

대체 냉매를 적용한 친환경 냉동탑차 성능 특성에 관한 해석적 연구

박차식
호서대학교 미래자동차공학과

Simulation on performance characteristics of eco-friendly refrigerated trucks using alternative refrigerants

Cha-Sik Park
Department of Automotive Engineering Hoseo University

요약 냉동탑차용 냉동시스템은 트럭 탑차에 장착되어 목적지까지 운반되는 수송과정에서 적재물의 일정한 온도를 유지하며 콜드체인 시스템에서 중요한 역할을 한다. 냉동 및 냉장 식품은 냉동탑차를 이용해 수송하고 있으며 현재 대부분의 냉동탑차는 엔진의 동력으로 냉동기를 구동하는 엔진 구동방식인데, 최근 전기상용차 보급의 확대로 냉동탑차의 전기차 전환을 위한 냉동시스템 개발에 대한 관심이 증대되고 있다. 본 연구에서 적용하는 R404A와 R454C 냉매의 냉동사이클 기본 성능 특성을 비교하기 위하여 냉동탑차의 증발온도 운전 조건에 따른 냉동사이클 시뮬레이션을 실시하였다. 기존의 엔진구동 방식의 압축기를 적용한 R404A 시스템과 대체 시스템인 전기구동 방식의 압축기를 적용한 R454C 시스템에 대하여 냉동사이클 해석을 수행하였다. 증발온도가 $-25\sim 0^{\circ}\text{C}$ 까지 변화할 때 R404A 시스템의 냉방용량과 압축기 소비동력은 각각 251.9%와 72.6% 증가하였고, R454C 시스템의 냉방용량과 압축기 소비동력은 각각 148.5%와 10.5% 증가하였다. 소형 상용차용 내연기관 냉동탑차의 전환 시스템으로 전기 상용차 냉동탑차에 대체냉매 R454C를 적용할 경우 기존의 R404A 시스템보다 전반적으로 성능이 우수한 것으로 나타났다.

Abstract The refrigeration system for refrigerated vehicles is installed on trucks and plays a vital role in the cold chain system by maintaining a constant cargo temperature during transportation to its destination. With the expansion of electric commercial vehicles, the interest in developing refrigeration systems for converting refrigerated trucks to electric vehicles has increased. A simulation was conducted to compare the basic performance characteristics of the refrigeration cycle of the R404A and R454C refrigerants used in this study. A refrigeration cycle analysis was performed on the R404A system using a conventional engine-driven compressor and the R454C system using an alternative system, an electric-driven compressor. When the evaporation temperature changed from -25 to 0°C , the cooling capacity and compressor power consumption of the R404A system increased by 251.9% and 72.6%, respectively, and the cooling capacity and compressor power consumption of the R454C system increased by 148.5% and 10.5%, respectively. When applying the alternative refrigerant R454C to electric commercial vehicle refrigerated trucks as a conversion system for internal combustion engine refrigerated trucks for small commercial vehicles, the overall performance was better than the existing R404A system.

Keywords : Alternative Refrigerants, Electric Vehicle, R454C, Refrigerator Truck, Refrigeration System

본 논문은 2021년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비(20210807) 지원을 받아 수행된 연구임.

*Corresponding Author : Cha-Sik Park(Hoseo Univ.)

email: cspark@hoseo.edu

Received April 29, 2024

Revised June 12, 2024

Accepted July 5, 2024

Published July 31, 2024

1. 서론

코로나 이후 비대면 생활 문화가 증가하면서 온라인을 이용한 식품의 배송이 급격히 증가하였다. 이에 따라 냉동 및 냉장 수송을 통한 수요는 국내 뿐만 아니라 해외에서도 증가하고 있으며, 현대생활에 있어 필수적인 수단이 되고 있다. 냉동 및 냉장 식품은 냉동탑차를 이용해 수송하고 있으며 현재 대부분의 냉동탑차는 엔진의 동력으로 냉동기를 구동하는 엔진 구동방식인데, 배송 식품의 상·하차 시와 같이 엔진이 정지한 경우에는 냉동기도 정지되어 냉동탑차의 적정온도 유지가 어려운 문제점이 있다. 이러한 문제점 개선과 최근 전기상용차 보급의 확대로 냉동탑차의 전기차 전환을 위한 냉동시스템 개발에 대한 관심이 증대되고 있다. 냉동탑차용 냉동시스템은 트럭 탑차에 장착되어 목적지까지 운반되는 수송과정에서 적재물의 일정한 온도를 유지하며 Fig. 1과 같은 콜드체인 시스템(cold chain system)에서 중요한 역할을 한다. 콜드체인 시스템에 적합하도록 냉동탑차에 저장된 물류의 온도 유지를 위해서는 냉동의 경우 -18°C 이하, 냉장의 경우 $1.1\sim 4.4^{\circ}\text{C}$ 를 유지하여야 하기 때문에 냉동시스템에 적용되는 냉매의 경우 저온에 적합한 냉매인 R404A를 사용하고 있으나, 지구온난화 규제물질로 규정되고 있기 때문에 대체냉매를 적용하는 기술 개발이 필요한 실정이다[1].



Fig. 1. Cold chain system

Kang et al.은 잠열축열식 냉동탑차의 에너지 절감효과에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험을 위하여 냉동탑차와 유사한 공간을 구현하여 엔진구동식 냉동탑차와 잠열축열식 냉동탑차의 에너지소비량을 비교하였다. 실험을 통하여 1차에너지 기준으로 잠열축열식이 엔진구동식보다 37.0%의 에너지 절감효과가 있는 것으로 보고하였다[2].

Kang et al.은 R134a와 R1234yf 냉매를 적용하여 냉동탑차 냉장시스템의 성능비교 연구를 수행하였다. 냉동탑차를 모사한 환경챔버에서 R134a와 대체냉매인 R1234yf 냉매를 실험장치의 시스템에 충전하여 최적의 냉매충전량을 찾고 기본 성능을 평가하였는데 R1234yf

시스템이 R134a 시스템보다 전반적으로 성능이 낮게 나타나서, 대체냉매 R1234yf 적용시 성능향상을 위한 연구가 필요함을 보고하였다[3]. 그러나, 냉동탑차에 적용되는 저온용 냉매로 R134a와 R1234yf는 적합하지 않아 R404A 및 그 대체냉매에 대한 연구가 수행되고 있다.

Kim et al.은 냉동탑차 내의 증발기의 최적 설계를 통한 냉동시스템의 성능향상 연구를 해석하였다. 냉매는 R404A 냉매와 대체냉매인 R455A 냉매를 적용하여 성능비교를 하여 대체냉매의 적용 가능성을 분석하였다. 기존 냉동시스템에 대체냉매인 R455A를 drop-in 하여 해석한 결과, R455A에 적용된 시스템의 증발열량 및 소비전력은 기존 R404A 시스템의 증발열량과 소비전력 대비 증가하여 전체적으로 COP 상승은 없었으나, 동일 증발열량 조건에서 R455A 적용 시스템의 COP는 R404A 적용 시스템 대비 약 8.7% 증가하는 것으로 보고하였다[4].

일반적으로 냉동탑차에는 R404A 냉매가 적용되고 있는데, 최근에는 R404A 대체냉매에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나, 기존의 연구는 대부분 열교환 성능에 대한 연구로서 냉동사이클 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다[5]. Table 1은 R404A와 대체냉매인 R454C에 대한 열역학적 물성치를 나타낸다. 대체냉매인 R454C 냉매는 GWP 지수가 146으로 낮은 GWP를 나타내며, 0°C 에서 증발잠열도 기존 R404A 냉매보다 냉동 능력에 대한 열역학적 물성치도 우수한 것으로 나타났다.

Table 1. Comparison of R404A and R454C

Refrigerants	R404A	R454C
Chemical formula	HFC Mixture	HFC/HFO Mixture
Molecular weight point(g/mol)	97.6	90.8
Boiling point($^{\circ}\text{C}$)	-46.5	-45.9
Safety group	A1	A2L
Autoignition temp.($^{\circ}\text{C}$)	>750	-
LFL/UFL(vol. % in air)	None	11.8-12.9
Heat of vapor(kj/kg) at 0°C	165.8	189.1
ODP	0	0
GWP	3,922	146

본 연구에서는 소형 상용차용 냉동탑차 시스템에 대하여 기존의 엔진 구동방식의 압축기를 적용한 R404A 냉매와 전기모터 구동방식의 압축기를 적용한 대체냉매 R454C를 적용한 경우에 대하여 식품 배송 종류에 따른 운전조건인 증발온도 변화에 따른 시스템 성능을 분석하였다.

2. 주요 부품 모델링

본 연구에서는 냉동탑차의 냉동사이클 시뮬레이션을 수행하기 위하여 상용 프로그램인 EES를 이용하여 해석을 수행하였다[6]. 본 연구에서 적용하는 R404A와 R454C 냉매의 냉동사이클 기본 성능 특성을 비교하기 위하여 ASHRAE LBP 32 조건에서 시뮬레이션을 실시하였다. 압축기에서는 등엔트로피 과정으로 이루어지고, 팽창장치에서는 등엔탈피 과정으로 가정하였다. Table 2에서는 기본 시뮬레이션 결과를 요약하여 나타낸다. 대채냉매인 R454C 냉매는 R404A 냉매와 비교하여 냉방용량은 31.9% 높게 나타났으나, 압축기 소비동력도 28.6%로 증가하여 COP는 0.2%로 거의 동일한 것으로 나타났다. 이것은 앞서 Kim et al.[4]의 연구에서 제시한 냉방용량과 압축기 소비동력이 각각 16.9%와 17.0% 증가하여 COP 상승이 거의 없는 결과 값과 유사한 경향을 나타내었다. 하지만, R454C 냉매의 압축기의 압축비와 냉매 토출온도가 높아 시스템의 신뢰성 확보를 위해 적절한 압축기의 선정과 시스템 제어가 요구된다.

Table 2. Theoretical performance of refrigerants for refrigerated trucks

Refrigerants	R404A	R454C
Cond. temperature	54.4℃	54.4℃
Cond. pressure	2551 kPa	2382 kPa
Evap. temperature	-23.3℃	-23.3℃
Evap. pressure	264.6 kPa	190.9 kPa
Comp. pressure ratio	9.643	12.48
Comp. outlet temperature	72.92℃	84.3℃
Comp. power consumption	48.02 W/kg	61.73 W/kg
Cooling capacity	84.46 W/kg	111.4 W/kg
COP	1.8	1.804

다음으로 소형 상용차용 냉동탑차에 적용되는 냉동·냉장 시스템의 제원을 반영하기 위하여 다음과 같이 주요 단품에 대하여 모델링을 실시하였다.

2.1 압축기 모델링

냉동탑차 냉동시스템의 압축기는 기존의 엔진구동 방식의 Bock 압축기와 전기모터 구동 방식의 Hitachi 압축기를 적용하여 냉동사이클 시뮬레이션을 수행하였다. Table 3은 두 압축기의 사양을 나타낸다.

Table 3. Specification of compressor

Specification	Bock FKX20	Hitachi FL300
Type	Reciprocating	Scroll
Displacement (cm ³ /rpm)t	25 / 1.450	56 / 3.470
Driven type	Engine	Electric
Capacity(kW)	3.47	3.70

압축기 모델링은 제조사가 제시하는 압축기 성능 데이터를 이용하여 압축기 성능 상관식을 개발하였다[7-10]. 응축온도와 증발온도 변화에 따른 압축기 냉방용량과 소비동력 데이터를 적용하여 상용프로그램인 Sigma Plot을 이용하여 Non-linear regression 분석을 통해 상관식의 계수 식 (1)과 (2)를 선정하였다. Table 4는 각 식의 계수 값을 나타낸다.

$$Q = c1 T_c^2 + c2 T_e + c3 T_c^2 + c4 T_e + c5 T_e T_c + c6 \quad (1)$$

$$P = d1 T_c^2 + d2 T_e + d3 T_c^2 + d4 T_e + d5 T_e T_c + d6 \quad (2)$$

여기서, T_e = 증발온도, T_c = 응축온도, Q = 냉방용량, P = 압축기 소비동력

압축기 성능 상관식의 정확도를 검증하기 위하여 예측 상관식과 실험데이터 값을 비교하였다. Fig. 2와 3은 Bock사 압축기의 냉방용량과 압축기 소비동력의 성능 상관식의 정확도를 비교하여 나타내었다. 압축기 전체 운전조건에서 냉방용량과 압축기 소비동력에 대한 실험값과 예측값의 오차는 각각 최대 ±5%와 ±2% 이내를 보였다.

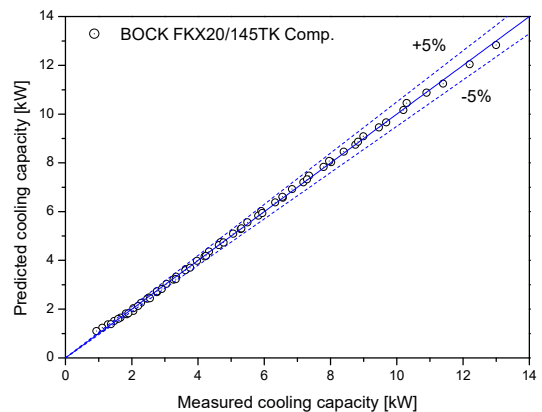


Fig. 2. Cooling capacity comparison of the measured data with the predicted data for BOCK compressor.

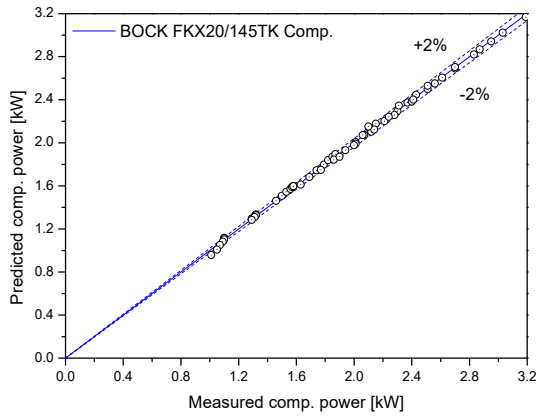


Fig. 3. Compressor power consumption comparison of the measured data with the predicted data for BOCK compressor.

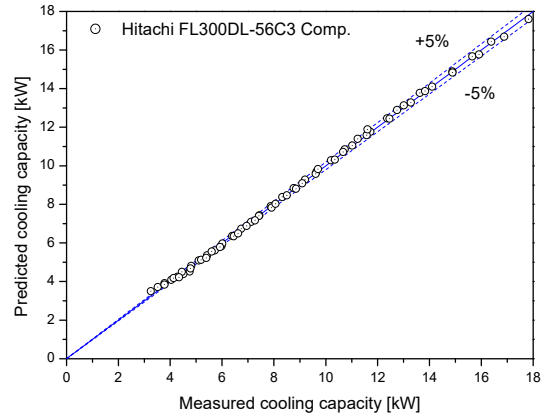


Fig. 4. Cooling capacity comparison of the measured data with the predicted data for Hitachi compressor.

Table 4. Correlations coefficient of Bock and Hitachi compressors

Coefficient	Bock FKX20	Hitachi FL300
c1	0.00339	0.00531
c2	-0.4822	-1.01550
c3	2.6387×10^{-7}	-0.00037
c4	0.7369	1.18100
c5	-3.2797×10^{-3}	-0.00424
c6	-61.8213	-71.67030
d1	-2.8547×10^{-4}	3.2018×10^{-4}
d2	-0.1164	-0.1982
d3	-1.9577×10^{-4}	8.88023×10^{-4}
d4	-0.1127	-0.4991
d5	9.7833×10^{-4}	1.972×10^{-4}
d6	26.7637	88.8112

Fig. 4와 5는 Hitachi사 압축기의 냉방용량과 압축기 소비동력의 성능 상관식의 정확도를 비교하여 나타내었다. Bock사 압축기 성능 상관식과 동일하게 냉방용량과 압축기 소비동력에 대한 실험값과 예측값의 오차는 각각 최대 $\pm 5\%$ 와 $\pm 2\%$ 이내를 보였다.

2.2 응축기 모델링

해석을 위하여 적용한 냉동탑차 응축기의 제원은 Table 5와 같다. 응축기는 냉매측과 공기측의 대류열전달과 관벽의 전도 열전달을 순차적으로 계산하는 차분법을 사용하였다. 냉매의 열전달 계수는 단상유동은 Dittus and Boelter의 상관식 (3)을 사용하였고, 이상유동은 Cavallini의 상관식 (4)를 사용하였다[11,12]. 압력강하는 이상상태에서 Newell and Shah의 상관식 (5)를 사용하였고, 단상상태에서는 Fang의 상관식 (6)을 사용하였다[13,14].

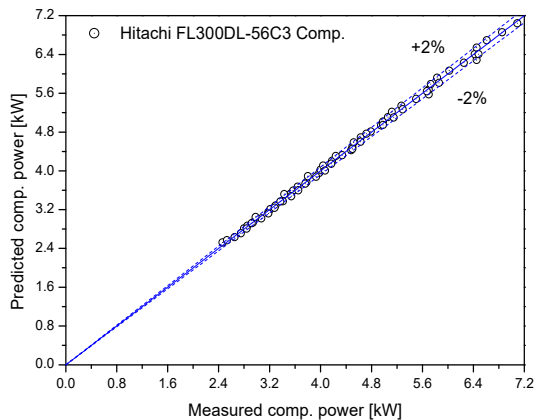


Fig. 5. Compressor power consumption comparison of the measured data with the predicted data for Hitachi compressor.

Table 5. Specification of condenser in refrigerator trucks

Variable		Input value
Condenser size	Width	789 mm
	Height	450 mm
	Depth	212 mm

$$h = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{k}{D} \quad (3)$$

$$h = 0.05 Re^{0.8} Pr^{0.33} \frac{k}{D} \quad (4)$$

$$\left(-\frac{dP}{dz}\right) = PF \cdot \Phi^2 \cdot \frac{2fG^2}{\rho D} \quad (5)$$

$$f = 0.25 \left[\log \left(\frac{150.39}{Re^{0.98865}} - \frac{152.66}{Re} \right) \right]^{-2} \quad (6)$$

2.3 팽창장치 모델링

팽창장치 모델링은 EEV의 냉매유량을 예측할 수 있는 Park et al.이 제안한 식 (7), (8)과 같은 형태의 경험적 유량상관식을 사용하였다. Table 6은 식(8)의 각 무차원 항의 변수를 나타낸다[15].

Table 6. Dimensionless Pi-groups

Group	Parameter	Group	Parameter
π_1	$\frac{P_i - P_d}{P_{cr}}$	π_4	$\frac{v_g}{v_f}$
π_2	$\frac{\Delta T_{sc}}{T_{cr}}$	π_5	$\frac{\sigma}{DP_i}$
π_3	$\frac{L}{D}$	π_6	$\frac{D_e}{D}$

$$\dot{m} = \frac{C_d A \sqrt{2\rho_f(P_i - P_s)}}{3600} \quad (7)$$

$$C_d = 0.0934\pi_1^{0.0697}\pi_2^{-0.0286}\pi_3^{-0.019}\pi_4^{0.213}\pi_5^{0.010}\pi_6^{0.655} \quad (8)$$

2.4 증발기 모델링

증발기는 PF 타입 열교환기를 차분하여 순차적으로 계산하였다. Table 7은 증발기의 제원을 나타낸다. 냉매의 열전달 계수는 단상유동은 Dittus and Boelter의 상관식을 사용하였고, 이상유동은 Gungor and Wonterton의 상관식을 사용하였다[16]. 압력강하는 응축기와 동일하게 이상상태에서 Newell and Shah의 상관식을 사용하였고, 단상상태에서는 Fang의 상관식을 사용하였다 [12,13].

Table 7. Specification of evaporator in refrigerator trucks

Variable		Input value
Evaporator size	Width	706 mm
	Height	595 mm
	Depth	190 mm

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 R404A 냉매를 적용한 기존 엔진구동 방식의 Bock사 FKX20 압축기와 R454C를 적용한 전기구동 방식의 Hitachi사 FL300DL 압축기를 적용하여 냉동사이클 시뮬레이션을 실시하였다. 응축온도 54.4℃와 증발온도 -23.3℃ 조건에서 냉동사이클 시뮬레이션을 수행한 결과 값을 요약하여 Table 8과 Fig. 6에 나타내었다.

Table 8. Simulation results of refrigeration cycle for refrigerator trucks

Refrigerants	R404A	R454C
Cooling capacity	2.316 kW	3.035 kW
Comp. power consumption	2.007 kW	2.603 kW
COP	1.154	1.166

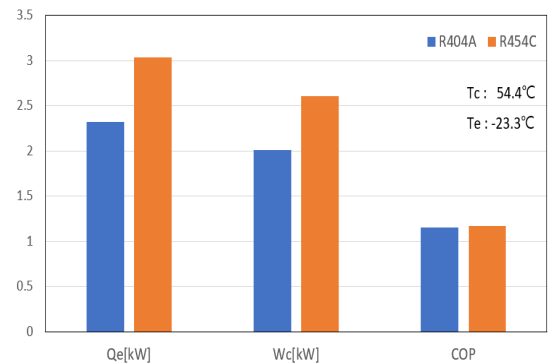


Fig. 6. Simulation results with R404A and R454C.

R454C를 적용한 냉동사이클 시스템이 R404A 시스템 보다 냉방용량이 31.0% 더 크게 나타났다. 그러나, 시스템에 흐르는 냉매유량도 증가하고 압축기 소요 동력도 29.7% 정도 더 크게 증가하여 시스템 COP는 1% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 앞서 냉매의 열역학적 물성치만 고려하여 냉동사이클을 계산한 Table 2의 성능 특성과 유사한 경향을 나타내었으나, 압축기의 성능 특성이 반영되어 압축기 소비동력 증가로 인한 시스템 COP는 전체적으로 낮게 나타났다.

냉동탑차는 냉동 또는 냉장 식품 배송에 따라 다양한 증발온도의 설정이 필요하기 때문에 본 연구에서는 증발 온도 변화에 따른 성능 특성을 분석하였다.

Fig. 7은 증발온도 변화에 따른 냉방용량 변화를 나타낸다. 냉동식품을 배송할 경우 저온 설정이 필요하고, 냉

장식품을 배송할 경우에는 증온 설정이 필요하다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 -10°C 이하 저온에서는 R454C 시스템의 냉방용량이 R404A 시스템보다 최대 26.4%까지 크게 나타났다. 이것은 저온에서의 R454C 냉매의 증발 잠열이 R404A 냉매보다 큰 열역학적 물성치가 우수하기 때문인 것으로 분석되었다. -10°C 이상의 영역에서는 점차로 R454C와 R404A의 냉방용량의 차가 줄어들다가 -5°C 이상의 구간에서는 오히려 R404C 냉방용량이 4.1% 더 높게 나타났다. 이것은 증온 이상의 냉장식품을 배송할 때는 기존의 R404A 시스템이 냉방용량 측면에서는 더 유리한 것을 알 수 있다.

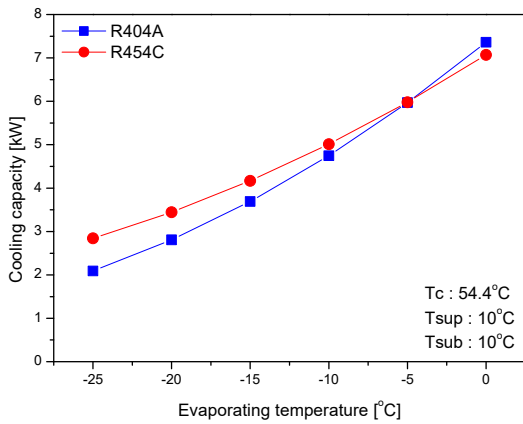


Fig. 7. Cooling capacity with the variation of evaporator temperature.

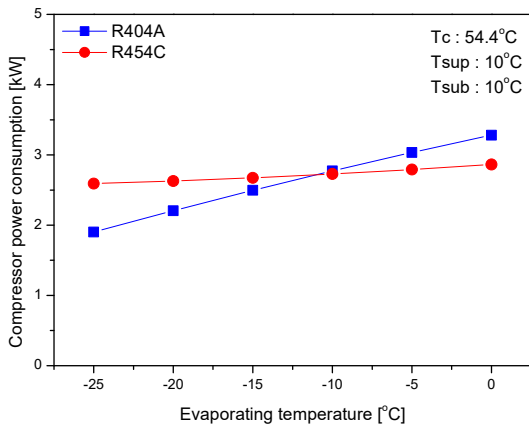


Fig. 8. Compressor power consumption with the variation of evaporator temperature.

Fig. 8은 증발온도 변화에 따른 압축기 소비동력의 변화를 나타낸다. 압축기의 소비동력은 냉동 및 냉장시스

템의 효율에 영향을 주는 요소이다. 압축기의 소비동력은 -10°C 이하 저온에서는 R454C 시스템이 R404A 시스템보다 36.2% 높게 나타났고, -10°C 이상의 증온 영역에서는 R404A 시스템이 최대 12.8% 높게 나타났다. 이것은 증발온도가 상승할수록 압축기 입출구에서의 압축비가 감소하면서 시스템에 흐르는 냉매 질량유량의 증가로 인해 압축기의 소비동력이 증가하는데 R404A 시스템이 R454C 시스템과 비교하여 증가량이 더 크게 나타났기 때문이다.

Fig. 9는 증발온도 변화에 따른 시스템 COP의 변화를 나타낸다. 앞서 Fig. 7과 8에서 나타난 바와 같이 증발온도가 상승할수록 냉방용량과 압축기 소비동력도 증가한다. -25°C 에서는 R454C 시스템이 냉방용량과 압축기 소비동력이 더 크게 나타났으나, 증발온도가 상승할수록 전반적으로 R404A 시스템의 증가율이 더 크게 나타나서, 0°C 에서는 R404A 시스템의 냉방용량과 압축기 소비동력이 크게 나타났다. 특히, R404A 시스템의 압축기 소비동력의 증가가 R454C 시스템보다 더 큰 증가를 나타내어 시스템 COP 증가는 R454C 시스템이 점차 더 크게 나타났고 0°C 에서 최대 9%의 차이를 나타내었다.

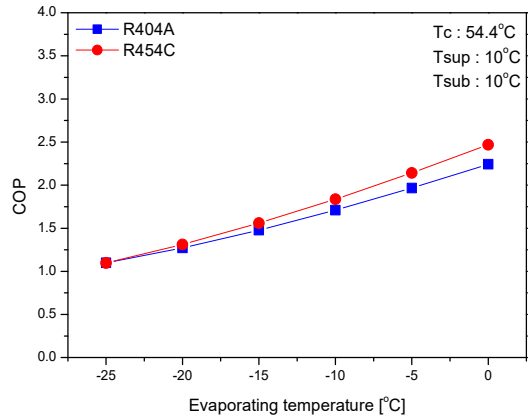


Fig. 9. COP with the variation of evaporator temperature.

Table 9는 증발온도 변화에 따른 R404A와 R454C 시스템의 질량유량과 압축기 토출온도 변화를 비교하여 나타내었다. 시스템에 흐르는 질량유량은 R404A가 높게 나타났는데, 증발온도가 낮을수록 그 차이가 32%까지 더 크게 나타났다. 그 이유는 압축기 입구에서 R454C 냉매의 비체적이 크고, 증발온도가 낮을수록 압축기 입구에서 비체적의 차이가 커지기 때문인 것으로 분석되었다. 또한, 압축기 토출부의 온도는 증발온도가 낮을수록

R454C 시스템이 최대 14.7℃까지 크게 나타났다. 이로 인하여 압축기의 소비동력이 급격히 증가하고, 시스템의 성능이 감소하는 것으로 분석되었다.

Table 9. Comparison of refrigeration cycle performance

Evaporator temperature	Items	Refrigerants	
		R404A	R454C
-20℃	Mass flow rate(kg/s)	0.03178	0.03037
	Comp. outlet temp.	90.92	105.6
-10℃	Mass flow rate	0.05058	0.04194
	Comp. outlet temp.	84.08	93.59
0℃	Mass flow rate	0.07437	0.05642
	Comp. outlet temp.	80.23	87.39

4. 결론

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 SigmaPlot과 EES를 활용하여 소형 상용차용 냉동탑차 시스템을 모델링하여 냉동사이클 시뮬레이션을 다음과 같이 수행하였다.

- 1) 기존의 엔진구동 방식의 압축기를 적용한 R404A 시스템과 대체 시스템인 전기구동 방식의 압축기를 적용한 R454C 시스템에 대하여 냉동사이클 해석을 수행하였다.
- 2) 증발온도가 -25~0℃까지 변화할 때 R404A 시스템의 냉방용량과 압축기 소비동력은 각각 251.9%와 72.6% 증가하였고, R454C 시스템의 냉방용량과 압축기 소비동력은 각각 148.5%와 10.5% 증가하였다.
- 3) 소형 상용차용 내연기관 냉동탑차의 전환 시스템으로 전기 상용차 냉동탑차에 대체냉매 R454C를 적용할 경우 기존의 R404A 시스템보다 전반적으로 성능이 우수한 것으로 나타났다.

References

[1] C. Myung, *Experimental Study on Performance Characteristics of Refrigerating Cycle in the Refrigerator Car*, Master's thesis, Chosun University, Gwangju, Korea, pp.5-10. 2012.

[2] S. Kang, D. Lee, S. Lee, "Experimental Study on Energy Reduction Effect of Latent Heat Storage Type Refrigerator Truck", *Proceedings of the SAREK 2016 Summer Annual Conference*, pp.839-842. 2016.

[3] W. Kang, Y. Shin, H. Cho, "Performance Comparison of a Refrigeration System in the Refrigeration Truck using R134a and R1234yf", *Proceedings of the SAREK 2016 Winter Annual Conference*, pp.383-386. 2016.

[4] J. Kim, S. Kwon, C. Han, H. Kim, Y. Kim, Y. Kim, "Performance Improvement of a Refrigeration System for an Eco-friendly Refrigerator Truck by Optimizing Heat Exchanger Designs", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.35, No.6, pp.275-285, 2023. DOI: <https://doi.org/10.6110/KJACR.2023.35.6.275>

[5] D. H. Park, S. B. Lee, N. H. Kim, "A Study on the Condensation Heat Transfer of R-404A Alternative Refrigerants R-455A and R-454C in a Smooth Tube", *Proceedings of the SAREK 2019 Summer Annual Conference*, pp.48-50. 2019.

[6] Engineering Equation Solver(EES) Ver 10.834, F-Chart software, 2020.

[7] VAP for mobile applicatons, <https://vap.bock.de/mobileapplication/Pages/ProductMobile.aspx?ItemObjectID=FKBAHN&Size=FK20&ProductID=1631>

[8] Hitachi compressor selector, <https://www.apps.selectionnavigator.com/app-ichcs/>

[9] S. K. Fisher and C. K. Rice, The Oak Ridge heat pump models: I. A steady state computer design model for air to air heat pumps, ORNL/CON-80/R1, Oak Ridge National Lab., 1980.

[10] P. M. Dabiri and C. K. Rice, "A compressor simulation method with corrections for the level of suction gas superheat", *ASHRAE Trans.*, Vol.87, 1981.

[11] A. Cavallini, L. Doretti, N. Klammsteiner, G. A. Longo, and L. Rossetto, "Condensation of New Refrigerants Inside Smooth and Enhanced Tubes", *International Congress of Refrigeration*, Vol.4, pp.105-114, 1995.

[12] C. C. Wang, C. B. Chiou, and D. C. Lu, "Single-phase Heat Transfer and Flow Friction Correlations for Microfin Tubes", *International Journal Heat and Fluid Flow*, Vol.17, pp. 500-508, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(96\)00048-3](https://doi.org/10.1016/0142-727X(96)00048-3)

[13] T. A. Newell and R. K. Shar, "Refrigerant Heat Transfer, Pressure Drop, and Void Fraction Effects in Microfin Tubes", *Proc. 2nd Int. Symp. On Two-Phase Flow and Experimentation*, Vol.3, pp. 1623-1639, 1999.

[14] X. Fang, Y. Xu, and Z. Zhou, "New Correlations of Single-phase Friction Factor for Turbulent Pipe Flow and Evaluation of Existing Single-phase Friction Factor Correlations", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, pp. 897-902, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.12.019>

[15] C. S. Park, H. H. Cho, Y. T. Lee, and Y. C. Kim, "Mass Flow Characteristics and Empirical Modeling of R22 and R410A Flowing Through Electronic Expansion Valves", *International Journal of Refrigeration*, Vol.30, 99. 1404-1407, 2007.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2007.03.011>

- [16] K. E. and H. S. Winterton, "Sensible heat and friction characteristics of plate fin-and-tube heat exchangers having plane fins", *International Journal of Refrigeration*, Vol.19, pp. 223-230, 1996.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(96\)00021-7](https://doi.org/10.1016/0140-7007(96)00021-7)
-

박 차 식(Cha-Sik Park)

[정회원]



- 1995년 2월 : 고려대학교 기계공학과 (공학사)
- 1997년 8월 : 고려대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 8월 : 고려대학교 기계공학과 열공학분야 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 2003년 2월 : 기아자동차 연구소 연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 미래자동차공학과 교수

〈관심분야〉

열펌프, 공조설비, 신재생에너지, 통합열관리시스템