

수치해석을 이용한 Volution형 LNG 기화기의 유동해석 Numerical Flow Analysis of a Volution-Type LNG Vaporizer

허재원* · 이연원** · 유동인* · 전주호** †

Jae-Won Heo*, Yeon-Won Lee**, Dong-In Yu* and Jun-Ho Jeon** †

(Received 31 December 2025, Revision received 14 January 2026, Accepted 14 January 2026)

초록 : Volution 열교환기는 열교환기 내부의 Tube가 소용돌이형으로 이루어진 열교환기로, 내부 유동 구조가 복잡하여 전체 형상을 직접 해석할 경우 많은 해석 자원과 시간이 요구된다. Volution 열교환기의 효율적인 수치해석 방법론을 검증하기 위하여 이를 Section 단위로 분할하여 LNG 및 Glycol-Water의 유량 분포 특성을 분석하고, 이를 기반으로 축소모델을 구성하여 열유동해석을 수행하였다. 전체 모델 해석 결과, LNG와 Glycol-Water 모두 입구 및 Section 위치에 따라 유량 분포의 차이가 나타나는 경향을 보였다. Section별 유량 조건과 평균 유량 조건을 축소모델에 적용하여 비교한 결과, 입·출구 온도 분포 및 열전달 특성은 전반적으로 유사한 경향을 나타내었다. 본 연구를 통해 평균 유량을 적용한 축소모델 해석이 Volution 형상 LNG 기화기의 열전달 성능 평가에 있어 합리적인 수치해석 방법임을 확인하였다.

키워드 : 전산유동해석, 액화천연가스, Volution 열교환기, LNG 기화기, 열교환

Abstract : The Volution heat exchanger analyzed in this study is characterized by a swirl-type tube configuration within the heat exchanger, which results in a complex internal flow structure and requires substantial computational resources and time when the full geometry is directly analyzed. To investigate an efficient numerical methodology for the analysis of the Volution heat exchanger, the system was divided into multiple sections, and the flow distribution characteristics of LNG and glycol-water were examined. Based on these results, a reduced-scale model was constructed and used for conjugate heat transfer analysis. The full-model analysis showed that both LNG and glycol-water exhibit variations in flow distribution depending on the inlet configuration and section location. When sectional flow conditions and average flow conditions were applied to the reduced model, the inlet-outlet temperature distributions and heat transfer characteristics exhibited similar overall trends. These findings confirm that reduced-model simulations

** † 전주호(<https://orcid.org/0000-0001-9801-6251>) : 연구원,
국립부경대학교 방위과학연구소

E-mail : skya333@naver.com, Tel : 051-629-7730

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

**이연원(<https://orcid.org/0000-0002-3749-8119>) : 연구원,
국립부경대학교 방위과학연구소

*유동인(<https://orcid.org/0000-0002-6863-9658>) : 교수, 국립
부경대학교 지능로봇공학과

** † Jun-Ho Jeon(<https://orcid.org/0000-0001-9801-6251>) : Researcher,
Institute of Defense Science and Technology, Pukyong National
University.

E-mail : skya333@naver.com, Tel : 051-629-7730

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

**Yeon-Won Lee(<https://orcid.org/0000-0002-3749-8119>) :
Researcher, Institute of Defense Science and Technology,
Pukyong National University.

*Dong-In Yu(<https://orcid.org/0000-0002-6863-9658>) : Professor,
Department of Intelligent Robot Engineering, Pukyong National
University.

employing average mass flow rates provide a reasonable numerical approach for evaluating the thermal performance of Volution-type LNG vaporizers.

Key Words : Computational Fluid Dynamics, Liquid Natural Gas, Volution Heat Exchanger, LNG Vaporizer, Conjugate Heat Transfer

1. 서 론

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 2050년 국제 해운 탄소중립을 목표로 강력한 배출가스 규제를 시행 및 추진중이다.¹⁾ 이에 따라 기존의 중유를 연료로 사용하는 대형 선박들의 경우 선박의 연료를 기존의 중유에서 액화천연가스나 암모니아, 수소 등 친환경 연료로 전환이 요구되고 있다.

선박에 액화천연가스(Liquid Natural Gas, LNG)를 연료로 사용하고자 할 때, 저온고압상태의 LNG를 가열해 연료로 사용할 수 있도록 기화시켜 엔진으로 보낸다. 이때, LNG의 기화에는 열교환기가 사용되며, 일반적으로 국내에서 Shell and Tube 열교환기나 Shell and Plate 열교환기, Plate type, 인쇄회로 열교환기(Printed Circuit Heat Exchanger, PCHE) 등 다양한 열교환기가 사용되고, 다양한 열교환기들이 생산된다.^{2,3)} Volution 열교환기는 기존의 Shell and Tube 열교환기와 비교할 때, 동일한 열전달 성능을 더 작은 부피로 구현할 수 있으며, 동일한 설치 공간에서는 향상된 열교환 성능을 기대할 수 있다.^{4,5)}

Deshmukh는 Helical coil 열교환기의 부분 형상을 모델링하여 CFD 해석을 수행하고, 해당 축약 모델을 통해 열유동 특성 예측이 가능함을 정상·정량적으로 제시하였다.⁶⁾ Kumar는 이중 Helical coil 열교환기를 대상으로 열전달/압력강하를 평가하였고,⁷⁾ Raj는 Helical coil 열교환기에 대해 열전달 성능을 수치적으로 분석하였다.⁸⁾ 다만 상기 연구들은 주로 Helical coil 형상의 단순화된 시험부/부분 모델을 대상으로 열전달 및 압력강하 성능을 평가하였다. Volution 열교환기는 내부 유로가 복잡하게 형성되어 있어 전체 형상을 그대로 해석할 경우 과도한 해석 자원과 시간이 요구된다.

이에 따라 효율적인 수치해석 방법론의 검증이 필요하며, 특히 축소모델 적용 시 유동 불균일성이 해석 결과에 미치는 영향에 대한 체계적인 검토가 필요하다.

본 연구에서는 Volution 열교환기의 일부를 Section으로 구분하여 Section별 유량 불균일성이 열유동 해석 결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 1개 Section에 해당하는 유량을 적용한 축소모델 해석의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 배경이론

Volution 열교환기는 내부 구조가 매우 복잡하고 유로가 매우 좁다. 따라서 본 연구에서는 벽면 근처 유동특성을 비교적 잘 반영할 수 있는 SST $k-\omega$ 난류 모델을 사용하여 Volution 열교환기의 유동특성을 해석하였다. 수치해석에서 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식은 다음과 같다.^{9,10)}

연속방정식

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho g \quad (2)$$

에너지방정식

$$\nabla \cdot (\rho u h) = k \nabla^2 T \quad (3)$$

2.2 Volution 열교환기

본 연구에서 해석을 진행한 Volution 열교환기의 형상은 Fig. 1과 같이 소용돌이 형상으로 말려 있는 LNG Tube Bundle이 원통 안쪽에 있는 구조

로 원통 내부에 LNG Tube 들이 중앙의 수직관에 교대로 양쪽 수평 방향으로 뻗어 있고, 이 관들이 몇 바퀴를 돌아 바깥쪽의 수직관으로 나가는 구조로 되어 있다.

lycol-Water의 경우, 원통 외부의 수직관으로 들어와 수평 방향으로 연결된 2개의 통로로 원통 쪽으로 흘러온 뒤, LNG가 나가는 수직관 옆으로 모여 중심을 향해 흐르며 열을 LNG에 전달한 후 중앙에서 수직 방향으로 나간다. 따라서 원통 쪽으로 들어올 때(열교환이 거의 일어나기 전)를 제외하면 2차원 유동이 지배적인 것으로 예상된다.

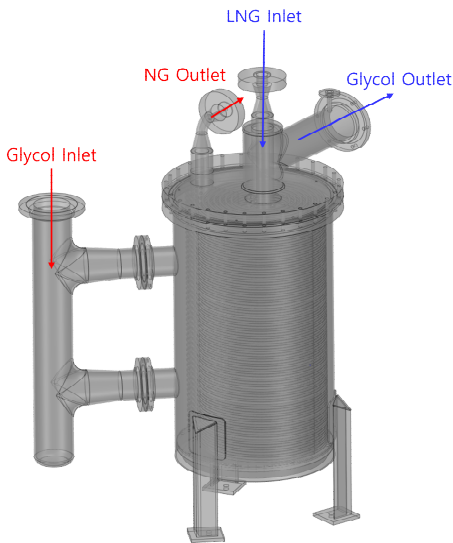


Fig. 1 Outfit of Volution Heat Exchanger

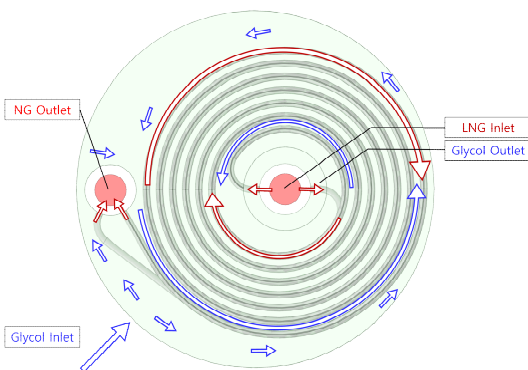


Fig. 2 Expected Flow Direction of Volution Heat Exchanger

LNG는 원통 중심부로 들어와 열교환을 거쳐 바깥으로 나가고, Glycol은 원통 바깥쪽에서 들어와 원통과 연결된 2개의 연결부로 들어온 후, Volution Tube Bundle에 열을 전달한 후 원통 중심부로 나오는 방식이다. Fig. 2는 Volution 열교환기에서 Glycol-Water 및 LNG의 2차원 유동방향을 간략하게 나타낸 그림이다.

2.3 해석모델

본 연구에서는 Volution 열교환기의 일부를 Section으로 구분하여 Section별 유량 불균일성이 열유동 해석 결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 1개 Section에 해당하는 유량을 적용한 축소모델 해석의 타당성을 검증하고자 한다. 따라서 Volution 열교환기의 Section별 Glycol-Water 및 LNG의 유량을 확인한 후, 이를 1개 Section에 해당하는 열유동 해석모델에 경계조건으로 적용하여 열유동해석을 진행하였다.

2.3.1 Section별 유량 검출 해석모델 및 조건

전체 열교환기 형상을 구현하여 각층의 유량을 확인하기 위하여 Volution 열교환기는 원통부 안에 소용돌이 형상으로 말려있는 LNG Tube가 교대로 바닥부터 천장까지 층층이 쌓여 있는 구조로, 총 96본의 Tube가 적층되어 있다.

전체 영역을 모두 반영하여 열유동해석을 진행하는 것은 상당히 비효율적이기 때문에, 총 96본의 LNG Tube를 8본씩 묶어 총 12개 영역으로 구분하였고(LNG 입구에 가까운 상단 층부터 Section 1을 설정), Glycol의 경우, 해당 LNG Tube의 높이에 해당하는 영역을 각 Section으로 나누었다. Fig. 3은 1개 Section에 해당하는 영역을 그림으로 표시한 것이다. 1개 Section은 LNG Tube 8본, LNG Tube 8본을 둘러싼 LNG Tube 영역, LNG Tube를 둘러싸는 Glycol 영역 모두 포함한다. 격자는 ANSYS Meshing을 활용하여 비정렬 격자를 생성, 약 2,500만 개의 격자를 사용하였다.

Volution 열교환기의 각 Section에 흐르는 LNG 및 Glycol-Water의 유량을 확인하여 2.3.2의 축소모델의 열유동해석의 경계조건으로 사용하였다.

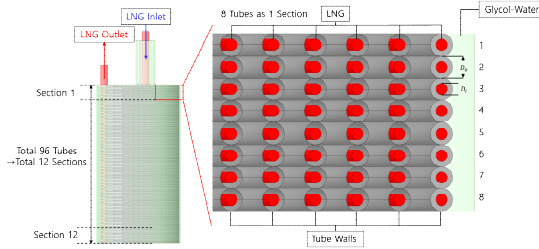


Fig. 3 Divided Section of Volution Heat Exchanger

Table 1 Design Condition of Volution Heat Exchanger

Fluid	Location	Mass Flow [kg/h]	Temp [°C]	Press [barG]	Phase
LNG	Inlet	8,000	-161.4	310	Liquid
	Outlet		45	308.63	Vapor
G.W	Inlet	160,473	55	4	Liquid
	Outlet		45	1.863	Liquid

Table 1은 Volution 열교환기의 설계조건으로, 각 유체의 입구온도와 목표로 하는 출구온도가 포함되어 있다.

해석조건은 Table 1의 전체유량에서 1개 Section에 해당하는 1/12의 유량을 LNG 및 Glycol-Water Inlet에 적용하여 해석을 수행하였고, 2.3.1의 Section별 유량해석에서 확인한 각 Section에 흐르는 유량을 축소모델의 LNG Inlet과 Outlet에 적용하여 해석을 수행하였다.

본 열교환기에 사용된 LNG의 경우, 310 barG의 초고압 상태로, 해당 압력에서는 LNG 대부분을 차지하는 CH₄의 상변화가 일어나지 않는 영역으로 상변화를 고려하지 않았다. Glycol-Water의 경우, Glycol 원액과 물을 50:50 비율로 혼합하여 사용하였다. CH₄ 및 Glycol-Water의 경우 온도에 따라 물성이 변하도록 설정하여 해석을 수행하였다.

2.3.2 축소모델 해석모델

2.3.1에서 나온 각 Section별 유량 결과 및 평균 유량 결과를 활용한 축소모델 해석을 수행하려 한다. 실제 LNG와 Glycol-Water 간의 열교환을 모사하였고, 축소모델 해석을 통해 제한된 해석 자원 및 시간을 고려한 해석모델 및 조건을 검토

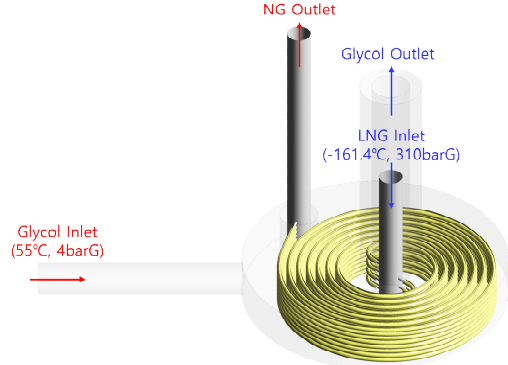


Fig. 4 Reduced Geometry of Volution Heat Exchanger

하고자 한다. 1/12 높이의 축소모델 형상은 Fig. 4와 같다.

수치해석을 이용한 Volution형 LNG 기화기의 해석모델은 LNG 영역, Volution Tube 영역(고체), Glycol-Water 영역으로 나누어져 있으며, LNG의 경우 LNG의 구성비 대부분을 차지하는 CH₄를 적용해 해석을 수행하였다. 해석격자는 3개 영역을 합쳐 2,300만 개의 비정렬 격자를 사용하였다. Fig. 4의 해석모델에서 노란색으로 표시된 Volution Tube 벽면을 제외한 모든 벽면의 경우, 단열벽면 조건을 적용하였고, 정상상태 해석을 수행하였다.

3. 해석결과

3.1 Section별 유량 조건 해석결과

Fig. 5, 6은 전체 Volution 열교환기 유량 해석 결과, 각 Section별 유량을 표로 나타낸 것이다.

Fig. 5는 LNG 영역에서의 각 Section별 유량 결과(1~12) 및 1/12 유량(녹색선)을 비교한 것이다. LNG의 Section별 유량 추이를 보면, 입구에 가까운 Section 1을 기준으로 선형적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 정량적으로 비교해 보면, 1/12 유량 대비 최대 2.8%, (0.1852, 0.1904 kg/s) 최대유량과 최소유량 (0.1904, 0.1826 kg/s) 비교 시 4.2%의 유량 차이를 확인하였다.

Fig. 6은 Glycol-Water 영역에서의 각 Section별 유량을 확인한 것으로 Fig. 4와 마찬가지로 초록색 선은 평균 유량을 나타낸다. Glycol-Water의

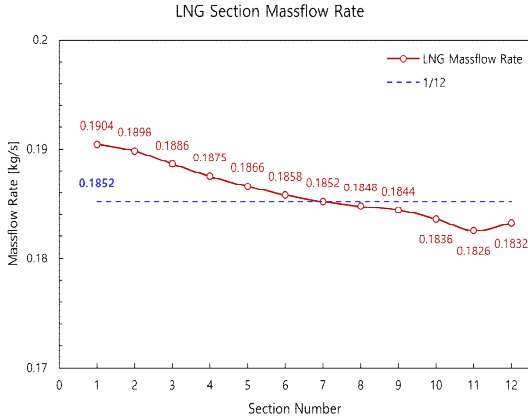


Fig. 5 LNG Mass Flow Rate at Each Sections

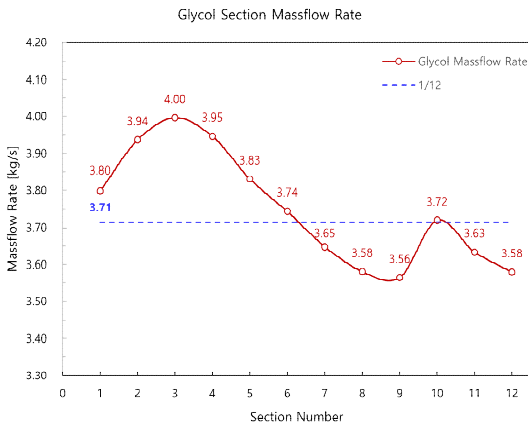


Fig. 6 Glycol-Water Mass Flow Rate at Each Sections

경우, Section별 LNG와 다른 경향성을 나타내는데, 이는 Fig. 1에서 Glycol-Water의 입구 영역이 2개인 것의 영향으로 판단된다. 정량적으로 비교해보면, 1/12 유량 대비 최대 7.6%, (3.9960, 3.7147kg/s) 최대유량과 최소유량 (3.996, 3.564 kg/s) 비교 시 10.8%의 유량 차를 확인할 수 있다. 이는 Glycol-Water Inlet에서 Volution 열교환기로 들어오는 유료가 Section 3과 10의 위치에 있어 발생하는 것으로 파악된다.

3.2 Section별 유량 및 평균 유량 조건 해석결과

여기서는 Fig. 4의 축소모델 및 Fig. 5, 6의 각 Section별 유량조건 및 1/12 유량을 해석조건으로 적용하여, 축소모델에서의 유량 변화에 의한 민감

도를 평가하고자 하였다. 그 결과는 Fig. 7, 8에 나타내었다.

Fig. 7은 LNG와 Glycol-water의 입출구면의 온도차를 나타낸 것으로, 각 Section 및 평균유량(점선)에서의 Glycol-Water와 LNG의 온도 변화량을 보여 준다. 전체적인 경향성은 확인하기 어렵다. 정량적으로는 Glycol-Water의 경우, 최대와 최소 온도차가 1.86℃ 1/12 유량 대비 최대 0.95℃ 차이가 난다. LNG의 경우, 최대 최소의 온도차가 2.37℃, 평균 대비 2.10℃까지 차이가 났다.

Fig. 8은 LNG와 Glycol-water의 열전달량을 나타낸 것으로, 각 Section 및 1/12 유량(점선)에서의 Glycol-Water와 LNG의 열전달량을 비교하였다. LNG의 경우, Section별 유량과 유사하게 LNG

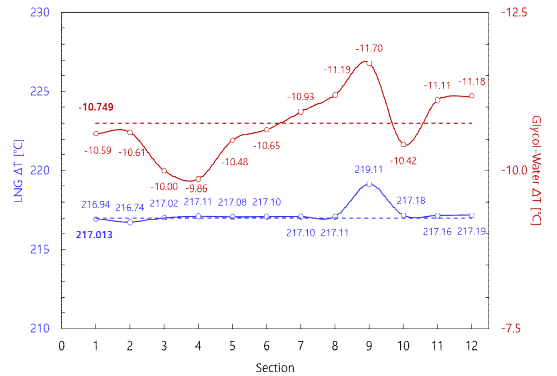


Fig. 7 Temperature Difference of LNG and Glycol-Water

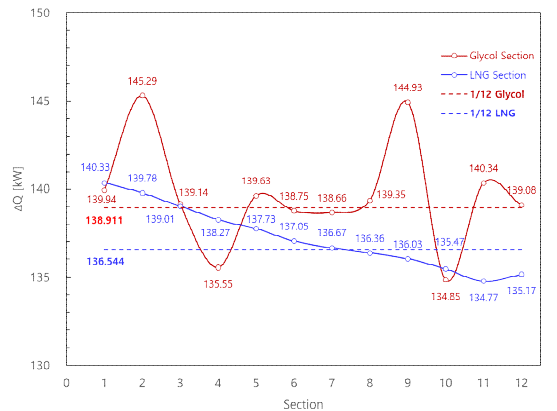


Fig. 8 Heat Transfer Rate of LNG and Glycol-Water

Inlet으로부터 멀수록 열전달량이 감소하는 경향을 확인할 수 있으나, Glycol-Water의 경우, 뚜렷한 경향성은 확인할 수 없었다.

정량적으로는 Glycol-Water의 경우, 최대와 최소 온도차가 10.44 kW, 1/12 대비 최대 5.35 kW 차이가 난다. 백분율로 보면 7%, 3%의 차이를 보여 준다. LNG의 경우, 최대 최소의 열전달량 차이가 5.56 kW(4.1%), 평균 대비 3.7 kW(2.7%) 까지 차이가 났다.

4. 결 론

본 연구에서는 Volution 열교환기의 해석방법론 검증에 위하여 전체 모델에서의 유동해석을 수행 후 각 Section별 유량을 파악하고, 이를 축소모델에 적용하여 열유동해석을 수행, 유량 변화에 따른 온도변화 및 열전달량 민감도를 파악하고자 하였다. 이를 통해 축소모델을 사용한 열유동해석의 타당성을 검증하였다. 그 결과는 아래와 같다.

1) LNG의 각 Section별 유량은 LNG Inlet으로부터 멀어질수록 선형적으로 감소하였고, 그 차이는 최대 4.2%, 평균기준 2.8%까지 유동량의 차를 확인하였다.

2) Glycol-Water 영역에서의 Section별 유량은 Glycol-Water 입구가 있는 3, 10 Section에서 증가하나 전체적으로는 Glycol-Water의 Inlet에서 멀어질수록 감소하는 경향을 보이며, 그 차이는 최대 10.8%, 1/12 대비 7.6%까지 유동량의 차를 확인하였다.

3) 각 Section별 유량 차이를 적용한 축소모델에서의 열유동 해석결과, 입·출구 간 온도차이는 최대 2.37℃, 1/12 대비 2.09℃(LNG), Glycol-Water는 최대 1.86℃ 1/12 대비 0.95℃로 Section별 경향성은 LNG에서만 나타났다.

4) 열전달량의 경우, LNG는 Section별 열전달량의 차는 최대 4.1%, 1/12 유량과는 최대 2.8%의 차이가 나타남을 확인할 수 있으며, LNG Inlet에서부터 멀어질수록 열전달량 또한 감소하는 경향을 확인할 수 있다. Glycol-Water의 경우, Section별 열전달량의 차는 최대 7.7%, 1/12 유량과는 최

대 4.6%의 차이를 확인하였다.

결론적으로 각 Section별 유량차와 온도차는 제한적이었으며, 열전달량의 경우, 평균값과 비교했을 때 최대 7.7% 이하의 차이를 보여 주었다.

이는 Volution 열교환기의 현재 설계조건에서의 Section별 유동검토 없이 1/12 유량을 활용한 해석이 타당성을 가질 것으로 판단 가능하다. 하지만 다른 설계 또는 운전 조건에 대해서는 추가 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구재단 초광역 연구개발특수 연례협력 기술사업화(R&BD) 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2023-DD-RD-0363).

Author contributions

J. W. Heo; Conceptualization, Software, Investigation, Formal analysis, Writing-original draft. Y. W. Lee; Funding acquisition, Validation. D. I. Yu; Writing-review & editing, Formal analysis. J. H. Jeon; Supervision, Validation.

References

1. International Maritime Organization, 2023, "IMO Approves Net-Zero Regulations to Cut Greenhouse Gas Emissions from International Shipping", IMO Press Briefings, July 7, <https://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/imo-approves-netzero-regulations.aspx>.
2. 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.
3. 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.
4. S. H. Kim, 2023, "A Study on Performance of Integrated Compact Spiral Coil Type Heat Exchanger for LNG FGSS", MS thesis, Donga University, Korea.
5. 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), 193-202. (<https://doi.org/10.3795/KSME-B.2024.48.3.193>)
6. P. Deshmukh, V. D. Patil and B. Devakant, 2016, "Cfd Analysis of Heat Transfer in Helical Coil Tube in Tube Heat Exchanger", *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 3(1), 1-8.
7. P. M. Kumar and M. Chandrasekar, 2019, CFD analysis on heat and flow characteristics of double helically coiled tube heat exchanger handling MWCNT/water nanofluids, *Heliyon*, 5(7).
8. R. T. K. Raj and M. Kumar S., A. Mathew C. and T. Elango, 2014, "Numerical analysis of helically coiled heat exchanger using CFD technique", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(3), 1-8.
9. H. K. Versteeg and W. Malalasekera, 2007, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Pearson Education.
10. ©ANSYS, Inc. ANSYS CFX Theory Guide. 2025.