

액화수소 수송용 진공자켓 밸브의 진공도에 따른 열적특성에 대한 연구

오승준¹ · 전경숙¹ · 윤정환¹ · 최정주^{2,†}

¹동아대학교 고기능성밸브 기술지원센터, ²동아대학교 기계공학과

A Study on the Thermal Characteristics of the Vacuum Jacket Valve for Transporting Liquefied Hydrogen According to the Degree of Vacuum

SEUNG JUN OH¹, KYUNG SOOK JEON¹, JEONG HWAN YOON¹, JEONGJU CHOI^{2,†}

¹Technical Center for High-Performance Valves, Dong-A University, 37 Nakdong-daero, 550 beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, 37 Nakdong-daero, 550 beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea

†Corresponding author :
jchoi72@dau.ac.kr

Received 4 November, 2021
Revised 19 November, 2021
Accepted 25 November, 2021

Abstract >> Liquefied hydrogen have advantage which reduces the volume by about 800 times or more compared to hydrogen gas, so it is possible to increase the storage density. However, liquefied hydrogen produced by cryogenic cooling of 20 K or less at normal pressure has a problem of maximizing the insulation effect that blocks heat introduced from the outside. Representative insulation technologies include vacuum insulation and multi-layer insulation materials and in general, heat blocking is attempted by combining insulation technologies. Therefore, in this study, the pressure of the internal vacuum layer was changed to 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} and 10^{-4} Torr to confirm the thermal insulation performance of the vacuum jacket valve for transporting liquefied hydrogen. As a result, it was confirmed that the insulation performance improved as the degree of vacuum increased.

Key words : Hydrogen(수소), Vacuum(진공), Insulation(단열), CFD(전산유체역학), Rarefied gas(희박기체)

1. 서론

최근 세계는 지구온난화, 대기오염 등 심각한 환경문제로 위기를 맞고 있으며 이에 EU, 미국, 중국 등 강대국 중심으로 탄소 국경세 도입 및 자동차 배출가스 규제 상향 등을 추진하면서 강제성을 가진 탄소 중립을 추진 중이다. 그로 인해 온실가스 즉, 탄

소 배출을 줄이기 위한 수많은 연구가 진행되고 있다.

‘탄소제로’라는 최종 목표의 달성을 위해 기존의 화석연료를 대체할 신재생에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 한국 정부도 이러한 변화의 흐름에 맞춰 2020년 1월 ‘수소경제 시대’를 선언하였고 같은 해 7월에는 한국판 그린뉴딜 정책을 발표

하여 탄소 중립 추진 전략을 수립하고 기존 에너지 주공급원인 화석연료에서 안전하고 깨끗한 신재생에너지로의 에너지 전환 정책을 추진하고 있다¹⁾.

신재생에너지는 신에너지와 재생에너지의 합성어이다. 먼저 재생에너지는 자연에서 발생하는 에너지를 재생하여 인류가 사용이 가능한 에너지로 변환하는 것이며 태양광, 수력, 풍력발전 등이 있다. 이러한 재생에너지의 단점은 간헐성이다. 즉, 태양광은 에너지원인 태양에서 빛에너지를 전기에너지로 변환하는 발전 방식으로 인해 야간에는 발전이 어렵고 날씨의 영향을 받는다. 풍력은 바람이 일정하게 늘 불지 않는다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 대두되고 있는 신에너지가 바로 ‘수소’이다. 재생에너지 발전을 통해 사용 후, 남은 잉여 전기를 이용해 물을 수전해한 수소를 저장하여 에너지가 필요할 때 사용하는 것이다. 수소는 온실가스 배출이 없고 물, 유기물 등의 화합물로부터 제조할 수 있으며, 특정 지역에 매립되어 있는 화석연료와 비교하여 지역적 편중이 없다^{2,3)}.

수소 전기차는 전기차와 비교하여 에너지밀도가 높고 충전 시간이 적은 등의 장점이 있다⁴⁾. 하지만 긴 주행거리 확보를 위해 수소를 저장 용기에 고압으로 충전하여 사용하기 때문에 이에 대한 안전 확보가 중요하며 고압 저장 용기에 대해 많은 연구가 진행되고 있다^{5,6)}.

수소를 수송, 보관하기 위한 저장 기술로는 고압의 수소 기체 저장법, 극저온의 수소 액체 저장법, 수소 저장 합금 등 고체 저장법, 흡착물질에 의한 화학적 저장법 등의 기술이 연구되고 있다⁷⁾. 이러한 방법 중 액체 수소를 저장할 경우 기체 수소와 비교하여 약 800배 이상의 부피를 감소시킬 수 있어 가장 각광받는 기술로 여겨지고 있으나, 현시점에서 기체 수소를 액화하는 비용적 측면의 경제적 문제와 극저온(-253℃)의 액체 수소와 대기 온도와의 열전달을 차단하는 단열 효과를 극대화해야 하는 기술적 문제점이 있다⁸⁾. 대표적인 단열 기술로는 진공단열, 다층단열재 등이 있으며 일반적으로 단열 기술들을 복합하여 열 차단을 시도하고 있다. 진공자켓 밸브의 경우

일반적인 초저온 밸브와 비교하였을 때 스템부를 확장시켜 초저온 가스의 냉기가 패킹이나 핸들에 전달되는 것을 방지하는 경우와 동일하지만 특히, 진공자켓 밸브는 외부에서 밸브로 침투하는 열량을 억제하기 위한 진공층이 있다는 특징이 있다.

따라서 본 논문에서는 진공단열자켓 밸브의 진공도에 따른 단열 성능을 분석하기 위해 진공층의 압력을 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} Torr로 변환하여 각각의 조건에서의 진공단열 성능을 분석하였다.

2. 수치해석 및 이론

온도 구배에 따라 에너지 전달에 의해 열전도 현상이 일어난다. 에너지 전달은 기체 분자 간의 충돌에 의존하며 평균자유행정의 지배에 놓인다. 기체의 열전도는 평균자유행정에 따라 나뉘며 압력의 변동에 따라 차이가 있다⁹⁾.

2.1 압력이 높을 경우

$$q = -\kappa \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

여기서 κ 는 열전도도(thermal conductivity)이다. 기체의 열전도도는 아래 식과 같으며

$$\kappa = \frac{1}{3} m_g \lambda n v_{av} c_v \quad (2)$$

위 식 (2)에서 c_v 는 정적 비열이며, m_g 는 기체의 분자 질량이며 n 은 분자 밀도, λ 는 평균자유행로, v_{av} 는 입자의 평균속도이다.

2.2 압력이 낮을 경우(희박기체)

위의 식에서 열전도도는 압력과 독립적인 관계에 있는 것으로 나타난다. 따라서 압력이 낮은 조건에서 위에서 제시된 열전도 계수를 통해 계산하는 것은

적합하지 않다. 낮은 압력과 온도에서 적용할 수 있는 이론¹⁰⁾에 의해 유도되며, 희박기체 상태의 열전도 계수는 식 (3)로 표현 가능하다.

$$A = \frac{\alpha_{eff}}{2} \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right) \left(\frac{k}{2\pi m T} \right)^{\frac{1}{2}} = 18.189 \alpha_{eff} \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \frac{1}{(MT)^{0.5}} \quad (3)$$

여기서 γ 는 기체의 비열비, k 는 볼츠만(Boltzmann) 상수로 1.3807×10^{-23} 이다. α_{eff} 는 유효적용계수이다.

따라서 희박기체 상태에서 전도에 의한 열전달량은 아래 식 (4)으로 표현된다.

$$Q = AAP(T_1 - T_2) \quad (4)$$

여기서 A 는 희박기체의 열전도도이며, A 는 전열 면적, P 는 압력이다.

2.3 충돌빈도 수 및 평균자유행로

CFD는 연속체 가정에 의한 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 하여 유동 및 열적 특성을 수치적으로 계산하며 Fig. 1과 같이 Knudsen number에 따라 연속체 및 비연속체로 구분가능하다. 따라서 해당 진공도에 따른 Knudsen number를 확인하여 CFD 해석 가능 여부를 판단하였다. Knudsen number는 아래 식과 같다¹¹⁾.

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (5)$$

여기서 Kn 은 Knudsen number를 나타내고, λ 는 평균자유행로(mean free path), L 은 특성 길이를 나타낸다. 액화수소용 진공자켓 밸브에서 진공도 변화에 따른 단열 성능 확인을 위해 유속의 경우, 1 m/s로 고정하였고 진공도는 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} Torr로 총 4가지 진공도에 대해 해석을 진행하였다.

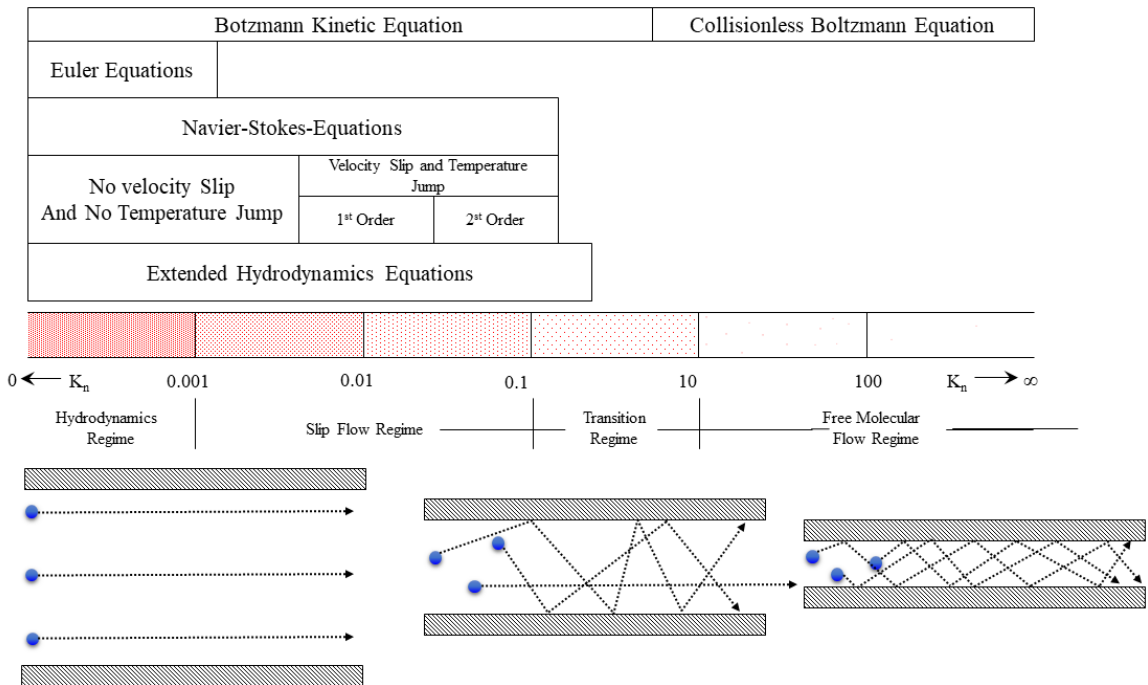


Fig. 1. Classification of flow regimes related to Knudsen number

진공자켓 밸브의 수치해석을 위해 solid, fluid, vacuum 3가지 영역으로 구분하여 해석을 진행하였으며 fluid 영역의 작동유체는 liquified hydrogen이다. 경계 조건으로는 입구 측에 동일하게 1 m/s로 설정하였으며 유입온도는 4 K으로 설정하였다. 난류 모델의 경우는 shear stress transfer (SST)모델을 적용하였으며 vacuum영역의 경우 laminar로 설정하였다. 그 외의 solid 영역은 열 교환이 가능하도록 설정하였고 외부면에 자연대류 계수(10 W/m²)를 적용하였다.

Fig. 2는 해석 모델인 진공자켓 밸브의 해석의 격자를 나타낸다. 그림과 같이 격자 형태는 fluent meshing의 polyhedral mesh를 사용하였으며 node의 수는 2,989,486개다. 또한 벽면에서 속도 분포 및 열 전달 특성을 정밀하게 모사하기 위해 prism격자를 생성하

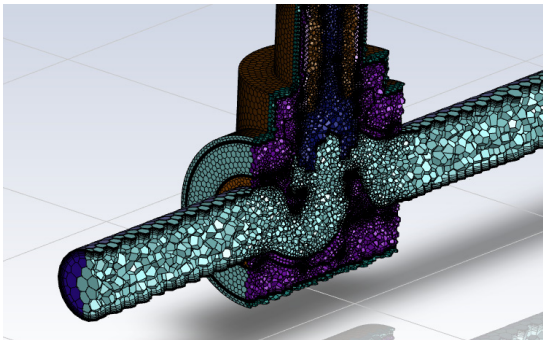
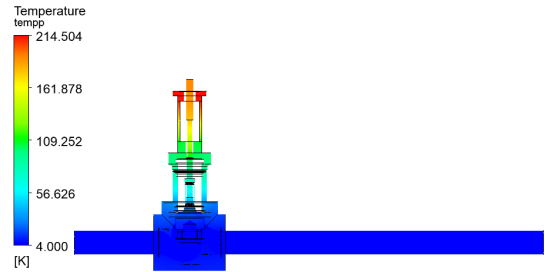


Fig. 2. Computational grid for numerical analysis

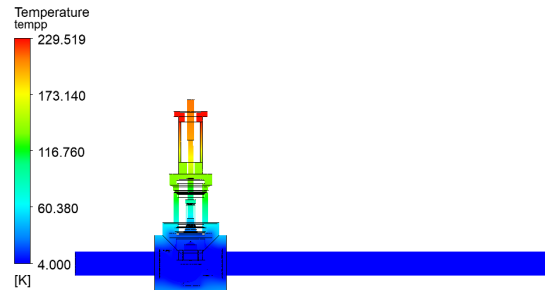
Table 1. Boundary, initial conditions and mesh information

Working fluid	Liquified hydrogen	
Boundary condition	Velocity (m/s)	Temperature (K)
	1	4
Initial condition	Hydrogen	Vacuum
	Temp: 4 (K)	Temp: 293.4 (K)
	Pre: 101,325 (Pa)	Pre: 10 ⁻¹ to 10 ⁻⁴ (torr)
Turbulence model	SST	Laminar
Mesh		
Nodes	2,989,486	
Elements	820,842	
Type	Polyhedra	

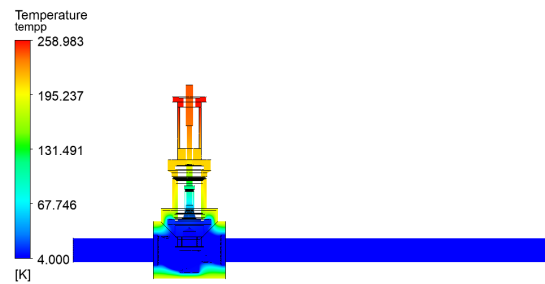
였다. 자세한 경계 조건 및 격자 정보는 Table 1에 나타내었다.



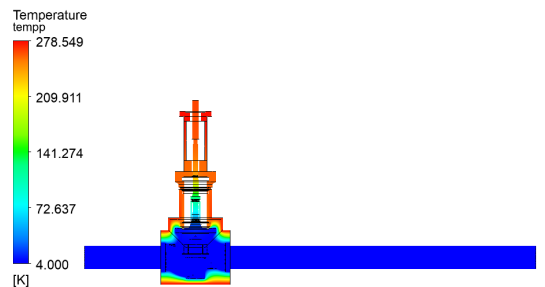
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. Temperature distribution on all region according to degree of vacuum. (a) 10⁻¹ Torr, (b) 10⁻² Torr, (c) 10⁻³ Torr, (d) 10⁻⁴ Torr

진공층의 두께는 약 40 mm이고 평균자유행로는 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} Torr 조건에서 각각 0.00048, 0.0048,

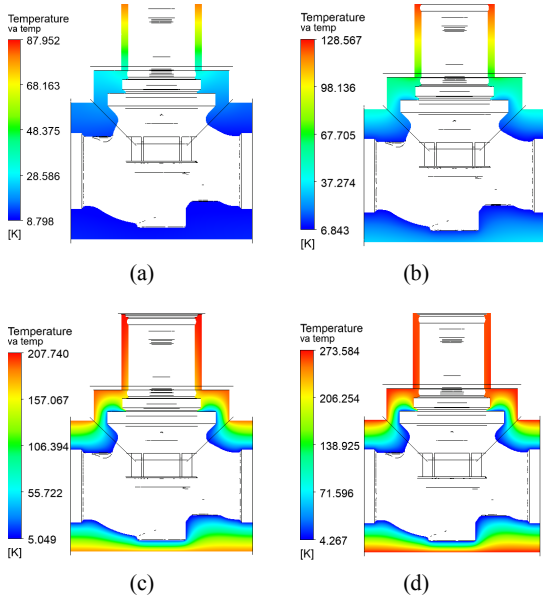


Fig. 4. Temperature distribution in vacuum layer in conditions of degree of vacuum. (a) 10^{-1} Torr, (b) 10^{-2} Torr, (c) 10^{-3} Torr, (d) 10^{-4} Torr

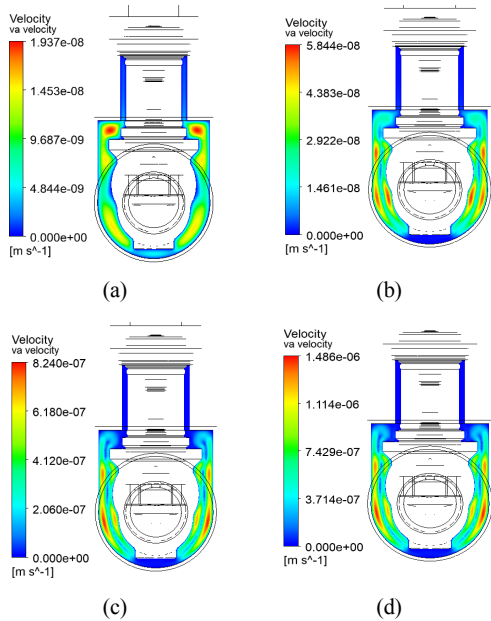


Fig. 5. Velocity field in vacuum layer. (a) 10^{-1} Torr, (b) 10^{-2} Torr, (c) 10^{-3} Torr, (d) 10^{-4} Torr

0.048, 0.478 m이며 Kn 수는 0.01195, 0.1195, 1.195, 11.95이다. 하지만 선행연구¹²⁾의 결과에서 $Kn \approx 1.0$ 에서 실험 결과와 비슷한 경향의 결과를 보고하였고 이러한 결과를 바탕으로 진공도에 따른 해석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

진공자켓 밸브의 진공도에 따른 열적특성 분석을 위해 수치해석을 진행하였고 결과 분석을 위해 온도 분포를 Fig. 3과 같이 나타내었다.

Fig. 3과 같이 진공자켓 밸브로 액화수소는 4 K으로 유지되며 1 m/s로 유입된다. 외기 온도는 20°C이며 대류열전달 계수는 10 W/m^2 이다. 전체 해석 영역에 대한 온도 분포와 같이 진공도가 낮을수록 열전

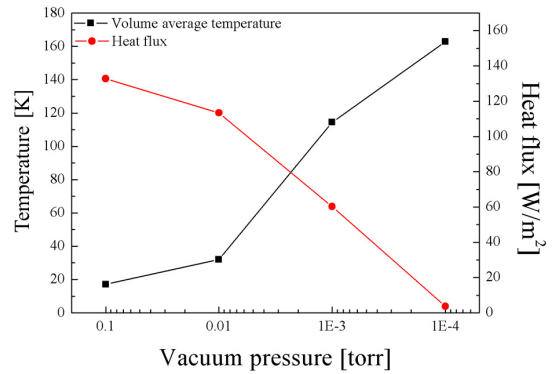


Fig. 6. Temperature and heat flux in vacuum layer

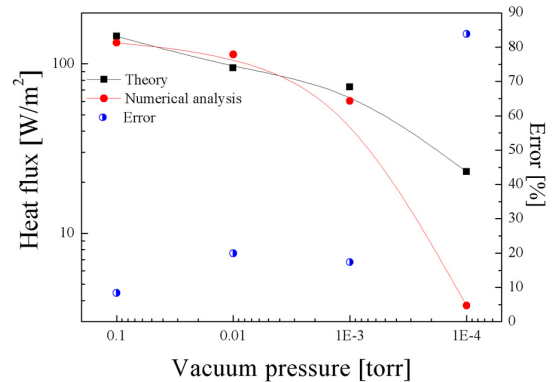


Fig. 7. Analysis of theoretical and numerical analysis data of heat flux

달이 상대적으로 높아 단열 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 진공도 증가에 따른 진공층의 열전달 감소에 따른 결과라 판단된다.

진공층의 열적특성을 분석하기 위해 Fig. 4와 같이 진공자켓 밸브의 진공층에 대한 온도 분포를 나타내었다. 진공도 10^{-1} Torr의 경우, 진공층 내부 온도 분포는 전체적으로 그 차이가 미미하며 균일하게 분포 하는 것을 확인할 수 있다. 10^{-2} Torr의 경우 10^{-1} Torr와 비교하여 상대적으로 온도 분포의 차이가 있으나 이 역시 열전달이 진행된 것을 볼 수 있다. 하지만 10^{-3} , 10^{-4} Torr의 경우, 진공층에서 열전달이 감소하며 외부의 온도가 침투하는 경향이 작아지며 특히 10^{-4} Torr의 경우는 이러한 경향이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 외부로부터 열 침투를 방지하기 위해서 최소 10^{-3} Torr 이상의 고진공을 유지할 필요가 있다고 판단된다. 진공도 증가에 따라 열 유입이 감소하고 진공도가 감소함에 따라 열 확산이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 진공층 내부 속도를 나타내며 그림과 같이 전체적으로 낮은 속도 분포를 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Lee 등¹²⁾의 연구에서 언급된 진공층에서 대류의 영향은 미미하다는 결과와 동일하며, 대류의 영향에 대한 열전달은 무시할 수 있음을 확인하였다.

Figs. 6, 7은 진공층에서 진공도에 따른 열 유속(heat flux)을 나타내며 그림과 같이 진공도 증가에 따라 열 유속이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 경향에 대해 식 (3)과 같이 이론적으로 구한 희박기체 열전도도를 적용하여 열 유속을 구하여 이를 비교하였다. 그래프와 같이 수치해석의 결과와 그 경향이 유사하며 Kn 수가 1보다 작거나 1에 근접한 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} 의 경우는 오차가 약 20%이며 Kn 수가 1보다 상대적으로 큰 10^{-4} 의 경우 오차가 80% 이상으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 연속체 가정이 유효한 Kn <1의 조건을 만족하지 못하므로 오차가 증가한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문은 액화수소 수송에 적용되는 진공자켓 밸브의 진공도에 따른 열적 특성에 대한 연구로 상용 프로그램을 적용하여 수치해석을 진행하였고 이론데이터와 이를 비교하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 진공도 증가에 따라 단열 성능이 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며 외부의 열 침투를 방지하기 위해서 최소 10^{-3} Torr 이하의 진공도를 유지하여야 한다.

2) 속도 분포를 통해 진공층의 열 교환에 있어 대류의 영향이 미미한 것을 확인하였다.

3) 희박기체 열전도도에 따른 열 유속과 수치해석으로 구한 열 유속의 차이를 통해 수치해석으로 진공층 열 교환 모사 시 주의가 필요하며 Kn <1 영역에서 유효함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 KAIA21TBIP-C158734-02).

References

1. Ministry of Economy and Finance, "2050 carbon neutral strategy of the republic of Korea", Ministry of Economy and Finance, 2020. Retrieved from <https://www.korea.kr/archive/expDocView.do?docId=39241>.
2. H. W. Lee, D. H. Oh, and Y. J. Seo, "Prediction of changes in filling time and temperature of hydrogen tank according to SOC of hydrogen", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 31, No. 4, 2020, pp. 345-350, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.4.345>.
3. B. H. Park, "Simulation of temperature behavior in hydrogen tank during refueling 661 using cubic equations of state", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 30, No. 5, 2019, pp. 385-394, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.5.385>.
4. G. Cipriani, V. Di Dio, F. Genduso, D. La Cascia, R. Liga, R. Miceli, and G. R. Galluzzo, "Perspective on hydrogen energy carrier and its automotive applications", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 39, No. 16, 2014, pp. 8482-8494, doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.174>.
5. R. Ortiz Cebolla, B. Acosta, N. de Miguel, and P. Moretto, "Effect of precooled inlet gas 664 temperature and mass flow rate on final state of charge during hydrogen vehicle refueling", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 40, 2015, pp. 4698-4706, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.035>.
 6. L. Zhao, F. Li, Z. Li, L. Zhang, G. He, Q. Zhao, J. Yuan, J. Di, and C. Zhou, "Thermodynamic analysis of the emptying process of compressed hydrogen tanks", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 7, 2019, pp. 3993-4005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.091>.
 7. R. Krishna, E. Titus, M. Salimian, O. Okhay, S. Rajendran, A. Rajkumar, J.M.G. Sousa, A.L.C. Ferreira, J. C. Gil, and J. Gracio, "Hydrogen storage for energy application", *INTECH*, 2012, pp. 243-266, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/51238>.
 8. Q. Hou, X. Yang, and J. Zhang, "Review on hydrogen storage performance of MgH₂: Development and trends", *Chemistry Select*, Vol. 6, No. 7, 2021, pp. 1589-1606, doi: <https://doi.org/10.1002/slct.202004476>.
 9. S. H. Bae, S. L. In, K. H. Jeong, Y. B. Lee, and Y. H. Sin, "Vacuum engineering", *The Korea Economic Daily*, Korea, 2000.
 10. M. Knudsen and Ann. D. Physik, "The laws of molecular flow and the internal frictional flow of gases through pipes", *adp*, Vol. 28, 1909, pp. 75, doi: <https://doi.org/10.1002/andp.19093330505>.
 11. E. H. Kennard, "The kinetic theory of gases: the kinetic theory of gases. by leonard loeb. xi + 687 pages. Published by the McGraw-Hill Book Company, Inc., New York City", *Science*, Vol. 80, No. 2079, 1939, pp. 406-407, doi: <https://doi.org/10.1126/science.80.2079.406>.
 12. J. H. Lee, J. H. Yoon, and S. P. Kim, "Statistical experimental study for verifying thermal characteristics of insulated double pipe", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 32, 2018, pp. 2317-2325, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0443-y>.