

Volution Type 열교환기의 동특성 및 진동 안정성 평가

Dynamic Characteristics and Vibration Stability Evaluation of Volution Type Heat Exchanger

윤재광* · 이정준* · 허재원** · 이연원** · 김성훈*** · 이승현*** · 최홍영*** · 최병근* †
Jae-Gwang Yoon*, Jeong-Jun Lee*, Jae-Won Heo**, Yeon-Won Lee**
Sung-Hun Kim***, Seung-Hyeon Lee***, Hong-Young Choi*** and
Byeong-Keun Choi*

(Received 30 September 2024, Revision received 27 November 2024, Accepted 27 November 2024)

초록 : 최근 정부의 환경정책에 따라 LNG에 대한 관심이 높아지면서 Volution Type 열교환기에 대한 관심도 증가하고 있다. Volution Type 열교환기는 Shell Type 열교환기와 달리 열효율이 높고, 유지 및 보수 시 작업공간 활용이 우수하지만, 해외에서 독점적으로 개발하고 있으며, 국내에서의 연구는 미비한 실정이다. 또한 열교환을 하기 위한 유체가 변화하는 속도로 회전하고 있어, 이에 대한 진동이 가진 원인으로 발생할 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 열교환기에서 발생할 수 있는 가진원을 고려하여 진동 안정성을 평가하였다. 유동해석을 통하여 유체에 의한 주파수 대역을 계산하였고, 진동 해석을 통해 고유진동수와 고유모드를 파악하여 구조물의 강성 취약부와 모드 기여도를 파악하였다. 구조물의 진동 안정성을 평가하기 위하여 주파수 응답 분석을 통해 Volution Type 열교환기의 적용 가능성을 검토하였다.

키워드 : 열교환기, 동특성, 고유진동수, 유체유발진동

Abstract : With the increasing focus on LNG due to environmental policies, interest in Volution Type heat exchangers has risen. Volution type exchangers offer advantages in terms of higher thermal efficiency and

* † 최병근(<https://orcid.org/0000-0001-8912-3688>) : 교수, 경
상국립대학교 에너지기계공학과

E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr, Tel : 055-911-9525

*윤재광(<https://orcid.org/0009-0004-2865-1646>), 이정준(<https://orcid.org/0000-0002-7039-2412>) : 대학원생, 경
상국립대학교 에너지기계공학과

**허재원(<https://orcid.org/0000-0003-1383-9510>) : 대학원생,
국립부경대학교 기계설계공학과

**이연원(<https://orcid.org/0000-0001-8655-2591>) : 교수, 국립
부경대학교 기계설계공학과

***김성훈(<https://orcid.org/0000-0002-8097-9452>), 이승현(<https://orcid.org/0009-0004-0758-7710>), 최홍영(<https://orcid.org/0009-0000-4549-6757>) : 연구원, (주)마이텍

* † Byeong-Keun Choi(<https://orcid.org/0000-0001-8912-3688>) :
Professor, Department of 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>), Jeong-Jun
Lee(<https://orcid.org/0000-0002-7039-2412>) : Graduate student,
Department of Energy Mechanical Engineering, Gyeongsang
National University.

**Jae-Won Heo(<https://orcid.org/0000-0003-1383-9510>) : Graduate
student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong
National University.

**Yeon-Won Lee(<https://orcid.org/0000-0001-8655-2591>) : Professor,
Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong
National University.

***Sung-Hun Kim(<https://orcid.org/0000-0002-8097-9452>), Seung-
Hyeon Lee(<https://orcid.org/0009-0004-0758-7710>), Hong-Young
Choi(<https://orcid.org/0009-0000-4549-6757>) : Researcher, Mytec
Co., Ltd.

better utilization of the operational area for maintenance. However, research on its safety has not been conducted domestically since this technology is exclusively developed overseas. Additionally, vibrations may be generated as the potential sources of exciations as the fluid rotates at a varying speed during heat exchange. Therefore, this study evaluates the safety of heat exchangers by considering the potential sources of excitation. Flow analysis was conducted to determine the sources of excitation and the frequency bands and vibration analysis was performed to determine the natural frequencies and modes. To assess safety, a frequency response analysis was conducted, and the applicability of the Volution type was reviewed.

Key Words : Heat Exchanger, Dynamic Characteristics, Natural Frequency, Fluid Induced Vibration

1. 서 론

열교환기는 온도 차를 이용하여 열을 이동시키는 장치로써, 유체의 가열 및 냉각의 목적으로 사용되고 있다.^{1,2)} 최근 정부의 탄소배출저감 정책에 따라 LNG(Liquefied Natural Gas)를 활용하는 비중이 높아지면서, 이와 관련된 열교환기와 유지보수에 대한 연구가 수행되고 있다.^{3,5)}

열교환기는 효율이나, 작업환경에 따라 적합한 유형을 선택하는 것이 중요하다. 열교환기는 뱀형(serpentine), 칼집형(bayonet)과 같이 배열 형상의 Shell type과 적층으로 쌓아 올린 형태인 Volution type으로 나뉘게 된다.

Shell type은 광범위한 온도 및 압력 조건에서 처리할 수 있고, 내구성이 좋은 장점이 있어 일반적으로 사용되고 있다. 하지만 유지보수를 수행할 때, 선박 내 많은 공간을 차지하고 제조비용이 높으며 열효율이 낮다는 단점이 존재한다.^{6,7)} Shell Type 열교환기에 대한 선행연구로서 Jang 등은 열교환기의 초기 설계 시 주요 변수에 대한 영향도를 평가하였다.⁸⁾ Lee 등은 열교환기의 설계 변수의 변화에 따라 열전달 및 마찰 특성 변화를 알아보기 위해 최적화를 수행하였다.⁹⁾

이에 반해, Volution Type은 제작 시 높은 기술력을 필요로 한다는 단점이 있지만, 기존 열교환기 대비 높은 열효율과 제조단가가 낮고 부피가 작아, 유지 및 보수 시 작업공간 활용이 우수하다는 장점이 있다.¹⁰⁾ 또한 Volution Type 열교환기는 Tube를 규칙적인 배열로 용접하여, 유체가 흐를 때 흐름이 불규칙적으로 생성되지 않도록 하여 유체가진에 대한 불안정성을 제거할 수 있어, 최

근에는 많은 산업 분야에서 선호되고 있지만,¹¹⁾ 해외에서 독점적으로 개발하고 있어 국내에서는 연구가 미비한 실정이다.

또한 Volution Type 열교환기에서 유체를 수송하기 위한 펌프 운전에 따른 진동이 존재할 뿐만 아니라, 유체가 열교환을 하면서 변화하는 속도로 회전하고 있어, 이에 대한 진동이 가진원으로 발생할 수 있다. 이러한 유체에 의한 진동이 작용하면 구조물에 피로가 증가하게 되며, 가진원의 주파수 범위가 열교환기의 고유진동수와 일치하여 공진이 발생하면 성능 저하나 파손까지 발생할 수 있다.¹²⁾ 따라서 장비의 구조 및 장비 운용 중에 발생 가능한 진동 문제를 사전에 파악하고 해결하기 위해 동특성 평가가 필요하다.

본 연구에서는 Volution Type 열교환기에서 내부 유체에 의해 발생하는 진동을 고려하여 열교환기에 대한 진동 안정성을 평가하였다. 평가를 위해 열교환기의 외부 프레임과 유체가 지나가는 내부 Tube의 형상을 실제 모형과 동일하게 모델링하였다. 유동 해석을 수행하여 열교환기 내부 유체의 유속을 파악해 나선형 Tube 구조에서 가진되는 주파수 대역을 계산하였으며, 진동 해석을 통해 Volution Type 열교환기의 고유진동수를 파악하였다. 이를 바탕으로 열교환기의 고유진동수와 유체에 의한 가진주파수 대역을 비교하여 진동 안정성을 평가하였다.

2. 유체 유동에 의한 가진원 파악

2.1 모델 형상 및 유동 정보

Fig. 1은 Volution Type 열교환기의 모델을 나타

낸 그림이며, Shell과 원통 내부에는 수십 개의 Tube로 구성되어 있다. Tube들은 Glycol Water가 사이에 흐르지 않도록 서로 용접되어 있으며, 외관을 따라 흐르게 하기 위해 상·하부의 Tube는 Plate로 고정되어 있다. Fig. 2는 Volution Type에 대한 유동의 흐름을 나타내기 위한 내부 단면을 나타낸 그림으로 LNG가 Inlet으로 들어가 Tube를 감싸고 있는 Glycol Water와 열교환 하여 NG로 토출하여 기화하는 형태이다. Volution Type 열교환기 내부의 유동에 대한 정보는 Table 1에 나타내었다.

이러한 구조로 인해 Shell 내부에 Glycol Water가 완전발달유동(Fully developed flow) 상태이므로 높은 에너지를 가지고 회전할 것으로 판단된다. 또한 이러한 유체는 온도에 따라 속도가 변하기 때문에, 특정 주파수가 아닌 대역 형태로 가진되는

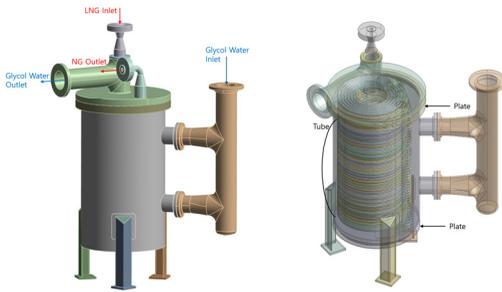


Fig. 1 Volution Type Model

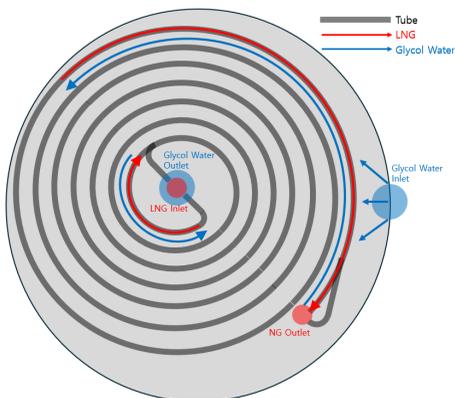


Fig. 2 Volution Type Model Fluid Flow

Table 1 Fluid Information

Nozzle	Fluid	Mass Flow (kg/hr)	Temp. (°C)	Pressure (bar)
Inlet	LNG	8,000	-161.4	310
Outlet	NG	8,000	45	308.6303
Inlet	Glycol Water	160,473	55	4
Outlet	Glycol Water	160,473	45	1.863

것을 고려해야 한다. 이에 따라, 가진주파수 대역을 추출하기 위해서 열교환기 내부에 흐르는 유체에 대한 유동 해석이 수행되어야 한다.

2.2 유동 해석 및 가진주파수 파악

Volution Type의 유체유발진동 범위를 파악하기 위해서 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)을 사용하였으며, 지배방정식은 식 (1)~(3)과 같다.¹³⁾ 난류 모델을 예측하기 위해 식 (5)와 같이 벽면 열전달 예측에 효과적인 SST k-omega 모델을 바탕으로 유동 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 회전하는 유체에 의해 발생하는 가진원을 파악하는 것이기 때문에 효율적인 해석을 수행하기 위해 Fig. 3에 나타낸 모델과 같이 축소하였다. 유체의 흐름은 Tube에 LNG가 흐르고, Glycol Water는 Tube 외부에 흐르고 있으며, 각각의 진행 방향은 역방향으로 형성되어 있다. 이에 따른 In/Outlet의 경계조건은 Fig. 3에 표현하였으며, 유체의 흐름 방향과 온도 변화에 따른 유속을 해석하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) + S_M \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j h_{tot}) \quad (3)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j h}) + \frac{\partial}{\partial x_j}[U_i (\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j})] + S_E$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (pkU) \tag{4}$$

$$= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_k}{\sigma_k} \right) \nabla(k) \right] + P_k - \beta^* pk\omega$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (p\omega U) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \nabla(\omega) \right] \tag{5}$$

$$+ \gamma_2 (2pS_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \omega k \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \delta_{ij})$$

$$- \beta_2 p\omega^2 + 2 \frac{p}{\sigma_{\omega,2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k}$$

Fig. 4는 Glycol Water의 Streamline에 대한 결과를 나타낸 그림이다. Glycol Water는 Fig. 2와 같이 유체가 Tube 사이로 빠져나가지 못하고 있으며, Outlet으로만 유체가 토출되고 있다. Glycol Water의 흐름은 Inlet 기준으로 반시계 방향으로 흐르고

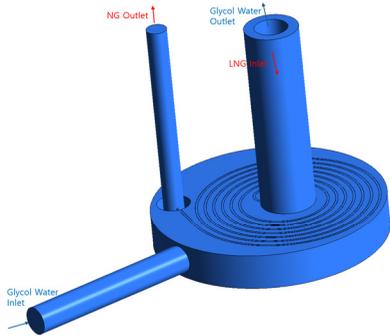


Fig. 3 CFX Analysis Model

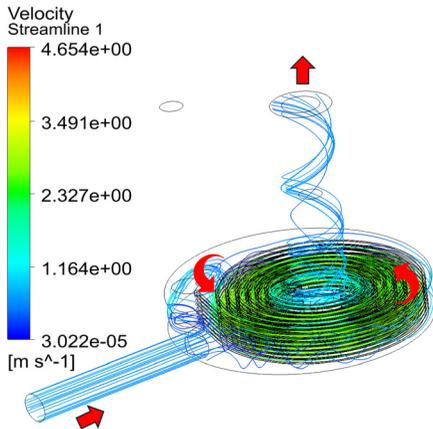


Fig. 4 Streamline of Glycol Water

있음이 확인되며, 방향성을 가지는 진동 특성을 고려하여 가진원을 파악하기 위한 필수 정보이다.

Fig. 5는 온도와 유속에 대한 결과를 Contour Map에 나타내었다. 유체가 서로 간의 열교환을 하게 되면서, 중심부의 온도가 외곽으로 갈수록 높아지는 것이 확인되며, 이에 따른 유속의 변화가 관찰된다. 특히, Glycol Water의 경우 유속에서는 약 1.4배 가량 유속이 변화하는 것이 확인되며, 이는 유체의 속도가 변화하며 회전 방향으로 원운동을 하고 있다는 것을 의미한다.

이러한 유체는 질량을 가지고 회전하게 되면 가진원이 될 수 있다. 원운동으로 인한 각속도가 발생하게 되며, 각속도는 식 (6), (7)과 같이 속도와 거리에 따라 주파수에 대한 특성이 변화하게 된다. 변화하는 유속을 고려하게 되면 가진주파수는 대역으로 발생하게 되며, 유체에 의한 가진원이 구조물과 상호작용하며 구조물의 피로가 증가할 수 있다.

$$w = \frac{v}{r} \tag{6}$$

$$f = \frac{w}{2\pi} \tag{7}$$

관계식으로부터 계산된 가진 주파수 대역은 Table 2에 나타내었으며, 반경 방향으로 가진된다. 이러한 가진원은 구조물의 강성에 대한 취약부나 고유진동수와 일치하게 되면 증폭 및 공진이 발생할 수 있다. 이에 따라 가진원의 특성을 고려하여 진동 안정성에 대한 평가를 수행하기 위해선 구조물의 고유진동수 및 모드 형상을 확인해야 한다.

Table 2 Frequency Range of Fluid Induced Vibration

Fluid	Frequency Range
Glycol Water	1.53 ~ 2.37Hz
LNG	1.91 ~ 5.99Hz

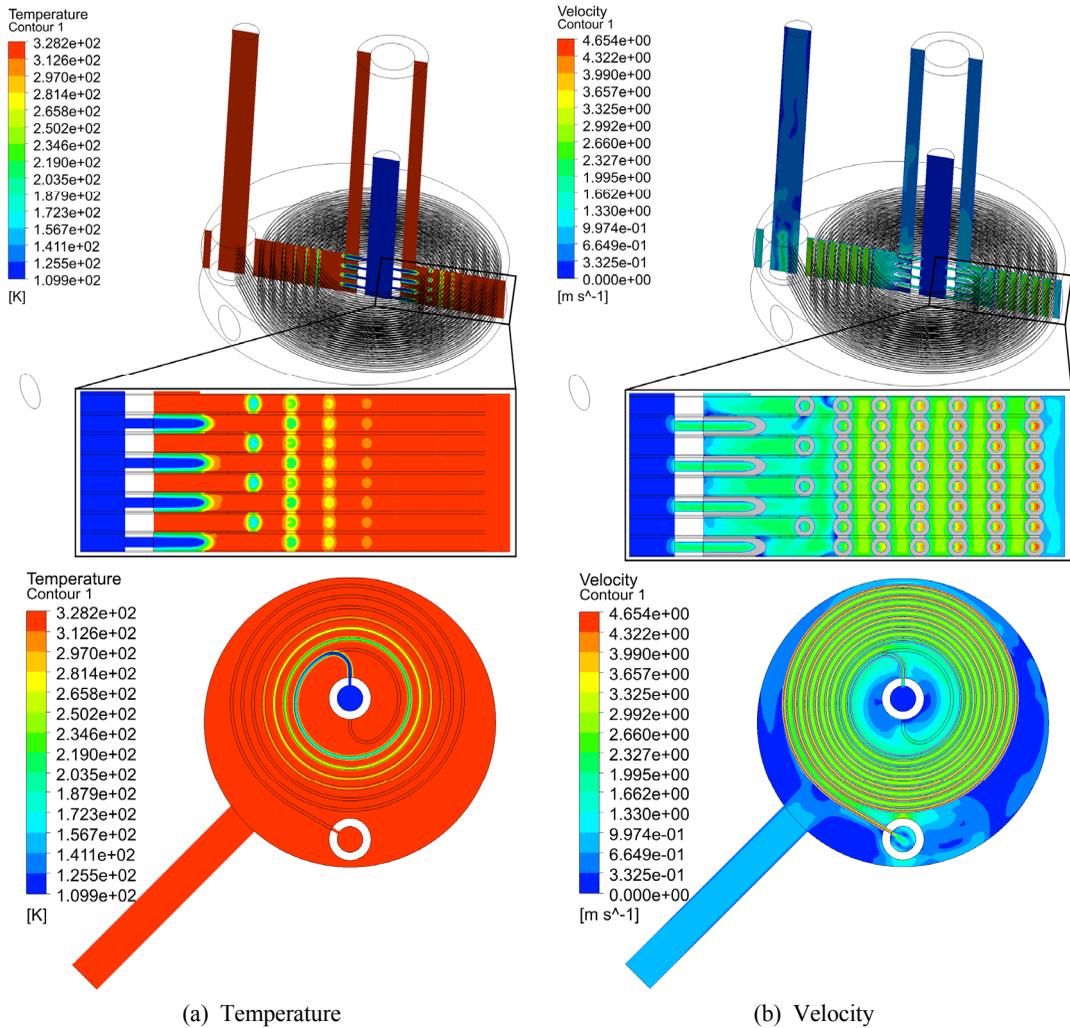


Fig. 5 CFX Analysis Results

3. 진동 해석

3.1 Modal 해석

Modal 해석을 수행하기 위해 상용해석 프로그램인 ANSYS WORKBENCH 2023 R2를 활용하였다. 이는 동적 해석의 기본이 되는 해석으로 구조물의 고유한 특성인 고유진동수와 고유모드를 구하는 해석이며, 지배방정식은 식 (8)과 같다.

$$[M][\ddot{x}] + [K][x] = 0 \quad (8)$$

해석을 수행하기 위하여 모델의 Mesh는 Node(절점) 약 439만 개, Element(요소) 약 227만 개로 구성하였다. 열교환기는 지면에 고정되어 있으므로 Fig. 6과 같이 하부 발의 밑면에 고정 구속조건을 주었다. Volution Type 모델을 구성하고 있는 Cover, Tube, Header, Pipe, Flange에 대한 재질은 Ansys에서 기본으로 제공하고 있는 Structural Steel과 유사하기 때문에 이를 사용하여 해석을 진행하였으며, 물성 정보는 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Material Property

Material	Structural Steel
Density (kg/m^3)	7850
Young's Module (Pa)	2E+11
Poisson's Ratio	0.3

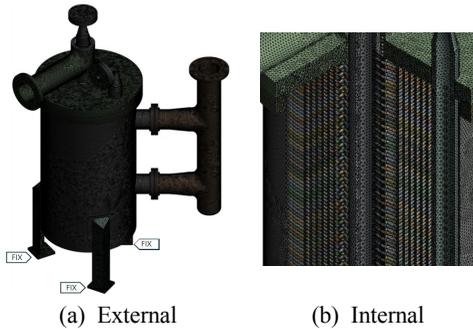


Fig. 6 Volution Type FEM Model

3.2 해석 결과

Modal 해석은 Glycol Water를 주입하는 펌프의 Operating Speed인 3,561 RPM을 고려하여 해석하였으며, Fig. 7에 전체 모드를 추출한 결과를 나타내었다. 총 6가지 모드 중 굽힘 및 비틀림 모드를 제외한 3개의 모드에서 Local 모드가 있는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 모드 형상에 대한 그림으로, Local 모드를 제외한 다른 모드에서는 반경 방향으로 뚜렷하게 나타났다. 국부적인 특정 부분에서만 진동

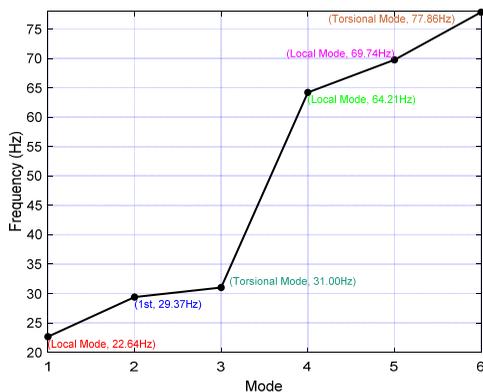


Fig. 7 Mode Extraction Result

형상이 나타나는 Local 모드는 22.64 Hz, 64.21 Hz, 69.74 Hz에서 발생하였다. 국부적인 영역에 과도한 응력이나 변형을 유발할 수 있으며, 이에 따라 구조물의 전체적인 안전성에 영향을 미칠 수 있으므로 해석 및 설계 시 고려해야 한다.

1차 굽힘 모드는 29.37 Hz에서 발생했다. 구조물의 가장 기본적인 진동 형태를 나타냈으며, 구조물 전체가 XY 방향으로 움직이는 형태로 나타났다. 1차 모드는 구조물을 진동시켰을 때 가장 쉽게 변형할 수 있는 모양으로 진동하는 진동수이기 때문에, 구조물의 전체적인 동적 응답을 이해하는 데 중요하다.

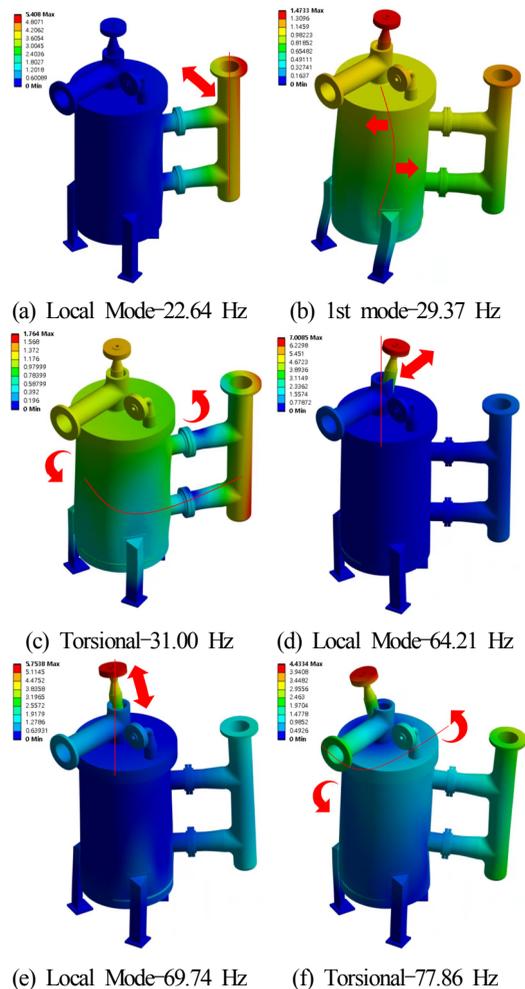


Fig. 8 Mode Shape of Volution Type Model

구조물 전체가 비틀리며 진동하는 형상인 비틀림 모드는 31.00 Hz, 77.86 Hz에서 발생하였다. 비틀림은 구조 및 기계 시스템에서 구성요소가 직면하게 될 비틀림 힘을 견딜 수 있는지 확인하는데 필요하며, 유체가 구조물 내부에서 특정 경로를 따라 회전하며 흐르는 경우, 유체가 구조물에 비틀림을 유발할 수 있다.

이러한 결과는 구조물의 설계 및 안전성 평가에 중요한 역할을 한다. 반경 방향의 진동이 우세하다는 결과는 구조물 내부에 존재하는 유체가 같은 방향으로 흐르기 때문에 유체와 구조물의 동특성과의 상호작용으로 추가적인 동적 하중이 발생할 수 있다. 이에 따라 구조물의 진동을 증폭시키는 역할을 할 수 있으므로, 유동 해석과 진동 해석 결과를 바탕으로 진동 안정성 평가가 필요하다.

4. 진동 안정성 평가

Volition Type 열교환기의 동적 시스템 특성을 파악하기 위해 Bode Plot을 이용하였다. 이는 주파수 응답을 통해 구조물의 진폭 변화를 시각적으로 표현하며, 이를 통해 열교환기의 동적 거동을 명확히 분석할 수 있다. 주파수 대역에서 구조물이 얼마나 민감하게 반응하는지 확인하였다.

Fig. 9는 Harmonic Response를 통해 Volition Type 열교환기의 Cover에 X축과 Y축 방향으로 각각 가진하여 Bode Plot을 나타낸 결과이다. Modal 해석 결과에서 나타난 굽힘모드(29.37 Hz)와 비틀림모드(31.00 Hz)에 부근에서 높은 응답이 나타나는 것이 확인된다. 이는 반경 방향으로 발생하는

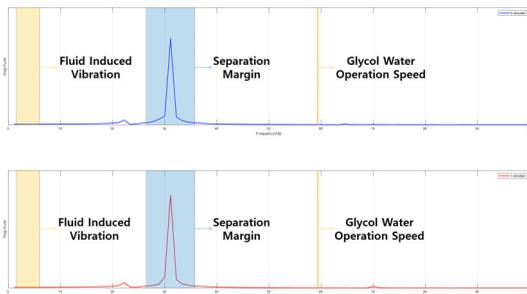


Fig. 9 Bode Plot

유체가진이 구조물의 비틀림에 대한 거동에 민감하게 반응할 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 유체에 의한 가진은 1.53~5.99 Hz에서 발생하기 때문에 에너지의 증폭 및 공진이 발생하지 않을 것으로 판단된다. 또한 Operating Speed인 3,561 RPM과도 발생 주파수의 차이가 약 70% 이상의 여유가 있으므로, 공진이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 Volition Type 열교환기에서 발생할 수 있는 가진원을 파악하여 진동 안정성 평가를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유체에 의한 가진원을 파악하기 위해 유동 해석을 수행하였다. 유체가 서로 간의 열교환을 하게 되면서 중심부의 온도가 외곽으로 갈수록 높아지며, 이에 따른 유속의 변화를 관찰하였다. 특히, Glycol Water의 경우, 유속에서는 약 1.4배 가량 유속이 변화하는 것을 확인했으며, 이는 유체가 변화하는 속도로 회전 방향으로 원운동을 하고 있는 것을 의미한다.

2) Volition Type 열교환기의 동특성을 파악하고자 Modal 해석을 수행하였다. Modal 해석 결과, 총 6개의 모드 중 29.37 Hz에서 1차 굽힘 모드가 발생하였고, 31.00 Hz, 77.86 Hz에서 비틀림 모드가 발생하였으며, 22.64 Hz, 64.21 Hz, 69.74 Hz에서 Local 모드가 발생하였다. 모드 형상을 확인해 본 결과, 반경 방향으로 기여도가 높은 것을 확인하였다. 이는 구조물 내부에 존재하는 유체가 같은 방향으로 흐르기 때문에 유체와 구조물의 동특성과의 상호작용으로 추가적인 동적 하중이 발생할 수 있다.

3) Volition Type 열교환기 내부에 흐르는 유체로 인해 원운동으로 인한 각속도가 발생하게 된다. 이러한 유체가 질량을 가지고 회전하게 되면 가진원이 될 수 있으므로, 이에 대한 가진 주파수 대역을 파악하였다. Glycol Water로 인한 가진주파수 대역은 1.53~2.37 Hz, LNG로 인한 가진주파수 대역은 1.91~5.99 Hz로 파악하였다.

4) 이를 바탕으로 진동 안정성 평가를 하기 위하여 주파수 응답 분석을 수행하였다. 일반적으로 공진 가능성을 회피하기 위하여, 평가된 고유진동수와 가진주파수 영역의 이격 기준을 $\pm 15\%$ 로 가진다. 이를 파악하기 위하여 Bode 선도를 확인한 결과, Glycol Water의 Operating Speed나, 유동에 의해 발생하는 주파수 대역이 구조물의 고유진동수와 벗어나 있음을 확인하였다. 이는 모델의 진동 안정성과 신뢰성을 위한 공진 분리 여유가 충분히 확보되었음을 의미한다. 하지만 안전성을 더 확보하기 위해서는 추후, 유동 해석과 진동 해석을 연성 해석하여 유체에 의한 Volution Type 열교환기의 동특성을 파악해야 할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구재단 초광역 연구개발특구 연계협력 기술사업화(R&BD) 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2023-DD-RD-0363).

Author contributions

J. G. Yoon & J. J. Lee; Vibration analysis, Fluid induced vibration analysis. J. W. Heo & Y. W. Lee; Flow analysis. S. H. Kim & S. H. Lee & H. Y. Choi; Heat exchanger design. J. G. Yoon; Writing-original draft. J. J. Lee & B. K. Choi; Writing-review & editing. B. K. Choi; Project administration.

References

1. J. W. Kim, C. S. Hong, S. Y. Kim, H. Lee, S. H. Jin, C. Y. Park, G. S. Kim and Y. S. Moon, 2022, "Experimental Study of GTAW Pipe Welding(6g) of Stainless Steel for Ship Heat Exchanger", Journal of The Korean Society of Mechanical Technology, 24(4), 639-644. (<https://doi.org/10.17958/ksmt.24.4.202208.639>)

2. S. M. Park, M. I. Jung, K. I. Whang and G. R. Cho, 2022, "A study on the development of the fin-tube heat exchanger pollution ratio evaluation algorithm using Image Precessing and Affine Transformation", Journal of The Korean Society of Visualization, 20(1), 11-17. (<https://doi.org/10.5407/jksv.2022.20.1.011>)
3. W. S. Ryoo, M. J. Seo, J. K. Yu and J. H. Jeong, 2023, "Numerical Analysis of Phase-Change in PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger) for LNG Carrier", Journal of The Korean Society for Fluid Machinery, 26(1), 23-28. (<https://doi.org/10.5293/kfma.2023.26.1.023>)
4. J. H. Jeon, M. H. Kim, J. N. Kim, S. M. Kim and H. Kang, 2021, "Development of Shell and Tube Type Heat Exchanger Possible for Removing Scale of the Outer Surface of Heat Exchanging Tube on Operation", Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, 238-239.
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. B. H. Jang, S. P. Kim, K. H. Lee, 2012, "A Numerical Analysis for the Performance Improvement of a Channel Heat Exchanger", Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 11(2), 159-164.
7. J. W. Lee, K. H. Shin, S. Choi, B. Y. Chung, B. S. Kim, 2015, "Design Optimization of Dual-Shell and Tube Heat Exchanger for Exhaust Waste Heat Recovery of Gas Heat Pump", Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, 3(1), 23-28.
8. Y. J. Yang, 2023, "Analysis on Characteristics of Thermal Flow of Coolant in Tube of Shell and Tube-type Heat Exchanger", Journal of The Korean Society of Mechanical Technology, 25(1), 24-30.

- (<https://doi.org/10.17958/ksmt.25.1.202302.24>)
9. J. K. Kim and S. H. Oh, 2022, “An Estimation on the Heat Transfer Performance of a Full-scale Shell-and-tube Heat Exchanger according to the Change of Mass Flowrate”, *Journal of The Korean Society For Power System Engineering*, 26(4), 89-97.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2022.26.4.089>)
 10. J. S. Kim, C. U. Ryu, E. B. Kim, S. H. Kim and S. Y. Ha, 2021, “The Structural study of spiral heat exchanger”, *Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 282.
 11. S. H. Kim, 2023, “A Study on Performance of Integrated Compact Spiral Coil Type Heat Exchanger for LNG FGSS”, MS thesis, Donga University, Korea.
 12. H. I. Lee, J. H. Jung, A. R. Lee, W. T. Kim and S. H. Choi, 2024, “Numerical Assessment of Flow-Induced Vibration in Main Steam Piping Using Computational Fluid Dynamics (CFD)”, *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, 48(3), 192-202.
(<https://doi.org/10.3795/KSME-B.2024.48.3.193>)
 13. ANSYS Inc, 2011, ANSYS CFX-Solver Theory Guide.