



# 액화 천연가스 화물 펌프 내 유동 특성에 의한 인두서 최적설계

## Optimal Design of Inducer by Flow Characteristics in LNG Cargo Pump

송지훈<sup>1</sup>, 이동렬<sup>2,#</sup>  
Jihun Song<sup>1</sup> and Dong-Ryul Lee<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 한국항공우주산업(주) 헬기체계해석팀 (Rotorcraft System Analysis Team, Korea Aerospace Industries)

<sup>2</sup> 대구가톨릭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Daegu Catholic University)

# Corresponding Author / E-mail: [dlee@cu.ac.kr](mailto:dlee@cu.ac.kr), TEL: +82-53-850-2717, FAX: +82-53-850-2710

ORCID: 0000-0002-7555-2745

KEYWORDS: LNG pump (LNG 펌프), Inducer (인두서), CFD (전산유체역학), Suction and discharge performance (흡입 및 토출 성능), Pressure loss coefficient (압력손실계수), Pressure drop (압력강하)

*The study examined the flow characteristics within an LNG cargo pump, specifically focusing on how variations in the geometry of the inducer and inducer casing affect pump performance. LNG cargo pumps are essential for transferring LNG from carriers' storage tanks to onshore facilities. The inducer significantly influences the pump's suction performance, making it crucial for efficient LNG transfer. Given that the inducer often operates under challenging conditions, computational fluid dynamics (CFD) analysis was conducted on various geometric configurations. The analyses assessed velocity, pressure, efficiency, head, and pressure loss coefficient. Among the configurations studied, Case 4 exhibited the lowest efficiency and head, although the differences compared to other cases were minimal. Notably, Case 4 demonstrated more uniform pressure distributions and stable velocity profiles. Additionally, its pressure loss coefficients were 34.9% and 10.9% lower than those of Case 1 and Case 2, respectively, indicating enhanced flow stability and reduced energy loss. Overall, within the design parameters of this study, Case 4 emerged as the most optimized configuration for stable LNG transport.*

Manuscript received: June 16, 2025 / Revised: December 4, 2025 / Accepted: December 17, 2025

### 1. 서론

석유, 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas, LPG), 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG) 등과 같은 액체 상태의 화물을 탱크 내부로 적재 또는 육상 기지로 하역하기 위해 유체에 압력을 가해주는 기계를 Cargo 펌프라 한다. Cargo 펌프는 일반적인 펌프와 달리 전체가 액체에 잠긴 상태로 운전을 하고, 탱크 바닥으로부터 일정 간격 위에 수직으로 설치된다. 이때 탱크 내의 잔류 LNG를 최소화하는 것이 핵심적인 설계 기술 중 하나이다. 따라서, LNG를 최대한 많이 생산함과 동시에 캐비테이션을 회피하기 위한 수단으로 인두서가 장착된다. 적절한 인두서 설계는 1차적으로 흡입구에서 발생하는 캐비테이션을 소멸시켜 수두와 유량이 감소되는 것을 방지한다. 그러나, 인두서의

기하학적 형상 등이 유동 특성의 안정성에 미치는 영향에 대한 분석 연구는 부족한 실정이다. 이를 위해 형상 설계 변수를 활용하여 적절한 비교를 통한 데이터 제시가 요구된다.

LNG 탱크 바닥, 인두서의 입구 형상, 운전 속도에 따른 흡입 성능, 효율, 캐비테이션 등의 다양한 연구가 활발히 진행되었다. 국내에서는 LNG 펌프 흡입 케이싱 홈 형상에 따른 흡입 성능 변화에 관한 연구[1], 탱크 바닥이 LNG 카고 펌프의 성능 및 캐비테이션 특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구[2], 입구 형상에 따른 인두서의 흡입 성능에 관한 연구[3], 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)를 활용한 육상용 LNG 고압 다단 펌프의 Eye 및 Inter-stage 실링 유닛 형상에 관한 연구[4], LNG 펌프용 극저온 볼 베어링의 단상 및 이상 열전달 특성에 대한 수치 해석적 연구[5], LNG 펌프의 누설 유량 최소화를

위한 래버린스 실 형상의 수치적 연구[6], 선박용 LNG 공급시스템의 피스톤 펌프 유동 특성에 대한 수치 해석적 연구[7], LNG HPSO 펌프 지지 베어링의 윤활 유량 모델에 따른 로터 다이내믹스 해석 연구[8], LNG 연료 펌프 Labyrinth Seal의 누설량 및 동특성 해석[9] 등 LNG Cargo 펌프에 관한 성능분석 및 유동 특성의 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 LNG Cargo 펌프의 인듀서 및 인듀서 케이싱의 형상을 설계 변수로 두어 펌프의 유동 특성을 3차원으로 수치적 해석을 하고 이에 따라 LNG Cargo 펌프의 인듀서 형상이 미치는 압력, 속도, 압력손실계수 등을 파악하여 손실 및 성능 특성 변화를 비교하여 정량적인 값의 차이를 살펴보고 인듀서의 최적 설계에 관한 자료를 제시하는 것이 연구의 목적이다.

2. 설계 및 수치해석

LNG Cargo 펌프의 성능을 나타내는 관계식은 아래의 식과 같다.

$$H = \left( \frac{p_{out}}{\rho g} \right) - \left( \frac{p_{in}}{\rho g} + \frac{v_{in}^2}{2g} \right) \tag{1}$$

$$\eta = \frac{\rho g H Q}{T \omega} \tag{2}$$

식(1)은 수두(Head, H)와 식(2)는 효율(Efficiency, η)을 나타내며, 양정과 압력 간의 관계를 설명한다. 식(1)과 식(2)에서 p, v, T, ω, Q는 각각 압력, 속도, 토크, 각속도, 유량을 나타낸다.

2.1 수치모델과 격자생성

3차원 형상인 임펠러, 디퓨저는 ANSYS BladeGen V.14.5, 인듀서는 CATIA V.5 프로그램을 사용하여 형상을 구현하였다. Fig. 1은 실제 Cargo 펌프의 인듀서와 임펠러가 조립된 사진이다. 본 연구에서 사용된 LNG Cargo 펌프는 Figs. 2와 3으로 형상을 나타내었다. Fig. 2는 인듀서와 임펠러이고 Fig. 3은 어셈블리한 형상이다. 인듀서 각도 변화와 그에 대한 반경을 포함하여 인듀서 케이싱의 형상을 변수로 수치해석을 수행하였다. 인듀서의 각도와 케이싱 입구 반경을 설계 변수로 선정한 주요 목적은 LNG Cargo 펌프의 흡입성능에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요소를 평가하는데 있다. Table 1에서는 설계 변수를 수치적으로 정리하였으며, 인듀서 각도의 변화와 각도에 따른 인듀서 케이싱 입구 형상의 변화를 총 4가지 Case로 해석을 수행하였다. 형상별 격자에 대한 의존도 검토를 완료하였고, 각 형상에 대한 격자수는 약 24만-30만 개의 범위로 생성되었다.

2.2 수치해석 방법 및 경계조건

상용 CFD 코드인 ANSYS CFX V.14.5가 복잡한 회전 기계의 유동 특성 및 수렴성에 장점이 있는 Cargo 펌프의 수치 해석적 연구에 사용되었다. LNG Cargo 펌프 내 레이놀즈 수(Re)는



Fig. 1 Impeller and inducer of LNG cargo pump

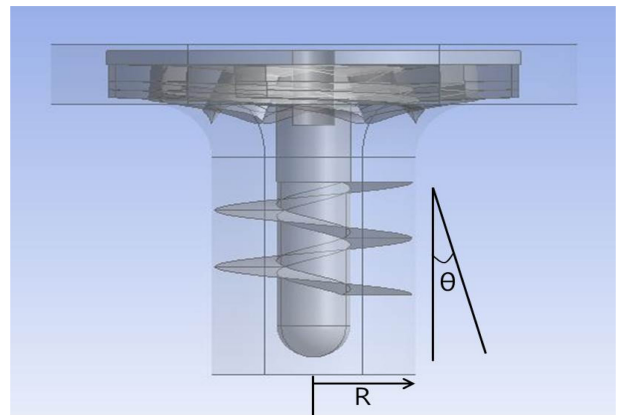


Fig. 2 3D Geometry of rotor in LNG cargo pump

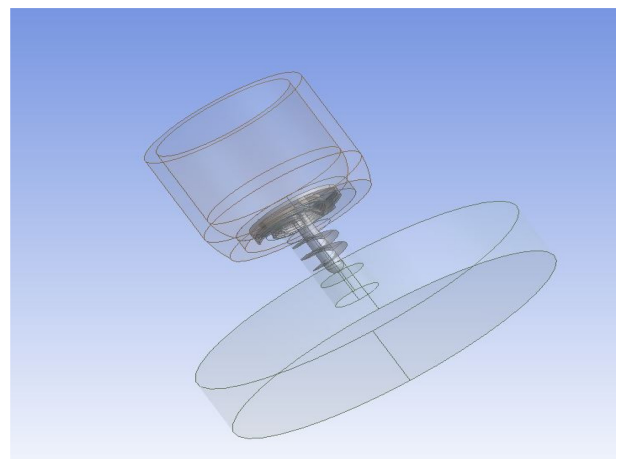


Fig. 3 3D Geometry of LNG cargo pump

6322.1로 계산되었다. 이를 바탕으로 벽면 난류를 효율적으로 계산하기 위해 Shear Stress Transport (SST) 난류 모델을 적용하였고, 작동 유체는 LNG 가스의 주성분인 액체 메탄의 물성을 활용하여 해석하였다.

Table 1 Design parameters of inducer and inducer casing

Inducer casing (R) [mm]	Inducer angle ( $\theta$ ) [ $^{\circ}$ ]
155	0 (Case 1)
130	5 (Case 2)
215	10 (Case 3)
120	-5 (Case 4)

경계조건은 펌프의 흡입부에 캐비테이션 방지를 위해 균일한 상태 1.5 bar의 압력을 부가하였고, 261 kg/s의 질량 유량을 출구 경계 조건으로 설정하였다. 임펠러 및 인두서의 회전 속도는 운전 속도인 1,780 RPM을 적용하였다. 영역 간 경계면은 General Grid Interface (GGI) 방식의 인터페이스를 활용하여 처리하였다. 이외의 모든 벽면은 단열조건으로 열전달을 고려하지 않았고, 마찰계수를 0으로 이상적인 벽면 유동을 가정하였다. 실제 Cargo 펌프의 작동 조건을 활용하여 형상별 특성을 수치적으로 검증하였으며, 수치해석 결과에 미미한 영향을 미치는 벽면 마찰계수 등은 가정하여 효율적 해석 결과를 도출할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 인두서 각도 변화 및 케이싱 반경을 주요 설계 변수로 설정하여 수치적으로 비교 해석하였고, 실제 Cargo 펌프 제작이 가능한 케이싱의 제작 범위를 고려하여, 구조적인 제약을 반영한 수치를 설계 변수로 설정하였다. 인두서의 각도는 인두서 내 속도 분포 및 압력 변화를 비교 분석하여 캐비테이션의 민감도를 평가하기 위한 독립적인 요인으로 설정하였다.

산업용 LNG Cargo 펌프에서는 성능 및 구조적 문제에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 캐비테이션은 설계 단계에서 필수적으로 고려되어야 할 인자 중 하나이다. 또한 선박용 펌프는 연속적으로 작동되는 특성으로 인해 효율 향상이 주요 설계 목표이다. 이 두가지 목적 함수들은 펌프 내부의 속도 및 압력 변화를 통해 효율적으로 예측 가능하다. 이러한 관점에서 최적 설계된 펌프는 공학적인 파급 효과를 야기한다.

3.1 속도 분포

인두서와 인두서 케이싱 형상에 따른 펌프 성능 변화를 알아보기 위해서 유동해석을 진행하였다. Figs. 4는 Z축 단면적을 기준으로 속도 스트림 라인을 나타내고, 5는 속도 벡터장을 나타내고 있다. 펌프내 유동을 직관적으로 이해할 수 있도록 도시하였으며, 펌프의 회전 운동에 의해 지배적인 유동이 발생한다. Case 4의 경우 다른 Case에 비해 많은 유동 속도가 인두서 입구 부분에 밀집되는 것을 볼 수 있다. Figs. 4와 5를 통해 각 형상의 각도 변경에 따라 전체적인 유동 패턴에 변화가 있는 것을 확인할 수 있으며, 속도장에서는 Case 4가 흡입되는 유량이

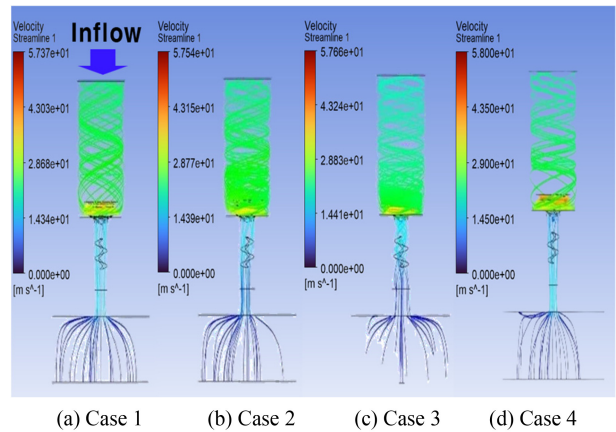


Fig. 4 Velocity streamlines in cargo pump

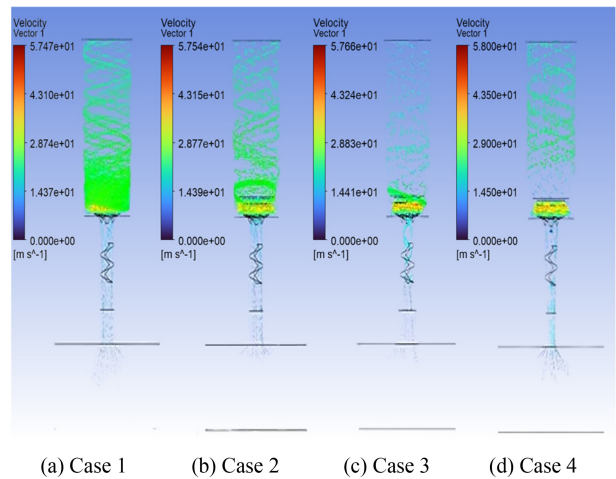


Fig. 5 Velocity vectors in cargo pump

Table 2 CFD results of efficiency and head

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Efficiency [%]	44.75	46.12	49.46	44.02
Head [m]	174.2	177.1	201.5	172.4

가장 높을 것으로 예상된다. 반면, Table 2에서는 펌프의 효율 및 수두 값이 Case 3인 경우에서 눈에 띄는 값을 확인할 수 있다. 전반적으로 비슷한 수치를 나타내고 있고 Case 3이 가장 높게 계산되어 유동성능이 가장 우수할 것이라고 예상된다.

Fig. 6은 Z축 방향에 대한 Cargo 펌프의 속도 분포를 보여준다. 그래프에서 -80 cm 지점에서 속도가 증가하는 부분은 인두서의 입구와 인접한 부분이고, 원점 근처의 위치에서는 임펠러 출구 부분으로 속도가 급격히 증가하는 것을 보여준다.

Case 1은 인두서 내에서의 속도가 점차적으로 증가하는 것을 보여주었고, Cases 2와 3은 인두서의 각을 5°, 10°로 변화시킨 것이다. 인두서 케이싱의 내경이 점차 줄어들어 면적이 축소됨으로써 속도가 증가하는 것에 반면, Case 4는 인두서의 각을 -5°를 주어 케이싱의 면적이 증가되어 점차적으로 속도가 감소되는

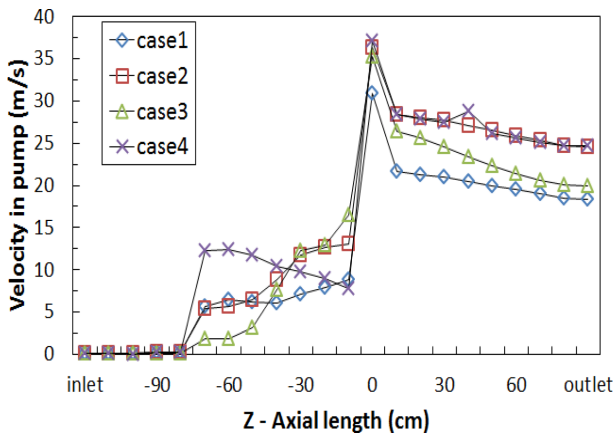


Fig. 6 Velocity LNG cargo pump on Z-axial length

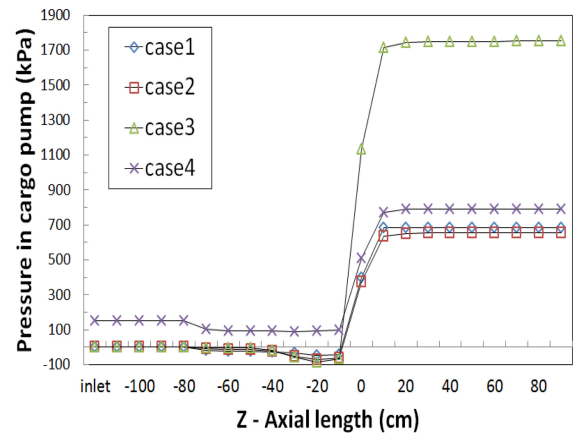


Fig. 8 Pressure in LNG cargo pump on Z-axial length

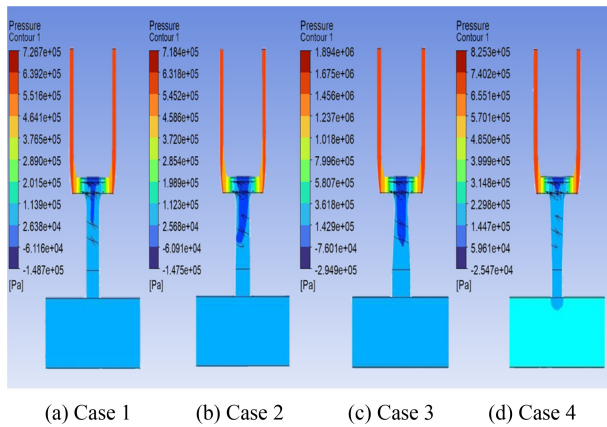


Fig. 7 Pressure distributions in cargo pump

것을 보이고 있다. -40~-10 cm에서 인두서 부분이며 Cases 2와 3은 비슷한 분포를 보여주고 있다. 이 두 가지 Case는 모두 인두서 내에서의 흡입 속도가 높을 것으로 예측된다.

3.2 압력 분포

Fig. 7에서는 펌프의 중심부의 단면의 유동 해석 결과를 보여주며, 펌프 내부의 압력 분포를 나타낸다. Cases 1-3을 보면 인두서의 각이 커지고 입구의 면적이 증가할수록 임펠러와 인두서의 중심부의 압력이 낮아지는 범위가 커지는 것을 볼 수 있다. 압력이 낮아지면서 흡입 속도는 증가하지만, 급격한 압력 강하로 인해 Cases 2와 3의 경우 캐비테이션 현상이 발생할 수 있을 것으로 예상되었다. 반면 Case 4는 압력이 낮은 범위가 상대적으로 좁은 것을 볼 수 있으며 인두서가 흡입하는 유량은 작지만 캐비테이션 현상이 적을 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 8은 Z축의 방향의 압력 분포를 보여준다. Cases 1-3은 인두서 부분은 비슷한 양상을 보여주며 다른 Case에 비해 Case 4는 높은 압력 분포가 발생하였다. 인두서 케이싱의 입구의 면적이 다른 Case보다 작기 때문에 압력이 높은 분포를 가진다.

-10 cm 부근에서 압력이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며,

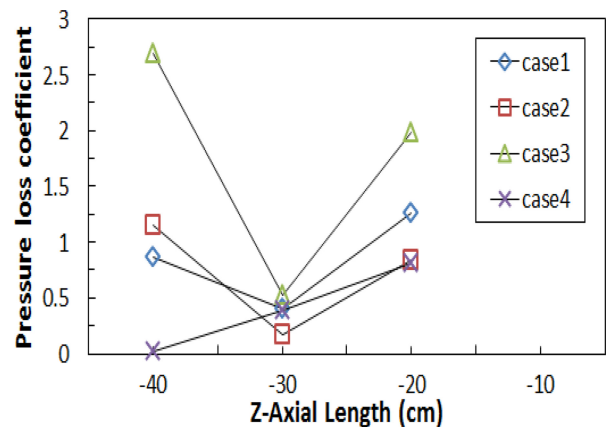


Fig. 9 Pressure loss coefficient on Z-axial length

Table 3 Average value of pressure loss coefficient for each case

Inducer design	$K_v$
Case 1	1.948
Case 2	1.407
Case 3	4.114
Case 4	1.268

이는 임펠러의 입구 영역에 해당하기 때문이다. Cases 1과 2는 비슷한 압력 분포를 가지고 Case 3은 다른 Case에 비해 높은 압력을 가지는 것을 볼 수 있다. Case 3은 입구의 면적이 크기 때문에 높은 압력이 발생한다는 것을 예측할 수 있다.

3.3 압력손실계수( $K_v$ )

압력 손실 계수는 펌프의 압력 손실과 캐비테이션 등을 파악할 수 있으며, Fig. 9의 인두서와 임펠러 부분에서 일정 간격 범위를 정해 압력강하와 평균 유속에 의한 압력 손실 계수를 나타낸 값이다. Cases 1과 2는 비슷한 양상을 나타내고, Case 3은 확연한 차이를 볼 수 있다. 반면에 Case 4는 압력손실계수가 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 3은 펌프 내부의 평균 유속으로 인듀서의 입구와 임펠러 출구의 압력 강하 값을 통해 계산한 압력 손실 계수 값이다. 각 Case들을 비교하였을 때 Case 3이 압력 손실이 가장 높게 나오는 것을 볼 수 있으며, Case 4의 압력 손실 계수를 수치적으로 비교하면 가장 낮은 수치를 볼 수 있어 Case 4는 다른 Case들에 비해 압력 손실 측면에서 더 우수한 높은 효율이 계산되었다.

4. 결론

본 연구에서는 선박용 LNG Cargo 펌프를 3차원으로 모델링하여 수치해석을 수행하였으며, 인듀서 각도 및 케이싱 입구 변화를 설계 변수로 펌프의 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 인듀서 각도와 반경을 케이싱 입구 형상을 결정짓는 설계 변수로 활용하였고, 수치적으로 펌프의 효율을 비교하였다. 이를 통해 설계 변수가 유동 안정성 및 효율 측면에 미치는 영향을 분석하여 향후 LNG Cargo 펌프 설계에 유의미한 데이터 제공이 가능할 것으로 사료된다.

- (1) 설계 변수에 따라 해석적으로 비교된 Cases에서 전반적으로 비슷한 속도 분포를 가지고 있는 것을 볼 수 있었다. 인듀서 부분에서 Case 4만 특징적으로 속도가 감소하였다. 이는 인듀서에서 급격한 압력강하가 적어 속도가 점차적으로 감소하는 것으로 사료된다.
- (2) Cargo 펌프 내부 단면의 유선과 속도 분포를 보면 입구 부분에 밀집된 유동 현상을 확인 가능하다. Case 4의 경우 입구 인근의 속도 값이 가장 높게 나타내고 있고 흡입되는 유속이 가장 높을 것으로 예상된다. 이때 높은 속도로 유입되는 유동을 고려하여 적절한 펌프 설계가 함께 이뤄져야 한다.
- (3) Case 3은 압력 증가가 가장 큰 양상을 보이고 있어 흡입량이 가장 많은 것으로 사료되지만, 임펠러와 인듀서 부분에서 압력 강하가 가장 크게 발생한다. 반면, Case 4는 압력 강하 부분이 적어 캐비테이션 현상이 적게 생기고 안정적으로 LNG를 흡입할 수 있는 것으로 예측된다. 따라서, Cargo 펌프의 활용 목적에 적절한 설계가 선택적으로 수행될 필요가 있다.
- (4) 압력 손실 계수를 계산하였을 때, Case 4는 Cases 1과 2보다 각각 34.9%와 10.9% 더 낮은 수치로 계산되었다. 이는 펌프에 의한 압력 손실 측면에서 Case 4가 Cases 1-3보다 더 우수한 유동 저항 성능을 나타냄을 알 수 있다. 따라서, 펌프 손실을 고려할 경우 효율적인 펌프로 고려될 수 있다.
- (5) 설계변수 범위 안에서 속도, 압력 및 압력 손실 계수를 비교하였을 때 Case 4가 캐비테이션 발생 가능성이 가장 낮은 안정적인 형상으로 수치적으로 확인할 수 있었다. 원활한 유동을 통해 압력 손실이 최소화되며, 펌프 내부 유동에 지배적인 성능 저하를 야기하는 캐비테이션 예방을 사전에 검토할 수 있는 형상으로 제시된다.

REFERENCES

1. Yoon, J. H., Jang, H. J., Park, S. D., Kim, D. S., (2013), The research about suction performance of LNG pump on the groove shape of suction casing, Proceedings of the KSME Spring Conference, 327-329.
2. Chu, S. H., (2013), An experimental study on effect of the tank bottom on performance and cavitation characteristics of a LNG cargo pump, M.Sc. Thesis, Seoul National University.
3. Yoon, H. G., Yoo, I. S., Park, M. R., Yoon, E. S., (2010), A Study of suction performance of inducer with different inlet shapes, Proceedings of the 6th National Conference on Fluid Engineering.
4. Ha, Y. S., Lee, Y. B., (2021), Research on eye and inter-stage sealing unit geometry for on-shore high pressure multiple-stage LNG pump using CFD, Proceedings of the KSFM Summer Conference, 275-276.
5. Jung, J. Y., Shin, H. C., Shin, M. S., Kim, S. M., (2021), Numerical study of single-phase and two-phase heat transfer characteristics in cryogenic ball bearing for LNG pump, Proceedings of the KSFM Winter Conference, 334-336.
6. Kwak, Y. G., Kim, S. H., Cho, Y. J., Chang, K. S., Baek, H. C., (2022), Numerical study of labyrinth seal geometry for minimum of leakage flow in LNG pump, The KSFM Journal of Fluid Machinery, 25(4), 30-38.
7. Heo, S. G., Park, J. H., Kim, J. H., Jeon, B. H., Kim, H. J., Kim, J. H., Hong, J. H., (2014), Numerical study for flow characteristics of piston pump of LNG fuel system in marine, Proceedings of the KSFM Autumn Conference, 135-136.
8. Kwal, W. I., Lee, Y. D., Lee, Y. B., (2021), A study on the rotor dynamics analysis of LNG (Liquefied natural gas) hpso pump support bearings according to the lubrication flow model, Proceedings of the KSFM Summer Conference, 277-278.
9. Jang, H. J., Suh, J. H., (2021), Analysis of leakage and rotor dynamic coefficient of labyrinth seal of LNG fuel pump, Proceedings of the KSFM Summer Conference, 171-173.



**Jihun Song**

Research Engineer in the Rotorcraft System Analysis team, Korea Aerospace Industries (KAI). His research interest is Aeroacoustics, Aerodynamics, and Optimization for Rotorcraft and Turbo Machinery.  
E-mail: [jihun.song@koreaaero.com](mailto:jihun.song@koreaaero.com)



**Dong-Ryul Lee**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Daegu Catholic University. His research interest is Heat Transfer, Fluid Engineering, Electric Vehicle, and Advanced Air Mobility.  
E-mail: [dlee@cu.ac.kr](mailto:dlee@cu.ac.kr)