Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 664~671
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.664

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

시험을 소형 수소연료전지 추진선박용 열교환기 성능해석 모델의 신뢰성 평가

이현우† · 정길주 · 한기훈

현대종합금속 기계사업본부

Reliability Assessment of Performance Analysis Model for Heat Exchanger of Hydrogen Fuel Cell-Powered Vessel through Test

HYUNWOO LEE†, GILJU JEONG, KIHOON HAN

Machinery Division, HYUNDAI Welding, 641 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44547, Korea

†Corresponding author :
hwlee@hyundaiwelding.com

Received 16 September, 2025
Revised 4 November, 2025
Accepted 12 November, 2025

Abstract >> This study aims to design and fabricate a plate heat exchanger for a hydrogen fuel cell-powered vessel, considering spatial constraints within the ship. To design the heat exchanger, a performance analysis model was developed and validated through test. The comparison between simulation and experimental results yielded a relative error of 6.98%, demonstrating the model's reliability at the design flow rate of 22 m^3/hr. However, at flow rates below 50% of the design condition, the model exhibited reduced accuracy. These findings suggest that further refinement of the performance analysis model is required to ensure reliability across a wider range of operating conditions.

Key words : Carbon neutrality(탄소중립), Ship(선박), Fuel cell(연료전지), Hydrogen (수소), Heat exchanger(열교환기), Performance analysis(성능해석)

1. 서 론

지구 온난화와 이상 기후 현상 등 환경 문제가 심화됨에 따라, 전 세계적으로 탄소 배출 저감에 대한 관심과 필요성이 급격히 증가하고 있다. 특히 탄소중립(Carbon Neutrality)은 인간 활동으로 발생하는 온실가스 배출을 최소화하고, 불가피하게 발생하는 잔여 온실가스를 흡수·저장함으로써 실질적인 배출량을 '0'으로 만드는 개념으로, 기후변화 대응을 위한 핵심 전략으로 주목받고 있다. 이러한 흐름에 맞추어 주요 국가들은 탄소중립 목표 달성을 위한 정책을 적극 추진하고 있으며, 국내에서도 2050 탄소중립 로드맵을 수립하여 다양한 정책과 제도를 이행하고 있다[1]. 또한, 탄소중립 정책의 효과와 한계에 대한 학술적 분석이 활발히 진행되면서 향후 정책 방향에 대한 논의 역시 확대되고 있다[2-4].

탄소 배출 저감을 실현하기 위한 대표적인 분야 중 하나는 모빌리티의 친환경 전환이다. 현재 전기차 및

수소전기차 보급 확대, 노후 경유차의 친환경 전환 사업 등이 추진되고 있으며, 동시에 고효율 배터리 및 연료전지 개발을 위한 연구개발도 활발히 이루어지고 있다[5-7]. 이 중 연료전지는 수소를 연료로 하여 대기 중 산소와 전기화학적 반응을 통해 전기를 생산하는 장치로, 이산화탄소 배출을 최소화할 수 있어 탄소중립 달성에 기여할 수 있는 핵심 기술로 평가된다.

연료전지는 작동 온도, 전해질, 촉매의 특성에 따라 고온형과 저온형으로 구분된다. 고온형에는 용융탄산염연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)와 고체산화물연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)가 있으며, 저온형에는 인산형연료전지(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC), 알칼리연료전지(Alkaline Fuel Cell, AFC), 고분자전해질형연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC), 직접메탄올연료전지(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)가 있다. 각 연료전지는 작동 조건과 성능 특성이 상이하기 때문에 적용 분야와 설치 환경에 따라 적합한 종류가 선택된다. 기본적으로 연료전지는 공기극(양극, Cathode), 연료극(음극, Anode), 전해질(Electrolyte)로 구성되며, 시스템은 스택(Stack)과 Balance of Plant (BOP)으로 이루어진다. BOP는 스택을 제외한 모든 보조 장치를 포함하며, 수소 공급, 공기 공급, 열 제어 등 연료전지의 안정적 작동을 위한 필수 기능을 담당한다.

연료전지의 대표적인 상용화 사례는 수소전기차로, 현재 PEMFC가 적용된 차량이 양산 및 보급되고 있다. 최근에는 자동차 산업을 넘어 선박 분야에서의 연료전지 적용에 대한 연구와 관심이 증가하고 있으며, 실제 운항 사례 역시 점차 확대되고 있다[8-16]. 이는 친환경 선박 수요 확대와 더불어 해양 부문에서의 탄소중립 달성에 있어 연료전지의 가능성을 보여주는 중요한 사례라 할 수 있다.

연료전지를 운송수단에 적용하였을 때, 내연기관 차량과 비교해 열효율이 우수하지만, 배기 손실이 적기 때문에, 냉각손실이 매우 크다. 게다가 일반적으로 연료전지의 허용 수온은 내연기관과 비교해 낮게 설정되기 때문에, 라디에이터의 냉각수 입구온도와 공기측 입구온도의 온도차를 크게 할 수 없다. 이러한 이유에 의해, 연료전지차량에 탑재되는 라디에이터는 내연기관 차량에 비해 2배 이상의 방열량이 요구된다[17]. 이러한 조건에서 운송수단에 적용되는 PEMFC의 열 관리 효율을 향상시키기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다[18-22]. Kim 등[23]은 DC 열교환기에 대하여 3차원 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)분석을 통하여 물리적 형상에 대한 parametric study를 진행하여 최적의 열교환 성능 변화 조건에서 DC 열교환기의 시험 모델을 제작하였으며 Park 등[24]은 연료전지 채널 입구의 요구 습도를 역으로 예측하고 이에 부합하도록 구성요소 부품들의 운전조건을 탐색하는 새로운 알고리즘을 제시하였다. 그 결과 내부 전달 현상 구현 가능 수학적 모델 개발을 통하여 열역학적 접근의 연료전지 시스템 환경 구축을 하였다.

본 연구에서는 소형수소연료전지 추진 선박용 열교환기의 제작을 위하여 선박 내부 공간을 고려한 판형 열교환기를 설계하였으며 성능 해석 및 시험을 통하여 성능해석 모델의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

2. 성능 해석

2.1 전열 성능 해석

연료전지용 판형 열교환기에서 열교환은 대류와 전도에 의한 열전달 메커니즘을 가지며 대류에 의한 열전달 메커니즘은 고체 표면과 유체 사이의 온도차이에 의해 유도되는 고체 표면과 이동 유체 사이의 에너지 전달이다. 대류에 의한 열전달은 실제로 전도와 유체 운동의 조합이며 이는 뉴턴의 냉각 법칙을 적용할 수 있어 식 (1)을 사용하였다.

$$Q = h_h A(T_h - T_{wh}) = h_c A(T_{wc} - T_c) \tag{1}$$

여기서, Q는 대류에 의한 전열량 [W or kcal/h] A는 열전달 표면적[m^2], h_h는 고온 측 대류 열전달계수 [$W/m^2°C$ or $kcal/(m^2h°C)$], h_c는 저온 측 대류 열전달계수 [W/m2°C or kcal/(m2h°C)], T_{wh}는 고온 측 표면

온도 [℃], T_{wc}는 저온 측 표면온도 [℃], T_h는 고온 유체 온도 [℃], 그리고 T_c는 저온 유체 온도 [℃]이다.

주어진 흐름과 표면 기하학의 경우 시험 데이터는 일반적으로 표면 및 유체 온도를 측정하여 열전달계수를 식 (1)에서 계산할 수 있다. 그러나 이 방법론의 주요 어려움은 표면 온도 측정에 있다. 표면 온도는 지점마다 다르고 흐름 프로파일은 온도 센서의 존재에 따라 변경될 수 있고 열교환기의 경우 열전달 표면에 접근할 수 없는 경우가 대부분이기 때문에 한계가 있다. 표면 온도를 직접 측정하지 않고, 그 결과 해당 온도를 측정하는 동안 유체 흐름과 열전달이 방해받지 않는 윌슨 플롯 방법을 적용하여 열전달계수를 추정하는데 사용하였다[25-27].

본 시험에서는 저온 측을 동일한 유량조건으로 고정하고 고온측의 유량을 가변하여 열전달 계수를 냉각수 속도의 함수 즉, Re 수로 평가하고자 한다.

판형 열교환기의 열전달 과정의 전체 저항은 식 (2)와 같이 저온측 대류 저항($1/h_c$), 튜브 벽면 저항(t/k_w) 및 고온측 대류저항($1/h_h$)의 세 가지 열 저항의 합으로 표현할 수 있다. 운전초기는 청정조건으로 파울링 저항은 무시한다.

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{h_c}+\frac{t}{k_w}+\frac{1}{h_h} \tag{2}$$

여기서, U는 총괄 열전달 계수 [W/(m^2℃)], t는 벽면 두께 [m], k_w는 벽면의 열전도도 [W/(m℃) or kcal/(mh℃)]이다.

단상 열교환기에서 열전달은 일반적으로 다음 식과 같이 표현된다[28].

$$Nu = CRe^n \mathrm{Pr}^{0.33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.17} \tag{3}$$

여기서, Nu는 Nusselt 수, C, n은 경험 상수, Re는 Reynolds 수, Pr은 Prandtl 수, μ는 점도 [kg/(m・s)], μ_w는 벽면온도 기준 점도 [kg/(m・s)]이다.

상기 식 (2)에 (3)으로부터 고온 측의 전열저항을 수식으로 치환하면,

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{h_c}+\frac{t}{k_w}+\frac{1}{C}\frac{1}{\frac{k_h}{D_e}Re^n \mathrm{Pr}^{0.33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.17}} \tag{4}$$

상기 식으로부터 Y = a・X 형태의 선형 함수로 표현할 수 있다.

$$Y=\frac{A\Delta T_{lm}}{Q_m}-\frac{1}{h_c}-\frac{t}{k_w} \tag{5}$$

$$a=\frac{1}{C} \tag{6}$$

$$X=\frac{1}{\frac{k_h}{D_e}Re^n \mathrm{Pr}^{0.33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.17}} \tag{7}$$

여기서, ΔT_{lm}은 대수 평균 온도차 [℃], A는 총 열전달 표면적 [m_2], 그리고 k_h는 열전도도 [W/(m℃)]이다.

초기 값(n_0)을 기준으로 계산하면 상수 C_0값을 구할 수 있으며 마찬가지로 계산된 초기값 C_0를 기준으로 계산된 h_h값으로부터 수정된 저온 측 열전달계수(h_c')를 계산하고 수정된 저온 측 Nusselt 수로부터 식 (3)에 따라 새로운 상수 n'값을 계산한다. 저온측/고온측에 상기 과정을 반복하여 다음 Error (ε_c, ε_n)가 최소가 되는 값으로 한다.

$$\left|\frac{C_i-C_{(i-1)}}{C_i}\right| \le \epsilon_c \tag{8}$$

$$\left|\frac{n_i-n_{i-1}}{n_i}\right| \le \epsilon_n \tag{9}$$

$$j_{Nu}=\left[\frac{Nu}{\mathrm{Pr}^{0.33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.17}}\right] \tag{10}$$

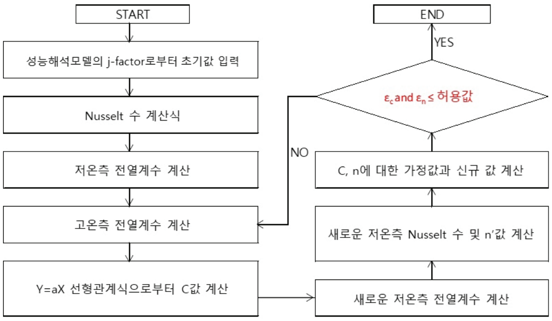

Fig. 1. Determination of nusselt number of plate heat exchanger Block Diagram

제안된 방법의 특징은 열교환기 양측의 형상이 동일한 구조를 가지는 판형 열교환기에서 차가운 유체와 뜨거운 유체의 nusselt 수에 대한 상관관계를 결정할 수 있으며 이를 통해 모든 작동 조건에서의 j-factor 및 총괄 열전달 계수를 결정할 수 있다.

차가운 유체 및 뜨거운 유체의 nusselt 수를 결정하는 과정은 Fig. 1과 같다.

3. 성능시험

3.1 시험 설비 구성 및 시험 조건

시험은 전열량(225kW) 및 압력손실(25kPa 이하, 연료전지 냉각매체 측) 성능조건을 충족하는 17매로 구성된 판형 열교환기를 기준으로 성능시험을 수행하였다. 시험에 사용된 열교환기는 소형 수소연료전지 선박의 공간적 제약을 고려하여 설계되었다. Fig. 2에 성능시험용 판형 열교환기 대표 형상을 나타내었다. 성능시험설비는 판형 열교환기의 열전달 및 압력손실을 포함한 열역학적 성능 검증을 위해 Fig. 3과 같이 온도(T_{h1}, T_{h2}, T_{c1}, T_{c2}), 압력(P_{h1}, P_{h2}, P_{c1}, P_{c2}) 및 유량(m_1, m_2)을 측정할 수 있는 PLC 시스템과 탱크(냉수 및 온수 공급용), 펌프, 밸브, 배관, 스팀보일러, 냉각탑(C/T) 등으로 구성되어 있다. 그리고 성능시험 설비는 단상 열교환기의 시험규격인 AMSE PTC (Performance Test Code) 12.5-2000의 요건을 충족하도록 구성하였다[29].

Fig. 2. Shape of plate heat exchanger for test

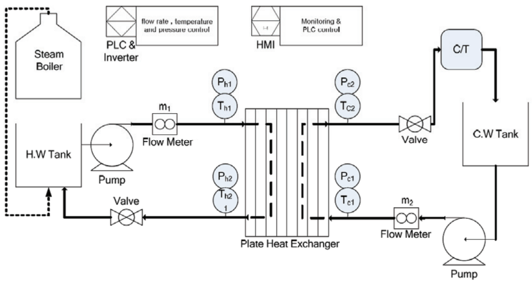

Fig. 3. Schematic diagram of plate heat exchanger performance testing facility

Fig. 4. Test setup of the heat exchanger

연료전지에서는 부하에 따라 고온측(Ethylene glycol 50%) 유량이 가변되어 부하를 제어하는 구조로 구성되어 있으며, 설계조건에서 각 유체의 입구온도차(T_{hi} -T_{ci})는 38°C이다. 이에 따라 성능시험에서는 고온 및 저온측 모두 물을 냉각매체로 사용하고 저온측 입구 온도는 외기에 의존하므로 고온 입구측 설정온도(T_{hi})를 53°C, 저온 입구측의 설정온도(T_{ci})를 15°C로 선정하였다. 또한, 유량변화 특성에 따른 열전달 성능을 확인하기 위해 연료전지에서의 운전과 동일한 방법으로 저온측의 유량을 고정하고 고온측의 유량을 4가지(설계유량의 100%, 75%, 50%, 25%)

Table 1. Initial conditions of test

CASE	Flow rate (m^3/h)		Temperature (℃)	
	Hot	Cold	$Inlet_{hot}$	$Inlet_{cold}$
1	22.0	25.15	53.0	15.0
2	16.5			
3	11			
4	5.5			

경우에 대하여 수행되었다. 판형 열교환기의 성능시험 전경 및 시험 조건은 Fig. 4 및 Table 1과 같다. 시험은 각 경우에 대하여 유량 및 온도 조건이 안정화되도록 조절하여 각 시험 조건에 대해 약 10분 동안 기록하며 기록되는 변수는 고온 & 저온 측 유체에 대한 변수(유량, 입/출구 온도, 입/출구압력)들이다. 그 결과로부터 열교환기에서 총괄 열전달계수(U)를 결정하기 위해 다음 식에 따라 계산할 수 있다.

$$Q = UA\Delta T_{lm} \tag{11}$$

열교환기에서 주변으로 열 손실이 없는 경우 고온 유체의 열교환량(Q_h)과 저온 유체의 열교환량(Q_c)은 $Q_h = Q_c$이다. 실제로 열교환기에 단열재를 사용하더라도 열 손실이 발생하고 열 유량 값 Q_h가 값 Q_c보다 높다. 이 경우 장치에서 뜨거운 유체에서 차가운 유체로 전달되는 열량의 평균(Q_m) 값은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$Q_m = \frac{Q_h + Q_c}{2} \tag{12}$$

평균 열 유량, 열전달 표면적 및 평균 대수 온도 차이를 기반으로 열교환기의 총괄 열전달계수 U는 식 (11)로부터 얻을 수 있다.

$$U = \frac{Q_m}{\Delta T_{lm} A} \tag{13}$$

3.2 성능해석 및 시험 결과 비교

Table 2는 시험결과로부터 평균 data를 추출한 결과이며 Table 3은 성능 해석 모델을 이용한 열교환기성능 예측 결과이다. 시험과 성능 해석을 통하여 고온측 입구 유량(w_h)이 감소할수록 고온측 출구부의 온도(T_{ho}) 감소 폭이 줄어들고 저온측 출구부의 온도(T_{co}) 증가 폭 역시 줄어들면서 열교환량이 감소

Table 2. Results of test

Case	w_h [m^3/hr]	T_{hi} [℃]	T_{ho} [℃]	w_c [m^3/hr]	T_{ci} [℃]	T_{co} [℃]	Q_m [W]	A [m^2]	U [kcal/m^2h℃]
1	22.06	52.95	38.08	25.04	15.20	27.83	372	3.255	4,096
2	16.44	52.93	35.59	25.10	15.19	26.21	324	3.255	3,658
3	11.00	53.09	31.90	25.08	15.19	23.95	262	3.255	3,092
4	5.51	53.07	25.76	25.12	15.10	20.42	164	3.255	2,209

Table 3. Results of analysis

Case	w_h [m^3/hr]	T_{hi} [℃]	T_{ho} [℃]	w_c [m^3/hr]	T_{ci} [℃]	T_{co} [℃]	Q_m [W]	A [m^2]	U [kcal/m^2h℃]
1	22.0	53.0	37.55	25.15	15.0	28.45	390	3.255	4,382
2	16.5	53.0	34.93	25.15	15.0	26.86	344	3.255	3,964
3	11.0	53.0	31.12	25.15	15.0	24.55	277	3.255	3,373
4	5.5	53.0	25.13	25.15	15.0	21.10	177	3.255	2,463

Table 4. Relative error results for performance analysis model validation

	U [kcal/m^{2}h°C]		
Case	Test	Analysis	Relative error, %
1	4,096	4,382	6.98
2	3,658	3,964	8.37
3	3,092	3,373	9.09
4	2,209	2,463	11.50

함을 확인할 수 있었다. 열교환량의 감소는 열전달계수의 감소로 이어짐을 식 (13)을 통해 확인할 수 있다.

시험 결과와 성능해석 결과의 비교를 통하여 성능해석 모델의 신뢰성을 확보하고자 하였으며 Table 4에 비교 결과를 나타내었다. 비교 결과, 설계 유량 케이스인 Case1에서 상대오차 6.98%로 성능 해석 모델을 통한 열교환기의 성능 예측이 가능함을 확인하였다. 하지만 설계 유량의 50% 이하 유량 조건(Case3,4)에서는 9% 이상의 오차를 보여 신뢰도가 부족한 결과를 보였다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 소형수소연료전지 추진선박 열교환기의 상세설계 모델을 제작하여 성능시험을 진행하였다. 그 결과, 시제품 모델의 적합 여부를 판정하고 소형수소연료전지 선박용 판형 열교환기 모델을 확정하였다. 또한 성능시험 Data로부터 성능해석 모델을 수정하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 상세설계 모델의 적합성 여부를 평가하기 위해 성능시험의 설계유량 조건(CASE 1)에서 성능해석 모델로 예측한 결과와 성능시험 결과를 비교한 결과 전열량의 경우 95.4%로 측정되어 적합 판정기준인 전열량 90% 이상을 충족하였다.
2) 시험과 성능해석 결과 비교에서 상대오차 6.98%의 결과를 얻어 설계 유량 조건에 대한 성능해석 모델의 신뢰성을 확인하였다.
3) 하지만 설계유량의 50% 이하의 유량 조건에서는 성능해석 모델의 신뢰도가 부족한 결과를 얻어 확장된 유량 범위에서의 신뢰도 확보를 위한 성능해석 모델의 수정이 필요함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 안전기반 소형수소추진선박 기술개발 및 실증 사업의 지원으로 수행되었음(과제명: [3세부] LBTS를 활용한 연료전지 기반 전기추진시스템 기술개발, 과제번호: RS-2022-00142947).

References

1. C. Kim, G. Kim, and H. Kim. "Analysis of domestic and foreign policy and technology trends for hydrogen industry development", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 122-131, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.122.
2. H. Hwang, "A study on tax system for carbon neutrality", Seoul Tax Law Review, Vol. 29, No. 3, 2023, pp. 529-568, doi: https://doi.org/10.16974/stlr.2023.29.3.011.
3. J. Kim and C. Kim, "Analysis of operation of the model school for carbon neutrality and directions for environmental education with a whole school approach", Journal of Korean Society for Environmental Education, Vol. 37, No. 2, 2024, pp. 282-302, doi: http://doi.org/10.17965/kjee.2024.37.2.282.
4. M. G. Choi, "A study on issues and improvement measures of the Special Act on offshore wind power for the realization of carbon neutrality", Ocean Policy Research, Vol. 39, No. 1, 2024, pp. 187-224, doi: http://doi.org/10.35372/kmiopr.2024.39.1.009.
5. Y. Kim and K. Yoo, "Development of highly heat-resistant polyimide separator to improve thermal stability and performance in electric vehicle batteries", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, Vol. 48, No. 1, 2024, pp. 1-7, doi: https://doi.org/10.3795/KSME-B.2024.48.1.001.
6. J. Lee, "Analysis of types and performance of portable replaceable batteries", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 32, No. 4, 2024, pp. 357-362, doi: https://doi.org/10.7467/KSAE.2024.32.4.357.
7. W. Kim, S. Lee, R. Song, S. Park, T. Lim, and J. Lee, "Development of tubular solid oxide fuel cells with advanced anode current collection", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 24, No. 6, 2013, pp. 480-486, doi: http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2013.24.6.480.

8. J. H. Gibbons, "Marine applications for fuel cell technology", 1st ed, U.S. Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1986, pp. 1-33, Retrieved from https://ota.fas.org/reports/8612.pdf.
9. T. A. Dahl, O. H. Staveli, and G. Sakariassen, "An approach to ventilation on hydrogen powered ships", BS thesis, Høgskulen på Vestlandet/Western Norway University of Applied Sciences, 2019, Retrieved from https://nva.sikt.no/registration/01990ee7f50e-760e4486-e118-49e4-b735-1e680953f315.
10. D. J. Yorke, "Fuel cell solution for marine applications", International Conference on Hydrogen Safety, 2021, Retrieved from https://www.h2knowledgecentre.com/content/conference3591.
11. F. Vogler, T. Grube, D. Stolten, and G. Würsig, "New developments for maritime fuel cell systems", In: Proceedings of world hydrogen energy conference WHEC, 2010, Retrieved from https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54538435.
12. B. R. Ryu, P. A. Duong, J. B. Kim, S. Y. Choi, J. W. Shin, J. Jung, and H. Kang. "The effect of ventilation on the hazards of hydrogen release in enclosed areas of hydrogen-fueled ship", Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 11, No. 9, 2023, pp. 1639, doi: https://doi.org/10.3390/jmse11091639.
13. T. Tronstad, H. H. Åstrand, G. P. Haugom, and L. Langfeldt, "Study on the use of fuel cells in shipping", European Maritime Safety Agency, 2017, Retrieved from https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper4089.
14. H. Cho, S. Hyeon, S. Jung, H. Ji, and J. Choi, "A study on optimal operation of methanol steam reforming system for hydrogen fuel cell propulsion ships", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 733-742, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.733.
15. J. Lim, S. Lee, S. Lee, and O. Lim, "The technology development and substantiation of small hydrogen powered vessel", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 555-561, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.555.
16. L. E. Klebanoff, J. W. Pratt, and C. B. LaFleur, "Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 1, 2017, pp. 757-774, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.024.
17. H. S. Lee, H. B, Jeon, Y. H. Cho, Y. M. Goo, and J. W. Park, "A study on thermal management system for the stack on hydrogen electric tram", Proceedings of the KAIS 2023 Fall Conference, 2023, pp. 568-570, Retrieved from https://www.kais99.org/jkais/springNfall/autumn2023/poster/2023_autumn_122.pdf.
18. T. H. Lee, T. S. Park, T. W. Kim, J. H. Noh, and Y. J. Kang, "Heat exchanger design for the individually allocated fuel cell for 1kw power generation", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 25, No. 1, 2014, pp. 39-46, doi: http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.1.039.
19. M. Y. Lee, J. P. Won, C. W. Cho, and H. S. Lee, "Experimental study on the mutual influence of thermal management system for hydrogen fuel cell vehicle", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 22, No. 6, 2011, pp. 852-858, doi: https://doi.org/10.7316/khnes.2011.22.6.852.
20. H. S. Lee, J. P. Won, C. W. Cho, and M. Y. Lee, "Performance characteristics of the thermal management system for passenger hydrogen fuel cell vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 3, 2012, pp. 986-993, doi: https://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.986.
21. H. S. Lee, S. J. Bae, H. S. Heo, and J. J. Kwon, "Internal pressure analysis design of fuel cell cooler for fuel cell electric commercial vehicle cooling circulation system", Proceedings of the KSAE 2023 Annual Autumn Conference & Exhibition, 2023, pp. 1811-1814, Retrieved from https://www.ksae.org/func/download_journal.php?bsid=47423&filename=MjBTS1NBRV9NMDA1LnBkZg%3D%3D&path=L2hvbWUvdmlydHVhbC9rc2FlL2h0ZG9jcy91cGxvYWQvam91cm5hbC8yMDIwMDkwNTIyNTYxNS43MjM2LjEwLjEucGRm.
22. B. Jeon, W. Ko, and Y. C. Park, "A study on the performance characteristics of a heat pump system using stack wast heat in fuel cell vehicles", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 8, 2016, pp. 325-330, doi: https://doi.org/10.6110/KJACR.2016.28.8.325.
23. J. H. Kim, J. S. LEE, I. S. KANG, and H. C. Ju, "Development and research of thermal management equipment for efficiency enhancement of PEMFC systems", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 2, 2024, pp. 205-215, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.2.205.
24. K. Park, J. Oh, S. Park, J. Joo, K. Yang, J. Park, and S. Um, "Thermodynamic approach to optimal water management for fuel cell electric vehicles", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 1, 2025, pp. 18-30, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.1.18.
25. J. Fernández-Seara, F. J. Uhía, J. Sieres, and A. Campo, "A general review of the Wilson plot method and its modifications to determine convection coefficients in heat exchange devices", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, No. 17-18, 2007, pp. 2745-2757, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.04.004.
26. J. Havlik and T. Dlouhy, "Condensation of water vapor

in a vertical tube condenser", Acta Polytechnica, Vol. 55, No. 5, 2015, pp. 306-312, doi: https://doi.org/10.14311/AP.2015.55.0306.
27. J. Havlik and T. Dlouhy, "Experimental determination of the heat transfer coefficient in shell and tube condenser using the Wilson plot method", EPJ Web of Conferences, Vol. 143, 2017, pp. 02035, doi: https://doi.org/10.1051/epjconf/201714302035.
28. Heat Transfer Research, Inc., "Design manual Section B2 single Phase Pressure Drop", 1997, Retrieved from https://www.htri.net/design-manual.
29. American Society of Mechanical Engineers (ASME), "PTC 12.5-2000 Single Phase Heat Exchangers(R2015)", 2002, Retrieved from https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/single-phase-heat-exchangers/2000/pdf.