

1-D 시뮬레이션을 이용한 히트펌프 기술과 결합된 연료전지 스택용 냉각 시스템 개발

Developing a Cooling System for Fuel Cell Stacks Combined with Heat Pump Technology Using 1-D Simulation

정상민¹ · 박동규¹ · 김민수¹ · 나성욱² · 이승준² · 권오성² · 이철희^{1*}

Sang-Min Chung, Dong Gyu Park, Minsu Kim, Sung-wook Na, Seung-Jun Lee, Oh-Sung Kwon and Chul-Hee Lee

Received: 1 Feb. 2024, Accepted: 27 Feb. 2024

Key Words : Cooling system(냉각시스템), Fuel cell(연료전지), Heat pump(히트펌프), Parametric analysis(파라미터 해석), 1-D simulation(1-D 시뮬레이션)

Abstract: This paper proposes a novel cooling system for hydrogen fuel cell cooling systems by integrating heat pump technology to enhance operational efficiency. The study analyzed the cooling efficiency of the fuel cell cooling system. With the increasing focus on eco-friendly vehicle technologies to address environmental concerns and global warming, the transportation sector, a major contributor to greenhouse gas emissions, needs technological enhancements for better efficiency. The proposed cooling system was modeled through 1-D simulations. The analysis results of parameters such as thermal balance, temperature, and pressure of each component confirmed the stable operation of the system. By examining variations in the cooling system's flow rate, compressor RPM, and the Coefficient of Performance (COP) based on different refrigerants, initial research was conducted to derive optimal operating conditions and parameter values.

기호 설명

C : average heat capacity

C_{yl} : cylinder volume

h_{in} : enthalpy of the inlet fluid

h_{is} : isentropic specific enthalpy

h_{out} : enthalpy of the outlet fluid

P_1 : temperature effectiveness of the cold fluid

P_2 : temperature effectiveness of the hot fluid

Q_m : mass flow rate

$\dot{Q}_{a.rad}$: AC system radiator heat transfer rate

$\dot{Q}_{a.eva}$: AC system evaporator heat transfer rate

$\dot{Q}_{h.exch}$: heat exchanger heat transfer rate

$\dot{Q}_{s.rad}$: stack system radiator heat transfer rate

$\dot{Q}_{s.sta}$: stack system stack heat transfer rate

T_{ci} : temperature of cold flow at inlet port

T_{co} : temperature of cold flow at outlet port

T_{hi} : temperature of hot flow at inlet port

$W_{a.com}$: AC system compressor power usage

$W_{c.pum}$: stack system pump power usage

w : motor rotation speed

η_{is} : isentropic efficiency

η_{vol} : volumetric efficiency

ρ_{in} : fluid density at the inlet

* Corresponding author: chulhee@inha.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

2 Fuelcell System Design Team, K-Fuelcell Co., LTD., Yongin 16976, Korea

Copyright © 2024, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

세계적인 산업화의 진행으로 인해 무분별한 화석 연료 에너지 사용으로 지구 온도가 상승하고 환경 문제가 발생하고 있다.¹⁾ 따라서 지구 온난화의 규제 및 방지를 위한 교토의정서가 협약되었다.²⁾ 온실효과를 감축시키기 위한 배출 감소 목표를 지키기 위해서는 친환경적인 대응 방안이 필요하다.³⁾ 특히, 한국의 교통부문은 전체 온실가스 배출량의 20%를 차지한다.⁴⁾ 따라서 친환경 차량 도입에 대한 필요성이 대두되고 있다. 그중 수소연료전지 기술은 높은 효율과 친환경적인 특성으로 주목받고 있다.⁵⁻⁶⁾ 수소연료전지는 물 이외의 배출가스를 발생시키지 않고, 공기 중의 산소를 직접 반응시켜 전기를 생산할 수 있으며, 상대적으로도 가벼우면서도 높은 에너지 밀도를 갖고 있으며, 전기차와 다르게 날씨나 온도에 크게 영향을 받지 않아 다양한 운전 조건에서도 효율적으로 운용할 수 있다.⁷⁾ 수소연료전지 자동차는 스택, 모터, 배터리, 수소탱크, 냉각 시스템, 공조 장치, 전력변환장치, 등으로 구성되어 있으며, 대부분의 장치가 온도에 크게 영향을 받는다. 연료전지 자동차의 효율을 높이고 각 부품의 수명을 극대화하고, 내구성을 향상하는 데 있어서 열을 제어하는 냉각 시스템의 중요성이 매우 크다.⁸⁾ 이러한 이유로 연료전지 자동차의 열을 효율적으로 운용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 선행연구로는 연료전지 자동차의 냉각시스템에서의 핵심 부품들의 성능을 확보하기 위한 연구 방법과 효과적인 연료전지의 열관리 기술 등을 연구를 수행하였다.⁹⁻¹⁰⁾ 냉각시스템의 열이 효율적으로 운용할 수 있도록 팽창밸브나 3-Way 밸브를 제어하는 로직을 개발하여 제어기의 성능을 검증 및 비교 분석한다.¹¹⁻¹³⁾ 또한 시뮬레이션을 통한 실제 도로에서의 운전 조건에 따른 냉각시스템의 주요 부품들의 최적 운영 조건을 연구를 수행하였다.¹⁴⁻¹⁵⁾ 또한 시뮬레이션을 통한 파라미터스터디를 통해 시스템 구조 및 안정성 분석과 최적화를 진행한 사례가 있다.¹⁶⁻¹⁷⁾ 선행 연구들은 기존의 스택 냉각시스템의 구조에서 크게 변화 없이 스택 냉각시스템 자체의 조건 및 파라미터값들의 변화를 통해 최적화와 최적의 효율을 도출하였지만, 에너지 효율을 증가시키기 위해 낭비되는 에너지를 다시 사용하는 방식의 히트펌프 기술과 결합해 진행되는 연구 사례는 불충분하여 본 연구는 상기한 선행 연구에 추가적으로 Fig. 1의 계략도와 같이 에어컨 냉각시스템에서 낭비되는 에

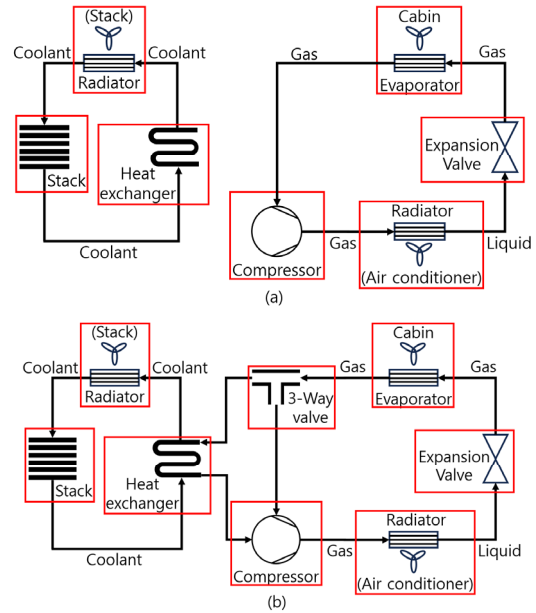


Fig. 1 Schematic of the cooling system of a fuel cell vehicle (a) conventional cooling system (b) air conditioning cooling system combining stack cooling system and heat pump technology.

너지를 이용한 히트펌프 기술을 결합하여 새로운 냉각시스템을 제안하고, 결합한 냉각 시스템의 개발을 위한 초기 연구를 목적으로 한다.

본 연구를 수행하기 위해 1-D 시뮬레이션을 기반으로 히트펌프와 결합한 냉각시스템의 모델링을 하였으며, 제안한 냉각시스템의 열평형을 파악하기 위하여 각 부품의 열 교환율, 입 출구의 온도와 압력을 파악하였다. 또한 냉각 시스템의 구성요소가 냉각 시스템에 미치는 영향을 파악하기 위하여, COP 값 결과를 통해 Matlab으로 분석하는 것을 목적으로 한다.

2. 해석 모델링

히트펌프 기술과 결합한 냉각시스템을 개발하기 위하여 전체 냉각시스템의 열평형을 파악하고, 부품의 구성요소에 따른 영향도를 파악하기 위한 모델링이며, 본 연구의 스택 냉각시스템은 스택과 스택용 라디에이터로 구성된다. 스택을 통과한 냉각수가 열 교환기와 라디에이터로 흐른다. 에어컨 냉각시스템은 압축기, 에어컨용 라디에이터, 팽창밸브, 증발기, 3-Way 밸브로 구성된다. 에어컨 냉각시스템에서 냉매는 압축기를 통과하여 압축되고 가스의 형태이다. 이후 에어컨 라디에이터를 통해 응축되어 액체의 형태가 된다. 이후 팽창밸브를 통해 팽창되며 가스 형

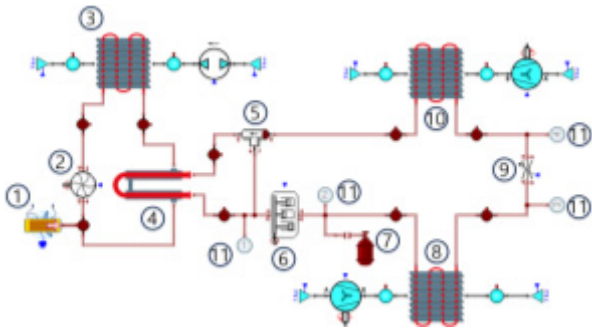


Fig. 2 1-D simulation analysis modeling of the entire cooling system.

Table 1 Component-specific designations for the entire cooling system.

Number	Designation
①	Stack
②	Coolant pump
③	Radiator(stack)
④	Heat exchanger
⑤	3-Way valve
⑥	Compressor
⑦	Filler
⑧	Radiator(air conditioner)
⑨	Expansion valve
⑩	Evaporator
⑪	Sensor

태가 되고, 증발기를 통해 증발하여 가스 형태가 된다. 이후 3-Way 밸브를 통해 냉매 온도에 따라 흐름이 나누어진다. 전체 냉각시스템의 열평형을 파악하기 위하여 압축기의 입구, 에어컨 라디에이터 입구, 팽창밸브 입구, 증발기 입구에 온도센서와 압력센서를 포함하여 모델링하였다. 스택 냉각시스템과 에어컨 냉각 시스템 사이에 열교환기를 통해 에어컨 냉각시스템에서 발생하는 폐열을 스택의 냉각시스템에서 사용할 수 있다. 시뮬레이션 X를 통하여 모델링하였으며, 전체 냉각시스템의 해석모델은 Fig. 2와 같이 모델링하였고, 모델링 부품별 명칭은 Table 1과 같다.

본 연구의 해석 모델은 냉각 시스템의 다양한 조건과 물리적 상호작용을 고려하기 위하여 시간에 따른 냉각 시스템의 동적 특성을 효과적으로 모델링하기 위한 수치 해법으로, 변수 시간 단계와 자동 오차 제어를 통해 미분 방정식의 초기값 문제를 효율적으로 해결하는 Cnode method를 사용하여 정확성과 계산 효율성을 높였다.¹⁸⁾ 냉각 시스템의 냉각수 및 냉

매의 흐름은 특정한 경로를 따라 순환하여 열을 흡수하고 전달하기 때문에 층류로 모델링하였다.¹⁹⁾ 히트펌프 기술을 결합한 냉각 시스템의 기초설계로 열 손실은 고려하지 않았다. 냉각 시스템의 열평형 및 설계파라미터에 따른 냉각효율을 분석하기 위하여 설정한 파라미터의 세부 사항은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Specifications used for 1-D simulation modeling and parameter study.

Component	Parameter
Radiator(Stack)	W 830 x D 36.5 x H 464 mm ³
Stack	Heating capacity 60 kW
Heat exchanger	I.D 7.3 mm, O.D 15.9 mm
Compressor	Cylinder volume 0.15L, 1000 ~ 3000 RPM
Radiator (air conditioner)	W 500 x D 100 x H 100 mm ³ , Tube I.D 10 mm
Evaporator	W 248 x D 87.5 x h 235 mm ³ , Tube I.D 10 mm
Radiator(stack) air inlet	40 ° C 1.01325 bar 182.4 m ³ /min
Radiator (air conditioner) air inlet	20 ° C, 1.01325 bar 40.16 m ³ /min
Evaporator air inlet	5 ° C, 1.01325 bar 41.287 m ³ /min
Coolant flow rate	40 ~ 200 L/min
Refrigerant material	R134a, R1234yf, R410a

3. 이론적 분석

스택 냉각시스템과 에어컨 냉각시스템을 히트펌프 기술로 결합한 시스템이 열평형을 이루며 안정적인 운영을 위해 시스템에 열전달률을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\dot{Q} = P_1 C_1 \Delta T = P_2 C_2 \Delta T \quad (1)$$

열전달률은 P-NTU 방법을 사용했다. P-NTU 방법에서 열 전달율은 식 (1)과 같이 표현되고, 여기서 P는 열효율을 나타내며, C는 상변화에 따른 평균 열용량을 나타내며, $\Delta T = T_{hi} - T_{ci}$ 는 입구 온도 차이이다. 차가운 유체의 효율 P_1 은 식 (2)와 같이 표현되고, 입 출구 온도에 영향을 받는다.²⁰⁾

$$P_1 = \frac{T_{co} T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}} \quad (2)$$

여기서, T_{co} 는 차가운 유체의 출구 온도이고, T_{ci} 는 차가운 온도의 입구 온도이며, T_{hi} 는 따뜻한 유체의 입구 온도이다. 따라서 전체 냉각시스템의 열평형은 식(3)과 같이 표현되며, 파라미터 변화가 냉각효율에 미치는 영향을 구하기 위한 COP는 식(4)와 같이 표현된다.

$$\dot{Q}_{s.rad} + \dot{Q}_{s.sta} + \dot{Q}_{h.exc} + W_{c.pum} = \dot{Q}_{a.rad} + \dot{Q}_{a.eva} + \dot{Q}_{h.exc} + W_{s.com} \quad (3)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{s.rad}}{W_{s.pum} + W_{s.sta}} + \frac{\dot{Q}_{a.eva}}{W_{a.com}} \quad (4)$$

여기서 \dot{Q} 는 열전달률을 나타낸다. W 는 사용전력이며, 식(5)와 같이 질량 흐름과 입 출구의 엔탈피 흐름의 관계에 따라 표현된다, 출구에서의 흐름 엔탈피는 식(6)과 같이 표현되고, 질량 흐름은 식(7)과 같이 표현된다.²¹⁾

$$W = \dot{Q}_m \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad (5)$$

$$h_{out} = \frac{1}{\eta_{is}}(h_{is} - h_{in}) + h_{in} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_m = \rho_{in} \eta_{vol} \frac{\omega}{2\pi} C_{yl} \quad (7)$$

여기서 \dot{Q}_m 은 질량 흐름이며, h_{out} 는 출구의 유체 엔탈피, h_{in} 는 입구의 유체 엔탈피, η_{is} 는 등방성 효율, h_{is} 등방성 비 엔탈피, ρ_{in} 는 입구의 유체밀도, η_{vol} 는 체적효율, ω 는 모터 회전속도, C_{yl} 는 실린더 체적이다.

4. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 진행한 전체 냉각시스템의 모델링을 Simulation-X를 통하여 1-D 해석을 수행하였다. 또한 모델링의 검증에 위해 냉각시스템 내 각 부품이 열교환을 통해 열평형을 유지하며, 운영하는지를 파악하였다. EES(Engineering Equation Solver)를 이용하여 R410a의 p-h 선도와 냉각시스템의 각 부품에서 얻은 압력과 엔탈피 해석 결과를 비교하여 Fig. 3에 나타

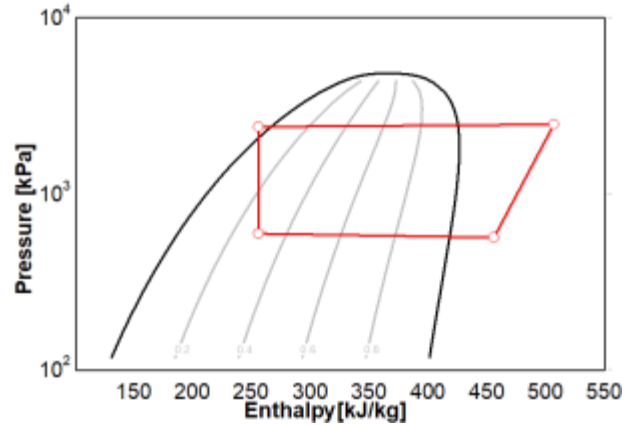


Fig. 3 Pressure-enthalpy plot and simulation results for R410a.

냈다. 냉매 R410a의 p-h 선도를 기반으로 압축기, 라디에이터(에어컨), 팽창밸브, 증발기, 입구에 설치한 센서 값이 열평형을 이루며 시스템이 조절되고 있음을 파악하였고, p-h 선도의 각 구역에 따라 상변화가 이루어지는 것을 파악하였다.

4.1 스택 냉각시스템 유량 변화에 따른 결과

Fig. 4는 스택 냉각시스템에 냉각수의 유량을 40L/m에서 200L/m까지 파라미터를 변경하였을 때 열교환기의 열전달률 결과이며 또한 R134a, R1234yf, R410a 냉매의 열전달률 변화를 파악하였다. 두 냉매에서 모두 유량이 증가함에 따라 열교환기에 열 교환율이 낮아졌다. 이는 스택 냉각시스템과 에어컨 냉각시스템 사이에 있는 열교환기가 유량이 증가하면 열교환기 성능을 저하한다는 것을 파악하였다.

Fig. 5는 냉매별 스택 냉각시스템에 냉각수의 유량 변화에 따른 스택 냉각시스템 열교환기의 냉각수 입출구 온도를 비교하였다. 두 냉매 모두 유량이 클수

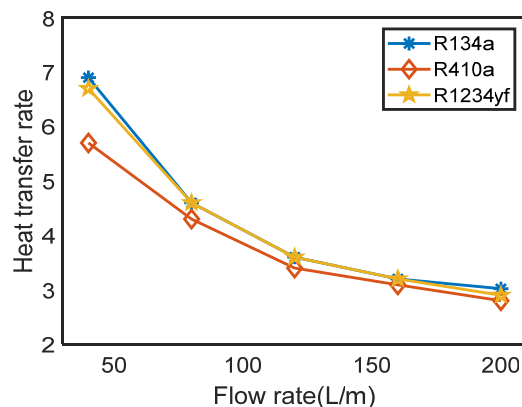


Fig. 4 Heat exchanger heat transfer rate as a function of stack cooling system flow rate.

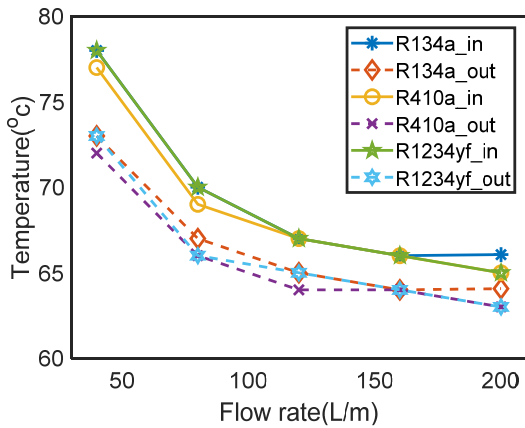


Fig. 5 Change in heat exchanger inlet and outlet temperatures as a function of stack cooling system flow.

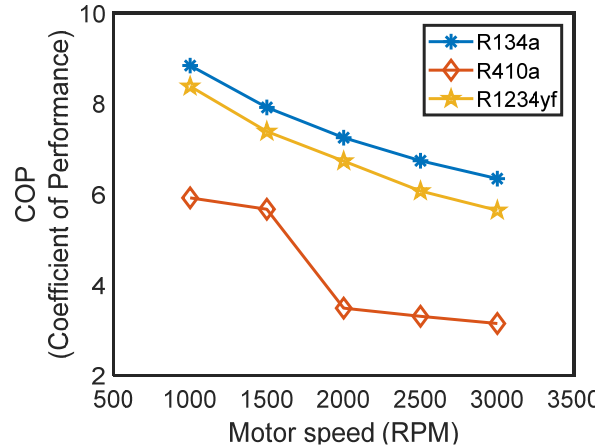


Fig. 6 COP as a function of refrigerant and compressor motor speed.

록 입구, 출구 온도가 낮아진다. 이는 스택 냉각시스템의 유량이 낮을수록 스택에서 전달받는 열이 증가하여 냉각수의 온도 상승으로 인해 입 출구 온도가 증가하는 것을 파악하였다.

유량을 증가시키면 전체 냉각시스템에서 안정적인 스택 온도 및 냉각수 온도를 유지하며 운영이 가능하고, 유량을 감소시키면 열교환기의 열 교환율의 증가로 히트펌프를 사용한 냉각시스템의 열 교환율이 증가한다. 따라서 스택의 유량은 전체 냉각시스템의 냉각효율에 영향을 미치는 중요한 변수임을 파악하였다. 또한 스택 냉각수의 유량이 스택 시스템과 에어컨 시스템 사이의 열교환기에 열전달률과 스택 시스템 냉각수의 입 출구 온도는 반비례 관계로 히트펌프 기술을 결합한 냉각시스템의 냉각 효율을 높이기 위해서는 스택 냉각시스템의 유량을 조절하여 적절한 유량 값을 도출하는 것이 중요하다.

4.2 압축기 RPM에 따른 냉각성능 비교

Fig. 6은 압축기의 RPM 변화에 따른 전체 냉각시스템의 COP 변화를 보여준다. COP는 냉각시스템의 열효율을 나타내는 성능계수이며, 수치가 높을수록 열효율이 높은 냉각시스템을 의미한다. 압축기의 RPM을 증가에 따라 두 냉매 모두에서 COP가 하락한다. 이는 Table 3과 같이 압축기의 RPM 증가로 사용되는 전력이 증가함에 따라 COP계수가 낮아지는 것을 파악할 수 있다. 또한 모든 결과에서 R134a 냉매가 R1234yf, R410a 냉매보다 높은 열효율 및 안정성을 나타내므로 히트펌프 시스템을 결합한 스택용 냉각시스템에서 R134a 계열의 냉매가 더 적합하다.

Table 3 Power usage of the compressor motor by refrigerant and RPM.

RPM	R134a (Kw)	R1234yf (Kw)	R410a (Kw)
1000	0.7	1.2	2.2
1500	1.1	1.6	4.3
2000	1.5	1.9	7.9
2500	1.9	2.2	9.8
3000	2.2	2.6	11.6

5. 결론

본 논문에서는 수소연료전지 냉각시스템에서 낭비되는 에너지를 저감하기 위한 히트 펌프와 결합한 새로운 냉각시스템을 설계하고 시뮬레이션을 통한 검증 및 냉각시스템 부품의 파라미터가 냉각효율에 미치는 영향을 분석하였다. 스택 냉각시스템과 에어컨 냉각시스템이 결합한 냉각시스템이 냉매의 상변화와 전체 시스템이 열평형을 이루는 것을 통하여 제안한 냉각시스템을 검증하였다. 또한 냉매의 종류, 냉각수의 유량, 압축기 모터의 RPM이 냉각효율에 미치는 영향을 분석하였다.

냉각수 유량을 40L/m에서 200L/m로 변경하였을 때, 스택 냉각시스템에서 열교환기의 열전달률은 40L/m에서 가장 높았다. 이는 냉각수 유량이 증가하면 스택 냉각시스템과 에어컨 냉각시스템 사이의 열교환기의 성능이 감소한다는 것을 의미한다. 또한 냉각수 유량의 증가에 따라 스택 시스템의 열교환기 입 출구 온도가 감소하고 입 출구 온도 차는 증가한다. 이는 유량이 작을수록 열원인 스택에서 받는 열

이 열교환기를 통해 감소하는 온도보다 크다는 것을 의미한다. 두 관계는 반비례하는 특징을 가지고 있으므로 목표 냉각온도에 따른 적절한 유량을 도출해야 한다. 에어컨 냉각시스템의 압축기 RPM을 1000RPM에서 3000RPM으로 변경하였을 때, 회전속도가 가장 낮은 1000RPM에서 COP계수가 높았다. 이는 회전속도의 증가로 모터의 전력량이 증가하고, 열 교환율은 낮아져 COP가 감소하는 것을 의미한다. 또한 R134a 냉매가 R1234yf, R410a보다 높은 COP로 냉각효율이 더 높아 히트펌프를 결합한 냉각시스템에서 R134a 계열의 냉매가 효율적이고 안정적인 것을 나타낸다. 본 논문에서 제시한 파라미터(냉각수 유량, 압축기 모터 RPM, 냉매 종류)가 시뮬레이션 결과를 통해 히트펌프를 결합한 냉각시스템의 냉각효율에 주요 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2023-00243974, 디지털기반 지속가능 에너지 공정혁신 융합대학원)

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) Dagobert. G. Kessel, "Global warming—facts, assessment, countermeasures," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol.26, No.1-4, pp.157-168, 2000.
- 2) Maamoun. Nada, "The Kyoto protocol: Empirical evidence of a hidden success," *Journal of Environmental Economics and Management* Vol.95, pp.227-256, 2019.
- 3) Bolin. Bert and Haroon. S. Khesghi, "On strategies for reducing greenhouse gas emissions," *Proceedings of the National Academy of Sciences* Vol.98, No.9, pp.4850-4854, 2001.
- 4) Sim. Seungbae, Jisoo Oh, and Bongju Jeong, "Measuring greenhouse gas emissions for the transportation sector in Korea," *Annals of Operations Research* Vol.230, pp129-151, 2015.
- 5) Kyoung. Ho. Han, Sang. Gyun. Park, Heesu. Kim, "Technology Trend on Hydrogen Fuel Cell Excavator," *Journal of Drive and Control*, Vol.6, 2023.
- 6) Mo. A. Son, Young. Sun. Kang, Yong. Joo. Kim, "Technology Trend on Hydrogen Fuel Cell Tractor," *Journal of Drive and Control*, Vol.6, 2023.
- 7) Hoseong. Lee, et al, "A Study on A nalytic A pproach for Stack Cooling Performance Improvement of Fuel Cell Electric Vehicle," *KSAE Annual Conference*, pp.3007-3013, 2009.
- 8) Kim. Sung. Chul, et al, "Performance evaluation of a stack cooling system using CO2 air conditioner in fuel cell vehicles," *International Journal of refrigeration*, Vol.32, No.1, pp-70-77, 2009.
- 9) H. S. Lee, M. Y. Lee, C. W. Cho, "Analytic study on thermal management operating conditions of balance of 100kW fuel cell power plant for a fuel cell electric vehicle," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.20, No.2, pp.1-6, 2019.
- 10) Keunseo. Park, et al, "A Study on Battery Cooling System Performance using 1D Simulation," *KSAE Annual Conference*, pp.1333-1338, 2018.
- 11) Han. Jaeyoung, Jisoo. Park and Sangseok. Yu, "Control strategy of cooling system for the optimization of parasitic power of automotive fuel cell system," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.40, No.39, pp.13549-13557, 2015.
- 12) Choi. J. H, et al, "Transient Characteristic Analysis on the Regenerative Braking System of Fuel-cell Electric Vehicle with Electro-Hydraulic Brake," *Journal of Drive and Control*, Vol.9, No.1, pp.1-9, 2012.
- 13) Song. H. Y, et al, "Analysis of Fault Diagnosis of Regenerative Braking System for Fuel Cell Vehicle with EMB System," *Journal of Drive and Control*, Vol.9, No.4, pp.8-13, 2012.
- 14) Chen. Qun, et al, "A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system I: Theory," *Energy*, Vol.35, No.6, pp.2448-2454, 2010.

- 15) Lee. Se. Young, "Development of Simulation Model for PEMFC Hybrid Excavator," *Journal of Drive and Control*, Vol.16, No.3, pp.16-22, 2019.
- 16) Choi. Yo. Han, Il. Hoon. Yoo and Chul. Hee. Lee, "Thermal Flow Analysis of an Engine Room using a Porous Media Model for Imitating Flow Rate Reduction at Outlet of Industrial Machines," *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.1, pp.62-68, 2022.
- 17) Seungwoon. Park, Yeong. Hwan. Han, Ho. Young. Jeon and Chul. Hee. Lee, "Study on Dynamic Characteristics of 4-Step Drainage Tower Based on Multi-body Dynamics Simulation," *Journal of Drive and Control*, Vol.20, No.4, pp.9-16, 2023.
- 18) Chen. X, Mehl. C, Faney. T, and Di. Meglio. F, (2023). "Clustering-Enhanced Deep Learning Method for Computation of Full Detailed Thermochemical States via Solver-Based Adaptive Sampling," *Energy & Fuels*, Vol.37, No.18, pp.14222-14239, 2023.
- 19) Cao. Eduardo, "Heat transfer in process engineering," New York: McGraw-Hill, 2010.
- 20) Sammeta. Harika, et al, "Effectiveness charts for counter flow corrugated plate heat exchanger," *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.19, No.2, pp.777-784, 2011.
- 21) Manual, SimulationX User, "Library Manual," ITI GmbH, 2011.