

ALE 기반 외부 보조연료탱크 충돌충격시험 수치해석 연구

김현기*, 김성찬
한국항공우주연구원

Study on the Numerical Analysis of Crash Impact Test for External Auxiliary Fuel Tank based on ALE

Hyun-Gi Kim*, Sungchan Kim
Korea Aerospace Research Institute

요약 외부 충격에 대한 연료탱크의 구조 건전성을 확인하기 위해서는 연료탱크 내부 연료의 거동과 그에 따른 영향성을 파악할 수 있는 유체-구조 연성해석을 수행해야 한다. 과거에는 유체-구조 연성해석을 수행하기 위해서는 상당한 전산자원과 과도한 계산시간이 필요하여 수치해석 결과를 도출하기까지 많은 제약이 있었다. 하지만, 최근 컴퓨터 성능이 획기적으로 향상되어 유체-구조 연성해석 등의 복잡한 수치해석이 가능하게 되었다. 유체-구조 연성해석을 위해 주로 사용되는 방법은 ALE(Arbitrary Lagrangian and Eulerian)와 입자법(Smoothed Particle Hydrodynamic)이 있다. 두 방법에는 상호 장단점이 있기 때문에 수치해석의 목적에 따라 적합한 방법을 적용하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 ALE를 적용하여 연료탱크 충돌충격 시험 수치모사를 수행하였다. 수치해석 목적은 충돌충격하중에 의해 컨테이너 내부에 장착된 연료탱크의 파손 가능성을 확인하는 것인데, 수치해석의 결과로 연료탱크 내부의 유체 거동을 파악하고, 충격하중에 의해 연료탱크와 컨테이너 구조물에서 발생하는 응력을 계산하여 연료탱크 파손 여부에 따른 내부 유체의 누설 가능성을 제고하였다.

Abstract A fluid-structure interaction analysis should be performed to evaluate the behavior of the internal fuel and its influence in order to confirm the structural soundness of the fuel tank against external impacts. In the past, fluid-structure interaction analyses have been limited to the obtention of numerical simulation results due to the need for considerable computational resources and excessive computation time. However, recently, computer performance has been dramatically improved, enabling complex numerical analyses such as fluid-structure interaction analysis to be conducted. Lagrangian and Euler coupling methods and Lagrangian based analysis methods are mainly used for fluid-structure interaction analysis. Since both of these methods have their advantages and disadvantages, it is necessary to select the more appropriate one when conducting a numerical analysis.

In this study, a numerical analysis of a crash impact test for a fuel tank is performed using ALE. The purpose of the numerical analysis is to estimate the possibility of failure of the fuel tank mounted inside the container when it is subjected to a crash impact. As a result of the numerical analysis, the fluid behavior inside the fuel tank is investigated and the stress generated in the fuel tank and the container structure is calculated, thereby enabling the possibility of fuel tank failure and leakage of the internal fluid to be evaluated.

Keywords : Fluid-Structure Interaction, ALE(Arbitrary Lagrange and Eulerian), Fuel Tank, Crash Impact Test, MIL-DTL-27422

본 연구는 산업통상자원부 항공우주부품기술개발사업(헬기 항속거리 확장용 보조연료탱크 시스템 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Hyun-Gi Kim(Korea Aerospace Research institute)

Tel: +82-42-870-3531 email: shotgun1@kari.re.kr

Received December 19, 2017

Revised January 15, 2018

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

1. 서론

항공기용 연료탱크는 평상시에는 연료저장 등의 단순한 기능을 하지만 항공기 추락과 같은 긴급한 상황에서는 연료탱크의 구조건전성이 승무원의 생존 여부와 직결된다. 이로 인해 승무원의 생존성을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 국내외에서 연료탱크 내충격 성능을 입증하기 위한 시도가 수행되어 왔다[1-2]. 더불어, 연료탱크 초기 설계단계부터 위험인자를 사전에 확인하여 시험 실패 가능성을 최소화하기 위한 수치해석 연구도 진행되어 왔다[3-5]. 연료탱크에서 발생할 수 있는 가장 심각한 문제는 외부충격에 의한 연료 누유의 발생이다. 해당 위험성을 사전에 파악하기 위해서는 연료를 보관하는 연료탱크 특성상 유체-구조 연성해석이 필요한데, 최근 컴퓨터 성능의 획기적인 발전으로 과거에 존재했던 전산자원이나 계산시간의 제약에서 상당히 벗어났다고 할 수 있다.

유체-구조 연성해석에는 라그랑지안(Lagrangian) 격자와 오일러(Eulerian) 격자를 연동시켜 해석하는 ALE(Arbitrary Lagrangian and Eulerian, 이하 ALE)와 입자법(Smoothed Particle Hydrodynamic, 이하 SPH)과 같이 라그랑지안 방법을 기반으로 하는 해석 방법이 있다. ALE는 구조격자와 오일러 격자 간에 하중과 경계조건 정보를 교환하면서 해석하는 방법인데, 정밀한 해석이 가능하다는 장점이 있으나, 수치해석을 위한 사전설정이 다소 복잡하고 계산시간이 많이 소요된다는 단점이 있다. 라그랑지안 기반 해석방법은 각 입자들이 일정 영역의 물성을 대표하는 것으로 가정하는 방법인데, ALE에 비해 수치해석 모델 설정이 간단하고 계산시간은 짧지만, 정밀한 유체 모사를 위해 많은 수의 입자가 필요하고 공기입자를 모델링 하는 경우에는 작은 밀도값으로 인하여 수치 계산 과정에서 발산 현상이 나타나는 등 공기 모사에 있어 제약이 따르는 단점이 있다. 따라서, 각 방법의 장단점을 고려하여 수치해석의 목적에 따라 적합한 방법을 적용해야 한다.

본 연구의 수치해석 목적은 충돌충격하중에 의해 컨테이너 내부에 장착된 연료탱크의 파손여부와 그에 따른 내부유체의 누설 가능성을 가늠하는데 있다. 이를 위해 연료탱크 내부를 실제 시험과 동일하게 공기영역과 유체영역을 모두 반영하여 수치해석을 수행하고, 이를 위해 공기 모사가 가능한 ALE 방법을 적용하였다. 그 결과로써 내부 유체 거동을 분석하고, 연료탱크와 컨테이너 구

조물에 작용하는 응력을 계산함으로써 연료탱크에 대한 구조 건전성을 제고하고자 한다.

2. 충돌충격시험 수치해석 모델

Fig.1은 연료탱크 수치해석 모델이다. 수치해석 모델은 연료탱크 조립체, 컨테이너 조립체, 내부유체 그리고 내부 및 외부 공기로 구성되어 있다. 연료탱크 조립체는 스킨(shell)과 금속피팅(metal fitting)로 구성되는데, 스킨은 5,064개 셸(shell) 요소, 상부 및 하부 금속피팅은 738개 셸 요소로 구성 되었으며, 연료탱크 조립체의 총 중량은 34kg이다. 연료탱크 조립체가 장착되는 컨테이너 조립체는 복합재 컨테이너, 금속피팅 그리고 폼(foam)으로 구성되어 있다. 복합재 컨테이너는 복합재 48장으로 적층되었는데, 적층각도는 $(0/45)_2s$ 이며, 복합재 1장의 두께는 0.2mm 이다. 복합재 컨테이너는 7,949개의 셸 요소, 금속피팅은 975개의 셸 요소, 폼(foam)은 810개의 솔리드요소로 구성되어 있으며, 컨테이너 조립체 총 중량은 61.7kg이다. 연료탱크 조립체와 컨테이너 조립체 형상은 Fig.2에 별도로 나타내었다.

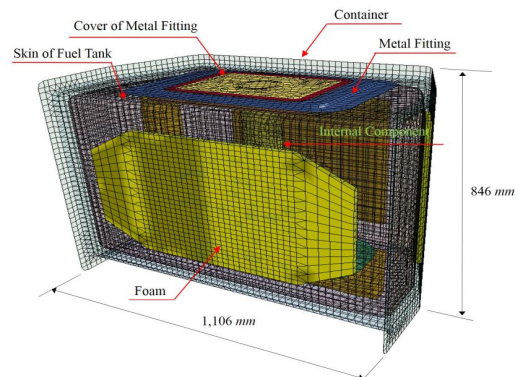


Fig. 1. Numerical analysis model for FEM

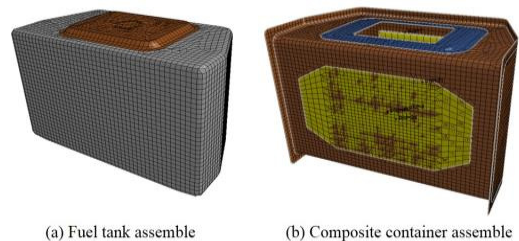


Fig. 2. Configuration of fuel tank assembly and container assembly

연료탱크 내부에는 Fig.3과 같이 상부피팅과 수직으로 연결된 column 형태의 부품이 설치되어 있는데, 용도는 연료펌프, 연료량 측정장치 또는 내부 배관 등 LRU(line replacement unit) 들의 고정이나 설치를 목적으로 한다. column의 물성은 알루미늄이고, 총 중량은 8.2kg로 계산되었으며, 820개의 쉘 요소로 만들어 졌다. 각 component들의 두께 정보는 Table 1에 정리하였고, 수치해석에 사용되는 복합재료, 알루미늄 및 폼 물성 정보는 Table 2에 주어져 있다.

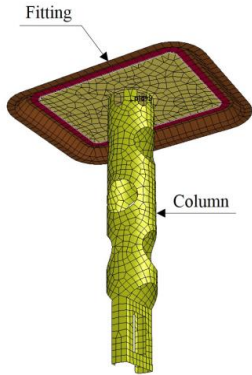


Fig. 3. Configuration of internal component

Table 1. Thickness of Components

Components	Thickness
Composite Container	9.6mm((0/45) ₁₂ /s,1sheet 0.2mm)
Skin of Fuel Tank	10mm
Fitting	10mm
Column	2mm

Table 2. Material data for the numerical model

Title	Title	Units	Value
Composite Material	Young's Modulus 0°, E1	GPa	63
	Young's Modulus 90°, E2	GPa	62
	In-plane Shear Modulus, G12	GPa	4.5
	Poisson's Ratio, ν12	-	0.053
	Ult. Tensile Strength 0°, Xt	MPa	800
	Ult. Tensile Strength 90°, Yt	MPa	700
	Ult. Comp. Strength 0°, Xc	MPa	111
Foam	Ult. Comp. Strength 90°, Yc	MPa	700
	Ult. In-plane Shear Strength, S	MPa	111
	Density	kg/m ³	1,650
Aluminum	Young's Modulus 0°, E1	MPa	180
	Poisson's Ratio, ν12	-	0.3
	Density	kg/m ³	80
	Young's Modulus 0°, E1	MPa	68.9
	Poisson's Ratio, ν12	-	0.33
	Density	kg/m ³	2,700
	Yield Stress	MPa	420

Fig.4는 ALE 수치해석을 수행하기 위해 LS-DYAN에서 지원하는 volume fraction line을 사용하여 내부와 외부 공기, 내부 유체를 설정하는 방법을 보여주고 있다. 먼저, 솔리드(solid) 요소를 이용하여 라그랑지안 모델(연료탱크와 컨테이너 조립체)을 충분히 포함하는 오일러 모델을 구축하고, 연료량 기준면에 volume fraction line을 생성한다. 그리고, 연료탱크 경계면 내부와 외부, volume fraction line의 상부와 하부를 기준으로 하여 외부공기, 내부공기 그리고 내부유체(물)를 설정한다. Fig.5는 앞에 설명한 과정을 거쳐서 생성된 내부와 외부공기 그리고 내부 유체를 보여주고 있는데, 내부유체의 총 무게는 394kg이다.

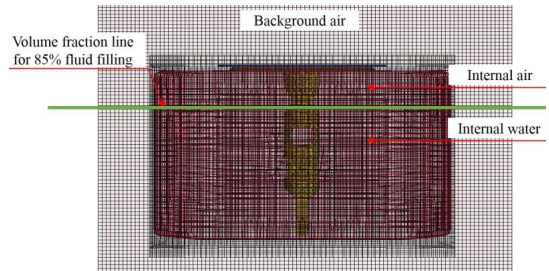


Fig. 4. Setting of the amount of internal fluid

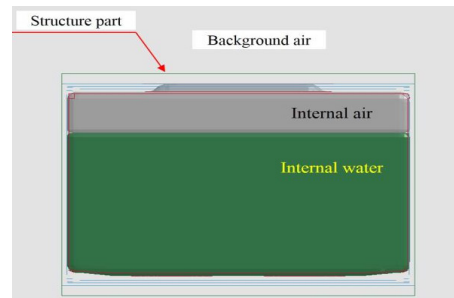


Fig. 5. Internal air and fluid

충돌충격시험의 수치해석 조건은 낙하높이 65ft (MILDTL-27422)[6], 내부 물충전 85% 조건(DEFSTAN 2/1)을 적용하였는데[7], 이 조건을 만족하기 위해 바닥면 충돌속도는 19.8m/sec로 설정하고, 연료탱크 내부는 85%의 물로 충전하였다. 충돌 바닥면은 LS-DYNA에서 지원하는 Rigidwall로 설정하고, 충돌각도는 미군사규격[6]에서 -10°~+10°로 규정하고 있는데, 본 연구의 수치해석에서는 0°의 기울기로 바닥면과 충돌하는 것으로 가정하였다.

Fig.6은 바닥면 충돌속도와 충돌면(rigid wall)을 보여

주고 있다. 수치해석 과정에서 연료탱크 조립체, 복합재 컨테이너 조립체 그리고 내부 유체 등이 상호 접촉 (contact)하게 되는데, 이 때 구조물의 관통(penetration)이나 유체의 누유 등이 발생하지 않도록 contact 조건이 적절히 적용되어야 한다. 연료탱크 조립체와 복합재 컨테이너 조립체는 single surface, surface to surface 조건을 적용하였고, 구조물과 내부유체의 접촉은 Constrained Lagrange in solid edge keyword를 적용하였다. Table 3은 수치해석 과정에서 부품 간에 발생하는 접촉을 고려하여 부과된 접촉조건을 정리한 것이다.

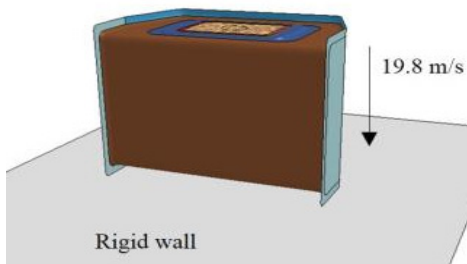


Fig. 6. Impact velocity and rigid wall

Table 3. Contact Conditions in LS-DYNA

Contact	Applied Part
Single Surface	<ul style="list-style-type: none"> • Fuel tank assembly • Composite container assembly
Surface to Surface	<ul style="list-style-type: none"> • Composite container assembly ↔ Fuel tank assembly
Constrained Lagrange in Solid Edge	<ul style="list-style-type: none"> • Fuel tank assembly ↔ Internal Fluid

3. 수치해석 결과

바닥면 충돌에 의한 내부유체의 거동을 정면과 측면으로 구분하여 Fig.7에 나타내었다. 바닥면 충돌순간부터 25ms까지의 거동을 나타내었는데, 25ms부터 유체의 영향력이 상부 피팅면으로 전달되는 것을 볼 수 있다.

바닥면 충돌시 column에 하중이 전달되는데, column을 구성하는 모든 절점에서의 하중을 Fig.8에 나타내었다. 최대하중은 약 3.7tonf 가 작용하는 것으로 계산되었는데, 최대하중 발생지점은 Fig.8에 나타낸 column 하단 부이며, 해당영역은 바닥면과 가장 먼저 접촉하는 부분이다. 최대하중 크기는 3.7tonf 수준인데, column 중량

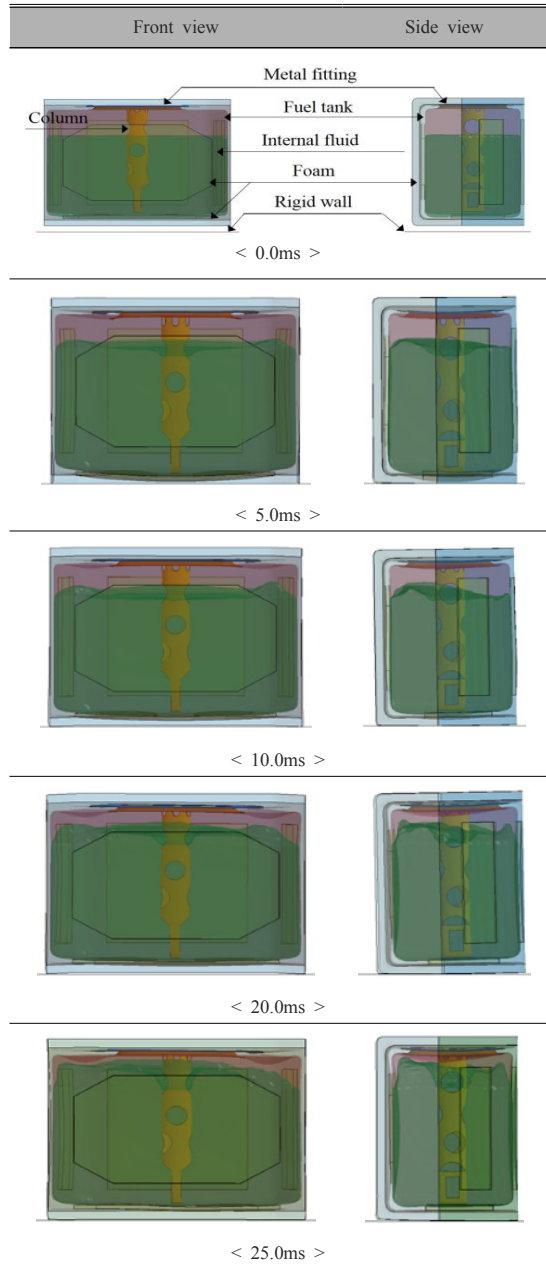


Fig. 7. Behavior of internal fluid

8.2kg, 충돌속도 19.8m/s 그리고 Fig.8을 통해 추정된 바닥면과의 접촉시간(약 4ms)을 고려하면 이론 예측치는 약 40,590N(4.1tonf)으로 계산되어 이론 예측값과 비교적 일치하는 수준의 하중이 계산된 것으로 사료된다.

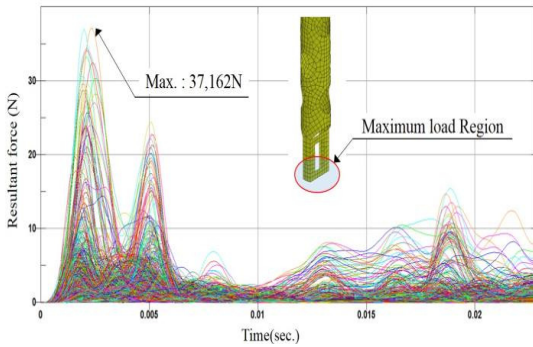


Fig. 8. Impact load on column

Fig.9는 충격하중에 의해 column에서 최대 등가응력이 발생할 때의 등가응력 분포와 발생지점을 나타내고 있다. 참고로, 충돌충격 상황에서 column이 파손되지 않는 경우에는 연료탱크 스킨을 관통하여 연료의 외부누설이 발생할 수 있다. 이 때문에, 충격하중 작용시 column은 파손이 발생하도록 의도적으로 설계되는데, 이 목적을 위해 column 몸체에 hole들이 반영되었다. 수치해석 결과, column의 설계 의도에 맞게 hole 영역에서 최대 등가응력이 발생(@2.0ms)하고 있으며, 해당영역에서 1GPa 이상의 응력이 발생하여 파손이 발생하는 것으로 예측되었다.

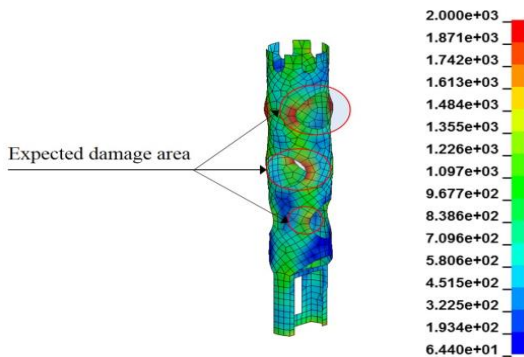


Fig. 9. Expected damage area in column

Fig.10은 컨테이너에서 파손이 발생할 것으로 예상되는 영역을 나타내고 있다. 해당영역은 하단모서리와 상단모서리로 파악되었고, 최대 등가응력 수준은 1.06~1.24GPa로 계산되었다. 하지만, 컨테이너는 내부에 장착된 연료탱크를 보관 및 보호하는 역할을 하는 용도이므로 파손되더라도 연료탱크로부터 내부연료의 누설이 발생하지 않으면 충돌충격시험에서 문제가 없을 것으로 평가 될 수 있다.

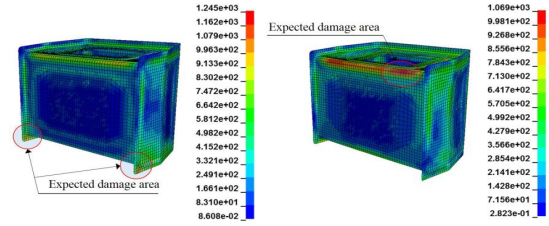


Fig. 10. Maximum equivalent stress in container

Fig.11과 Fig.12는 연료탱크 스킨과 금속 피팅영역에서 발생하는 최대 등가응력을 나타내고 있다. 최대 등가응력은 스킨영역에서는 14.5MPa, 금속피팅 영역에서는 969.8MPa로 계산되었다. 사전연구를 통해 연료탱크 소재가 견딜 수 있는 응력 수준은 최대 144 MPa로 예측되었음을 고려하면[3], 연료탱크 자체의 찢어짐은 발생하지 않을 것으로 사료되며 그로 인한 누설 또한 발생하지 않을 것으로 판단된다. 하지만, 연료탱크 상부피팅 측면영역에서는 최대 등가응력이 969.8MPa로 계산되어 금속 피팅부에서는 파손의 위험이 있는 것으로 파악된다. 연료탱크 금속피팅 파손은 연료 누설을 발생시킬 수 있기 때문에 이 부분에 대한 보강은 필요할 것으로 사료된다.

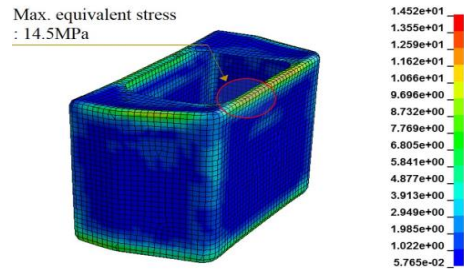


Fig. 11. Maximum equivalent stress in skin of fuel tank(3.0ms)

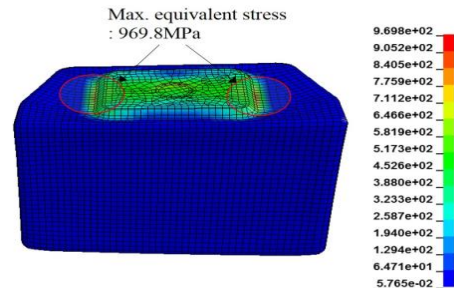


Fig. 12. Maximum equivalent stress in metal fitting (3.0ms)

4. 결론

본 연구에서 수행한 수치해석의 목적은 충돌충격 시험에서 연료탱크의 찢어짐으로 인한 연료의 외부누설 가능성을 점검하는 것이다. 수치해석 방법으로 ALE를 적용하였고, 수치해석 모델링에서는 연료탱크가 복합재 컨테이너 내부에 장착되고, 연료탱크 내부에는 부품과 배관 설치용 column이 장착되었다. 본 연구에서의 수치해석 결과는 다음과 같다.

1. 내부유체의 거동을 살펴보고, 충돌충격하중에 의해 컨테이너와 연료탱크에서 발생하는 등가응력을 계산하였다.
2. 복합재료로 제작된 컨테이너에서는 주로 상부와 하부 모서리 부위의 파손이 발생할 것으로 예측되었다. 컨테이너 자체의 파손은 상/하단 모서리와 같은 국부적인 영역에서 발생하기 때문에 연료탱크 손상에는 영향이 없을 것으로 판단된다.
3. 연료탱크 금속피팅 측면부에서 파손의 가능성이 있는 것으로 파악되어 이 부분에 대한 보강이 필요한 것으로 판단된다.
4. 연료탱크 스킨에서는 컨테이너 파손에 의한 sharp edge의 영향이 없다면 연료탱크 소재 자체의 찢어짐 등은 없을 것으로 보이며 그로 인한 연료의 외부 누설도 발생하지 않을 것으로 판단된다.

References

[1] H.Kim, S. C. Kim, J. Lee, I. Hwang, J. W. Hue, D. W. Shin, P. S. Jun, T. K. Jung, B. K. Ha, "Assessment of crashworthiness performance for fuel tank of rotorcraft", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 38, no. 5, pp. 806-812, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2010.38.5.477>

[2] Ugone, Mary L., "Meling, John E., Snider, Jack D., Gause, Neal J., Carey, Alice F., "Acquisition: Fuel Cells of the V-22 Osprey Joint Advanced Vertical Aircraft", D-2003-013, 2002.

[3] H. Kim, S. C. Kim, S. J. Kim, S. Y. Kim, "Numerical Simulation of Full-scale Crash Impact Test for Fuel Cell of Rotorcraft", *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, vol. 26, no. 5, pp. 343-349, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2013.26.5.343>

[4] H. Kim, S. C. Kim, "Analysis of Crash Load in Crash Impact Test for Fuel Tank of Rotorcraft", *Journal of the*

Korean Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 16, no. 6, pp. 3736-3741, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.6.3736>

- [5] H. Kim, S. C. Kim, "Numerical Analysis of Crash Impact Test for External Auxiliary Fuel Tank of Rotorcraft", *Journal of the Korean Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 18, no. 3, pp. 724-729, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.3.724>
- [6] U. S. Army Aviation and Missile Command, "Detail Specification for the Tank, Fuel, Crash-Resistant, Ballistic-Tolerant, Aircraft", MIL-DTL-27422D, 2007.
- [7] Ministry of Defence, "Flexible Tanks for Use in Aircraft Fuel and Methanol/water System" Defence Standard 15-2/Issue 1, 1987.

김 현 기(Hyun-Gi Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(학사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(석사)
- 2006년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(박사)
- 2006년 2월 ~ 2007년 12월 : 현대중공업 선임연구원
- 2007년 12월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 선임연구원

<관심분야>

항공기 구조해석, 구조최적화, FSI

김 성 찬(Sungchan Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한국항공대학교 항공기계공학과(학사)
- 1998년 8월 : 한국항공대학교 항공기계공학과(석사)
- 2009년 2월 : 충남대학교 항공우주공학과(박사)
- 1991년 3월 ~ 1994년 12월: (주) 광림 과장
- 1995년 2월 ~ 2000년 7월 : 한국항공우주산업 선임연구원
- 2000년 9월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 책임연구원

<관심분야>

항공기 구조설계 및 세부계통