

ANSYS를 이용한 전투차량 유압장치 구조강도 개선 연구

김혜은¹, 배공명^{1*}, 오은빈¹, 사공재²
¹국방기술품질원, ²한화에어로스페이스

A Study on the Structural Strength Improvement of Hydraulic System for Combat Vehicle using ANSYS

Hyeeun Kim¹, Gongmyeong Bae^{1*}, Eunbin Oh¹, Jae Sakong²
¹Defense Agency for Technology and Quality
²Hanwha Aerospace

요약 군용 전투차량은 무기체계 탑재 및 대용량 물자 수송이 가능한 다목적 전술 차량으로, 일반차량보다 더 가혹한 주행조건에서 운용된다. 이러한 환경에서 사용되기 위하여 적용되는 부품들은 고도의 신뢰성과 내구성이 요구된다. 특히 전투차량의 유압장치는 차량의 유압원 공급장치로, 내부 볼트파손 시 유압 누유로 인해 대형사고로 이어질 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 전투차량 유압장치에서 야전 운용 간 다발적으로 발생한 볼트파손의 원인을 분석하고 이를 해소하기 위한 개선방안을 수립하고자 하였다. 볼트파손에 대한 원인검토를 통하여, 전투차량 주행 방향의 수직축 방향에서 안전율이 1.0 이하로 구조적 취약성이 확인되었다. 이는 전투차량 주행 간에 발생하는 진동에 인한 것이다. 유압장치 구조강도 개선을 위하여 볼트의 수직축 방향 처짐에 의한 진동 발생을 억제하고자 하였다. 이에 따라 처짐 방지를 위한 브래킷을 추가하였으며, 볼트 체결 길이를 변경하였다. 개선사항에 대한 신뢰성은 구조해석과 체계입증시험을 수행하여 입증되었다. 본 연구에서 수행한 유압장치 구조강도 개선은 향후 유사무기체계에 대한 고장분석 및 설계에 참고자료가 될 것으로 기대된다.

Abstract Military combat vehicles are multi-purpose tactical vehicles that can be equipped with weapons systems, transport large-capacity supplies, and operate under harsher conditions than ordinary vehicles, and thus the components of such vehicles must be highly reliable and durable. If an internal bolt in the hydraulic system is fractured, hydraulic fluid could cause a significant accident. In this study, we analyzed the causes of bolt fracture in the hydraulic systems of combat vehicles during field operations. Structural analysis showed a safety factor of < 1.0 in the direction, which indicated structural vulnerability, and it was considered that vibration had caused bolt fracture. To improve the structural strength of the hydraulic system, we suppressed the vibration causing the bolt to move perpendicularly to the direction driven. A bracket was added to prevent sagging, and bolt fastened length was changed. The reliability of the design was verified by structural analysis and system applicability. The improved structural strength of the hydraulic system achieved is expected to serve as a reference for failure analysis and the design of similar weapons systems.

Keywords : Combat Vehicle, ANSYS, Fatigue, Structural Analysis, Safety Factor

*Corresponding Author : Gongmyeong Bae(Defense Agency for Technology and Quality)

email: gmbae@dtaq.re.kr

Received August 30, 2022

Accepted November 4, 2022

Revised October 14, 2022

Published November 30, 2022

1. 서론

전투차량에서 유압장치는 유압 펌프 조립체, 유압식 다기관조립체, 유압 저유기 조립체 등 다양한 구성품으로 구성된다. 유압장치는 유압 펌프 조립체가 구동되어 생성된 동력원으로 다양한 기능을 수행한다. 야전에서 동시다발적으로 발생한 볼트파손은 유압식 다기관조립체 내부에서 발생하였다. 다기관조립체는 전기적 신호 및 수동조작으로 캡 상승 및 하강을 위한 유압원을 공급하는 기능을 수행한다. 또한 비상시 전투차량의 지지력을 수동으로 상승 작동시킬 수 있다. 따라서 내부 볼트파손 시 유압 누유로 인해 차량 캡의 상승, 하강 조절이 정상적으로 수행할 수 없게 된다.

기계 구조물인 전투차량에서 볼트 체결부의 상태는 전체 구조물의 성능에 많은 영향을 미치게 된다. 응력집중이나 피로 파손 등에 의해 발생하는 볼트 파손이 내구성을 저하시키고 이에 따라 체계 전체의 성능 및 기능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전투차량 유압장치 내부에서 다발적으로 발생한 볼트 파손에 대한 원인검토 및 구조강도 개선을 통하여 체계장비의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 이러한 구조물에서 발생하는 볼트 파손에 대한 연구는 군수분야 뿐만 아니라 민수분야에서도 다양하게 연구되고 있으며, 연구의 목적은 모두 구조적 안정성 확보에 있다[1-5].

본 연구는 Fig. 1과 같은 과정을 거쳐 개선방안을 도출하였다. 먼저 볼트파손에 대한 원인을 파악하기 위하여 유한요소 해석을 실시하였다. 그리고 해석결과를 바탕으로 개선점을 도출하고 설계방향을 수립하였다. 이후 구조해석과 체계입증시험을 수행하여, 모든 기준을 충족하였을 경우에만 개선방안에 대한 신뢰성을 확인하였다.

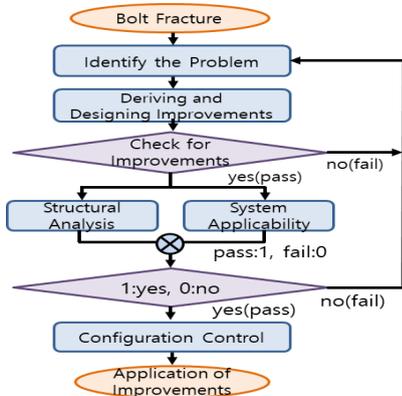


Fig. 1. Flow chart of quality improvements

2. 고장현상 분석

2.1 형상 및 기능

본 연구에서 다루는 전투차량은 Fig. 2와 같은 형상으로, 30톤급 차륜형 차량이며 무기체계 탑재 및 대용량 물자 수송이 가능한 다목적 전술 차량이다. 전투차량은 차량 점검과 정비 용이성을 위해 유압장치를 이용하여 캡 조립체(Cap Structure)를 상승 또는 하강시킨다. 내부 유압회로 작동 및 유압원의 공급은 캡 조립체 후방에 장착되는 다기관조립체(Manifold)를 통해 이루어진다. 다기관조립체는 박스 내부에 기능품 내장형으로 구성되어 있으며, 다기관조립체 아래의 틸팅 조종상자(Tilting Control Box)에서 캡 상승/하강 스위칭을 통해 전기적 신호를 받아 유압원을 공급하게 된다. 또한 유압 파워팩 내 유압라인이 손상될 시 캡이 강제로 하강하는 것을 방지할 수 있도록 안전 스톱퍼가 함께 라인에 구성되어 있다. 다기관조립체는 Fig. 3과 같이 전동모터, 유압호스 및 유압밸브, 레버, 중간블록 등으로 이루어진다.

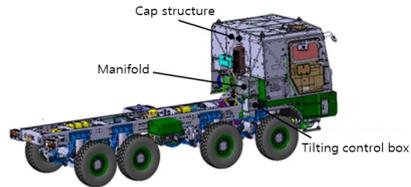


Fig. 2. Configuration of combat vehicle

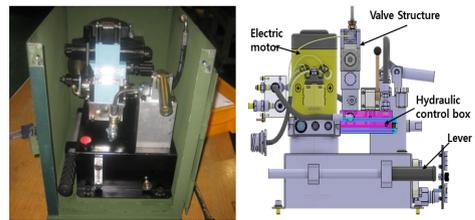


Fig. 3. Figure and 3D modeling

2.2 고장현상

중간블록은 Fig. 4와 같이 전동 모터 하우징에 볼트 3개소로 조립되어 있으며 상단의 밸브 구조물을 지지해주는 역할을 한다. 이러한 볼트 3개소에 대한 파손이 동시다발적으로 발생하였다. 볼트의 파손범위는 전투차량에서 서마다 다르게 나타났지만, 볼트 3개소에 대한 파손유형으로 보아 구조적 취약성을 추정할 수 있다.

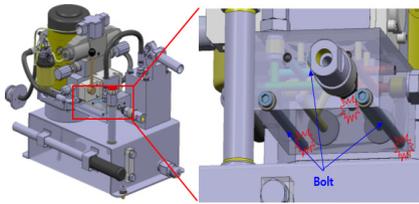


Fig. 4. Details of the interior structure

2.3 구조물 분석

볼트 파손부 구조를 Fig. 5와 같이 분석하였다. 중간 블록의 폭은 약 133 mm로 이를 지지하는 볼트의 140 mm에 긴 길이에 비해 작다. 따라서 볼트를 사용하여 외팔보 형태로 체결할 경우, 볼트 텀부 물림길이는 7 mm로 6산 정도만 체결이 되어 비정상적으로 짧은 상태가 된다. 또한, 중간블록 자체무게 1.4 kg과 블록 상단에 조립된 약 6.7 kg의 밸브 구조물이 수평방향 외팔보의 형태로 총 8.1 kg 하중을 지지하고 있는 구조로 상하 진동에 매우 취약한 구조임을 확인하였다.

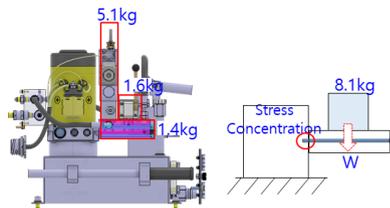


Fig. 5. Structure of bolt fatigue

2.4 파단면 검토

야전에서 볼트가 파단된 유압식 다기관조립체를 분해하여 확인한 파손된 볼트의 파단면은 Fig. 6과 같다. 파손 유형에 육안 관찰 및 체결 구조로 볼 때, 전투차량 주행 중 상하 진동에 의한 파손으로 추정할 수 있다[6,7].

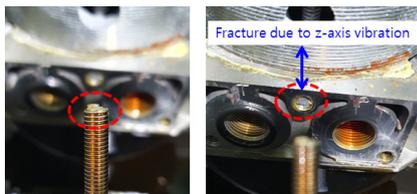


Fig. 6. Details of bolt fatigue

2.5 구조해석

ANSYS를 이용하여 파손된 볼트 3개소에 대한 구조 해석을 수행함으로써 구조적 건정성을 검토하였다. 본

연구에서 이용한 ANSYS는 자동차, 전자, 조선, 항공우주, 화학, 의학에 이르는 거의 모든 분야에서 요구되는 유한요소해석에 사용되는 범용 유한요소해석 프로그램이다[8].

2.5.1 해석조건

파손부에 적용되는 볼트 3개소의 응력분포 측정 및 설계 재검토를 위해 유한요소 해석을 실시하였다. Fig. 7과 같이 중간블록(유압 조종상자)을 중심으로 볼트 지지부(전동기 하우징), 볼트 및 와셔로 구분하였다. 지지부의 소재는 알루미늄 AC4C, 중간블록의 소재는 알루미늄 6061을 사용하였다. 그리고 볼트와 와셔는 강철소재를 사용했다.

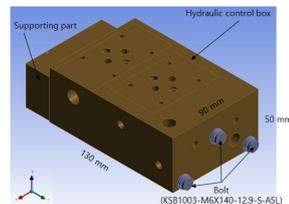


Fig. 7. Modeling geometry

요소망 형상은 평균 요소 크기를 상자 및 지지부는 2 mm, 볼트는 0.5 mm를 적용하였다. 이에 따라 요소망을 형성하여 Fig. 8과 같이 실제 형상과 흡사하게 3차원으로 모델링하였다.

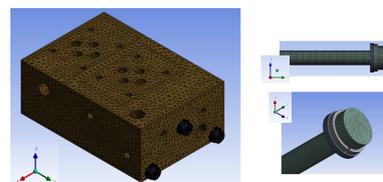


Fig. 8. Mesh geometry

2.5.2 정하중 해석

전투차량이 정지해 있을 경우 볼트가 받는 응력을 계산하기 위해 정하중 해석을 실시하였다. 중간블록 상부의 부품은 Fig. 9와 같이 해당 부품의 무게중심에 질량을 추가하였으며 부품과 블록의 연결부위와 지지부 주변면을 구속하여 하중을 지지하도록 모델링하였다. 또한 체결토크 산출식을 통하여 체결토크 100 kgf·cm에서 볼트체결력 11,192 N(1.142 kgf)을 적용하였다.

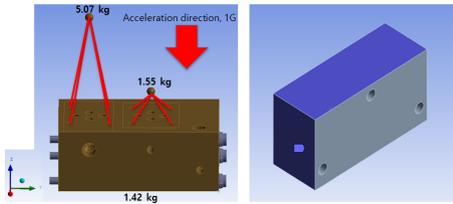


Fig. 9. Conditions for static load analysis

구성부품 간 접촉조건은 Fig. 10과 같이 설정하였다. 먼저 볼트는 Cylindrical support(Axial, tangential 구속)를 적용하여 좌/우를 구속하였으며, 볼트-와셔-스프링와셔 간 접촉부에는 Bonded contact를 적용하였다. 그리고 와셔-블록, 블록-지지부 간 접촉부는 Frictional contact(coefficient : 0.2)를 적용하였다.

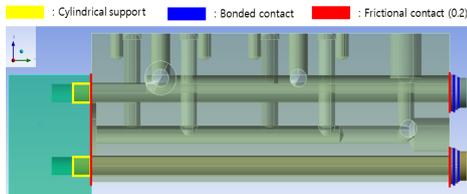


Fig. 10. Contact conditions for static load analysis

위 조건들을 적용한 정하중 해석 결과는 Fig. 11 및 Table 1과 같이 도출되었다. 즉 정적 상태에서의 볼트 안전율은 모두 1.5 이상으로 확인되었다. 이는 국방분야의 일반적인 차체구조물의 안전율 1.5를 상회하는 값으로 구조적 안정성을 확인할 수 있다[9].

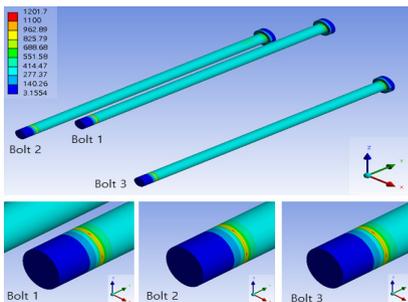


Fig. 11. Result of static load analysis

Table 1. Result of static load analysis

Classification	Yield strength (Mpa)	Maximum stress (Mpa)	Safety Factor
Bolt 1	1100	622	1.76
Bolt 2		614	1.79
Bolt 3		619	1.74

2.5.3 진동해석

전투차량 주행 조건에서의 볼트가 받는 응력을 계산하기 위하여 진동해석을 수행하였다. 진동해석은 정하중 해석과 마찬가지로 Fig. 12와 같이 블록 상부의 부품의 무게중심에 질량을 추가하였으며 부품과 블록의 연결부위를 구속하였다. 또한 지지부에 고정된 볼트의 끝부분을 완전 구속하였다. 추가적으로 지지부와 접촉하는 상자의 면은 수직방향의 운동을 구속하는 compression only support를 적용하였으며, 볼트-와셔-브라켓-상자 간 접촉과 브라켓 사이의 접촉은 bonded contact를 적용하였다.

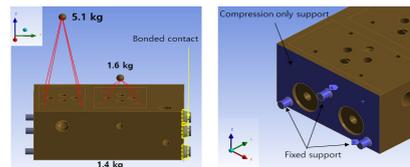


Fig. 12. Conditions for vibration analysis

완료 된 모델링에 휠 차량 진동을 고려하여, Fig. 13과 같이 MIL-STD-810G의 composite wheeled vehicle PSD profile을 적용하였으며 고정된 볼트의 구속부문에 가진하였다[10].

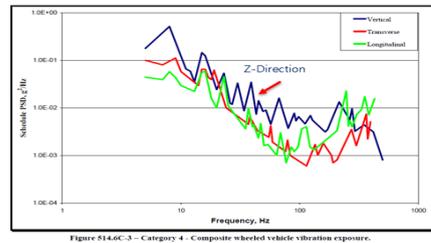


Fig. 13. MIL-STD-810G PSD profile

위 조건들을 적용하여 전투차량 상하 진동인 Z축에 대한 구조해석을 수행한 결과는 Fig. 14 및 Table 2와 같이 도출되었다. 주행상태에서 볼트 안전율은 모두 1.0 이하로 주행상태에서의 구조적 취약성을 확인하였다.

Table 2. Result of vibration analysis

Classification	Yield strength (MPa)	Maximum stress (MPa)	Safety Factor
Bolt 1	1100	1181	0.93
Bolt 2		1152	0.95
Bolt 3		1238	0.88

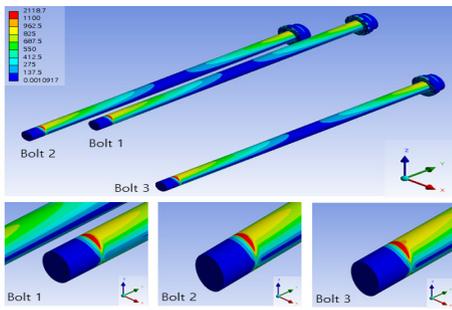


Fig. 14. Result of vibration analysis

3. 개선방안 및 검증

3.1 개선방안

전투차량 운행 시 발생하는 상하 진동이 볼트 연결부에 응력을 집중시켜 볼트파손에 이를 수 있음을 구조해석을 통하여 확인하였다. 이는 야전에 배치된 전투차량의 잠재적인 결함 발생 가능성을 의미한다. 따라서 잠재적인 결함에 대한 발생 가능성을 완전히 제거하기 위하여, 배치된 전투차량 전체에 대한 적용을 목표로 개선방안을 수립하였다. 캡 톨딩 다기관 수직방향 처짐에 의한 중간블록 고정용 볼트 파손 방지를 위하여 Fig. 15와 같이 브라켓을 추가하였다. 상부 브라켓은 중간블록에 밀착하여 볼트를 체결함으로써 수직축 방향의 처짐을 방지하고, 하부 브라켓은 유압 탱크에 밀착됨으로써 수직축 방향을 지지하게 된다. 약 5 mm 두께의 브래킷이 추가됨에 따라 볼트 길이를 기존 140 mm에서 150 mm로 늘렸으며, 볼트 물림 길이 또한 7 mm에서 11 mm로 증대시켜 볼트 체결력을 강화하였다.

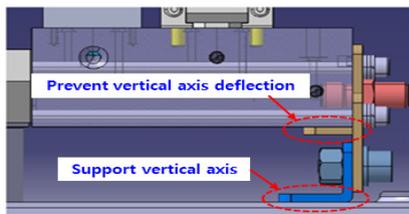


Fig. 15. Configuration of Improvement

3.2 구조해석

개선방안에 대한 구조 안정성을 확인하기 위하여 상용 유한요소 해석프로그램인 Ansys를 이용하여 구조해석을 수행하였다.

3.2.1 해석조건

브라켓 모델링 형상을 토대로 전투차량 주행상태에서의 유한요소 해석을 통해 볼트에 작용하는 응력의 근사치를 도출하고자 하였다. Fig. 16과 같이 지지부 및 중간블록, 볼트, 와셔의 소재는 기존과 동일하게 적용하였으며, 새롭게 추가된 브라켓은 강철 SM20C의 소재를 사용하였다.

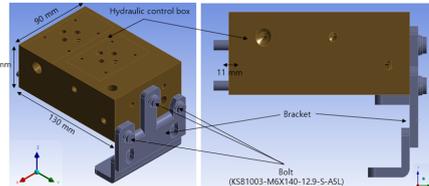


Fig. 16. Modeling geometry of improvement

요소망 형상은 평균 요소 크기를 상자 및 지지부는 2 mm, 볼트는 0.5 mm를 적용하였다. 이에 따라 Fig. 17과 같이 총 273,027개(지지부 포함)의 요소망을 형성하였다.

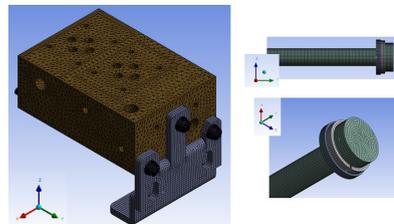


Fig. 17. Mesh geometry of improvement

3.2.2 모드해석

볼트 길이 연장으로 인해 볼트 물림길이가 7 mm에서 11 mm로 증가함에 따른 개선 전/후의 고유 진동 특성을 비교하기 위해 모드해석을 수행하였다. 볼트가 체결된 외팔보 형태의 블록 모델링을 대상으로 고유 모드를 비교한 결과는 Fig. 18 및 Table 3과 같다. 3차 이후 발생 모드는 모두 500 Hz 이상의 고유 진동수를 보이며, 3차까지 진동수에서 큰 차이가 나지 않아 해석 조건에 영향을 주지 않음을 판단할 수 있다.

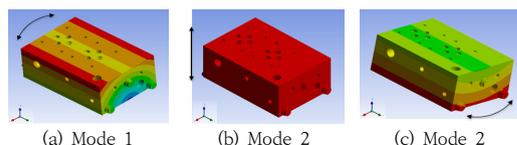


Fig. 18. Result of mode analysis

Table 3. Result of mode analysis

Mode number	Frequency(Hz)	
	before (bolt length : 140mm)	after (bolt length : 150mm)
1	10.07	10.094
2	23.74	23.81
3	55.97	56.038

3.2.3 진동해석

진동해석을 수행하기 위하여 하중 및 경계조건을 Fig. 19와 같이 규정하였다. 중간블록 상부의 부품으로 인한 질량은 해당 부품의 무게중심에 질량 추가하였으며 연결부와 구속하였다. 또한 지지부에 고정된 볼트의 끝부분을 완전 구속하였다. 지지부와 접촉하는 상자의 면은 수직방향의 운동을 구속하는 compression only support를 적용하였으며, 볼트-와셔-브라켓 상자간 접촉, 브라켓 사이 접촉은 bonded contact를 적용하였다.

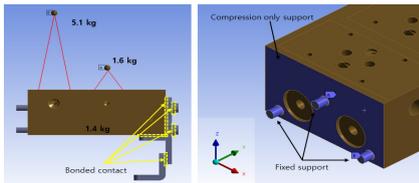


Fig. 19. Conditions for vibration analysis of improvement

위 조건들을 적용하여 진동해석을 수행한 결과는 Fig. 20 및 Table 4와 같다. 볼트의 안전율은 모두 1000 이상으로 구조적으로 매우 강건한 상태임을 확인할 수 있었다.

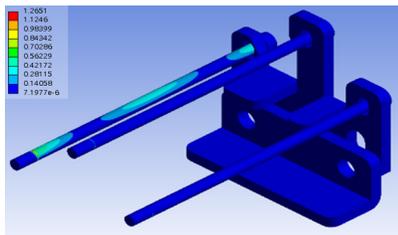


Fig. 20. Result of vibration analysis of improvement

Table 4. Result of vibration analysis of improvement

Classification	Yield strength (MPa)	Maximum stress (MPa)	Safety Factor
Bolt 1	1100	0.09	>>1000
Bolt 2		0.62	>>1000
Bolt 3		0.1	>>1000
Bracket	245	0.18	>>1000

3.3 체계 입증

구조 안정성이 확인된 개선방안은 야전 부대에서 운용 중인 전투차량 00대에 Fig. 21과 같이 적용하여 3개월 동안 모니터링을 실시하였다. 1.5개월 간격으로 2회에 걸쳐 볼트 파손 여부를 확인하였으며, 볼트 파손은 추가적으로 발생하지 않았다.



Fig. 21. Application of system to improvement

4. 결론

본 연구에서는 전투차량 야전운용간 다발적으로 발생한 유압장치 파손에 대한 원인분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 파손된 볼트의 형상과 체계 조립구조를 고려할 때, 볼트의 파손현상은 운행중 발생한 수직축 진동에 의한 것으로 판단하였다.
- (2) 전투차량 유압장치 내부 볼트 파손에 대한 설계 안전성을 검토하기 위하여 구조해석을 수행한 결과, 차량 주행 방향의 수직축 방향에서 안전율 1.0 이하로 구조적 취약성이 확인되었다.
- (3) 상기 (1), (2)의 결과에 따라, 수직축 방향으로의 진동 발생을 억제하기 위한 개선방안으로 볼트 몰림부 길이 증가 및 구속조건을 추가하였다. 이에 대한 구조해석 수행결과 구조적으로 매우 강건함을 확인하였다.

본 연구를 통해 수행한 전투차량 유압장치 구조강도 개선은 향후 유사무기체계에 대한 고장분석 및 설계에 참고자료가 될 것으로 기대된다.

References

[1] H. W. Seo, M. G. Kim, H. M. Lee, J. S. Han, "Automatic Tool for VDI 2330 Bsed Structural Analysis

and Evaluation of Bolted Joints Using ANSYS and MS Excel", *The Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol.44, No.2, pp.149-158, 2020.

DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2020.44.2.149>

- [2] D. E. Kim, K. J. Lee, "A Study on Improvement Cases for Improving Maintenance and Structural Strength of Riveted Combat Equipment Parts", *KIMST Annual Conference Proceedings*, Daejeon, Korea, pp.33-34, Nov. 2021.
- [3] J. H. Park, S. H. Choi, "Comparison and Verification of the Dynamic Characteristics of the Bolted Structure according to the method of Finite Element Modeling", *KSME Annual Conference Proceedings*, Jeju, Korea, pp.3492-3495, November 2015.
- [4] J. S. Kim, S. H. Park, H. T. Kim, C. Y. Oh, "Mode Analysis of Socket Welds on Small Bore Pipe Using ABAQUS", *KSME Annual Conference Proceedings*, pp.264-265, Jeju, Korea, April 2018.
- [5] P. H. Kim, S. M. Kim, S. C. Doh, D. H. Yoon, J. S. Park, "Progressive Failure Analysis of Composite Double Bolted Joints using Gradual Degradation Model", *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol.13, No.6, pp.26-35, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.20910/JASE.2019.13.6.26>
- [6] D. S. Oh, J. H. Kim, S. H. Seo, "Failure Analysis by Fracture Study of Connecting Rod Bolts in Diesel Engine for Military Tracked Vehicles", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.21, No.7, pp.191-200, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.7.191>
- [7] M. G. Son, S. J. Kang, R. H. Kim, J. H. Jang, "A Study on the Cause of Damage and Strength Improvement of Hydropneumatic Suspension Unit Bolt through Structural Analysis", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.23, No.2, pp.194-202, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.2.194>
- [8] S. H. Chae, S. I. Jung, "A Study on Safety of Air Bridge by Using ANSYS", *Journal of Korea Society Management & Science (KSMS)*, Vol.7, No.1, pp.45-56, 2005.
- [9] U.S. Army Materials Command, "Engineering Design Handbook (AMCP 706-357): Automotive Series - Automotive Bodies and Hulls", 1970.
- [10] U.S. Army Development Test Command, "MIL-STD-810G Environmental engineering considerations and laboratory tests", 2008.

김혜은(Hyeeun Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 전북대학교 전자공학부 (공학학사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

국방, 전기/전자, 재료

배공명(Gongmyeong Bae)

[정회원]



- 2006년 8월 : 부산대학교 기계공학부 (공학학사)
- 2008년 8월 : 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템전공 (공학석사)
- 2014년 2월 : 부산대학교 기계공학부 정밀가공 시스템전공 (공학박사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

국방, 기계/재료, MEMS

오은빈(Eunbin Oh)

[준회원]



- 2017년 2월 : 경상대학교 기계공학부 (공학학사)
- 2017년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

국방, 기계/재료, 열역학

사 공 재(Jae Sakong)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한양대학교 대학원
미래자동차학과 (공학박사)
- 2020년 4월 ~ 현재 : 한화에어로
스페이스 선임연구원

〈관심분야〉

국방, 기계/재료, 열역학