

LNG 연료공급 시스템 Skid 배관구조 진동 안정성 평가

Vibration Stability Evaluation of the LNG Fuel Supply System Skid Piping Structure

윤재광* · 강민석* · 성주현* · 이정준** · 최병근* †

Jae-Gwang Yoon*, Min-Seok Kang*, Ju-Hyeon Seong*, Jeong-Jun Lee*
and Byeong-Keun Choi* †

(Received 13 February 2026, Revision received 24 February 2026, Accepted 25 February 2026)

초록 : 국제해사기구(IMO)를 중심으로 선박 배출가스 규제 강화를 발표한 이래로 해운산업에는 규제를 만족하기 위한 대안으로 LNG 연료 추진 시스템을 주목하였으며, 이에 따라 LNG 연료공급 시스템 또한 중요 시스템으로 떠오르고 있다. LNG는 연료로 사용할 시 천연가스 상태로 변화시켜야 하며, 이를 위해 변환 공정에 고온, 고압의 유체를 사용하기 때문에 안정성 평가가 매우 중요하다. 이에 따라, 본 연구에서는 LNG 연료공급 시스템 Skid 배관구조에서 발생할 수 있는 가진원을 고려하여 진동 안정성을 평가하였다. 진동 해석을 통해 시스템의 고유진동수 및 고유 모드를 파악하여 시스템의 취약점을 파악하였다. 구조물의 진동 안정성을 평가하기 위해 주파수 응답 분석을 수행하여 공진 가능성을 평가하고, 응답 스펙트럼 분석을 통해 구조물의 파손에 대한 안정성을 검토하였다.

키워드 : LNG 연료공급 시스템, 고유진동수, 공진분리여유, 유체유발진동

Abstract : Following the International Maritime Organization (IMO) regulations on ship emission reductions, LNG fuel propulsion systems have gained attention as an alternative in the shipping industry, making the LNG fuel supply system an important component. When LNG is used as fuel, it must be converted to natural gas, a process involving high-temperature and high-pressure fluids that requires stability evaluation. In this study, the vibration stability of the LNG fuel supply system skid piping structure was evaluated by considering potential excitation sources, and vibration analysis was performed to identify natural frequencies, mode shapes, and weaknesses of system. Frequency response analysis was conducted to assess resonance possibility, and response spectrum analysis was used to evaluate the structural stability against damage.

Key Words : LNG Fuel Supply Systems, Natural Frequency, Resonance Separation Margin, Fluid Induced Vibration

* † 최병근(<https://orcid.org/0000-0001-8912-3688>) : 교수, 경상국립대학교 스마트에너지기계공학과
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr, Tel : 055-911-9525

* 윤재광(<https://orcid.org/0009-0004-2865-1646>), 강민석(<https://orcid.org/0009-0008-9187-6978>), 성주현(<https://orcid.org/0009-0004-8390-8694>) : 대학원생, 경상국립대학교 에너지기계공학과

** 이정준(<https://orcid.org/0000-0002-7039-2412>) : 조교수, 울산과학기술대학교 기계공학부

* † Byeong-Keun Choi(<https://orcid.org/0000-0001-8912-3688>) : Professor, Department of Smart Energy Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr, Tel : 055-911-9525

* Jae-Gwang Yoon(<https://orcid.org/0009-0004-2865-1646>), Min-Seok Kang(<https://orcid.org/0009-0008-9187-6978>), Ju-Hyeon Seong(<https://orcid.org/0009-0004-8390-8694>) : Graduate student, Department of Energy Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.

** Jeong-Jun Lee(<https://orcid.org/0000-0002-7039-2412>) : Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Ulsan College.

1. 서 론

오염방지를 위한 국제협약(MARPOL)의 배출가스 규제 강화를 발표한 이래로 해운산업 전반에서 고효율·친환경 추진 기술에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다.¹⁾ 또한 이산화탄소 배출 규제를 만족하기 위한 현실적인 대안으로 LNG를 연료로 사용하는 추진 시스템이 주목받고 있다.^{2,3)} 이에 따라, 선박용 LNG 연료 저장 및 공급 기술이 중요한 핵심 요소로 부각되고 있다.^{4,5)} 특히, LNG 연료 공급 시스템은 LNG 저장탱크로부터 엔진까지 연료를 안정적으로 공급하기 위한 핵심 설비이자, LNG를 추진 시스템의 연료로 사용하기 위한 필수 설비이다.

LNG 연료공급 시스템은 LNG를 천연가스 상태로 변화시켜 추진 연료로 공급하기 때문에 LNG의 기화 공정에 있어 고압, 고온의 유체를 다루기 때문에 안정성 평가가 매우 중요하며, 이에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. LNG 연료공급 시스템의 안정성에 대한 선행연구로 Jeong 등은 소형의 LNG 연료공급 시스템을 만들어 실험을 통해 LNG 연료공급 시스템의 안정성을 평가하였다.⁶⁾ Nubli 등은 전산유체역학(CFD)을 통해 LNG의 누출 사고에 대한 안정성을 평가하였다.⁷⁾ Yoon 등은 LNG 연료공급 시스템의 Volution Type 열교환기에 대해 안정성을 평가하였다.⁸⁾ 기존 연구들은 주로 수치해석 기반 접근이나 시스템 검증 실험에 초점을 두고 있으며, 실제 운전 조건에서 발생하는 진동을 계측하고 이를 해석 모델에 반영하여 시스템의 안정성을 평가한 연구는 상대적으로 부족하다.

LNG 연료공급 시스템에서는 펌프 운전에 따른 진동이 존재하며 복잡한 형상의 배관 및 열교환기로부터 유체의 충돌 등의 이유로 진동이 발생할 수 있다. 시스템 내의 진동은 구조물에 피로를 누적시키고, 가진원의 주파수가 시스템 내 구조물의 고유진동수와 일치하여 공진이 발생하면 성능저하로 이어질 수 있으며, 심하면 파손을 초래할 수 있다. 특히 연료공급 시스템의 배관은 시스템에 이루는 주된 구성요소로, 진동의 영향을 많이

받는 구조물이다. 이러한 특성으로 인해, 배관은 사고의 발생원이 되기 쉬우며, 고압의 유체를 운반하기 때문에 각별한 주의를 요구한다. 시스템에 존재하는 진동으로 인해 고장이 발생할 경우, 가스 누출, 화재 및 폭발 사고로 이어질 가능성이 있다. 따라서 설비 운용 시 시스템에서 진동으로 인해 발생할 문제를 사전에 파악하고 해결하여 사고를 방지하기 위해 시스템에 대한 안정성 평가가 필요하다.

본 연구에서는 LNG 연료공급 시스템에서 외력에 의해 발생하는 진동을 고려하여 연료공급 시스템에 대한 진동 안정성을 평가하였다. 안정성 평가는 3D 모델을 통한 Modal 해석의 결과를 통해 시스템의 고유진동수를 파악하고 해석 결과에 대한 신뢰성 확보를 위해 구조물의 가진시험을 통하여 결과를 비교하였다. 또한, 실제 시스템에서 측정된 진동 데이터를 모델에 적용하여 해석하는 Response Spectrum 해석을 수행 후 결과를 바탕으로 시스템에서 발생할 수 있는 진동의 주파수와 크기를 고려하였다. Response Spectrum 해석을 수행함으로써 실제 진동 특성이 시스템에 미칠 실질적 영향을 평가하였고, 시스템의 각 Skid별로 나누어 평가하였다.

2. Modal 해석

2.1 해석모델 및 경계조건

Fig. 1은 LNG 연료공급시스템 Skid 배관구조를 나타낸 그림이며, 각각 Glycol Water Tank Skid, Glycol Heating Skid, Vaporizer Skid로 구성되어 있다. 각 Skid별로 해석하기 위해 강성의 영향이 미미할 것으로 판단되는 부분은 삭제하였고, Fig. 2와 같이 Mesh를 구성하였다. 구조물을 지지하는 Base Frame에 고정 구속조건을 주었고, Vaporizer Skid의 경우, 열교환기 내부에 존재하는 Tube를 Point Mass로 조건을 주었다. Skid 모델의 재질은 Ansys에서 기본으로 제공하고 있는 구조용 강체의 정보와 유사한 값을 가지고 있다. Table 1~2는 해석에 사용한 물성 정보와 Mesh 정보를 나타내었다.

Table 1 Material Property

Material	Structural Steel
Density (kg/m^3)	7,850
Young's Module (Pa)	2E+11
Poisson's Ratio	0.3

Table 2 Mesh of Skid Models

Skid Model	Nodes	Elements
Glycol Water Tank Skid	2,229,545	900,871
Glycol Heating Skid	2,103,453	455,450
Vaporizer Skid	1,543,175	496,254

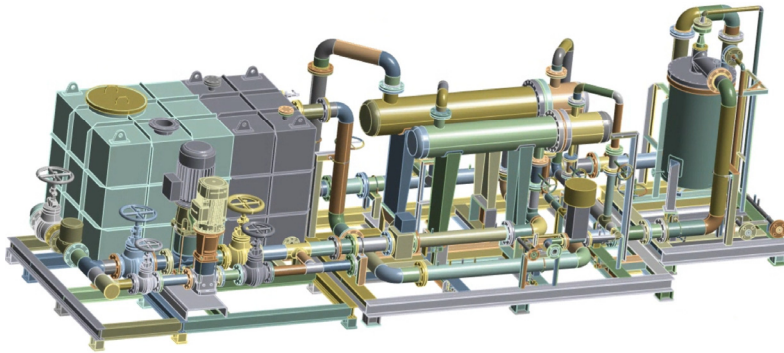
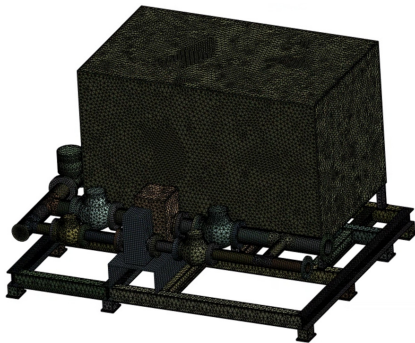
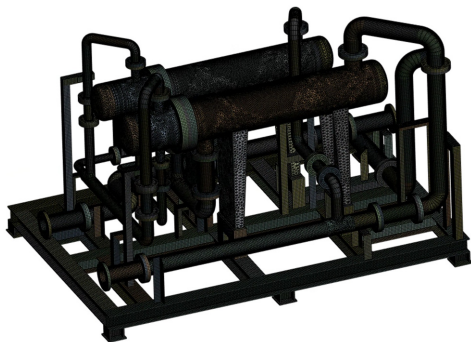


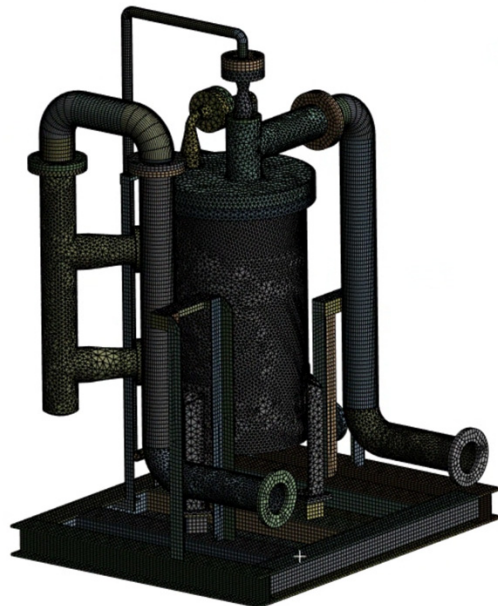
Fig. 1 LNG Skid Model



(a) Glycol Water Tank Skid



(b) Glycol Heating Skid



(c) Vaporizer Skid

Fig. 2 FEM Models of System

2.2 Modal 해석 및 결과

Modal 해석을 수행하기 위해 사용해석 프로그램인 ANSYS WORKBENCH 2023 R2를 활용하였다. Modal 해석은 구조물의 고유진동수와 고유모드를 구하는 해석으로 시스템의 동적 해석을 위해 기본적으로 수행하는 해석이다. 고유진동수 및 모드 형상은 외부의 지속적인 가진 조건이 아니므로 외부 하중은 0이며, 이에 따른 감쇠에 대한 응답은 미소하다고 가정하면 지배방정식은 식 (1)과 같다. 여기서 M 은 질량, K 는 강성, \ddot{x} 는 가속도, x 는 변위를 의미한다.

$$[M] [\ddot{x}] + [K] [x] = 0 \quad (1)$$

Fig. 3~5는 각 Skid별 모드 형상을 보여 주는 것으로, Glycol Water Tank Skid의 경우, 24.39 Hz

에서 비틀림 모드가 발생하였으며, 41.34 Hz를 포함하여 56개의 Local 모드가 발생하였다. Glycol Heating Skid의 경우, 17.09 Hz에서 1차 모드가 발생하였으며, 18.93 Hz와 32.7 Hz에서 비틀림 모드가 발생하였고, 48.49 Hz를 포함한 47개의 Local mode가 발생하였다. Vaporizer Skid의 경우, 8.12 Hz에서 1차 모드가 발생하였고, 11.17 Hz와 38.42 Hz에서 비틀림 모드가 발생하였으며, 96.87 Hz를 포함한 34개의 Local 모드가 발생하였다. 1차 모드는 구조물의 전체적인 거동을 보여 주는 가장 기본적인 진동 모드로 해당 모드에서 구조물이 진동할 때 가장 쉽게 변형할 수 있는 모양으로 진동한다. 즉 변형이 쉽고 많이 발생하는 위치를 알 수 있으며, 시스템의 안정성을 평가하는 데 있어 중요하다.

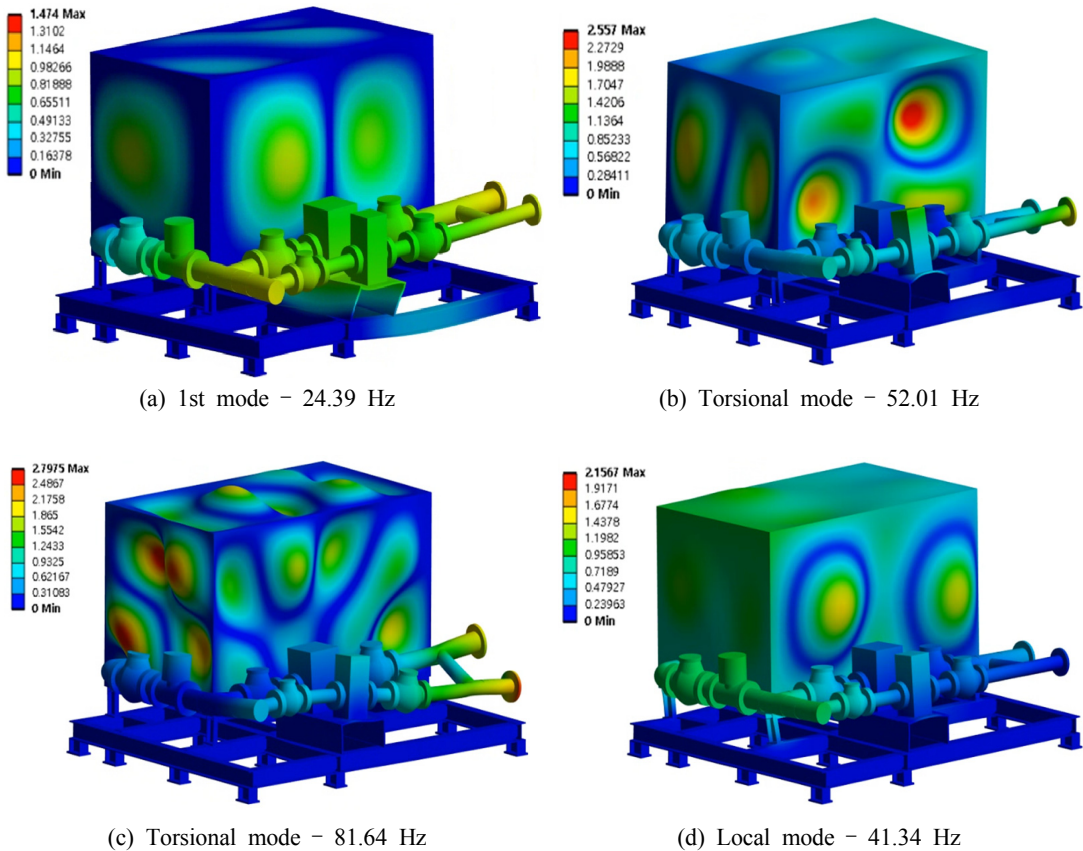


Fig. 3 Mode Shapes of Glycol Water Tank Skid

LNG 연료공급 시스템 Skid 배관구조 진동 안정성 평가

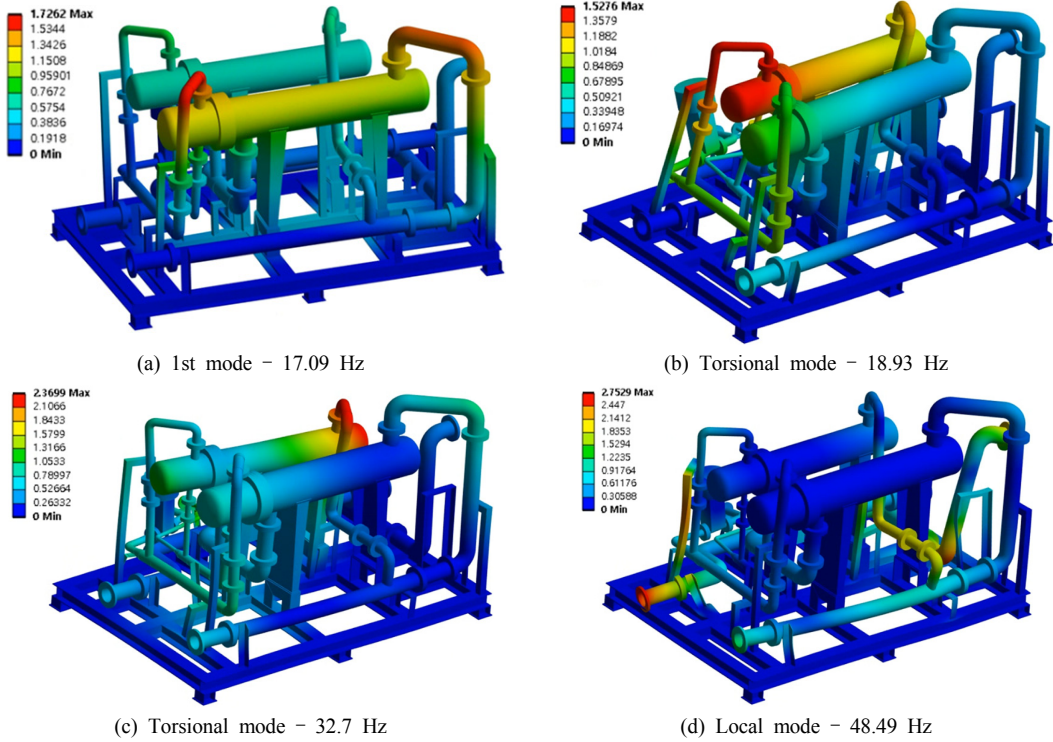


Fig. 4 Mode Shapes of Glycol Heating Skid

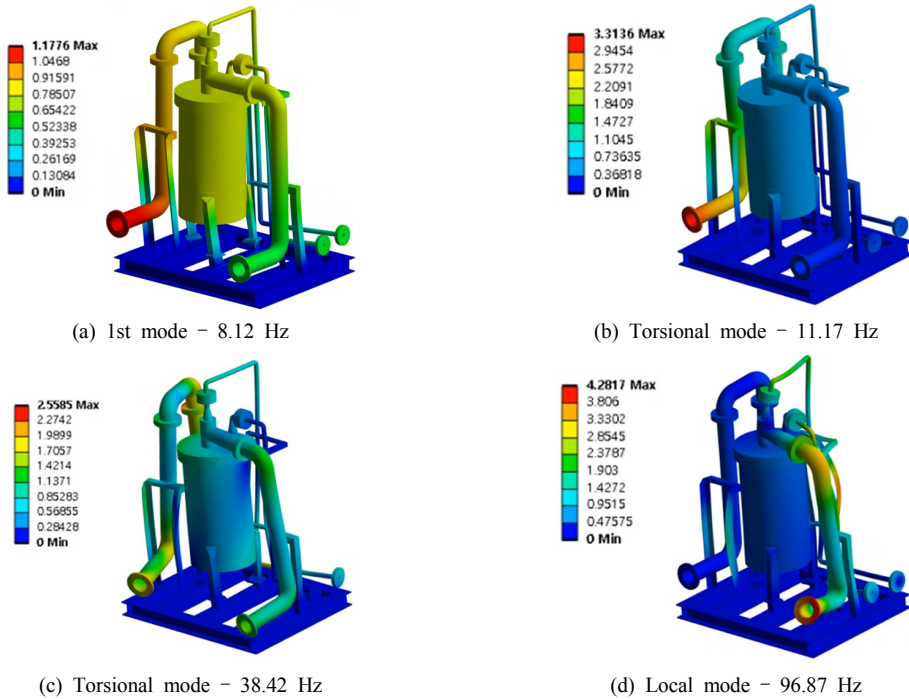


Fig. 5 Mode Shapes of Vaporizer Skid

2.3 Modal 해석 신뢰성 평가

Modal 해석의 신뢰성을 확보하기 위해 Glycol Heating Skid를 대상으로 가진시험을 통해 실제 고유진동수를 측정하였으며, 측정된 고유진동수와 해석 결과의 고유진동수를 비교하였다. 가진시험은 Impact hammer(Meggitt사의 Model 2305), 가속도 센서(Bruel & Kjaer사의 T-4371), 신호증폭기(Amplifier, Bruel & Kjaer사의 T-2692)를 사용하여 진동을 측정하였으며, 측정 장비에 대한 정보는 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

Table 3 Operating Specification of Impact Hammer

Type	Measuring Range	Sensitivity
Impact Hammer(2305)	35,584 N	0.227 mV/N

Table 4 Operating Specification of Sensor and Amplifier

Type	Amplifier (T-2692)	Accelerometer (T-4371)
Freq. Range	0.1 Hz ~ 100 kHz	Determined by the amplifier used Max: 12.6 kHz
Sensitivity	output-10 mV/m.s ⁻²	0.988 pC/m.s ⁻²

Fig. 6과 같이 센서를 부착하고, 타격을 가한 후, 주파수응답(Frequency Response Function), 위상(Phase), 상관함수(Coherence)를 통하여 고유진동수를 확인하였다. 시험 결과, 주파수 응답과 위상은

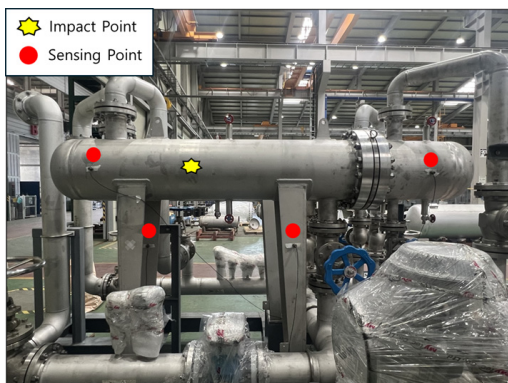


Fig. 6 Glycol Heating Skid Point

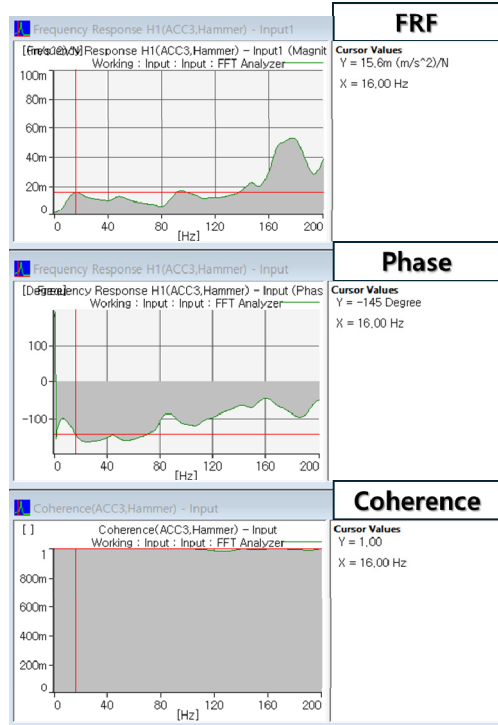


Fig. 7 Result of Impact Hammer Test

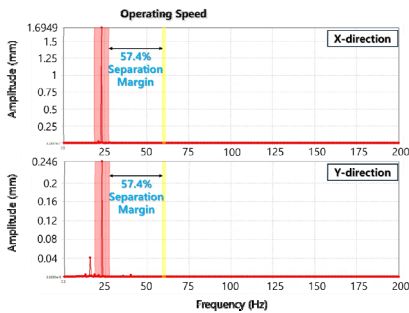
Fig. 7과 같이 취득되었으며, 1차 고유진동수는 16 Hz로 나타나는 것을 확인하였다. Modal 해석에서 확인되는 고유진동수는 17.09 Hz로 약 1 Hz 오차가 확인되며, 가진 시험과 해석 결과의 차이가 미소하여 신뢰성을 가진다.

2.4 공진분리여유 평가

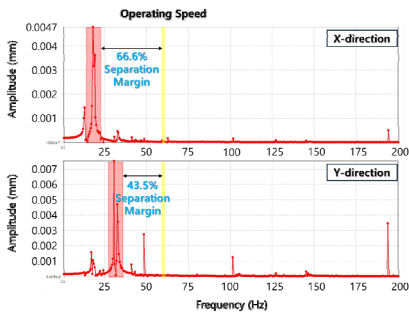
Skid 모델의 동적 시스템 특성을 파악하기 위해 Harmonic Response를 분석하였다. 이는 주파수 응답을 통해 구조물의 진폭 변화를 시각적으로 표현하며, 이를 통해 Skid의 가진되는 주파수의 응답을 분석할 수 있다.

Fig. 8은 각각의 Skid 구조물을 Harmonic Response를 통해 X축과 Y축 방향으로 가진하여 Bode Plot을 나타낸 결과이다. Fig. 8에 나타나듯이, 주파수 증가에 따라 Skid 구조물의 진폭 응답이 특정 주파수 대역에서 급격히 증가하는 경향을 확인할 수 있다. Local Mode에 해당하는 주파수 부근에서 응답이 나타나는 것을 확인하였으나,

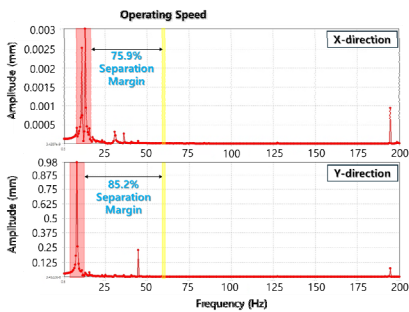
이는 국부적인 영역에만 발생하므로 구조물의 전체적인 거동에 미치는 영향은 미미하다. Modal 해석에서 확인한 모드형상의 주파수에서 높은 응답이 나오는 것을 확인하였다. 이는 Modal 해석에서도 출된 구조물의 공진 특성이 Harmonic Response 해석에서도 동일하게 반영됨을 의미한다. X축 및 Y축 방향 가진에 따라 응답 특성이 상이하게 나타났다으며, 이는 방향별 강성 및 질량 분포 차이에 기인한 것으로 판단된다.



(a) Glycol Water Tank Skid - Bode Plot



(b) Glycol Heating Skid - Bode Plot



(c) Vaporizer Skid - Bode Plot

Fig. 8 Bode Plot

또한 Fig. 8에 위험속도와 운전속도의 차를 운전속도에 대한 비율로 표현한 공진분리여유에 대하여 표현하였다. Glycol Water Tank Skid의 경우, X축 방향과 Y축 방향 모두 1차 모드의 주파수인 24.39 Hz에서 가장 높은 응답을 보이는 것을 확인하였으며, 이는 1차 모드가 공진에 취약함을 의미한다. Glycol Heating Skid의 경우, X축 방향은 1차 모드의 주파수인 17.09 Hz, Y축 방향은 비틀림 모드의 주파수인 32.7 Hz에서 높은 응답을 보이고 있으며, Vaporizer Skid의 경우, X축 방향은 비틀림 모드의 주파수인 11.17 Hz, Y축 방향은 1차 모드의 주파수인 8.12 Hz에서 높은 응답을 보이고 있다. 실제 구조물의 운전속도인 3,561 RPM(59.35 Hz)에 대하여 Glycol Tank Skid는 57% 이상의 분리여유를 가지고 있으며, Glycol Heating Skid는 43% 이상의 분리여유를 가지고 있고, Vaporizer Skid는 75% 이상의 분리여유를 가지고 있다.

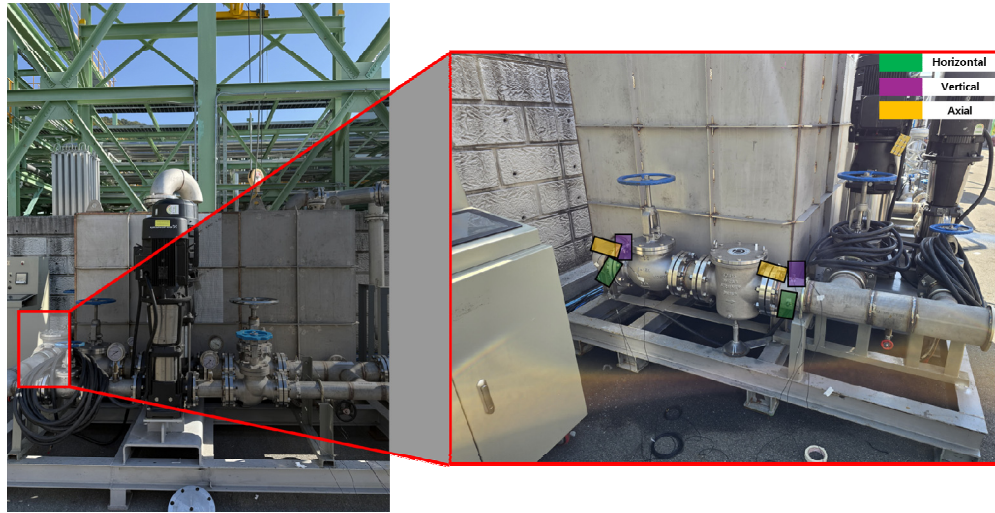
3. Response Spectrum 해석

3.1 진동 측정

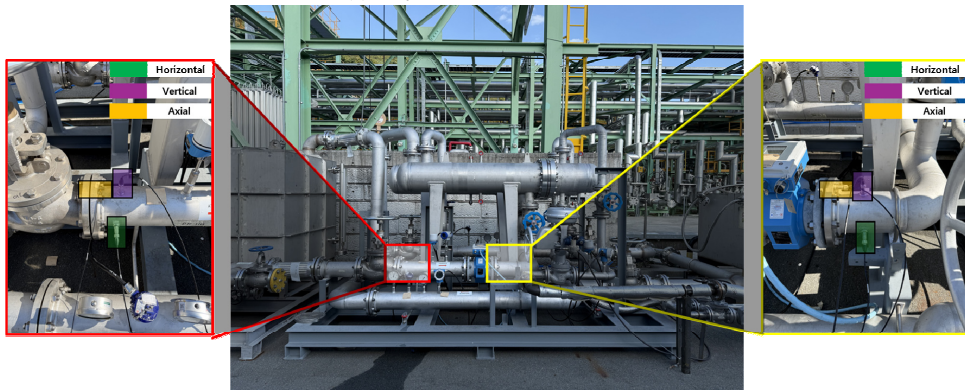
Response Spectrum 해석을 수행하기 위해서는 가진력을 정의해야 한다. 유체에 의한 진동을 측정하기 위해 구조물에서 Glycol Water가 흐를 때 배관으로부터 측정된 진동 데이터를 가진력으로 사용한다. 진동을 측정하기 위해 가속도 센서(Bruel & Kjar사의 T-4371)와 신호증폭기(Amplifier, Bruel & Kjar사의 T-2692)를 사용하여 진동을 측정하였으며, 가속도 센서의 정보는 Table 4에 나타내었다. 시스템의 각 Skid별 센서 부착 위치를 Fig. 9에 나타냈으며, 진동의 방향성을 고려하여 수평방향, 수직방향, 배관방향 각각 2지점씩 총 6지점에서 3분 동안 측정하였다.

3.2 Response Spectrum 해석

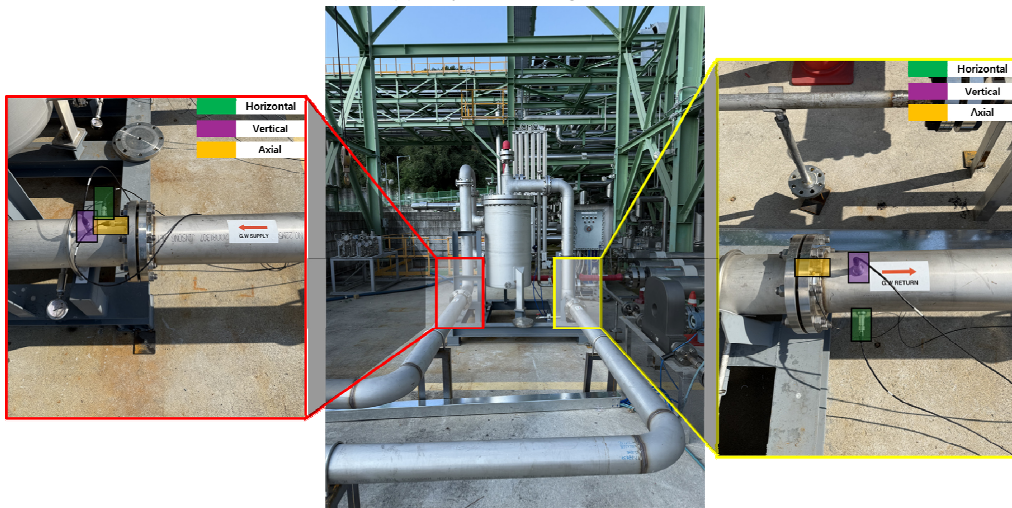
구동 조건에서 각 Skid에 발생하는 진동 응답 특성을 평가하기 위해 Response Spectrum Analysis를 수행하였다. Response Spectrum Analysis는 일정한 감쇠비를 갖는 단자유도 시스템이 동적 하중을 받을 때, 고유진동수에 따라 나타나는 최대



(a) Glycol Water Tank Skid



(b) Glycol Heating Skid



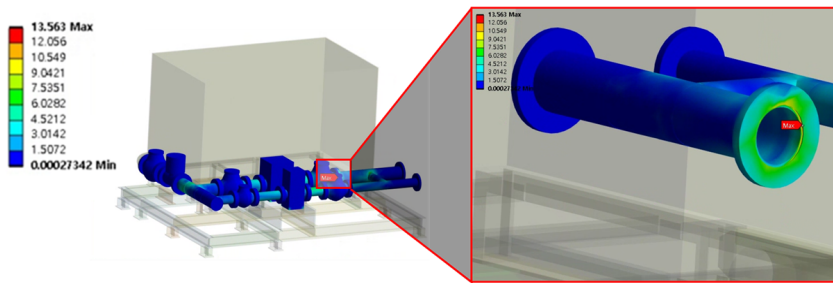
(c) Vaporizer Skid

Fig. 9 Locations of Vibration Measurement Sensors

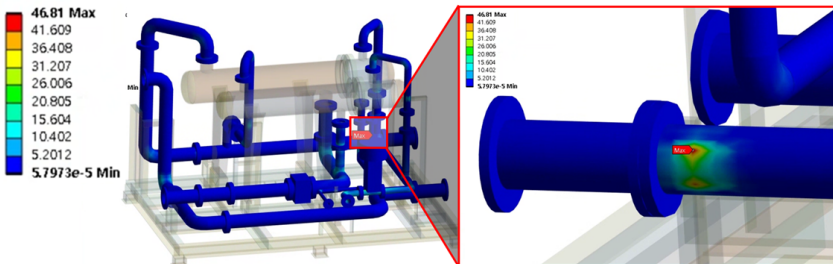
응답(변위, 속도 또는 가속도)을 스펙트럼 형태로 표현하는 기법이다. 실제 구동 시 유체에 의해 발생하는 진동을 고려하기 위해 각 Skid마다 측정된 진동 데이터를 가진력으로 적용하여 Skid 구조물의 응답 특성을 분석하였다. 응답 스펙트럼 해석의 지배방정식은 식 (2)로부터 유도된다. 여기서, M 은 질량, K 는 강성, C 는 감쇠, I 는 단위벡터, \ddot{u} 는 상대가속도, \dot{u} 는 상대속도 u 는 상대변위, \ddot{u}_g 는 지반가속도를 의미한다.

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = - [M] [I]\ddot{u}_g \quad (2)$$

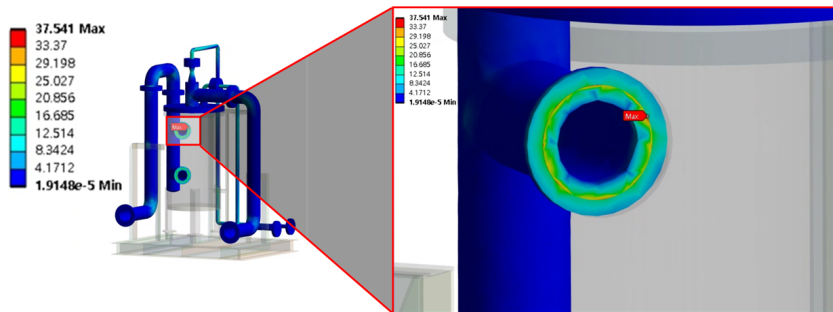
각 Skid별 Response Spectrum 해석 결과를 Fig. 10에 나타냈으며, 유체가 흐를 때의 가진력을 기반으로 Pipe에 발생하는 최대 등가 응력 평가하였다. Skid별 배관의 최대 등가 응력은 Glycol Tank Skid의 경우, 13.563 Pa, Glycol Heating Skid의 경우, 46.81 Pa, Vaporizer Skid의 경우, 37.541 Pa이다. 이는 Pipe의 최소 항복강도인 170 MPa 대비 낮은 수준이므로 구조물의 구조적 안전성은 확보된 것으로 판단된다.



(a) Glycol Water Tank Skid



(b) Glycol Heating Skid



(c) Vaporizer Skid

Fig. 10 Response Spectrum Analysis Result

4. 결 론

본 연구에서는 LNG 연료공급 시스템에서 발생할 수 있는 진동을 고려하여 진동 안정성 평가를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시스템의 각 Skid별 고유진동수 및 고유모드를 파악하기 위해 Modal Analysis를 수행하였다. Glycol Water Tank의 1차 고유진동수는 24.39 Hz, Glycol Heating Skid의 1차 고유진동수는 17.09 Hz, Vaporizer Skid의 1차 고유진동수는 8.12 Hz로 확인하였다. 파악한 고유진동수를 기반으로 각 Skid의 공진 분리 여유 확보의 확인을 위해서 Harmonic Response Analysis를 수행하였다. 주파수 응답을 통해 구조물의 진폭 변화를 시각적으로 표현하며, 구조물에 대한 주파수에 따른 가진 응답을 분석할 수 있는 Bode Plot을 해석으로부터 확인하였다. X축 및 Y축 방향 가진에 따라 응답 특성이 상이하게 나타났으며, 이는 방향별 강성 및 질량 분포 차이에 기인한 것으로 판단된다. 운전속도인 3,561 RPM(59.35 Hz)과 각 Skid별 발생 주파수 차이가 40% 이상의 여유가 있으므로, 공진은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

2) 시스템의 가치요소로 유체유발가진(FIV)을 고려하기 위해 실제 시스템의 Skid마다 가속도 센서를 부착하여 진동 데이터를 취득하였다. 진동은 방향성을 고려하여 수직방향, 수평방향, 배관방향으로 각각 2지점씩 총 6지점에서 취득하였으며, 취득한 데이터를 Response Spectrum의 Input Data로 활용하여 해석을 수행하였다. 해석 결과, 각 Skid별 배관에 대한 최대 등가 응력을 확인하였다. Glycol Tank Skid는 13.563 Pa, Glycol Heating Skid는 46.81 Pa, Vaporizer Skid는 37.541 Pa로 발생했다. 이는 배관의 최소 항복강도인 170 MPa 대비 매우 낮으므로 구조물의 구조적 안전성은 충분히 확보된 것으로 판단된다.

종합적으로 Modal 해석에서 확인한 1차 모드의 주파수는 운전속도와 일치하지 않고, Harmonics Response 해석에서 확인한 위험속도 모두 운전속도로부터 40% 이상의 충분한 분리여유를 가지고 있음을 확인하였다. Response Spectrum 해석을 통

해 실측 데이터를 모델에 적용한 결과로, 실제 배관에서 발생하는 진동은 배관의 최소 항복강도에 비해 매우 낮은 크기로 진동하는 것을 확인하여 LNG 연료공급 시스템의 안정성은 충분히 확보되었음을 확인하였다.

Author contributions

J. G. Yoon & J. J. Lee; Modal analysis, Harmonics response analysis. M. S. Kang & J. H. Seong; Response spectrum analysis, System skids design. J. G. Yoon; Writing-original draft. J. J. Lee & B. K. Choi; Writing-review & editing. B. K. Choi; Project administration.

References

1. International Maritime Organization, 2011, "Resolution MEPC.203(62): Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships", IMO, Annex 19, 1.
2. S. Martinic-Cezar, Z. Juric, N. Assani and N. Racic, 2025, "Controlling Engine Load Distribution in LNG Ship Propulsion Systems to Optimize Gas Emissions and Fuel Consumption", *Energies*, 18(3), 485. (<https://doi.org/10.3390/en18030485>)
3. J. Park, Y. Kim, D. Lim, J. Kim, J. Lee and H. Cho, 2024, "Advancing greener LNG-fueled vessels: Compact simultaneous reduction system for CH₄, NO_x and CO₂ emissions", *Journal of Cleaner Production*, 478. (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143902>)
4. IMARC Group, 2024, "South Korea Heat Exchanger Market Size, Share, Trends and Forecast by Type, Material, End Use Industry, and Region, 2025-2033", IMARC Group.
5. K. T. Lee, J. H. Kim, G. D. Kim, S. W. Choi, S. Y. Lee and D. Y. Koh, 2018, "Construction

- of LNG and Cryogenic Heat Exchanger Performance Test System”, Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, 84-85.
6. J. Jeong, W. Jung, S. Che and D. Chang, 2024, “Experiment-based Feasibility Study of LNG Equipment-embedded Fuel Gas Supply System for Vessels”, Energy, 309.
(<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132959>)
7. H. Nubli, D. Jung, S. J. Kim and J. M. Sohn, 2024, “Structural Impact Under Accidental LNG Release on the LNG Bunkering Ship: Implementation of advanced cryogenic risk analysis”, Process Safety and Environmental Protection, 186, 329-347.
(<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.03.109>)
8. J. G. Yoon, J. J. Lee, J. W. Heo, Y. W. Lee, S. H. Kim, S. H. Lee, H. Y. Choi and B. K. Choi, 2024, “Dynamic Characteristics and Vibration Stability Evaluation of Revolution Type Heat Exchanger”, Journal of Power System Engineering, 28(6), 31-39.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2024.28.6.031>)