



액화수소 고압 펌프 Rod 및 챔버 내부 유한요소해석

†김현세 · 함영복 · 박중호

한국기계연구원 탄소중립기계연구소

(2024년 1월 24일 접수, 2024년 4월 23일 수정, 2024년 5월 31일 채택)

Finite Element Analysis of Rod and Inside of Chamber of High Pressure Pump for Liquid Hydrogen

†Hyunse Kim · Young-Bog Ham · Jung-Ho Park

Research Institute of Carbon Neutral Energy Machinery,

Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 34103, Korea

(Received January 24, 2024; Revised April 23, 2024; Accepted May 31, 2024)

요약

최근 화석연료를 대체할 수 있는 수소에너지를 이용한 이동 수단에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 한편 이를 이용하기 위해서는 수소를 생산 저장 이송하는 과정이 필수적이다. 특히 수소를 90 MPa에 이르는 고압으로 저장 이송할 경우 기체 상태가 아닌 액체 상태이므로 부피가 감소하여, 상대적으로 비용을 절감 할 수 있다. 본 연구에서는 수소 액화에 필수적인 액화수소 펌프 개발을 위해 챔버 내의 유동을 유한요소해석 (Finite Element Methods (FEM)) 프로그램인 ANSYS를 이용하여 해석하였다. 그 결과, 1차 챔버에서 2차 챔버 사이에 밸브가 없는 경우, 2차 챔버 내의 최대 속도는 9.075 m/s, 밸브가 3 mm 열린 경우의 최대 속도는 8.111 m/s 로 10.6% 감소하였다. 또한 밸브가 없는 경우의 최대 압력은 0.62 MPa, 밸브가 3 mm 열린 경우의 최대 압력은 0.63 MPa 로 1.6% 증가하였다. 이 결과를 바탕으로 액화수소 펌프의 상세 설계에 활용할 경우, 좀 더 효율적인 펌프의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

Abstract - Recently, transportations using hydrogen energy is being researched for the alternative energy of fossil fuels. To use them, processes of producing, storing and transferring are required. When carrying them in liquid under 90 MPa pressure, it costs less than in a gas status. Thus, a hydrogen pump is necessary and in this research we predicted the flow in the chamber using finite element methods (FEM) program ANSYS. As a result, when the valve was opened by 3 mm, between the 1st chamber and the 2nd chamber, the maximum velocity was decreased to 8.111 m/s by 10.6% (without valve, 9.075 m/s). In addition, pressure was also increased to 0.63 MPa by 1.6% (without valve, 0.62 MPa). When using these results, more efficient processes would be possible in designing them in detail.

Key words : finite element methods (FEM), liquid hydrogen pump, flow, reciprocating, plunger

1. 서 론

화석연료의 사용으로 인해 대기 중에 이산화탄소 (CO₂)의 양이 늘어나게 되고, 지구온난화가 진행되고

있다. 이러한 온실가스를 저감하기 위한 여러 가지 방안 중에 환경오염이 없는 청정에너지 수소를 활용하기 위한 노력이 있다. 수소를 에너지원으로 사용할 경우, 부산물이 물이므로 자동차 등의 이송수단에서 나오는 배기가스를 줄여줄 수 있는 장점이 있다. 이러한 수소를 생산하는 방법으로는 수전해, 태양전지를 이용한 생산, 바이오매스 가스화 (biomass gasification)

†Corresponding author:hkim@kimm.re.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

등의 방법이 있다[1-3]. 특히 태양전지를 이용하는 하이브리드 방식은 태양광 패널, 양성자 교환막 (Proton Exchange Membrane, PEM) 연료전지, PEM 전지분해 장치와 수소 저장고 등으로 구성되어 있다. 태양전지에서 발생한 전기를 이용해 물을 수소와 산소로 분해하여 저장하게 된다[2]. 또한 바이오매스를 이용하는 방법은 우선 가스화를 위해 공기, 산소 및 스팀 등을 이용하여 합성가스 (Syngas)를 얻을 수 있다. 여기에는 수소, 이산화탄소, 메탄과 탄화수소 (Hydrocarbon) 등이 포함되어 수소를 만들게 된다[3].

한편 생산된 수소를 이동 및 공급을 할 때 현재는 기체 상태에서 이송을 하는 상황이다. 그러나 이러한 방식은 부피가 크기 때문에 이송 단가가 올라가는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 수소를 고압으로 압축한 상태로 이송을 하게 되면 부피가 줄어들어 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다[4]. 특히 수소 충전소에 고압의 수소를 저장 할 때 필요한 것이 액화수소 펌프 또는 압축기이다. 구동 방식으로 분류를 해 보면 왕복동 펌프 (Reciprocating Pump), 원심 펌프 (Centrifugal Pump), 다이어프램 압축기 (Diaphragm Compressor), 액체구동 방식 압축기 (Liquid-driven Compressor), 이온액체 방식 압축기 (Ionic Liquid Compressor) 등이 있다[1]. 이 액체 피스톤은 이온용액으로 가스와 고체 피스톤 사이를 채워 실링 (Sealing)과 윤활의 역할을 할 수 있다.

최근 Qiu 등은 왕복동 방식의 액화수소 펌프의 동적 과정을 수치해석한 결과를 발표하였다. 이 논문에서는 실린더 내의 캐비테이션 (Cavitation)을 피할 수 있는 펌프와 밸브의 설계변수를 구하였다[5]. Shao 등은 액화수소 펌프의 고압을 형성하기 위해 원심 펌프 (Centrifugal Pump)를 해석하고 성능을 평가하였다[6]. 그 결과 캐비테이션 (Cavitation)을 줄여 줄 수 있는 설계 변수들을 도출하였다. Seo 등은 수소연료전지 차량의 충전 과정에서, 충전소에서의 공급압력과 차량 내 저장 탱크의 압력 차이에 의해 일어나는 수소의 압력강하에 대한 분석을 수행한 결과를 발표하였다[7]. Nam 등은 수소충전소용 유량제어 밸브의 차압에 의한 유동특성을 수치해석적으로 연구한 결과를 발표하였다. 이를 통해 밸브의 차압과 열림량에 대한 유량, 온도변화 등을 이용하여 유량계수와 유량비를 예측하였다[8].

본 연구에서는 액화수소를 충전소에 저장할 때 필요한 고압 펌프를 개발하고자 하였다. 미국의 국제자동차기술자협회 (SAE International)의 규약에 따르면, 액화수소의 저장은 ~0.3 MPa, ~24.5 K, 그리고 수소 자동차에 70 MPa로 충전하기 위한 수소 스테이션에 들어가는 압축기는 ~90 MPa, ~233 K로 권장하고

있다[9]. 이 고압 펌프는 왕복동 방식 (Fig. 1)이며, 기존에 개발된 펌프와는 다른 구조를 가지고 있으며, 90

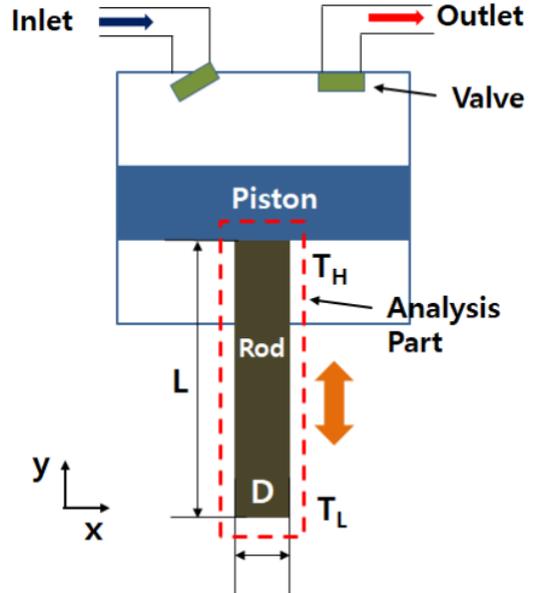


Fig. 1. Reciprocating pump.

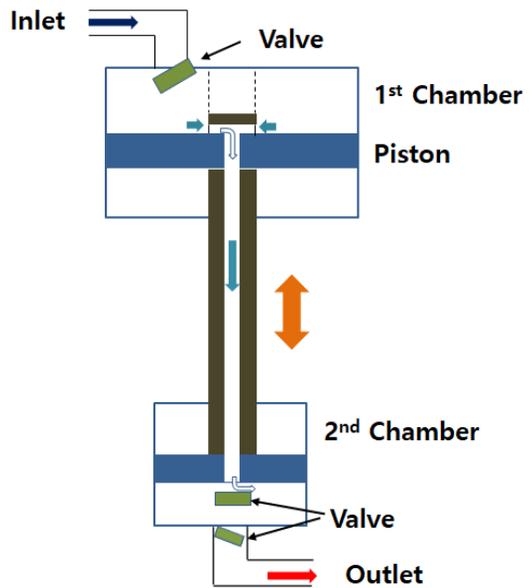


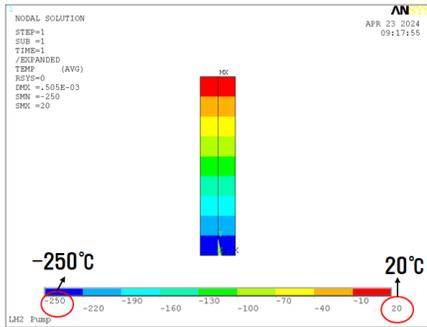
Fig. 2. Liquid hydrogen pump.

MPa로 압축할 수 있게 설계를 진행하였다. 이를 위해, 본 논문에서는 유한요소해석 (Finite Element Methods (FEM))을 이용한 액화수소 펌프 로드 (Rod)의 열 및 구조 설계를 수행한 결과를 설명하고자 한다. 이를 위해 II장에서는 극저온의 환경에서 작동하므로 열해석과, 고압의 힘을 이겨내야 하므로 구조해석을 수행하였다. 또한 III 장에서는 1차 챔버 (Chamber)와 2차 챔버 내부의 유동을 해석하고 결과를 토의하였다.

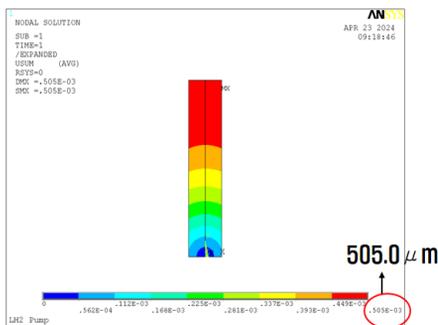
II. 로드 유한요소해석

2.1. 액화수소 펌프 구조

앞서 설명한 것처럼 본 연구에서 개발하고자 하는 펌프는 90 MPa에 이르는 고압으로 기체를 압축해야 한다. 그러므로 좀더 효율적인 방식이 필요하게 되며, 이를 위해 Fig. 2와 같이 두 단계로 압축하는 방식을 도입하게 되었다. 즉 두 개의 왕복동 펌프를 직렬로 연결하여, 1차 챔버에서 가압을 한 후 다시 2차로 원하는 압력까지 올려주는 구조로 개발할 예정이다. 즉 입구



(a)



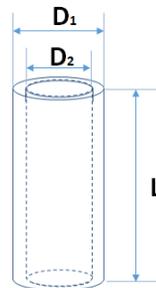
(b)

Fig. 3. Analysis results of (a) a temperature and (b) a displacement.

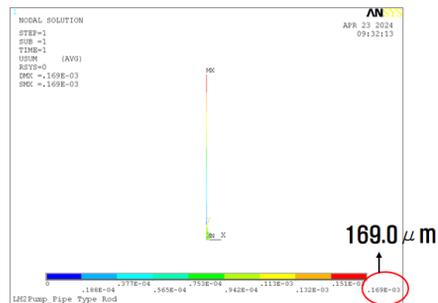
로부터 밸브를 지나 유입되는 수소가 1차 챔버에서 피스톤이 상향으로 이동하면서 압축 된다. 이후 피스톤이 최고점을 지나면서 아래쪽의 체크 밸브가 열리게 되며, 1차 압축된 수소가 2차 챔버로 이동하게 된다. 두 개의 챔버는 원통형상이고 피스톤이 로드엔 연결되어 동시에 상하 방향으로 움직이면서 작동하게 된다. 그 다음 공정은 중간에 있는 체크밸브가 닫히면서, 2차 압축이 일어나게 된다. 마지막으로 맨 아래쪽의 밸브가 열리면서 압축된 액화수소가 이동하는 과정으로 진행된다.

2.2. 로드의 열 및 구조 설계

수소를 액화하여, 낮은 온도로 만들어 주는 것이 중요하다. 우선 왕복동 펌프 로드의 열 및 구조 설계를 수행하였다. 한편, 펌프의 로드는 상온에서 저온까지 온도분포가 있는 경우 변형이 일어나게 되므로, 이를 예측하여 설계에 반영하는 것이 필요하다. 이를 위해 Ansys를 이용하여 열-구조 연성 해석을 수행하였다. 상부 20°C 하부 -250°C 일 때, 변형량을 예측하였다. 이는 펌프의 상부에는 상온의 수소가 계속 유입되고, 하부는 극저온의 액화수소가 만들어지는 상황을 가정



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Hollow rod analysis model and (b) the result.

Table 1. Material Properties of SUS 316L (at Room Temperature) [10]

E, Young's Modulus	193 GPa
σ_y , Yield Stress	205 MPa
Poisson Ratio	0.3

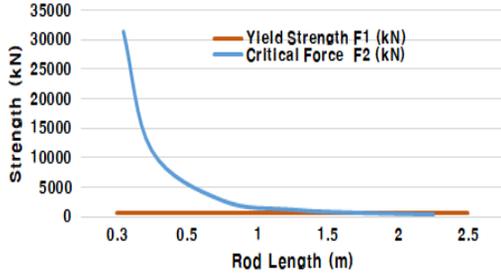


Fig. 5. Rod strength vs. the length ($L = 2.5$ m).

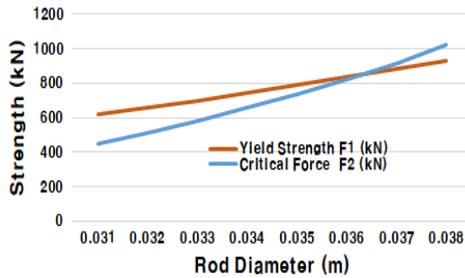


Fig. 6. Rod strength vs. the diameter ($D_0 = 32$ mm).

하여 해석하였다. 로드의 재료는 STS (Stainless Steel) 316L이고 탄성계수 $E=193$ GPa을 입력하였다[10]. 해석에 사용된 물성치가 Table 1에 나와 있다. 그리고 로드가 실축일 경우와 중공축일 경우의 변형량을 계산하여 비교하였다.

상부 20°C (T_h) 하부 -250°C (T_L) 일 때, 변형량을 예측한 결과 x 방향의 변형량 $d_x = 8.7 \mu\text{m}$, y 방향의 변형량 $d_y = 505.0 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. Fig. 3 (a)에 온도분포가 나와 있고, (b)에는 변위해석결과가 나와 있다.

다음으로 하중 307 kN을 가했을 때, 로드의 변형량을 예측하였다. 실축인 경우와 중공축 (Hollow Axis) 인 경우에 대하여 비교를 해 보았다. 해석에 필요한 중공축의 구조와 변수가 Fig 4(a)에 나와 있다. 실축 지름 $D = 60$ mm인 경우 축방향 변형량이 $169.0 \mu\text{m}$ 가 나왔

으며, 동일 단면적의 외경 $D_1 = 80$ mm, 내경 $D_2 = 53$ mm인 경우 역시 같은 값을 보여주었다 (Fig 4(b)). 본 펌프는 극저온의 환경에서 작동하는 만큼, 해석 조건 기준 y 방향 변형량이 온도에 3배 민감한 것으로 보인다. 또한 상온에서 제작한 피스톤의 x 방향 변형량도 수십 μm 로 발생할 것으로 예측된다. 실제 운전환경에서는 로드와 벽면에 틈(gap)이 생기고 이로 인해 누설이 발생하므로 이러한 현상을 설계에 반영하여야 한다.

그리고 액화수소 고압 펌프 로드의 인장강성과 좌굴강성을 해석적으로 계산하였다. 계산 조건은 지름 $D = 62$ mm이고 길이 L 은 0.3 m이었다. 그 결과 인장강성은 619 kN, 좌굴강성은 31.4 MN로 나왔다.

또한 길이와 직경을 변경해 가면서 고압 펌프 로드의 항복강도와 임계하중을 계산하였다. 이 계산에 사용된 식은 아래와 같다.

$$F_1 = \sigma_y A \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{cEI}{L^2} \quad (2)$$

여기서 F_1 은 항복강도 (Yield Strength), σ_y 는 항복응력 (205 MPa), A 는 단면적, F_2 는 임계하중 (Critical Force), c 는 상수 (이 경우 20.2), E 는 탄성계수, I 는 Inertia, L 은 길이 (0.3 m)이다[11].

액화수소 고압 펌프 로드의 길이 L 과 지름 D_0 에 따른 강성의 변화를 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다 ($D_0 = 32$ mm일 때). 그리고 로드의 길이 L 이 약 2.1 m 보다 길 경우 인장강성이 더 강한 것으로 나왔다. 로드의 직경 D_0 의 변화에 따른 강성의 변화는 Fig. 6과 같다 ($L = 2.5$ m일 때). 로드의 직경 D_0 가 약 0.0362 m 보다 큰 경우 좌굴강성이 더 강한 것으로 나왔다.

III. 챔버 내 유동 해석

챔버 내의 유동을 예측하기 위해 액화수소 고압 펌프 실린더 내의 해석을 수행하였다. 우선 밸브가 없고, 피스톤의 속도 $v = 0.423$ m/s, 위치는 최저점에서 50 mm 지점일 때를 예측하였다. Fig. 7에 해석 모델과 경계조건을 나타내었다. 구동 주파수 $f = 1.44$ Hz, 피스톤의 행정은 $L_i = 150$ mm이므로 $v = 2L_i \times f = 0.432$ (m/s)가 된다. 물성치로는 유체는 물로 가정하였고, 밀도 $\rho = 998$ kg/m³, 출구 압력은 6 bar로 설정하였다. FEM 해석 결과는 Fig. 8(a)와 같이 밸브가 없는 경우의 최대 속도는 9.075 m/s, 최대 압력은 Fig. 8(b)에서 처럼 0.62 MPa이 나왔다.

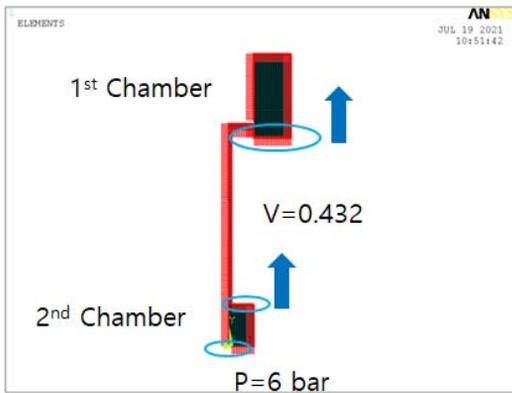


Fig. 7. Analysis model the chambers without a valve.

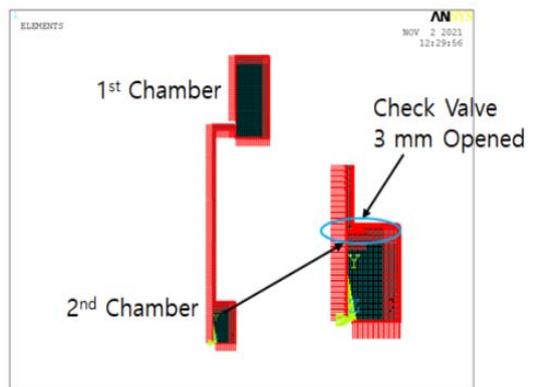
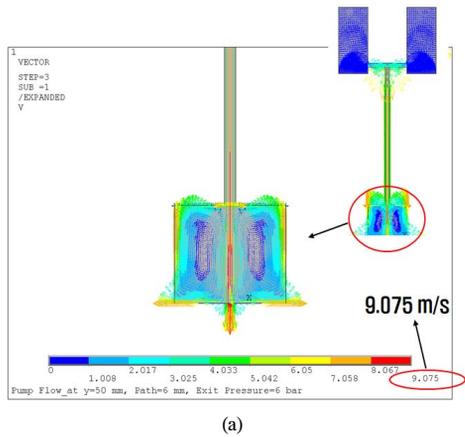
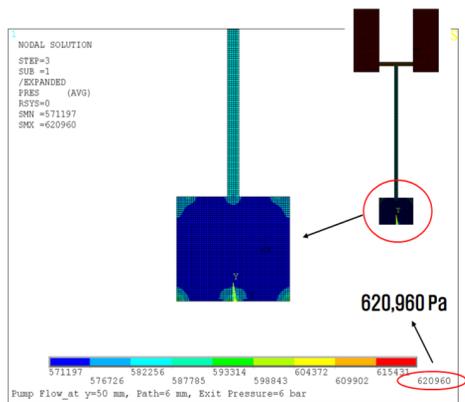


Fig. 9. Analysis model of the chambers with a valve.

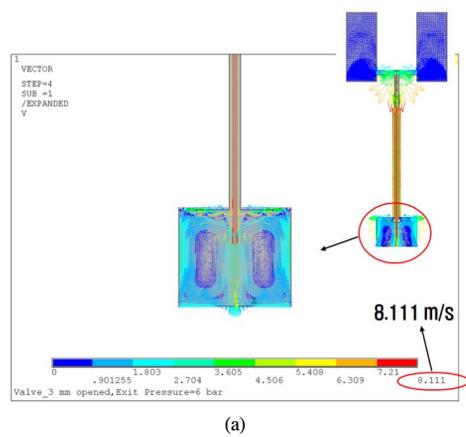


(a)

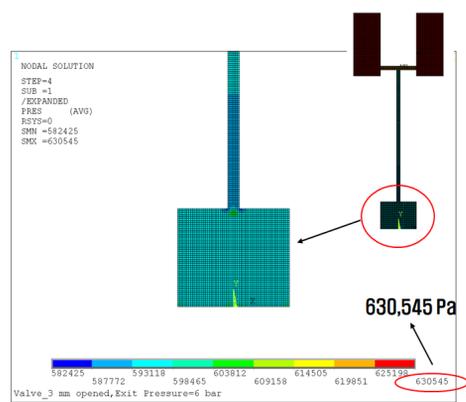


(b)

Fig. 8. Analysis results: (a) Flow velocity and (b) pressure.



(a)



(b)

Fig. 10. Analysis results: (a) Flow velocity and (b) pressure.

다음으로, 2차 챔버 내에 밸브가 있는 경우를 해석하였다. 밸브는 직경 20 mm × 두께 1 mm 인 얇은 디스크 모양으로 가정하였다. 해석 조건은 앞의 유동 해석 조건과 동일하게 수행하였다. Fig. 9에 해석 모델과 경계조건이 나와 있다. 밸브가 3 mm 열린 경우의 최대 속도는 Fig 10(a)와 같이 8.111 m/s, 최대 압력은 Fig. 10(b)와 같이 0.63 MPa 로 나왔다.

IV. 결론

본 연구에서는 액화수소 펌프의 설계를 위해 FEM 을 이용하여, 로드와 챔버 내의 유동을 해석하였다. 그 결과, 상부 20°C 하부 -250°C 일 때, 최대 $d_x = 8.7 \mu\text{m}$, $d_y = 505.0 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. 그리고 하중 307 kN을 가했을 때, 실축 $D = 60 \text{ mm}$ 인 경우, $169.0 \mu\text{m}$ 가 나왔으며, 열로 인한 변형량이 약 3배임을 알 수 있었다.

이번에는 유동해석을 수행하였으며, 밸브가 없는 경우의 최대 속도는 9.075 m/s, 밸브가 3 mm 열린 경우의 최대 속도는 8.111 m/s 로 10.6% 감소하였다. 또한 밸브가 없는 경우의 최대 압력은 0.62 MPa, 밸브가 3 mm 열린 경우의 최대 압력은 0.63 MPa 로 1.6% 증가하였다. 이는 밸브가 유로에 저항역할을 하여 최대 속도가 감소하였고, 반대로 상부의 최대 압력은 증가한 것을 의미한다. 향후 본 결과를 응용하여 밸브의 열림량에 따른 유량을 계산할 수 있고, 펌프의 용량을 정할 때 참고자료로 활용할 수 있다고 판단된다. 그러므로 본 결론을 이용하여 고압의 액화수소 펌프를 개발한다면, 좀 더 효율적으로 설계 제작이 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 산업통상부 한국에너지기술평가원 (KETEP) 에너지기술개발사업 (20203010040020, 액화수소 충전소용 100 kg/h, 90MPa급 극저온 왕복동 펌프 개발) 및 한국기계연구원의 기본사업 (NK249B)의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

[1] Jin, Y., Guo, Y., Zhang, J., and Peng, X., "Nume-

rical Study on Two-phase Flow and Heat Transfer Characteristics of the Ionic Liquid Compressor for Hydrogen Refuelling Stations," *Applied Thermal Engineering*, 99, 169-178, (2016)

[2] Ozden, E., and Tari, I., "Energy-exergy and Economic Analyses of a Hybrid Solar-Hydrogen Renewable Energy System in Ankara, Turkey," *Applied Thermal Engineering*, 99(25), 169-178, (2016)

[3] Safarian, S., Unnþórsson, R., and Richter, C., "A Review of Biomass Gasification Modelling," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 378-391, (2019)

[4] Petitpas, G., and Aceves, S. M., "Liquid Hydrogen Pump Performance and Durability Testing through Repeated Cryogenic Vessel Filling to 700 Bar," *Int. J. of Hydrogen Energy*, 43, 18403-18420, (2018)

[5] Qiu, G., Zhu, S., Wang, K., Wang, W., Hu, J., Hu, Y., Zhi, X., and Qiu, L., "Numerical Study on the Dynamic Process of Reciprocating Liquid Hydrogen Pumps for Hydrogen Refueling Stations," *Energy*, 281(15), 128303, (2023)

[6] Shao, X., and Zhao, W., "Liquid Hydrogen Centrifugal Pump Optimization based on Reducing Hydraulic Loss and Improving Cavitation," *Int. J. of Hydrogen Energy*, 49(B), 1419-1431, (2024)

[7] Seo, H. M., and Park, B. H., "Pressure Drop Analysis on Filling of Hydrogen Fuel Cell Vehicles," *KIGAS*, 27(1), 38-47, (2023)

[8] Nam, C.-W., Kim, R.-M., and Kim, H.-H., "A Numerical Study Of Flow Control Valve to Flow Characteristics by Pressure Difference for Hydrogen Station," *KIGAS*, 25(2), 28-33, (2021)

[9] Society of Automotive Engineers (SAE) International, Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles, J2601_202005

[10] William, D. C., and David, G. R., *Materials Science and Engineering*, Wiley & Sons, New York, (2011)

[11] Crandall, S. H., Dahl, N. C., and Lardner, T. J.. *An Introduction to Mechanics of Solids: (In SI Units)*, McGraw Hill, New York, (1978)