미늄이기 때문에 볼트의 나사산보다 더 낮은 응력에서 파손이 일어날 수 있다. 조인트의 나사산에 작용하는 응력은 나사산의 개수에 영향을 받으며 나사산이 많을수록 응력은 분산되는 효과가 있다. 이를 정리하면 식 (5)와 같다.<sup>(5)</sup>

$$\sigma = \frac{4P}{\pi(d^2 - d_i^2)} \frac{p}{t} \quad (5)$$

여기서  $P$  는 외부의 하중,  $p$  는 피치(pitch),  $t$  는 나사산의 개수이다.

### 3.6 이론 계산의 결과

주행, 낙하, 관성, 비틀림등의 여러 조건의 하중에 대해서 이론식을 계산하였다. Table 3 은 최대 본미세스 응력을 보이는 관성하중에 대한 결과를 볼트의 중간 부분과 응력집중 현상이 발생하는 볼트 머리부분, 조인트 부분으로 나타내었다. 상대적으로 볼트 머리에 큰 응력이 작용하는 것을 볼 수 있다. 관성하중 적용 시 볼트의 머리부분에 899MPa 의 응력이 작용하며 허용응력 1000MPa 에 대해 안전계수는 1.2241 이므로 안전한 설계라 볼 수 있다.

## 4. 상세 볼트해석에 의한 응력결과

가장 위험할 것으로 예측되는 볼트조인트의 볼트 이론/경험식을 이용한 응력결과를 보면 볼트의 머리부분에 응력집중이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 응력결과가 모두 허용응력을 만족한다. 이러한 결과를 검증하기 위해 볼트와 조인트의 상세 유한요소모델을 구축하고 해석을 수행한다. Fig. 8 은 해당 조인트의 유한요소모델이다.

Fig. 9 는 상세볼트해석의 과정과 응력분포를 나타낸다. 첫째 볼트에 작용하는 예하중을 온도분포로 대체하여 열응력 해석을 수행한다. 이 기법은 볼트에 예하중을 적용하는 기법 중 비교적 손쉽게 예하중 상태의 응력분포를 모사할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 예하중은 이론/경험식의 계

산과 마찬가지로 보증강도의 50%로 하였다.

둘째 볼트에 걸린 응력분포를 이용하여 볼트가 체결된 상태의 접촉해석을 수행한다. 볼트와 프레임, 프레임과 조인트간에 접촉 조건을 주어 해석을 수행하였다. 이때 볼트의 나사산이 나있는 부분과 조인트 간의 연결은 이론식상에서 볼트 머리부분보다 안전하다고 생각 되기 때문에 이 부분은 자유도 구속을 통하여 모델링 하였다.

셋째 응력해석을 수행한 상태에서 전체 모델의 해석에서 구한 조인트의 반력을 이용하여 하중을 가한다. 이러한 과정을 거쳐서 조인트와 볼트에 작용하는 응력을 구한다.

Table 3 에서 이론/경험식에 의한 응력과 상세 볼트해석에 의한 응력을 비교한다. 두 응력결과 모두 허용응력 이내의 응력수준을 보이며 유사한 경향성을 보인다. 유한요소해석의 결과와 경험식의 결과의 차이는 최대 15%정도를 나타내고 있다.

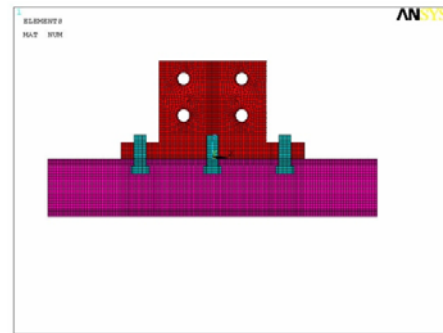


Fig. 8 Finite element model of bolt joint

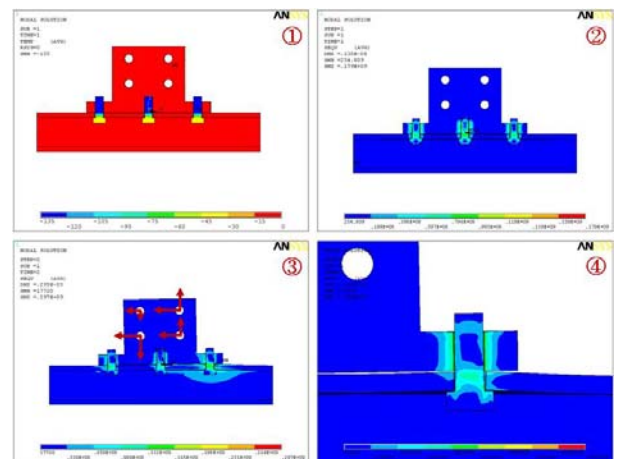


Fig. 9 Procedure and stress distribution of detailed bolt analysis

**Table 3** Comparison of maximum stress on the joint by theoretical/experimental formula and detailed structure analysis

	Bolt (MPa)	Head(MPa)	Joint(MPa)
Empirical Formula	446	899	272
FE Analysis	515	760	270
Error (%)	15	15	0.7

## 5. 결론

본 논문에서는 볼트조인트가 포함되는 유한요소 모델에서의 볼트조인트의 응력수준을 검증하는 기법을 제안하였다. 그 과정은 다음과 같다.

(1) 자유도 구속 기법을 통하여 볼트조인트로 연결되어있는 전체 유한요소 모델을 해석한다.

(2) 가장 위험한 볼트조인트의 반력을 도출한다.

(3) 반력을 이용하여 볼트의 이론/경험식으로 응력을 계산한다.

(4) 반력을 이용하여 볼트의 상세 응력해석을 수행한다.

(5) 경험식과 상세 유한요소모델을 통하여 구한 응력의 크기가 매우 유사함을 확인하였다.

이와 같은 과정을 통하여 볼트조인트에 걸리는 응력수준을 검증하였으며, 본 연구의 하중조건하에서는 볼트조인트가 안전하게 설계되었음을 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 국방과학연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Samaam Ladhany, Brendan. J. O'Toole, Qunli Liu, Kumarswamy Karpanan, Masoud Feghhi, Karthik Doppola, A. Frydman and TingHo Li, 2005, "General Ballistic Shock Modeling Issues(Task BS-3)," *Technical Review*.
- (2) Mohamed B. Trabia, Brendan. J. O'Toole, Samaam Ladhany, Jinhua Huang, Jagannadha Rao Naraparaju, Umakanth Sakaray, Srujanbabu Sridharala, Morris Berman, Michael Minnicino and Sarah Wolf, 2005, "Vehicle Joint Design for Vehicle Joint Design for Shock Mitigation (BS4b)," *Technical Review*.
- (3) Hong Seok Lim, Hong Hee Yoo, Hak In Gimm and Man Hoi Koo, 2008, "Study of Impact Energy Propagation Phenomenon and Modal Characteristic of an Armor Vehicle Undergoing High Velocity Impact," *4th Asian Conference on Multibody Dynamics 2008*, pp. 285-291.
- (4) Norman E. Dowling, 1999, "Mechanical Behavior of Materials." *Prentice Hall*, pp. 245~273.
- (5) Robert C. Juvinall and Kurt M. Marshek, 2006, "Fundamentals of Machine Component Design," *Wiley*, pp. 399~402.
- (6) John H. Bickford, 2008, "Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints," *CRC Press*, pp. 41~48, 219~247, 443~466.
- (7) Robert L. Norton, 2000, "Machine Design," *Prentice Hall*, pp. 875~940.