

# 상업용 선박의 LNG-암모니아연료 겸용을 위한 연료탱크 설계 최적화

## Design Optimization of Ammonia-LNG Combined Fuel Tank for a Commercial Vessel

이윤성\* · 박재관\* · 최준혁\* · 이 빈\* · 임지윤\* · 조락균\*\*\*

Yunseong Lee\*, Jae-Kwan Park\*, Junhyuk Choi\*, Been Lee\*, Jiyun Lim\* and Nak-Kyun Cho\*\*\*

(Received 28 September 2022, Revision received 22 November 2022 Accepted 22 November 2022)

**Abstract :** Under decarbonization regulations by the International Maritime Organization, the shipping industry is working to develop post-LNG fuels. Among them, the possibility of using ammonia lead is emerging due to its technical advantages. In this study, structural integrity assessment and optimization were conducted when ammonia was shipped to the existing LNG tank. As a result, it was not safe due to higher mechanical stress. In order to verify this, linear and high cycle fatigue analysis were performed when liquified ammonia with a relatively high density to LNG was shipped. It was evaluated based on the safety evaluation criteria of the IGC code, and the optimization was conducted by applying the design of experiments method. The results of this study can be used to design fuel tanks using liquefied ammonia and LNG composite, providing insight to secure structural robustness of the fuel tank.

**Key Words :** Liquefied Natural Gas, Liquefied Ammonia, Fuel Tank, Design Optimisation

### — 기 호 설 명 —

IMO : International Maritime Organization

AIP : Approval In Principle

SPH : Smoothed Particles Hydrodynamics

IGC : International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk

FE : Finite Element

M.P. : Measurement Point

\*\*\* 조락균(ORCID:https://orcid.org/0000-001-6836-8539) :

교수, 서울과학기술대학교 MSDE학과

E-mail : nkcho@seoultech.ac.kr, Tel : 02-970-7278

\*이윤성(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2210-1518),

\*박재관(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5692-2184),

\*최준혁(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0817-792X),

\*이빈(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5636-5795),

\*임지윤(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3612-2424) :

대학생, 서울과학기술대학교 MSDE학과

\*\*\* Nak-Kyun Cho(ORCID:https://orcid.org/0000-001-6836-8539)

: Assistant Professor, Department of Manufacturing Systems and Design Engineering (MSDE), Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech).

E-mail : nkcho@seoultech.ac.kr, Tel : 02-970-7278

\*Yunseong Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2210-1518),

\*Jae-Kwan Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5692-2184),

\*Junhyuk Choi(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0817-792X),

\*Been Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5636-5795),

\*Jiyun Lim(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3612-2424) :

Undergraduate student, Department of MSDE, SeoulTech.

- CEL : Coupled Eulerian Lagrangian
- EVF : Eulerian Volume Fraction
- G : Gravitational Force [N]
- L : Longitudinal Length of the Tank [mm]
- $\omega$  : Resonant Frequency [Hz]
- h : Water Depth [mm]
- $P_p$  : The Pressure at Full Scale
- $P_m$  : The Pressure at Model Scale
- $\rho_p$  : The Density at Full Scale
- LNG : Liquefied Natural Gas
- g : Gravitational Acceleration [m/s<sup>2</sup>]
- $\rho_m$  : The Density at Model Scale
- X : Displacement [mm]
- A : Maximum Amplitude [mm]
- w : Resonant Frequency [Hz]
- S : Second
- Re : Minimum yield stress at room temperature
- $\sigma_a$  : Allowable equivalent stress

## 1. 서 론

세계적인 탄소 중립 흐름에 따라 국제 해사 기구(IMO)은 선박에서 발생하는 온실가스를 2050년까지 50% 감축하는 것을 목표로 하고 있다.<sup>1)</sup> 기존 친환경 연료인 LNG는 벙커C유에 비해 탄소 배출 감소량이 15%에 불과하다. 따라서 액화 암모니아, 수소 등 포스트 LNG 연료에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 그 중 액화 암모니아는 공급 안정성과 취급이 용이하고, 기술적 난도가 낮다. 따라서 국제 에너지 기구에서는 2060년 신조선의 60% 이상이 암모니아 연료를 사용할 것으로 예측하고 있다.<sup>2,3)</sup>

2050년까지 IMO 규제를 충족하기 위해서는 기존 LNG 추진 선박의 주기와 연료탱크를 암모니아 연료 시스템으로 교체하는 작업이 필요하다. 이때 LNG 탱크에서 암모니아 탱크로의 전환 비용과 개조 기간 동안 선박을 운행하지 못하는 손실이 발생한다.<sup>4)</sup> LNG-암모니아 겸용 연료탱크를 개발한다면 연료탱크 교체가 불필요하기 때문에 경제적인 손실을 최소화할 수 있어 이에 대한 대

안으로 적합하다. 그러나 현재 LNG-암모니아 겸용 탱크에 대한 연구가 기초 단계에 불과하므로 연료탱크의 신뢰성 확보가 요구된다.<sup>5)</sup>

본 연구에서는 타이이지코리아에서 개발한 Type-B 형태의 LNG 연료 탱크모델을 제공받아 사용하였다. 보수적인 평가결과를 도출하기 위하여, 액화 암모니아가 연료 탱크에 90% 선적된 상태를 가정하여 구조 건전성을 평가하였다. 연료탱크의 내, 외부의 온도차와 액화 암모니아의 무게를 열, 기계적 하중으로 적용하였다. 온도 의존적 물성을 적용하였으며, 선형해석을 통해 도출한 최대 von-Mises 응력 값을 사용하여 IGC 코드 기반으로 최대 허용 응력과 고주기 피로 수명을 계산하였다. 이후, 구조적으로 취약한 부위에 대하여 다구찌 실험설계법을 적용하여 최적설계를 수행하였다. 추가적으로 선박의 운항 중 연료탱크 내 발생하는 슬로싱 현상에 대한 연료탱크의 구조적 건전성 평가를 수행하였다.

## 2. 구조해석

### 2.1 유한 요소 모델

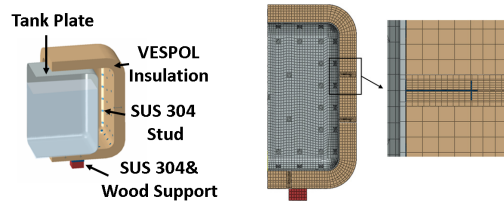


Fig. 1 (a) Prismatic Type-B fuel tank of TIG KOREA (b) Localized mesh model adjacent the stud

Table 1 Technical specifications of the fuel tank

Tank	Size [mm]	Height	Width	Length
		3750	4750	3750
Stud	Part Name	Bottom Washer	Rod	Upper Washer
	Thickness [mm]	2.5	255.5	4.5
	Radius [mm]	40	3	35

Table 2 Mechanical properties of the materials<sup>4)</sup>

	Materials	Thermal Coefficient [°C <sup>-1</sup> ]	Poisson Ratio	Specific Heat [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Temperature Dependent Thermal Conductivity [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Young's Modulus [MPa]	Density [kg·m <sup>-3</sup> ]
1	Tank Plate	2.4 × 10 <sup>-5</sup>	0.33	500	110	68,000	2,400
2	VESPOL	6 × 10 <sup>-5</sup>	0.3	2,100	confidential	6.18	40
3	SUS 304	1.8 × 10 <sup>-5</sup>	0.29	500	16	190,000	8,000

본 연구에서는 타이이지코리아에서 제공한 LNG 연료 탱크모델을 사용하였다. 탱크의 내부구조는 Fig. 1(a)와 같고, 연료 탱크의 구성부품은 Table 1에 나타내었다. 연료탱크 구성품의 재료물성은 Table 2와 같다.

### 2.2 안전성 평가 기준

본 연구에서는 타이이지코리아의 선행 연구 보고서에 따라 취약 부위인 스테드에 대해서만 평가하였다. 스테드 재료가 SUS304인 점을 고려하여, 금속재료의 항복 메커니즘을 가장 잘 나타내는 스테드 재료가 SUS304인 점을 고려하여, 금속재료의 항복 메커니즘을 가장 잘 나타내는 von-Mises 응력 값을 사용하여 연료탱크의 건전성 평가를 수행하였다.

$$\frac{R_c}{1.2} \leq \sigma_a \tag{1}$$

정적 구조 해석 결과는 IGC 코드에서 제시한 허용 응력 강도 식 (1)을 사용하여 평가하였다.<sup>6)</sup>

본 연구에서 생성된 유한요소모델은 Fig. 1(b)와 같다. 스테드가 삽입된 단열재 주변을 국부적으로 이산화하여 주변 단열재 격자크기 대비 20% 작은 격자를 생성하였다. 이를 통해 스테드에 발생하는 응력과 변형률의 크기를 정확하게 예측하였다. 또한 탱크의 1/4만 모델링한 후, 대칭조건을 적용하여 열-구조 등의 해석 시간을 단축시켰다. 모델의 요소와 절점의 개수는 Table 3과 같다.

해석에 사용된 경계 조건은 Table 4와 같다. 유한 요소 모델의 생성과 해석은 상용 프로그램인 ABAQUS 2021<sup>7)</sup>을 사용하였다. SUS304의 Re는

Table 3 Information of elements and nodes

Item	Information
Element type	C3D8
Number of elements	754,145
Number of nodes	913,790

Table 4 Mechanical & thermal loading magnitudes

Loading	Value
Ammonia Weight [W]	0.0184 [MPa]
Hydrostatic Pressure [P <sub>h</sub> ]	0.0184 [MPa]
Gravity [G]	9.81 [m·s <sup>-2</sup> ]
Inner Temperature [T <sub>i</sub> ]	-33.4 [°C]
Outer Temperature [T <sub>o</sub> ]	45 [°C]

270 MPa로, 식 (1)을 통해 얻은 허용 등가 응력은 225 MPa이다. 피로 수명 평가는 90% 충전비에 대한 암모니아 연료 선적 및 하역에 따른 누적 손상을 평가하였다. 도출된 결과는 IGC코드에 따라 20년 동안 1,000회 이상 사이클을 충족해야 한다.

### 2.3 연료탱크 건전성 평가

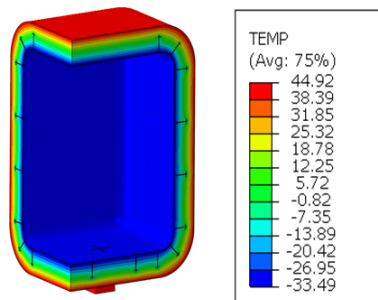


Fig. 2 Temperature distribution

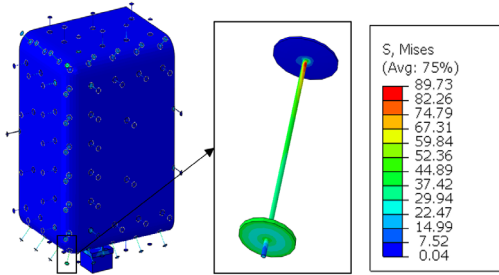


Fig. 3 Thermal analysis result

외부 및 내부의 온도 변화를 고려하지 않았다. 본 연구의 해석 결과는 두 가지의 안전성 평가 기준에 따라 평가되었다.

해석에 사용된 연료탱크의 내부 온도는 IGC 코드에 따라 액화 암모니아의 온도인  $-33.4^{\circ}\text{C}$ , 외부 온도는  $45^{\circ}\text{C}$ 의 경계조건을 적용하였다. 탱크 외부에서 오는 햇빛의 복사열은 고려하지 않았으며, 탱크 내 외부의 온도는 설정한 초기온도가 계속 유지되는 조건으로 가정하였다. 열 전달 해석을 통해 Fig. 2의 온도 구배를 도출하였고, 이에 따른 열 응력을 산출하였다. 열 하중에 의한 열 응력은 Fig. 3과 같다. 연료 탱크의 아래쪽 코너 부분에 있는 스티드에서  $89.73\text{ MPa}$ 의 von-Mises 응력이 발생한다. 이는 허용 응력 강도 기준인  $225\text{ MPa}$ 을 충족한다.

### 2.3.1 기계적 하중을 고려한 해석

1G 조건에서 액화 암모니아의 무게와 탱크의 자중을 적용한 해석 결과는 Fig. 4와 같다. 연료탱크의 1차 방벽이 암모니아의 무게 하중으로 인해 처지지만 서포트에 받쳐진 탱크 플레이트 부분은 처지지 않았기 때문에 그 옆의 스티드에 최대 등가 응력  $922\text{ MPa}$ 이 발생하였다.

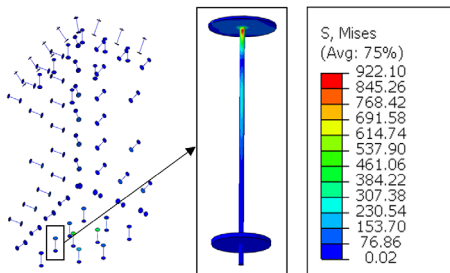


Fig. 4 Mechanical analysis result

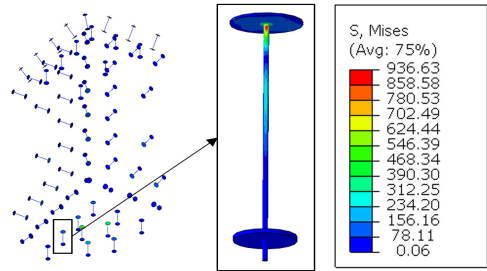


Fig. 5 Thermal & mechanical analysis result

### 2.3.2 열 및 기계적 하중을 고려한 해석

Fig. 5는 열 및 기계적 하중을 동시에 고려한 해석의 결과이다. 최대 등가 응력은 서포트 바로 옆 스티드에서 허용 응력 강도 기준을 초과하는  $936\text{ MPa}$ 이 발생하였다.

두 조건을 고려한 해석의 최대 응력의 발생 위치는 기계적 하중을 고려한 해석과 동일하다. 기계적 하중에 의한 최대 응력은 열 하중에 의한 최대 응력보다 약 10배 이상이다. 이는 기계적 하중이 높은 등가 응력의 주원인임을 나타낸다. 따라서 최적화 과정은 암모니아의 기계적 하중이 끼치는 영향을 고려하여 진행하였다.

### 2.3.3 피로 수명 평가

정적 해석으로부터 도출된 최대 von-Mises 응력을 이용하여 피로수명 계산 소프트웨어인 fe-safe<sup>8)</sup>를 통해 피로 수명 평가를 진행하였다.

SUS304의  $-33^{\circ}\text{C}$ 에서의 S-N 선도는 Fig. 6의 상온과 극저온 ( $-163^{\circ}\text{C}$ )의 S-N선도의 내삽법을 이용하여 도출하였다. 가장 취약한 스티드의 피로 수명은 159회로, IGC 코드의 기준을 충족하지 않는다.

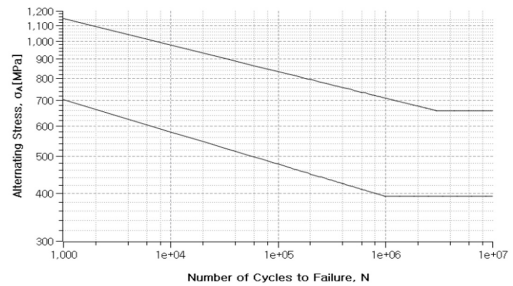


Fig. 6 SUS 304 S-N curve at  $-163^{\circ}\text{C}$  and room temperature

### 3. 최적화 설계 과정

액화 암모니아를 선적한 탱크에서 발생한 최대 등가 응력은 허용 응력 강도 기준을 충족시키지 못하였다. 따라서 최대 응력 값을 낮추기 위해 재료변경 및 실험계획법을 통한 치수 최적화 설계를 진행하였다.

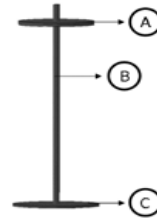


Fig. 7 Design parameter of the stud

#### 3.1 재료 변경을 통한 최적화

티아이지코리아에서 제공한 물성에서 1차 방벽의 탄성 계수는 68 GPa로 스테인리스강보다 상대적으로 낮다. 이에 1차 방벽이 쉽게 처지게 되어 스티드에 굽힘 응력이 발생하는 원인이 되었다. 발생하는 응력을 낮추기 위해 1차 방벽의 재료를 높은 항복 강도를 가진 고망간강으로 변경하였다.<sup>9)</sup> 고망간강의 물성은 Table 5에 명시하였다.

1차 방벽의 재료를 변경 후, 최대 등가 응력은 탱크 하단의 스티드에서 936 MPa에서 399 MPa까지 감소했다. 그러나 이는 여전히 IGC 코드에서 제시하는 허용응력 강도 기준을 초과한다. 따라서 응력을 감소시키기 위해 추가적으로 최대 응력이 발생하는 스티드의 치수 최적화를 진행하였다.

#### 3.2 스티드 치수 최적화

##### 3.2.1 주요인자 선정

선형 해석 결과, 치수 최적화의 대상은 탱크 하단부를 중심으로 높은 등가 응력이 발생하는 취약 부분인 스티드로 선정하였다.

최대 응력에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해 다구찌 방법을 사용하였다.<sup>11)</sup> 설계인자는 Fig. 7과 같이 윗 와셔의 두께, Rod의 반지름, 아래 와셔의 두께로 선정하였으며, 각각 A, B, C로 명칭을 부여했다.

Table 5 Material properties of high manganese steel<sup>10)</sup>

Young's Modulus [GPa]	Density [kg·m <sup>-2</sup> ]	Yield Strength [MPa]	Ultimate Strength [MPa]
200	7850	>400	>970

Table 6 Stud design factors and levels

	A: Upper Washer Thickness [mm]	B: Rod Radius [mm]	C: Bottom Washer Thickness [mm]
1	4.8	3.5	3
2	5	4	3.5
3	5.2	4.5	4

Table 7 L9 Arrangement table for design factors and level

Case	A [mm]	B [mm]	C [mm]
1	4.8	3.5	3
2	5	3.5	3.5
3	5.2	3.5	4
4	5	4	3
5	5.2	4	3.5
6	4.8	4	4
7	5.2	4.5	3
8	4.8	4.5	3.5
9	5	4.5	4

설계인자에 대한 수준(level)을 달리하는 3개의 변동 폭은 Table 6과 같다. 이를 기반으로 3수준 직교배열인 L9 직교배열표를 사용하여 Table 7과 같이 총 9개의 해석 케이스를 설정하였다. Table 8과 Fig. 8은 Rod에 발생하는 응력에 대한 분산분석 결과를 보여 준다. Rod에 발생하는 응력에 대해서 A변수, C변수는 크게 영향을 미치지 않으며 B변수가 가장 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 또한 3수준으로 갈수록 Rod에 발생하는 응력이 낮아지는 경향을 보이는 것을 확인하였다.

Table 8 Maximum von-Mises stress of Rod

Case	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Max. stress [MPa]
1	4.8	3.5	3	361.8
2	5	3.5	3.5	361.9
3	5.2	3.5	4	361.3
4	5	4	3	335.4
5	5.2	4	3.5	343.2
6	4.8	4	4	335.4
7	5.2	4.5	3	304.4
8	4.8	4.5	3.5	305.4
9	5	4.5	4	305.6

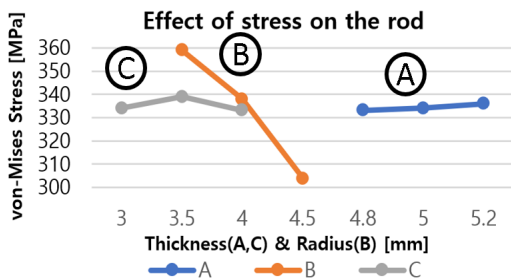


Fig. 8 The main effect of stress on the Rod

Table 9와 Fig. 9는 아래 와셔에 발생하는 응력에 대한 분산분석 결과를 보여 준다. 아래 와셔에서 발생하는 응력에 대해서는 C변수가 가장 큰 영향을 미치며, 다음으로는 B변수가 큰 영향을 미친다.

또한 Table 9를 통해 C변수가 커질수록 응력이 작아지는 경향을 확인하였다. 결과적으로, 응력에 영향을 미치는 주요인은 B변수와 C변수이며, 두 가지 요인은 서로 반비례 관계임을 확인하였다. 이를 적용하여 최적의 치수 값을 찾기 위한 추가적인 시뮬레이션을 진행하였다.

### 3.2.2 주요인자 최적 치수 선정

B변수와 C변수만을 고려하여 시뮬레이션을 진행한 결과는 Table 10에 정리하였다. 이때, B변수는 7 mm, C변수는 5.5 mm인 Case 3번에서 가장 작은 응력 값이 도출되었다.

Table 9 Maximum von-Mises stress of bottom washer

Case	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Max. stress [MPa]
1	4.8	3.5	3	191.352
2	5	3.5	3.5	172.624
3	5.2	3.5	4	152.359
4	5	4	3	200.234
5	5.2	4	3.5	161.974
6	4.8	4	4	158.883
7	5.2	4.5	3	225.592
8	4.8	4.5	3.5	190.996
9	5	4.5	4	156.112

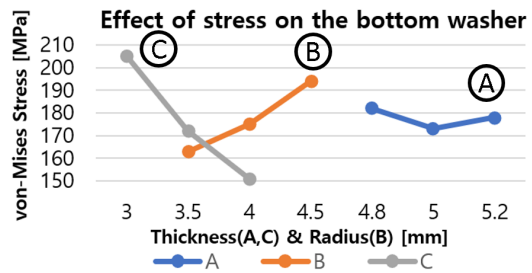


Fig. 9 The main effect of stress on the bottom washer

Table 10 Maximum von-Mises stress of simulation considering only major factors

Case	B [mm]	C [mm]	Max. stress (Location) [MPa]
1	5	5.5	257.2 (B)
2	6	5.5	232.2 (B)
3	7	5.5	206.9 (B)
4	7	6.5	215.5 (B)
5	8	5.5	234.1 (C)
6	8	6.5	216.2 (B)
7	9	5.5	246.5 (C)
8	10	5.5	246.9 (C)
9	11	5.5	214.3 (C)
10	12	5.5	224.7 (C)

### 3.3. 최적화 모델 건전성 평가 결과

#### 3.3.1 허용 응력 평가

Fig. 10은 최적화 이후의 해석 결과이다. 아래 와셔와 Rod의 이음새 부분에 굽힘에 의해 206 MPa의 최대 등가 응력이 발생하였다. 이는 IGC코드에서 제시한 허용 응력 기준인 225 MPa를 충족한다. 최적화 후의 최대 응력은 최적화 전과 동일 위치에서 발생하였으며, 약 78%의 응력이 감소하였다.

#### 3.3.2 최적화 모델 피로 수명 평가

1G 조건에서의 피로 수명 평가 결과, 피로 파괴가 발생하지 않았다. 보수적인 수명예측을 위해 2G 조건에서의 피로 수명 평가를 진행하였다. 해석 결과, 선적 및 하역에 대한 피로 파괴가 발생하지 않음을 확인하였다.

## 4. 슬로싱 해석

슬로싱 현상은 탱크 안에 부분적으로 채워져 있는 액화 연료가 외부 하중과 움직임에 의해 자유 표면에 변화가 생기는 현상이다. 탱크 내벽에 가해지는 지속적인 슬로싱 하중은 탱크 내부 단열재에 심각한 손상을 초래할 수 있다.

CEL해석은 동적 대변형에 적용하기 용이하며, 유체 구조 상호작용에 관한 문제해결에 큰 안정성을 보이고 부드러운 그래픽을 확인할 수 있다. SPH는 액체가 입자로 표현되며, 복잡한 난류 혹은 Multi-phase 상태의 유체 흐름 해석에 적합하다.

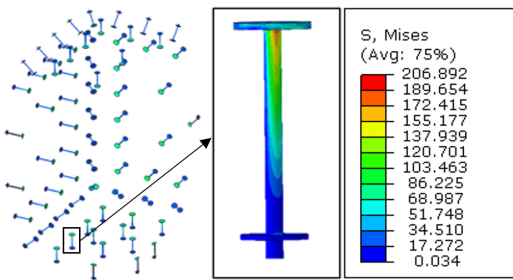


Fig. 10 Result of static structural analysis

본 연구는 CEL 해석을 이용하여 1차 방벽에 발생하는 압력 하중을 도출하였고, 이를 줄이기 위한 방해판의 형상을 설계하였으며, 방해판 설치 후 탱크에 발생하는 압력을 SPH 해석을 통해 확인하였다.

### 4.1 슬로싱 해석 모델

Fig. 11은 해석에 사용된 유한 요소 모델이다. 해석시간의 단축을 위해 1:100 모델로 해석을 진행 후 결과 값은 식 (2)를 적용해 1:1 규모 값으로 변환하였다. 해석에 사용된 탱크의 길이(L)와 높이(H)는 각각 39.9 mm와 29.9 mm이다. 본 연구에서는 IGC 코드에서 규정하고 있는 70%의 충전비로 진행하였으며, 각각의 측정위치(M.P)에서 발생하는 충격 압력 값을 측정하였다.

$$P_m = \left( \frac{\rho_f L_f}{\rho_m L_m} \right) P_f \quad (2)$$

### 4.2 슬로싱 해석 경계 조건

병진 운동에서 직육면체 탱크의 주기는 식 (3)을 통해 계산하였다.

$$X = A \sin(\omega t) \quad (3)$$

식 (4)는 직육면체 탱크의 움직임 주기를 나타내는 공식이다.

$$\omega = \sqrt{\frac{g\pi}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) / 2\pi} \quad (4)$$

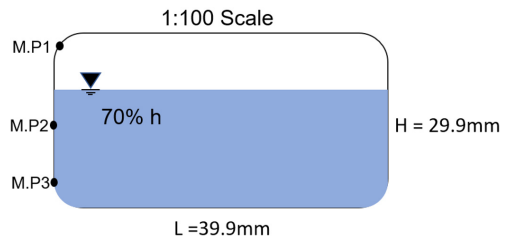


Fig. 11 Dimension of schematic 1/100 model

탱크의 움직임 주기가 내부 액체 연료의 고유 주파수와 비슷할 때 최대 충격 압력이 발생한다.<sup>12)</sup> 이에 따라 움직임의 진동수를 26.762 Hz로 설정하였다. 진폭은 수직 방향 길이의 10%인 2 mm로 설정하였다.

### 4.3 슬로싱 해석 결과

각각 측정위치에서 압력을 측정한 결과, 측정위치 1에서 최대 압력이 발생하였으며, 최대 압력은  $s=1.41$ 에서 0.68 kPa이 발생하였고 Fig. 12에 나타내었다. 또한 식 (3)을 적용하여 1:1 실제 탱크에서 46.4 kPa의 최대 슬로싱 압력이 발생한다는 것을 확인하였다.

Table 11의 하중 조건과 같이 슬로싱 해석에서 산출한 최대 압력 값을 포함하여 정적해석을 진행하였다. 최대 등가 응력은 서포트의 옆에 설치된 스티드의 1차 방벽과 맞닿는 아래 와셔에서 발생하였으며, 이는 Fig. 13에 나타내었다.

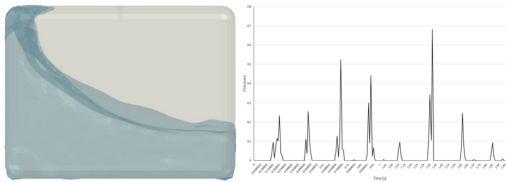


Fig. 12 (a) Fluid sloshing behavior at  $s=1.41$  (b) Absolute pressure at measurement point 1

Table 11 Loading case of sloshing analysis

	Self weight	Fuel weight	Max. Pressure	Temp
Case	✓	✓	✓	✓

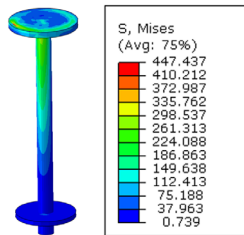


Fig. 13 Slushing analysis results of the optimized stud

### 4.4 방해판 형상 제안 및 해석 결과

최대 충격 압력을 적용하여 정적해석을 진행하였을 때 발생하는 응력은 스티드의 허용 응력 기준을 초과한다. 따라서 슬로싱 현상에 의한 응력을 줄이기 위한 방법이 요구된다. 이에 최적의 형상을 한 방해판(baffle)을 Fig. 14와 같이 설치하였다.<sup>13)</sup> 방해판 설치 시 열 하중, 기계적 하중에 의해 탱크 내부에 구조적 결함이 발생할 수 있으나 고려되지 않았다. 방해판 설치를 통해 1차 방벽에 발생하는 압력을 감소시키는 것에 목적을 둔다.

Fig. 15는 유체가 탱크의 1차 방벽에 충돌할 때 발생하는 최대 유체 속도를 나타낸다.  $s=1.183$ 일 때, 최대 32.758 mm/s의 속도로 유체가 탱크에 충돌하며, 이에 따른 측정된 유체 입자의 압력 변화는 Fig. 16에 나타내었다. 최대 0.245 kPa이 발생하며, 공식 (3)을 적용하여 1:1 실제 크기 탱크에서 16.709 kPa의 압력이 발생함을 확인하였다.

Table 11의 하중조건을 적용하여 해석을 진행하여 다음 Fig. 17과 같은 해석 결과가 도출되었다.

최대 등가 응력은 226 MPa로 Fig. 13과 같은 위치에서 발생하였다.



Fig. 14 (a) Baffle shape with prismatic tank (b) FE model with baffles

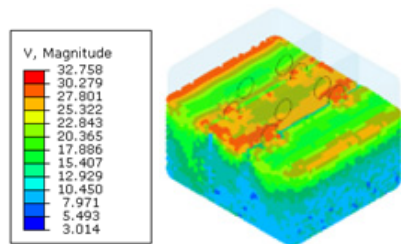


Fig. 15 Fluid behavior at  $s = 1.183$  and velocity magnitude [mm·s-1]





Fig. 16 Pressure measurement at measurement point 3 with baffles

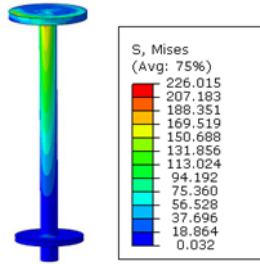


Fig. 17 von-Mises stress contour of the optimized stud applied maximum pressure value reduced by baffles

## 5. 결론 및 고찰

본 연구는 스티드 및 복합 단열 방식을 활용한 타이아이코리아의 Type-B LNG탱크를 LNG-암모니아 겸용으로 사용할 수 있도록 최적 안전 설계를 진행하였다. 실험설계법을 활용하여 스티드에 발생하는 최대 등가 응력 값이 IGC 코드의 허용 응력 기준인 225 MPa을 만족시키는 206.9 MPa까지 감소하였다. 최적화 모델의 피로 평가의 경우, IGC 코드의 선적 및 하역에 대한 평가 기준인 1,000 cycle을 충족한다. 공진 주기에서 발생하는 슬로싱 현상의 최대 압력은 46.4 kPa임을 확인하였다.

본 연구에서의 피로수명 평가는 정적상태에서의 선적 및 하역에 대한 평가가 진행됐다. 실제 운항에서의 피로수명 평가를 위해서는 가속도의 영향을 포함하는 하중에 대해서도 누적 손상을 고려해야 한다.

본 연구 결과의 실제 적용성에 대해 열 수축과 슬로싱 현상에 의한 용접부의 손상 연구가 진행되어야 한다. 정확한 충격 압력 값 산출을 위해

모형 수조 해석이 요구된다. 이러한 추가 연구가 진행될 시 실제 방해판 설치에 대한 신뢰성 확보가 가능하며, 슬로싱 현상에 의한 손상을 최소화하여 단열재의 수명을 증가시킬 것으로 사료된다.

국내 조선시장에서 암모니아 선박 기술 개발은 GTT 社의 독점에서 벗어나기 위해 필요한 시점이며, 또한 LNG-암모니아 겸용 탱크는 연료 전환 시 경제적 손실을 줄일 수 있다. 본 연구에서는 LNG-암모니아 겸용 탱크를 예인선 크기의 상용 선박에 적용 가능하도록 구조적 신뢰성을 확보하였고, 추후 대형 선박에 적용 가능성을 판단할 때 기초자료로서 도움이 될 것이라 사료된다.

## 후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 MSDE학과 와 타이아이코리아 지원으로 수행되었습니다.

## Author contributions

Y. S. Lee; Investigation, Formal analysis, Writing-origianl draft, Visulaisation. J. K. Park; Investigation, Formal analysis, Writing-origianl draft, Visulaisation. J. H. Choi; Investigation, Formal analysis, Writing-origianl draft, Visulaisation. B. Lee; Investigation, Formal analysis, Writing-origianl draft, Visulaisation. J. Y. Lim; Investigation, Formal analysis, Writing-origianl draft, Visulaisation. N. -K. Cho; Conceptualization, Methodology, Software, Resource, Funding acquisition, Project administration, Supervision, Validation, Writing- review & editing.

## References

1. IMO, 2005, Prevention of Air Pollution from Ships: Reducing Shipping Emissions of Air Pollution- Feasible and Cost-effective Options. MEPC 53/4/1, pp. 3-4.
2. S. Lee and H. J. Lee, 2019, "Potential Applicabilities of Ammonia in Future Hydrogen

- Energy Supply Industries", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 30, No. 6, pp. 667-672. (<https://doi.org/10.14478/ace.2019.1094>)
3. International Energy Agency (IEA), 2021, Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertilizer production.
  4. Thermal Insulation Group Korea Inc, 2020, Structural assessment report of Type-B LNG fuel tank, *Ocean Engineering*.
  5. DNV GL., 2019, MARITIME FORECAST TO 2050.
  6. T. W. Kim, S. K. Kim, S. B. Park and J. M. Lee, 2018, "Design of Independent Type-B LNG Fuel Tank: Comparative Study between Finite Element Analysis and International Guidance", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 14. (<https://doi.org/10.1155/2018/5734172>)
  7. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 2021, Dassault Systèmes Simulia Corp.
  8. Dassault Systems SIMULIA, 2020, fe-safe USER GUIDE, Massachusetts, 3D experiences.
  9. D. Jeong, 2014, "Cryogenic S-N Fatigue and Fatigue Crack Propagation Behaviors of High Manganese Austenitic Steels", Graduate School of Specialized Aerospace Engineering Gyeongsang National University.
  10. C. M. Pyo and J. S. Kim, 2020, "A Study on Mechanical Properties Analysis of Laser Butt Welds of High Manganese Steel Materials for Vessel Cryogenic Tanks", *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 23, No. 6, pp. 1123-1128. (DOI:10.17958/ksmt.22.6.202012.1123)
  11. R. Z. Wu and H. S. Yoon, 2010, "A Study on Design of Micro End-mill Geometry using Taguchi method and Response Surface Method", *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 869-870.
  12. R. L. Bass et al., 1985, "Modeling Criteria for Scaled Lng Sloshing Experiments", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 272-280. (<https://doi.org/10.1115/1.3242473>)
  13. F. Buck, H. Hetzler, E. Freund and S. Oexl, 2017, "Linear forced sloshing for a baffled rectangular fuel tank", *Proc. Appl. Math. Mech.*, Vol. 17, pp. 673-674. (<https://doi.org/10.1002/pamm.201710305>)