

항공기 구조용 소방차 탱크룸의 구조 안정성 평가 및 설계 개선에 대한 해석적 연구

An Analytical Study on Structural Stability Evaluation and Design Improvement of Fire Truck Water Tank for Aircraft Rescue

권혁진¹ · 강명철^{1*} · 임수일² · 김한욱² · 홍정기² · 이호³ · 황영선³

Hyukjin Kwon, Myeongcheol Kang, Suil Lim, Hanwook Kim, Jungki Hong, Ho Lee
and Yongson Hwang

Received: 04 Nov. 2022, Accepted: 08 Jan. 2023

Key Words : Aircraft Fire Truck(항공기용 소방차), Tank Room(탱크룸), Structural Stability(구조 안정성), Improvement design(개선 설계), FEM(유한요소해석)

Abstract: In this study, the structural stability of the tank room of an aircraft rescue fire engine is to be studied. The tank room of the aircraft rescue fire engine is filled with fire extinguishing water and chemicals. Fire extinguishing water and chemical are filled to a capacity of about 12.5 tons and are subjected to high stress. The tank room is made of PP material with low yield stress. Structural analysis of the tank room is performed and structural weakness is analyzed.

In addition, if a structural problem occurs as a result of structural analysis, an analysis simulation result is presented to derive an improved design and to show the validity of the structural stability of the tank room.

1. 서 론

항공기 화재의 경우 매우 짧은 시간 내에 탑승인원의 사망 및 주변부로의 화재 확산으로 치명적인 피해가 발생할 수 있어 항공기 구조 소방차의 성능은 매우 중요하다. 따라서 민·군 공항은 다양한 사고에 대처하기 위한 구조소방 등급에 적합한 소방차량을 보유 배치하여야 한다. 군공항인 경우 전투기는 빈번한 출동으로 인해 항시 사고위험에 노출되어 있으며, 이런 높은 위험성 때문에 항공기의 화재 발생

시, 신속한 초기 대응을 위해 항공기 구조용에 특화된 소방차는 많은 양의 소방용수와 소화약제를 적재하고 상시 대기하고 있다.

기존 소방차는 탱크룸에 저장된 소방용수와 소화약제에 대한 내압성을 충분하게 가지면서 부식을 방지하기 위해 스테인레스 스틸(stainless steel)로 제작한다. 하지만 스테인레스 스틸로 제작되어진 탱크룸은 중량이 무거워 소방차의 신속한 대응을 하기에는 부족한 현실이다. 따라서 항공기 구조용 소방차는 항공기에 발생하는 화재의 신속한 초등 대응을 위해 소방차의 기동성을 증대시키고 소화약제로 인한 부식을 방지하기 위해서, 항공기 구조용 탱크룸을 내식성이 우수하고 중량이 가벼운 재질인 PP(Polypropylene) 소재로 제작하고 있는 추세이다.

PP는 일반 금속과 비교하여 항복응력(약 26MPa)이 낮은 비금속 재료로 소방용수와 소화약제에 의해 발생하는 내압, 외부 충격 및 중량에 의해서 탱크룸에 크랙(Crack)이 발생하거나 심한 경우 파손이 일어날 수 있는 구조적 문제점을 야기할 수 있다. 이를 방지

* Corresponding author: mckang@koceti.re.kr

1 Convergence Machinery Research Lab, Korea Construction Equipment Technology Institute, Kunsan 54004, Korea

2 HYUNDAI EVERDIGM, Jincheon, 27844, Korea

3 Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement, Jinju, 52851, Korea

Copyright © 2023 KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하기 위해서는 탱크룸에 대한 강건 설계가 무엇보다도 필수적이다.

본 연구에서는 항공기 구조용 소방차의 탱크룸에 대한 구조적 안정성을 확보하기 위해 초기 설계된 탱크룸의 구조해석을 수행하여 구조적으로 취약부를 분석하고, 강건 설계를 적용하여 탱크룸의 취약부를 보완하는 연구를 수행하고자 한다.

2. 해석모델

2.1 항공기 구조용 소방차 모델

Fig. 1은 항공기 구조용 소방차의 구성요소를 도식화한 그림이다. 항공기 구조용 소방차의 구성요소는 크게 차량 새시부와 소방부로 나뉜다. 먼저 차량 새시부는 비행장 및 인근 주변부까지 화재 진압 활동을 전개하는데 있어 구동할 수 있는 엔진, 새시 등을 포함하고 있으며, 소방부는 비행장 및 항공기 화재 진압 특성에 적합하도록 조명장치, 지붕방수포, 범퍼포탑, 소화장치, 펌프룸, 탱크룸, 안전장치(차량 안전) 등으로 구성되어 있다. Fig. 2는 구조 안정성 평가를 수행할 탱크룸이 차량에 위치되어 있는 분해도와 탱크룸 내부 모습을 도식화한 그림이다. 탱크룸은 엔진룸과 펌프룸 사이에 위치해 있으며, 물탱크와 폼탱크로 구성되어 있고 차량 새시에 부착되어 진다.

본 연구에서는 항공기 구조용 소방차의 소방부를 구성하는 탱크룸(탱크룸, 소화약제탱크 등)에 대한 구조적 안정성을 확보하기 위해서 탱크룸의 내압 해석과 외부 충격에 대한 해석 시뮬레이션을 수행한다. 그리고 해석 결과에 따라 구조적인 문제점을 지닌 부위에 대한 개선설계를 진행하고자 한다.

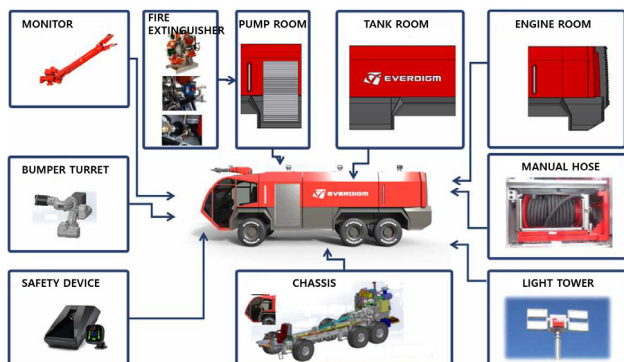


Fig. 1 Components of Fire engine for aircraft rescue

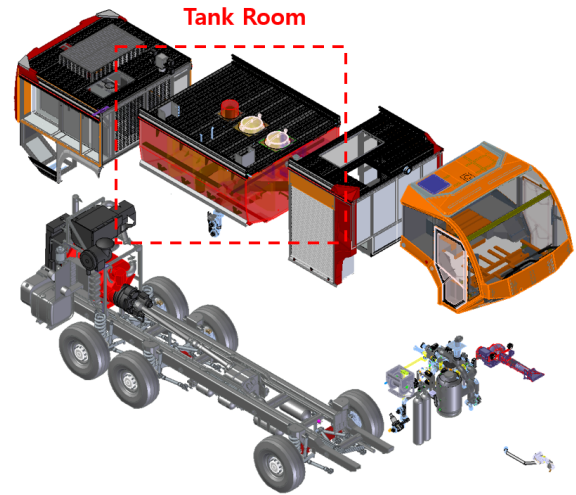


Fig. 2 Fire engine concept design for aircraft rescue

2.2 항공기 구조용 소방차 탱크룸 3D 설계

탱크룸의 구성요소는 크게 소방용수를 적재할 수 있는 소방용수 탱크와 소화약제를 적재할 수 있는 소화약제 탱크로 구분되어 있다. 내/외부 구성요소는 Fig. 3에서 나타낸 것과 같다. 먼저 외부 구성요소로는 소방용수와 소화약제를 적재할 수 있는 외부 패널과 탱크룸을 지지하고 있는 새시부(Chassis), 새시부와 탱크룸을 연결하는 브라켓(bracket)으로 구성되어 있다. 탱크룸의 내부 구성요소는 소방용수와 소화약제에 의해 발생하는 슬로싱(sloshing) 현상에 대응하기 위한 방파판(Baffle), 내부패널, 배관 및 구조보강재 등으로 구성되어 있다.

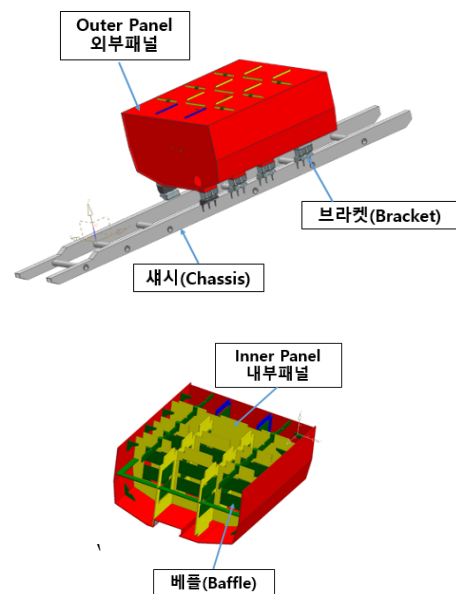


Fig. 3 Structural elements of tank room

탱크룸에서 소방용수를 적재할 수 있는 용량은 공 항의 소방등급 5등급²⁾에 해당하는 11,000L 이상으로 설계되어야 한다. 이에 따라 Fig. 4와 같이 개발된 소방용수 탱크는 11,167L 이상으로 설계하였고, 소화 약제 탱크는 1,250L 이상으로 설계하였다.

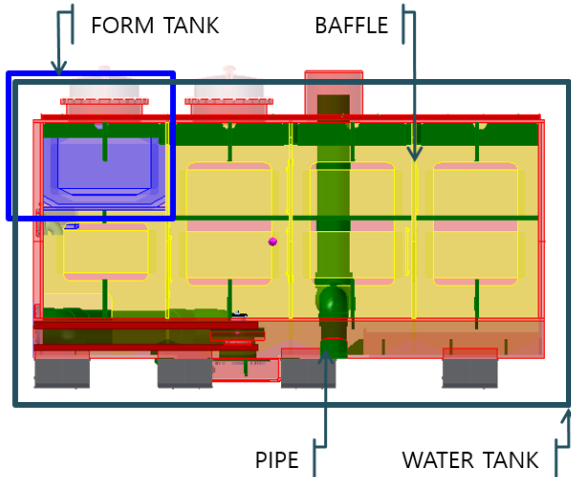


Fig. 4 Capacity of tank room

3. 해석 시뮬레이션

3.1 탱크룸의 구조해석 조건

본 연구에서 개발되어지는 탱크룸의 주된 부품의 재질에 대한 물성치는 아래 표와 같다. 먼저 PP 소재 (Table. 1)이며, 탱크룸을 지지하는 새시(Chassis)의 재 질은 Steel 소재(Table. 2)이다.

Table 1 Material properties of tank room

PP	
Density	9.1e-07kg/mm ³
Young's Modulus	915MPa
Tensile Yield Strength	26.2MPa
Tensile Ultimate Strength	29.9MPa

Table 2 Material properties of chassis

steel	
Density	78.9e-07kg/mm ³
Young's Modulus	200,000MPa
Tensile Yield Strength	250MPa
Tensile Ultimate Strength	460MPa

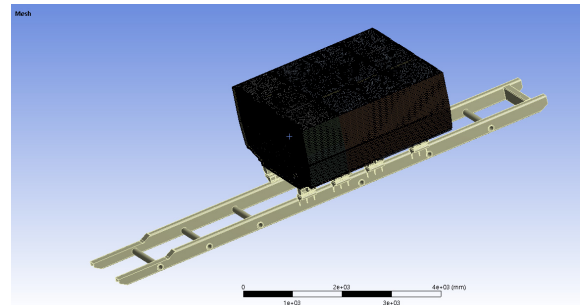


Fig. 5 Finite Elements of tank room

Fig. 5는 탱크룸에 사용된 격자계를 나타낸 것으로, 10 절점 사면체 격자와 20절점 육면체 격자를 사용하여 격자시스템을 구현하였다. 총 절점 수는 약 149 만개이고, 총 요소 수는 약 38만개로 구성된다. 탱크 룸을 지지하는 새시부와 브라켓은 Steel 소재로 구조 적 안정성 문제 발생 가능성이 낮아 rigid body³⁾로 설정하여 구조해석 연산 시간을 최적화하였다. 또한 격자계 생성은 ANSYS 자동요소생성 기능을 사용하여 격자시스템을 구성하였다.

Fig. 6는 탱크룸과 새시부의 구속조건을 나타낸다. 새시부는 joint ground⁴⁾ 구속조건으로 설정하여 지면 에 맞닿아 있는 구동부와의 구속조건과 유사하도록 6 자유도를 구속하였다. 또한 탱크룸과 새시부는 joint로 구속조건을 설정하여 6 자유도를 구속하였다. 마지막으로 탱크룸을 구성하는 부품들의 체결방식은 볼팅(Bolting) 및 용접을 통해 제작되어지는 것으로 구조해석 상에서는 bonded 조건을 부여하여 해석을 수행하였다.

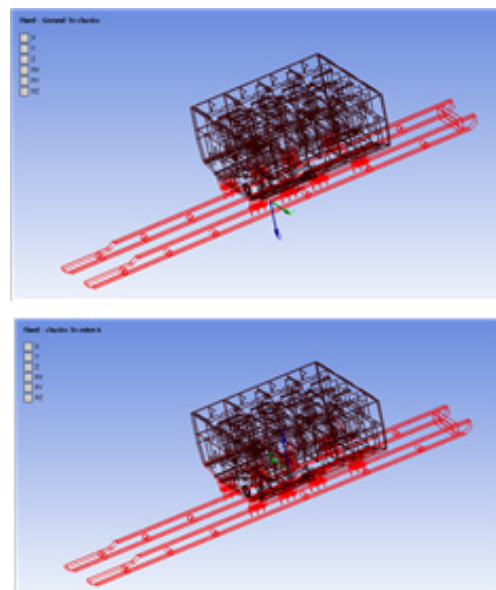
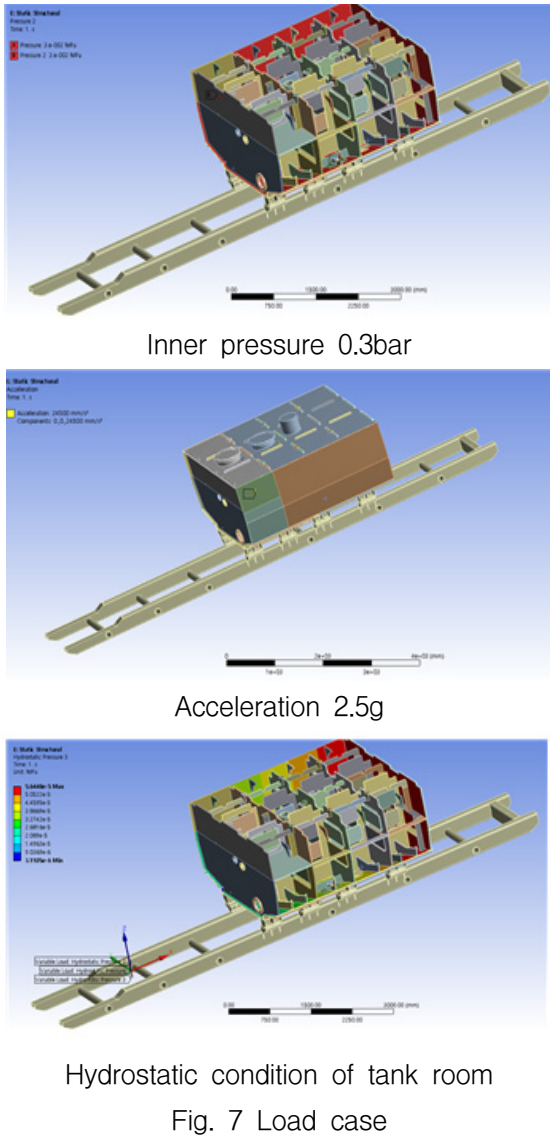


Fig. 6 Boundary condition



탱크룸에 가해지는 하중조건은 총 2가지)로 탱크룸 내부에 압력 0.3bar를 가하는 조건과 소방차 주행 시 발생하는 외부충격은 아래 방향으로 $2.5g^{3)}$ 의 충격을 가하는 조건이다(Fig. 7). 또한 탱크룸 내부에 소방용수와 소화약제가 가득 적재되어 있다는 전제하에 정수압 조건을 부가하였으며, 탱크룸의 3D 모델링에 point mass로 12.5ton을 추가하여 해석을 수행하였다.

3.2 탱크룸의 구조해석 결과

본 연구에서는 ANSYS workbench 19.1를 사용하여 탱크룸에 가해지는 내압 및 충격 가속도에 따른 응력 분포를 확인하여 구조적인 취약부를 확인하였다. 또한 구조해석 결과를 토대로 구조적 취약부에 개선 설계를 적용하여 탱크룸에 대한 구조강도 보장을 진행하였다.

Fig. 8는 탱크룸 내부에 0.3bar의 조건으로 내압을 부여한 구조해석 결과를 나타낸다. 탱크룸 하단 부위의 외부패널과 내부패널이 접촉되어지는 지점인 A 지점에서 최대 응력 약 54MPa이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 탱크룸의 내압 해석에서 최대 응력이 탱크룸의 제작에 주된 재질이 PP의 항복응력(약 26MPa)을 넘는 수치이므로 구조적으로 매우 취약하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 최대 응력 지점을 제외한 주위 지점에서는 약 15MPa 이하의 응력 분포를 확인하였지만, 이 또한, 개선 설계를 통해 탱크룸 하단부에 구조적 보강이 필요하다고 판단된다.

Fig. 9는 소방차 주행 시 발생하는 2.5g의 외부 충격이 충격 반대 방향으로 가해지는 것에 대한 충격 해석 결과를 나타낸다. 탱크룸 하단 부위의 외부패널과 내부패널의 접촉지점 즉 구조 보강을 위해 제작된 보강재 A 지점에서 최대 응력 약 57MPa이 발생하는 결과를 확인하였다. 이는 가속도 2.5g의 외부 충격에 대한 최대 응력이 탱크룸의 재질인 PP의 항복응력(약 26MPa)을 넘는 수치이므로 구조적으로 매우 취약한 것을 확인할 수 있었다. 또한 최대 응력 지점과 근접한 부위인 B, C 지점에서 최대 응력보다는 낮은 응력이 분포하고 있지만, PP 재질의 항복응력에 근접한 응력(25MPa)이 발생하여 구조적으로 보강이 필요하다고 판단된다.

탱크룸의 내압 및 충격 해석 결과 최대 응력이 탱크룸의 재질인 PP의 항복응력을 초과하는 수치로 구조적으로 매우 불안정한 상태라는 것을 알 수 있었다.

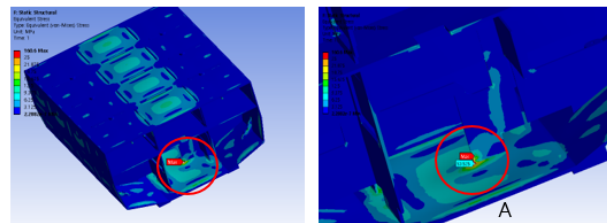


Fig. 8 Result of structural analysis for pressure

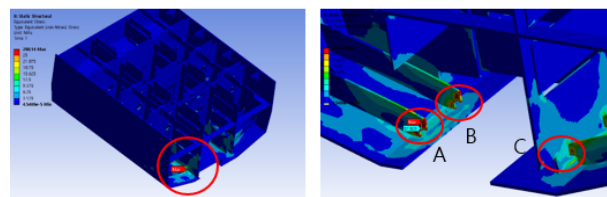


Fig. 9 Result of structural analysis for acceleration

4. 탱크룸 3D 모델링 개선 설계

탱크룸의 구조해석 결과를 토대로 탱크룸에 대한 개선 설계(7)를 진행하였다. Fig. 10는 기존 탱크룸의 3D modeling이며, Fig. 11은 개선 설계가 적용된 탱크룸의 3D modeling 이다.

Fig. 10과 Fig. 11에서 녹색으로 표시된 부분이 개선 설계가 이루어진 부위이다. 기존 구조해석 결과 탱크룸의 하단 부위에서 응력이 집중되는 현상을 분산시키기 위해서 보강재를 보강하였다. 특히 탱크룸과 새시부가 접촉되는 부위에 많은 보강을 적용하여 응력을 분산 시키고자 하였다. 우선 내부 패널과 외부 패널을 지지하는 보강재의 각진 형태를 유선형 형태로 설계 변경을 하였으며, 최대 응력 발생 부위에 보강재를 추가(8)하는 등의 설계 변경을 수행하였다. 또한 구조적인 보강이 이루어져야 하는 설계 변수(9)를 고려하고 구조해석 상의 높은 응력이 분포되어 있는 요소를 설정하여 보강재를 추가하였다. 보강

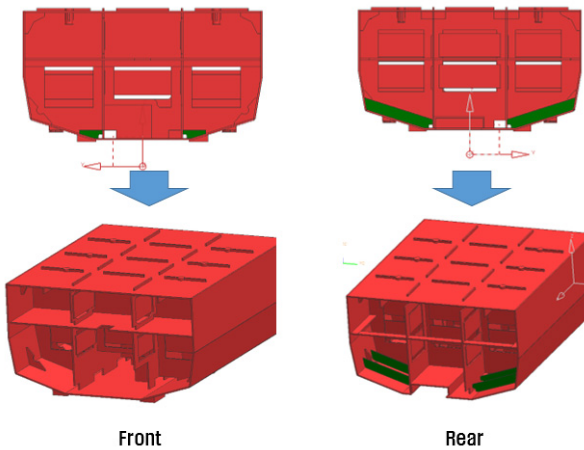


Fig. 10 3D modeling of previous tank room

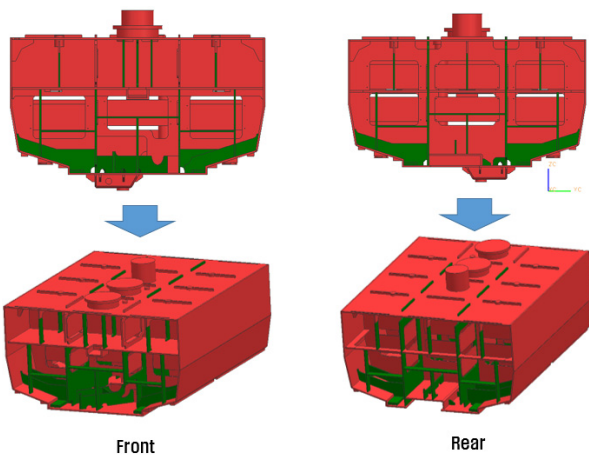
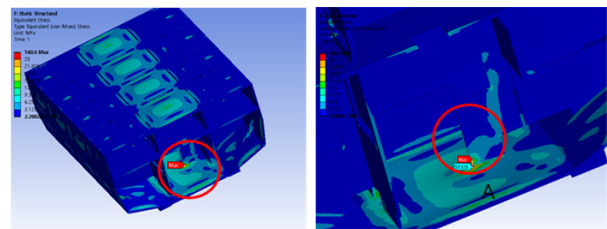


Fig. 11 3D modeling of new tank room

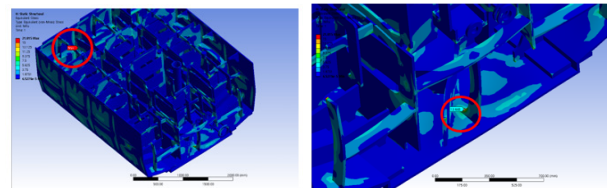
재의 재질은 탱크룸 제작에 사용된 재질과 동일한 PP 소재를 적용하였다. 보강재의 두께는 기존 탱크룸의 패널과 동일한 두께인 20mm로 설정하여 보강하였다.

5. 탱크룸 개선 설계에 대한 구조해석 결과

해석 방법은 기존 탱크룸 해석 시뮬레이션과 동일한 조건을 적용하여 수행하였다. 먼저 Fig. 12는 탱크룸의 개선 설계안에 대해서 내압 0.3bar를 가했을 때의 개선 전 모델과 개선 후 모델과의 구조해석 비교 결과이다. 탱크룸의 개선 설계안에 대해서 내압

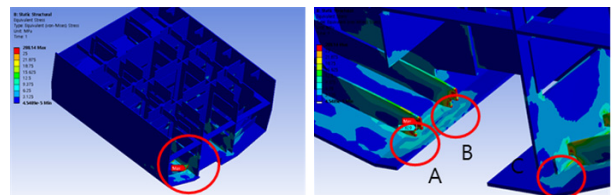


Pressure analysis result of the model before improvement

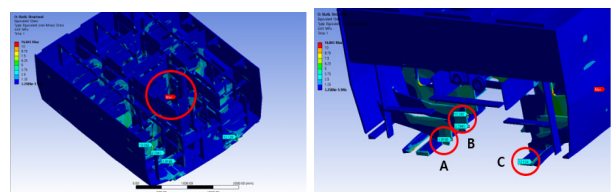


Pressure analysis result of the model after improvement

Fig. 12 Comparison of pressure analysis results



Impact analysis result of the model before improvement



Impact analysis result of the model after improvement

Fig. 13 Comparison of acceleration analysis results

Table 3 Comparison of analysis results

Division	Result(before)	Result(after)
Pressure(0.3bar)	54MPa	22MPa
Acceleration(2.5g)	57MPa	17MPa

0.3bar를 가했을 때의 구조해석 결과이다. 해석 결과 개선 후 모델의 최대응력은 약 22MPa로 낮춰졌으며, 개선 전 모델의 최대응력 지점을 개선 후 모델과 비교해서는 약 12MPa로 응력이 낮춰진 것을 확인할 수 있었다. 응력 분포 또한 낮게 형성되어 구조적인 개선이 이루어졌다고 확인할 수 있었다.

Fig. 13은 탱크룸의 개선 설계안에 대해서 아래 방향으로 2.5g의 충격을 가했을 때의 개선 전 모델과 개선 후 모델과의 구조해석 비교 결과이다. 탱크룸의 개선 설계안에 대해서 중력 반대 방향의 외부 충격인 아래 방향으로 2.5g의 충격을 가했을 때의 구조해석 결과이다. 기존 모델 해석 결과 A지점은 57MPa로 최대 응력이 발생하였으나, 구조 개선한 물탱크의 해석 결과 A지점은 약 3MPa로 응력이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 외부 패널을 지지하는 보강재의 모델링 형상변경을 통해 응력 집중을 피하도록 설계하였다. 하지만 개선 후 모델에서는 최대 응력이 기존 모델 최대 응력 지점에 다른 지점에서 약 17MPa로 나타났다. 응력 분포 또한 기존 탱크룸의 구조 해석 결과와 비교하여 낮게 형성되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 구조강도의 개선을 위한 설계최적화가 잘 이루어졌다고 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 항공기 구조용 소방차의 탱크룸을 대상으로 하여 구조해석을 수행하였다. 해석 대상물들의 작동 상황을 정적 환경에서 모사할 수 있도록 Fig. 6, Fig. 7과 같이 하중조건과 구속조건을 정의하여 ANSYS 상용 해석프로그램을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 외부 충격에 대한 해석 결과 최대 응력 및 응력 분포는 Fig. 9에서와 같이 차량 새시와 탱크룸을 연결하는 탱크룸 하단부의 구조물에서 분포하고 있다는 것을 확인할 수 있었으며, 탱크룸에 내압을 가하는 구조해석 결과 Fig. 8에서와 같이 최대 응력 및 응력 분포가 외부 패널과 내부 패널을 연

결하는 부위에 집중적으로 분포되어 있다는 것을 확인할 수 있었다.

개선 전 탱크룸 모델과 개선 후 탱크룸 모델과의 구조해석 결과 비교에서는 내압 해석 결과 최대 응력이 60% 가량 감소하였고, 가속도 충격 해석 결과 최대 응력이 70% 가량 감소하여 구조적 보강이 이루어졌다는 것을 확인할 수 있었으며, 응력 감소의 주된 원인은 기존 탱크룸 모델에서 내부 패널과 외부 패널 사이에 보강재를 추가하고, 보강재 형태를 수정하는 등의 응력 분산을 시킬 수 있는 개선 설계가 이루어져 가능했다고 판단된다.

후 기

이 연구는 2021년도 국방부, 산업통상자원부에서 민간기술협력 전력지원체계개발사업의 지원을 받아 수행된 연구(과제번호 : 20-전력지원-03)입니다

References

- 1) P.RLewis and G.WWeidmann. "Catastrophic failure of a polypropylene tank Part i: primary investigation," Engineering Failure Analysis, Volume 6, Issue 4, 1 August 1999, Pages 197-214
- 2) NFPA 414. (2020), "Standard for Aircraft Rescue and Fire-Fighting Vehicles."
- 3) Jonggeun Won, Jongil Yoon, Hyunah Lee, Seonggyo Chung, Jaesu Jeong. (2022). Simulation Analysis on Static Safety of 55Hp-Servo-Based Hydrostatic Transmission. Journal of Drive and Control, 19(1), 34-42.
- 4) M. K. Seo, E. Batbayar, H. Y. Shin, H. Y. Lee, J. I. Ko. (2021). Development of Modeling Method of Hysteretic Characteristics for Accurate Load Measurement of Trucks. Journal of Drive and Control, 18(2), 38-45.
- 5) 日本消防検定協会, "消防ポンプ自動車の安全基準", 平成 19年 3月.
- 6) Seung Woon Park, Yo Han Choi, Chul-Hee Lee. (2022). Review of Regulation for Rollover Test and Evaluation of Safety for Buses by using Simulation of Multi-body Dynamics. Journal of Drive and Control, 19(3), 39-46.

- 7) NFSC 402, (2021), “National fire safety code for extinguishing tank and water tank.”
- 8) Dongpil He and, Sehong Min, “A Study on the Structural Analysis for Sloshing Prevention through Binding between FRP Firefighting Water Tank Members,” J Korean Soc Hazard Mitig 2022; 22(2): 91-100.
- 9) S. Y. Cho, Y. C. An, C. H. Lee. (2018). Optimum Design of Forklift Frame for weight minimization. 유공압건설기계학회 학술대회논문집, 52-53.