

극저온 공통격벽 추진제 탱크의 단열 시험과 과도 열전달 해석을 통한 단열 성능 평가

김예지¹, 이경한^{1,4}, 최상민³, 김상우^{1,2,4,†}, 이수용⁴

¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

²한국항공대학교 항공우주공학과

³대한항공 항공기술연구원

⁴한국항공대학교 항공우주산업기술연구소

Insulation Performance Evaluation through Insulation Test and Transient Heat Transfer Analysis of Cryogenic Common Bulkhead Propellant Tanks

Yeji Kim¹, Gyeong-Han Lee^{1,4}, Sang Min Choi³, Sang-Woo Kim^{1,2,4,†} and Soo-Yong Lee⁴

¹Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

²Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, Korea Aerospace University

³Space/Future Technology, Korean Air R&D Center

⁴Research Institute for Aerospace Engineering and Technology, Korea Aerospace University

Abstract

The validity of the analysis results was confirmed based on the insulation test results, and the vaporization mass generated in the common bulkhead was calculated to evaluate the common bulkhead propellant tank's insulation performance. The analysis results were validated by comparing the transient heat transfer analysis with the insulation test results. A transient heat transfer analysis was subsequently conducted on the common bulkhead propellant tank, considering the internal heat conduction in the propellant tank and natural convection heat transfer due to the outside air. This analysis extracted the heat flux generated in the common bulkhead and quantified the vaporization mass, a key indicator of insulation performance. Consequently, the vaporization mass was calculated at 0.09 kg, below the insulation design standard of 0.12 kg for the common bulkhead propellant tank, confirming it meets the insulation performance standard.

초 록

본 연구에서는 단열 시험 결과를 기반으로 해석 결과의 유효성 검증을 수행하였으며, 공통격벽에서 발생하는 기화 질량을 산출하여 공통격벽 추진제 탱크의 단열 성능을 평가하였다. 과도 열전달 해석 결과와 단열 시험 결과를 비교하여 해석 결과의 유효성을 검증하였다. 이후 추진제 탱크에서 발생하는 내부 열전도와 외기로 인한 자연 대류 열전달을 고려하여, 공통격벽 추진제 탱크에 대한 과도 열전달 해석을 수행하였다. 이를 통해, 공통격벽에서 발생하는 열 유속을 추출하고, 단열 성능의 정량적 지표인 기화 질량을 산출하였다. 그 결과 공통격벽 추진제 탱크의 단열 설계 기준인 0.12 kg 보다 낮은 0.09 kg의 기화질량이 산출되어 단열 성능 기준에 부합함을 확인하였다.

Key Words : Common Bulkhead(공통격벽), Insulation Test(단열 시험), Heat Flux(열 유속), Transient Heat Transfer Analysis(과도 열전달 해석), Boil-off Mass(기화 질량)

1. 서 론

Received: Jul. 05, 2024 Revised: Jul. 25, 2024 Accepted: Aug. 05, 2024

† Corresponding Author

Tel: +82-02-300-0286, E-mail: swkim@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

소형발사체는 지구 저궤도 (Low Earth Orbit)에 500 kg 이하인 탑재물을 투입할 수 있는 발사체이다. 최근 우주 발사체 시장은 저궤도 위성의 수요 증가에 따라 전 세계 적

으로 우주 발사체를 개발이 활발히 이루어지고 있다 [1]. 이러한 동향에 맞추어 저궤도 위성에 대한 수요와 소형발사체에 대한 개발과 운용이 증가하고 있다. 소형발사체의 상단 시스템은 크게 엔진, 추진기관, 기타 서브시스템으로 구분할 수 있으며, 초기 개념 설계 단계에서 중량 배분을 위한 구조 서브시스템 설계 개발이 진행되고 있다[2]. 그중 추진제 탱크는 발사체 중량의 대부분을 차지하기 때문에 구조 경량화가 가능한 공통격벽 추진제 탱크 연구가 요구된다[3].

공통격벽 추진제 탱크는 기존의 분리된 산화제 탱크와 연료 탱크를 공통격벽으로 통합한 일체형 구조이다. 이러한 공통격벽 구조는 연료 탱크와 산화제 탱크를 연결하는 연결 탱크(intertank)의 높이를 감소시킨다. 이는 기존의 추진제 탱크 대비 제한된 공간에서 구성품의 효율적인 배치와 경량화가 가능하다는 장점이 있다. 또한 폼 코어 샌드위치가 적용된 공통격벽은 폼 코어의 상/하부에 강성이 높은 금속 판이 적층된 구조로 높은 단열 효과와 경량성이 우수하다[4]. Singh 등은 인도 우주 연구 기구(ISRO; Indian Space Research Organization)에서 개발한 GSLV III에 폼 코어 샌드위치 공통격벽을 적용하여 질량이 최대 590 kg 감소가 가능함을 확인하였다[5].

한편, 극저온 산화제와 연료는 외부 대기와의 온도 차이로 인해 열적 성층화(Thermal stratification) 현상이 발생한다. 이로 인해 상부의 추진제 온도가 상승하여 높은 증기압(vapor pressure)이 유발된다. 그뿐만 아니라 산화제가 기화되어 기포 형태의 공동현상(Cavitation)과 서지(Surge) 현상이 일어날 수 있다[6]. 이는 액체 산소의 유입을 지연시켜 연료 손실을 야기한다. 또한 극저온 산화제와 연료의 온도 차이로 인해 발생하는 온도구배는 열 변형을 일으켜 탱크의 구조 거동이 달라지게 된다[7].

따라서 폼 코어 샌드위치 구조의 공통격벽 추진제 탱크 설계 시 단열 성능과 구조 안전성을 고려한 단열 설계가 요구되며, 이와 관련되어 선행 연구가 수행되었다. Vietze 등은 공통격벽, 스킷, 측벽과 상부 벽을 통해 유입되는 열전달량을 측정하기 위해 실험 결과와 전산 유체역학 기반 시뮬레이션 결과를 비교 검증하였다[8]. Sumith.S 등은 폼 코어 샌드위치 내에서 발생하는 열전도도를 확인하기 위해 과도 열전달 해석을 수행하여 공통격벽의 단열 성능을 분석하였다[9]. NASA/MSFC는 단열 설계 조건을 정립하기 위해 LH₂의 열적 성층화 현상에 대한 광범위한 실험을 진행하였으며, LH₂의 탑재량은 시간당 6% 이하로 증발(Boil-off) 하도록 제안하였다[10]. Kang 등은 유한요소해석을 이용하여 열적 성층화로 인해 발생하는 기화 질량을 도출하고, 실험 결과와 비교를 통해 기화 질량과

압력 사이에 상관관계를 확인하였다[11].

본 연구에서는 단일 시험 결과를 기반으로 공통격벽 추진제 탱크의 과도 열전달 해석을 수행하였다. 이후 단일 성능을 평가하기 위한 정량적 지표인 기화 질량(BOM; Boil-off Mass) 산출을 통해 공통격벽 추진제 탱크의 단열 성능을 확인하였다. 이때 공통격벽과 액체 질소와의 내부 열전도를 고려한 과도 열전달 해석을 수행하여 단일 시험 결과를 통해 해석 결과의 유효성을 검증하였다. 최종적으로 극저온 공통격벽 추진제 탱크에 대한 과도 열전달 해석을 수행하여 공통격벽에서 발생하는 기화 질량을 도출하였다.

2. 단일 시험 유효성 검증

폼 코어 샌드위치 공통격벽 추진제 탱크는 극저온 추진제를 적용하였을 때 단열 성능 평가를 통한 구조안전성 확보가 요구된다[12]. 따라서 본 연구에서는 극저온 추진제에 대한 공통격벽의 단일 시험과 열전달 해석 결과를 비교하여 해석 결과의 유효성을 검증하였다.

2.1 단일 시험

Figure 1은 단일 시험에 사용된 단일 시편의 개략도를 보여준다. 단일 시편은 200 mm × 200 mm × 50 mm의 크기를 가지며, 단열재(Foam) 상/하부에 2 mm의 알루미늄 판이 적용된 구조이다.

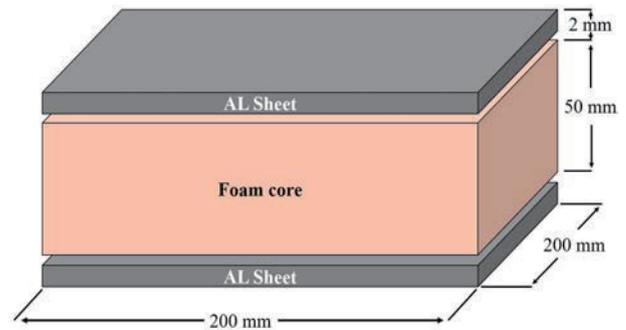


Fig. 1 Schematic View of Insulation Specimen

Figure 2는 단일 시편의 단열 성능을 평가하기 위한 시험 구성과 열전대(thermocouple)의 부착 위치를 보여준다. 단일 시험은 단일 시편 상부에 -196 °C의 극저온 액체 질소(LN₂)가 채워진 철(steel) 용기를 두고 시간에 따른 시편의 온도 변화 측정을 진행하였다. 이때, 열전대는 단일 시편의 시간에 따른 온도 변화를 측정하기 위하여 상부, 중앙, 하부에 부착하였다. 단일 시험은 평균값을 도출하여 정확한 결과를 얻기 위해 총 5회 수행하였고, 소형발사체 대기 시간을 고려하여

약 30분 동안 진행하였다. 또한 단열 시험 외부에 단열 스티로폼을 적용하여 외부 온도의 영향을 최소화하였다.

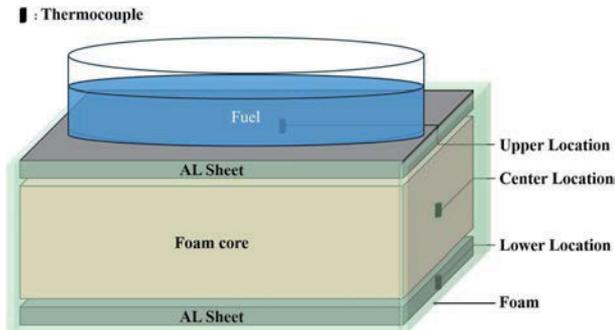


Fig. 2 Experimental setup for Insulation Performance Verification

2.2 단열 시험의 유한요소해석

2.2.1 단열 시험 시험편 모델

단열 시험 결과와 열전달 해석 결과의 유효성을 검증하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 이때 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/standard를 사용하여 과도 열전달 해석을 수행하였다. Fig. 3은 과도 열전달 해석에 사용된 유한요소 모델을 보여준다. 이때 단열 시험편을 2차원으로 모델링하여 해석 시간을 단축시켰다. Table 1은 단열 시험 모델의 각 영역에 대한 소재를 나타낸다.

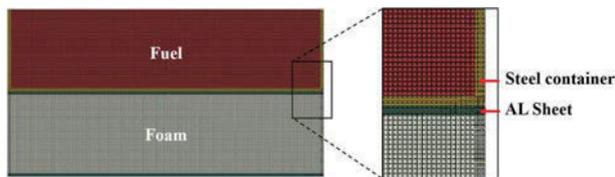


Fig. 3 2D model of Insulation Specimen

열전달 해석을 위해 ABAQUS에서 2차원 모델에 사용되는 4절점 선형 열전달 요소인 DC2D4를 사용하였다. 이때 요소의 크기에 따라 해석 결과의 정확도를 높이기 위해 수렴성 테스트를 수행하였다. Fig. 4는 단열 시험편의 요소 수에 따른 열전달 해석 결과의 수렴성을 보여준다. 그 결과 요소 크기가 1 mm부터 온도가 12.7 °C로 수렴하여 1 mm 크기의 요소를 이용하였다. 이때 총 절점(node)과 요소(element)의 개수는 각각 23,165, 22,848개이다. 한편, 단열 시험편과 알루미늄 판의 열전달을 통한 온도 분포를 확인하기 위해 두께 방향에 따라 상대적으로 작은 요소를 적용하였다.

Table 1 Composition for Insulation Specimen Model Using Insulation Test

Part	Material
Aluminum sheet	AA2198
Insulation Foam	DIAB H80
Metal container	SS316L
Fuel	LN ₂

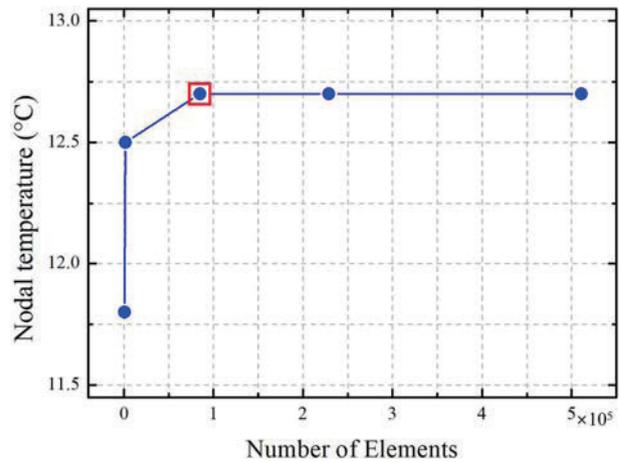


Fig. 4 Mesh Convergence Test for Insulation specimen Model

2.2.3 과도 열전달 해석

폼 코어 샌드위치 구조의 단열 시험 결과와 열전달 해석 결과의 유효성을 검증하기 위해 과도 열전달 해석을 수행하였다. 단열 시험과 동일한 단열 조건을 적용하여 단열 시험편과 액체 질소 간의 내부 열전도만을 고려하였다. Table 2는 단열 시험편에 사용된 소재의 열적 물성치를 보여준다. 액체 상태의 질소는 극저온 온도를 유지할 수 있는 열적 경계조건을 적용하였고, 이외 모든 영역에는 초기 온도를 부여하였다. 이때 액체 질소, 단열재 폼, 알루미늄 판, 철 용기는 각각 -196, 17, 18, 18 °C이다. 해석 시간은 단열 시험과 동일하게 1,800 s로 설정하였다.

Table 2 Thermal Properties for Transient Heat Transfer Analysis

	Conductivity [W/m·K]	Specific Heat [J/kg·K]	Density [kg/m ³]
AA2198	251	963	2,700
DIAB H80	0.026	1,750	80
SS316L	16.3	500	8,000
LN ₂	25.83	4,186	808

3. 공통격벽 추진제 탱크

3.1 폼 코어 샌드위치 공통격벽 추진제 탱크

추진제 탱크의 외부 직경, 전체 높이, 단열재 두께는 각각 2,000, 2,385, 50 mm이며, 단열재 상/하부에 2 mm의 알루미늄 판이 적층 된 구조이다. 이때 단열재의 중앙 두께와 외벽 끝단의 두께는 상이하다. 추가로 공통격벽 추진제 탱크의 외벽은 2 mm이다. Fig. 5 (a)는 폼 코어 샌드위치 공통격벽 추진제 탱크 형상을 보여준다. 이때 공통격벽 추진제 탱크의 대칭적 형상을 고려하여 2차원 축대칭(axisymmetric) 형상으로 모델링하였다. 추진제 탱크의 상단과 하단에는 각각 산화제 탱크와 연료 탱크를 의미하며, 액체 상태의 산소와 메테인을 탑재하였다. Ullage 영역은 액체 상태의 산소와 메테인 상단에 위치하며, 각각 기체 상태의 산소와 메테인을 가정하였다.

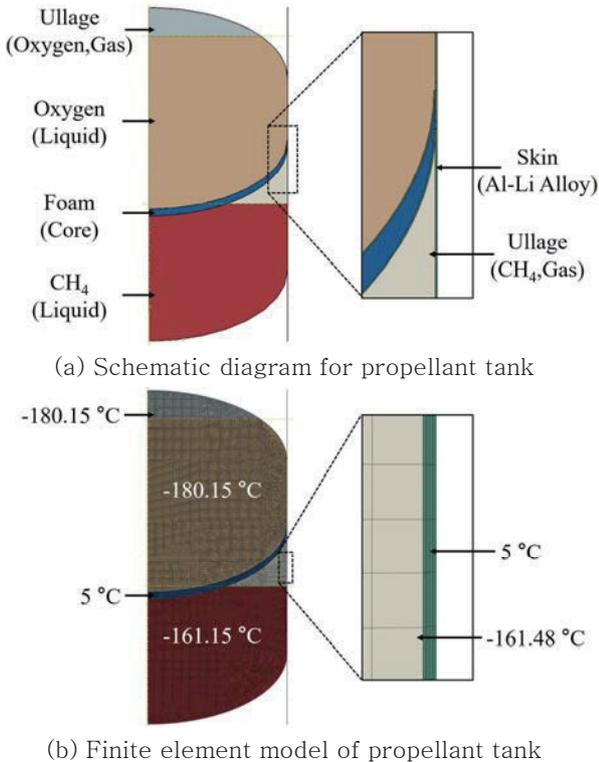


Fig. 5 2D Axisymmetric Model of Common Bulkhead Propellant Tank

요소의 크기는 열전달 해석 결과의 정확도를 높이기 위해 수렴성 테스트를 수행하였다. Fig. 6은 공통격벽 추진제 탱크의 요소 크기에 따른 요소 수의 열전달 해석 결과 수렴성을 보여준다. 그 결과, 요소 크기가 8 mm부터 15 °C로 수렴하여 8 mm의 요소 크기로 선정하였다. 이때 총 절점과 요소의 개수는 39,298, 39,789개이며, ABAQUS에서 2차원 축대칭 모델에 사용되는 4절점 선형 열전달 요소인 DCAX4를 사용하였

다. 이때 Fig 5 (b)에 나타낸 것과 같이 추진제 탱크 내부와 외부 대기 간의 열전달을 파악하기 위해 알루미늄 판을 두께 방향에 따라 상대적으로 작은 요소를 생성하였다.

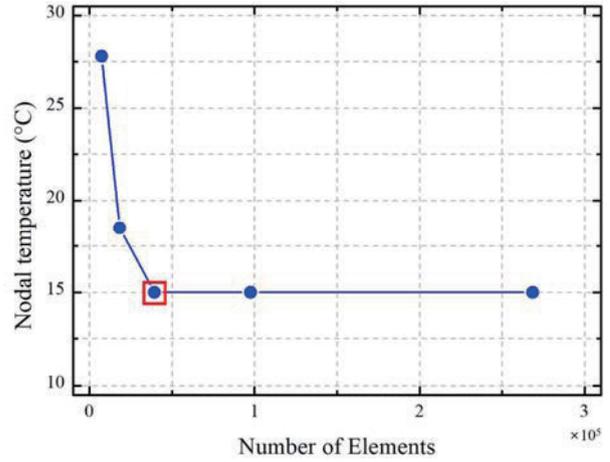


Fig. 6 Mesh Convergence Test of Common Bulkhead Propellant Tank

3.2 과도 열전달 해석

폼 코어 샌드위치 공통격벽 추진제 탱크의 단일 성능을 분석하기 위해 과도 열전달 해석을 수행하였다. Table 3은 열전달 해석에 필요한 열적 물성치 정보를 보여준다. 공통격벽 추진제 탱크 내부에서 발생하는 열전도와 외기와의 자연대류를 고려하여 열전달 해석을 수행하였다. 이를 위해 액체 상태의 산소와 메테인 온도는 극저온 온도를 유지할 수 있는 열적 경계조건을 적용하였으며, 각각 -180.15, 168.15 °C로 고정하였다. 이외의 모든 영역은 초기 온도 조건을 적용하였으며, 기체 상태의 산소, 메테인, 단열재 폼, 알루미늄 판은 각각 -180.15, -161.48, 5, 5 °C로 가정하였다. 이때 자연대류 열전달 계수와 외기 온도는 각각 10 W/m²·K, 15 °C로 탱크 벽면과 외기와의 자연대류를 고려하였다. 해석 시간은 소형발사체의 1단 비행시간을 고려하여 180 s로 가정하였다.

Table 3 Thermal Properties for Transient Heat Transfer Analysis

	Conductivity [W/m·K]	Specific Heat [J/kg·K]	Density [kg/m ³]
Al-alloy	154	880	2,700
O ₂	Gas	0.0085	976
	Liq.	0.1468	1,708
CH ₄	Gas	0.1146	2,220
	Liq.	0.1929	3,436
Foam	0.0370	1,751	80

3.3 기화 질량

Figure 7은 공통격벽 추진제 탱크의 단열 성능을 평가하기 위한 BOM 계산 과정을 보여준다.

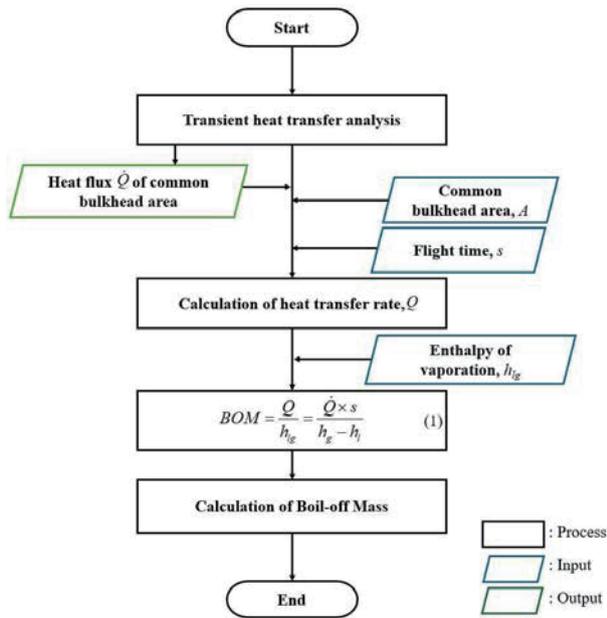


Fig. 7 Flowchart for Boil-off Mass Calculation

우선, 기체 질량을 산출하기 위해서 추진제 탱크 내부에서 발생하는 열전도와 외부 대기로 인한 자연 대류를 고려하여 과도 열전달 해석을 수행하였다. 이후, 공통격벽 추진제 탱크의 단열 성능을 평가하기 위하여 공통격벽에서 발생하는 열 유속(heat flux)을 ABAQUS를 통해 추출하였다. 이를 바탕으로 산화제와 연료의 열전달에 대응하는 표면의 면적과 총 비행시간을 통해 열전달량을 도출하였다[13]. 최종적으로 도출한 열전달량과 산화제의 기화 엔탈피를 이용하여 Eq. 1을 통해 BOM을 산출하였다.

$$BOM = \frac{Q}{h_g} = \frac{\dot{Q} \times s}{h_g - h_l} \quad (1)$$

여기서 Q , h_g , \dot{Q} , s , h_g , h_l 은 각각 총 열전달량, 기화 엔탈피, 단위시간당 열전달량, 총 비행시간, 기체 엔탈피, 액체 엔탈피를 의미한다. 이때 산화제의 기화 엔탈피는 액체 상태의 엔탈피와 기체 상태의 엔탈피의 차이를 통해 산출된다. 이때 산화제의 액체 상태와 기체 상태 엔탈피는 각각 -128.38 , 84.29 kJ/kg이며, 산화제 기화 엔탈피는 212.67 kJ/kg이다.

4. 결 과

4.1 단열 시험 유효성 검증

Figure 8은 단열 시편 모델에 대한 열전달 해석 결과를 보여준다. 단열 시편과 액체 질소의 온도 차이로 인해 내부 열전달이 발생하여 단열 시편 부근에서 큰 온도 구배가 나타났다. 이때 단열 시편의 상부, 중앙, 하부의 온도는 각각 -176.20 , -61.66 , -12.90 °C로, 초기 온도 대비 193.20 , 78.66 , 29.90 °C의 온도 변화가 나타났다.

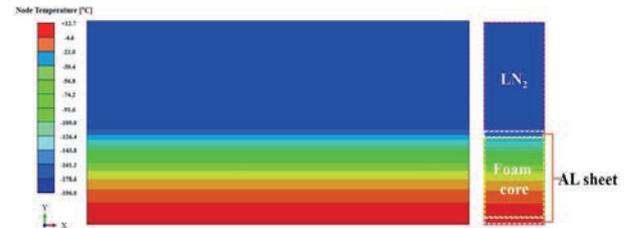
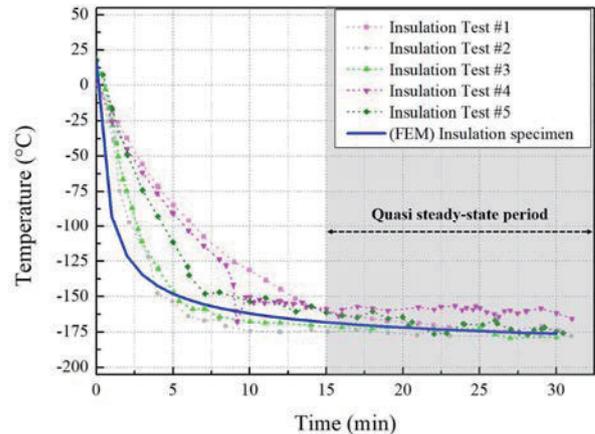
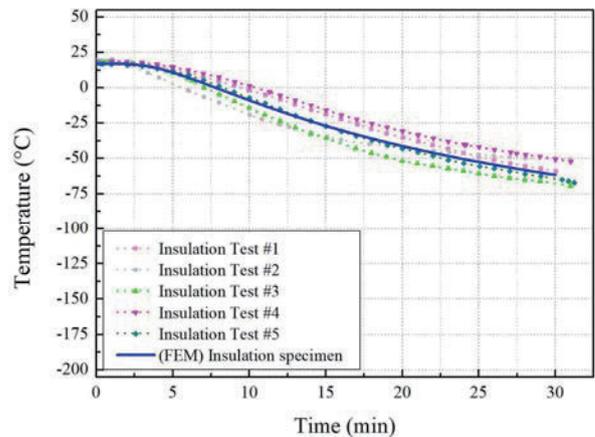


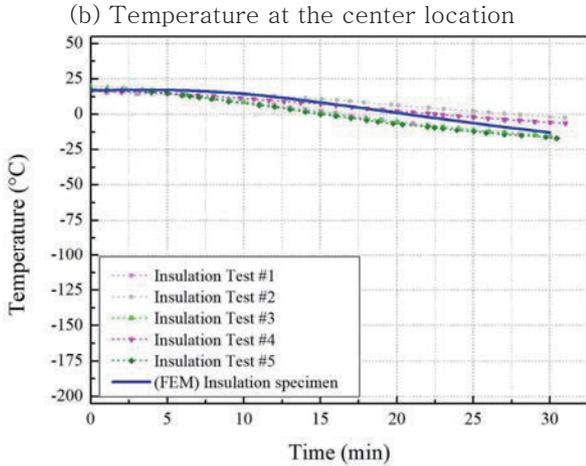
Fig. 8 Heat Transfer Analysis Results of Insulation Specimen Model Using Insulation Test

열전달 해석 결과의 유효성을 검증하기 위해 단열 시편에 부착된 열전대와 동일한 위치에서 시간에 따른 온도를 추출하였다.



(a) Temperature at the upper location





(c) Temperature at the lower location

Fig. 9 Validation of Insulation Performance Test and Heat Transfer Analysis Results

Figure 9는 각 위치에서의 시간에 따른 온도 변화를 보여준다. Fig. 9 (a)의 경우, 단일 시험과 열전달 해석 결과 모두 15분 이전에는 급격한 온도 변화가 발생하였으며, 이후에는 온도 변화가 거의 발생하지 않았다. 이는 액체 질소와 단일 시험편의 내부 열전도가 충분히 발생하여 준-정상상태(quasi steady-state period)로 판단하였다. Fig. 9 (b), (c)의 경우, 액체 질소와의 거리가 멀어짐에 따라 열전달의 영향이 줄어들어 온도 변화가 적게 발생하였다. 한편, Table 4는 30분에서의 단일 시험과 열전달 해석 결과를 보여준다. 열전달 해석 결과와 단일 시험 결과를 비교하기 위해, 30분에서의 열전대 부착 위치에 따른 단일 시험 결과의 평균 값을 도출하였다. 그 결과, 상부, 중앙, 하부에서 단일 시험 대비 각각 2.84, 3.31, 1.84 °C의 차이가 나타났으며, 단일 시험과 열전달 해석 결과가 유사함을 확인하였다. 이를 통해 단일 시험 열전달 해석 결과의 유효성을 검증하였다.

Table 4 Comparison of Insulation Test and Heat Transfer Analysis Results

	Temperature (°C)		
	Upper	Center	Lower
Exp. average	-173.36	-58.35	-11.06
FEM Results	-176.20	-61.66	-12.90
Deviation	2.84	3.31	1.84

4.2 공통격벽 추진제 탱크

Figure 10은 공통격벽 추진제 탱크의 시간에 따른 온도 분포를 보여준다. 산화제 탱크의 Ullage 영역에서

비해 연료 탱크의 Ullage 영역에서 온도 구배가 크게 나타났다. 이는 해당 영역에서 산화제와 연료와의 온도 차이로 인해 온도 구배가 크게 발생한 것으로 판단된다[14].

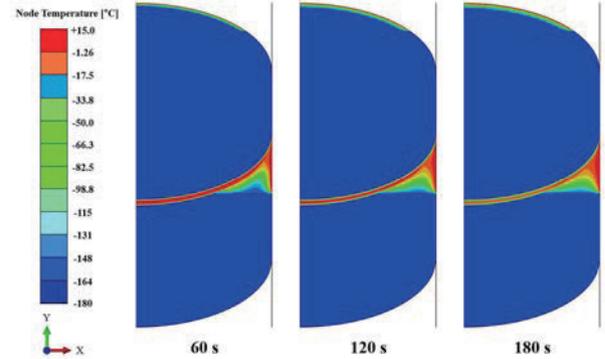


Fig. 10 Temperature Distribution of Common Bulkhead Propellant Tank

Figure 11은 180 s 시점의 공통격벽 추진제 탱크 열전달 해석 결과를 보여준다. 연료 탱크의 Ullage 영역과 단열제 영역의 최대 온도는 각각 14.99, 14.52 °C로 도출되었다. 외부 벽과 인접한 영역에서 온도 변화가 가장 크게 나타나 15 °C의 외부 온도와 차이가 미미함을 확인하였다. 이는 높은 열전도도를 갖는 알루미늄 합금으로 인해 해당 영역에서 가장 큰 온도 변화가 일어난 것으로 판단된다. 이를 통해, 외부 대기와 추진제 탱크 외벽 사이 접촉으로 인해 주로 열전달이 발생하였고, 공통격벽 중심부보다 외벽에 인접한 영역의 단열 성능이 상대적으로 취약한 것을 확인하였다. 따라서 추진제 내부에서 발생하는 열전도와 외부 대기로 인한 자연 대류 열전달은 공통격벽 추진제 탱크 온도 분포에 큰 영향을 미침을 확인하였다.

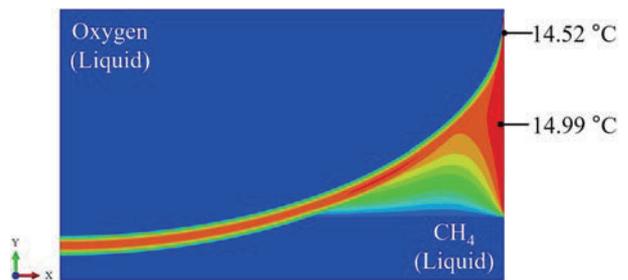


Fig. 11 Transient Heat Transfer Analysis Result of Common Bulkhead Propellant Tank

4.3 기화 질량 산출

추진제 탱크 내부에서 발생하는 열전도와 외부 대기로 인한 자연대류 열전달을 고려하여 공통격벽의 기화 질량을 산출하였다. 그 결과 공통격벽에서 발생하는 열 유속과 열전달량은 각각 61,476 mW/mm², 108.12

W로 도출되었고, 기화 질량은 91.51 g으로 산출되었다. 한편, 소형발사체 설계 요구 조건에 따르면 공통격벽에서 발생하는 기화 질량이 0.12 kg 이하인 경우 설계 허용 기준에 만족한다[15]. 따라서 공통격벽에서 발생하는 기화 질량은 0.09 kg으로 산출되어 단열 설계 기준에 부합함을 확인하였다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 단열 시험 결과를 기반으로 해석 결과의 유효성 검증을 수행하였으며, 공통격벽에서 발생하는 기화 질량을 산출하여 공통격벽 추진제 탱크의 단열 성능을 평가하였다. 이때 단열 시편과 액체 질소와의 내부 열전도만을 고려하여 과도 열전달 해석을 수행하였다. 단열 시편의 온도 분포를 기준으로 과도 열전달 해석 결과와 단열 시험 결과를 비교하여 해석 결과의 유효성을 검증하였다. 이후 폼 코어 샌드위치 공통격벽 추진제 탱크에 내부에서 발생하는 열전도와 외부 대기와 추진제 탱크 벽 사이의 자연 대류 열전달을 고려하여 과도 열전달 해석을 수행하였다. 그 결과 산화제와 연료와의 온도 차이로 인해 연료 탱크의 Ullage 영역에서 온도 구배가 크게 나타났다. 또한 추진제 탱크 벽에 인접한 영역에서 온도 변화가 크게 나타났으며, 15 °C의 외부 온도와 차이가 미미함을 확인하였다. 이를 통해 외부 대기와 추진제 탱크 외벽 사이 접촉으로 인해 주로 열전달이 발생하였고, 공통격벽 중심부보다 외벽에 인접한 영역의 단열 성능이 상대적으로 취약함을 확인하였다. 따라서 폼 코어 샌드위치 구조를 고려한 단열 성능 평가뿐만 아니라 외벽의 소재를 고려한 단열 설계 연구가 필요할 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 공통격벽에서 발생한 기화 질량은 0.09 kg으로 산출되었다. 이는 소형발사체 단열 설계 기준인 1 kg 이하를 만족하여 단열 성능 기준에 부합함을 확인하였다.

후 기

이 연구는 과학기술정보통신부의 거대과학연구개발사업인 '스페이스파이오니어사업'에 의해 수행되었습니다 (No.2021M1A3B9096764). 또한 이 연구는 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No.2022R1A6A1A03056784).

References

- [1] B. S. Oh, J. H. Lee, W. R. Roh, M. O. Joh, J. J. Park, & G. R. Cho, "The Conceptual Design of Launch Vehicle." *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 30, no. 6, pp. 130-141. 2002.
- [2] Lee, J, Seo, D, Choi, S, Lee, K, Park, J., " Conceptual Design of a Common Bulkhead Propellant Tank for the Upper Stage of a Small Launch Vehicle." *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Fall conference*, pp. 938-939, 2021
- [3] M. Ragab & F. M. Cheatwood, "Launch vehicle recovery and reuse". *AIAA SPACE 2015 conference and exposition*, pp. 4490, Aug 2015.
- [4] P. Wang, Y. Lei & Z. Yue, "Experimental and numerical evaluation of the flexural properties of stitched foam core sandwich structure". *Composite structures*, 100, pp. 243-248. 2013.
- [5] Y. P. Singh, H. Singh, P. K. Sahu & R. Muthukumar, "Common bulkhead tank design for cryogenic stage of an Indian launch vehicle." *Defence Science Journal*, vol. 72, No.1, pp. 3-9. 2022.
- [6] N.K. Cho, D.B. Seo, B.I. Yoo, S.H. Kim & Y.M. Han, "Investigation on Chilling Procedure for LOX Supply System for Liquid Rocet Engine." *Journal of the Korean Society for Propulsion Engineers*, vol. 23, No. 3, pp. 119-126., 2019.
- [7] D. K. Choi, J. W. Choi, S. Y. Lee, and J. H. Roh, "A Study on Thermal-Structural Analysis of Common Bulkhead Propellant Tanks Using a Two-Dimensional Axisymmetric Numerical Model," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, pp. 83-84, November 2021.
- [8] Vietze, M., Weiland, S., & Mundt, C. "Quick design tool for stratification processes in cryogenic fuel tanks with focus on sandwich common bulkheads." In *Proceedings of the 67th International Astronautical Congress*, pp. 26-30 2016.
- [9] S. Sumith, and R. Ramesh Kumar, "Thermo-structural analysis of cryogenic tanks with common bulkhead configuration," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 236, no. 5, pp. 900-909, June 2021.
- [10] W.E. Dean, "Saturn S- II Problem Resolution History Report," *North American Rockwell*, SD 71-256, 1971.
- [11] M. Kang, J. Kim, H. You & D. Chang, "Experimental

- investigation of thermal stratification in cryogenic tanks.”
Experimental Thermal and Fluid Science, 96, pp. 371-382.
2018.
- [12]S. Y. Kim, choi & D K. “Hydrogen Liquid, Storage
technology and application”, The Korean Hydrogen and
New Energy Society, vol. 12 , no. 2, pp 87-102 ,2018.
- [13]S. M. Tak, J. W. Park, M. K. Kang, D. J. Park, J. S. Lee,
and S. S. Lee, “Transient heat transfer analysis of inertial
measurement devices by outside frictional heat,” *Journal of
Aerospace System Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 32-37,
March 2010.
- [14]J. Y. Yang, G. H. Lee, S. W. Kim, S. Y. Lee, “Transient Heat
Transfer Analysis of Small Launch Vehicle Common
Bulkhead Propellant Tank with Different Insulation
Thickness,” *Journal of Aerospace System Engineering*,
vol.18, No.3, pp.70-75, 2024.
- [15]Korea Aerospace Research Institute, “Common Bulkhead
Propellant Tank Development Specification,” SPPO-SP-
LV1-001, Ver. B, 2022.