

R290 냉매 적용 자동차용 Secondary Loop 시스템의 성능특성에 대한 해석적 연구

김진영, 박차식*

호서대학교 기계자동차공학부 대학원, *호서대학교 기계자동차공학부
cspark@hoseo.edu

A simulation on performance characteristics of secondary loop system for an electric vehicle with R290

Jin-Young Kim, Cha-Sik Park*

Graduate school of Mechanical and Automotive Engineering, Hoseo University

*School of Mechanical and Automotive Engineering, Hoseo University

요 약

본 연구에서는 전기자동차 통합 열관리 시스템에 R290 냉매를 적용하기 위하여 SL 시스템을 기존의 DX 시스템과 냉동사이클 성능특성을 비교 분석하였다. 각 시스템에 흐르는 냉매유량을 변화시켜 냉방용량은 6.7 kW, 난방용량은 7.0 kW로 고정하여 냉동사이클 성능특성을 분석하였다. 냉방 COP는 R1234yf DX 시스템과 비교하여 SL 시스템에서 R1234yf와 R290에서 각각 29.4%와 26.6% 냉방 COP가 저하되는 것으로 나타났고, 난방 COP는 SL 시스템에서 R1234yf와 R290에서 각각 20.9%와 18.8% 난방 COP가 저하되는 것으로 나타났다. 그러나, R290 냉매의 열역학적 특성상 응축기와 증발기에서의 잠열구간이 R1234yf와 비교하여 상대적으로 커서 냉매유량을 50%이상 크게 감소시킬 수가 있어 R290 냉매 적용시 시스템의 주요 부품의 크기를 크게 줄일 수 있을 것으로 분석되었다.

1. 서론

지구온난화와 대기환경 오염의 문제로 화석연료를 사용하는 내연기관 자동차의 규제가 점점 강화되고 있다. 따라서 자동차 제조업체는 내연기관에서 전기 자동차로의 양산체제로 전환하고 있으며 향후 수년내에는 주 생산차종이 전기 자동차로 이루어질 전망이다. 내연기관에서 전기 자동차로 전환에 따라 자동차의 일부 부품은 삭제되거나 새로운 시스템의 개발이 필요하게 되는데, 자동차 공조 시스템 역시 새로운 시스템의 개발이 필요한 시점이다. 내연기관 자동차에는 엔진이 장착되어 있어 엔진 냉각을 위한 냉각수 일부를 열원으로 사용하여 난방용 열원으로 충분하였으나, 전기 자동차의 경우에는 자동차 엔진의 부재로 난방 열원 확보가 어려워 이에 대한 대안이 필요하다. 반면에 전기 자동차에는 배터리가 장착되어 있어, 배터리의 최적화를 위한 분위기 온도 제어를 위해 다양한 방법으로 배터리 열관리에 대한 연구를 진행하여 왔으나, 최근에는 배터리와 구동계 냉각에 대한 열관리를 공조시스템과 통합하기 위한 전기자동차 통합 열관리 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Fig. 1은 전기자동차 통합 열관리 시스템에 대한 기본적인 개념도를 나타낸다.

현재 자동차 공조시스템에 적용되는 냉매는 R1234yf 로서 HFO 계열의 냉매를 사용한다. HFC 계열의 R134a 냉매는 2017년 이후부터 지구온난화 문제로 인하여 점차 사용을 규제하고 있어, GWP가 150 이하인 대체 냉매를 사용한 자동차 공조시스템 적용이 진행되고 있다[1]. R1234yf 냉매는 R134a 냉매와 비교적 비슷한 열역학적 특성을 가지고 있으나, 동일한 포화온도에서 R1234yf가 R134a 냉매와 비교하여 증발잠열이 작아 동일한 운전조건에서 R134a 냉매보다 성능이 다소 낮게 나타난다[2]. 이러한 이유로 최근에는 R1234yf를 대체 적용할 수 있는 냉매에 대한 연구가 이루어지고 있다. 내연기관에서 전기 자동차로 전환하는 과정에 앞서 언급한 바와 같

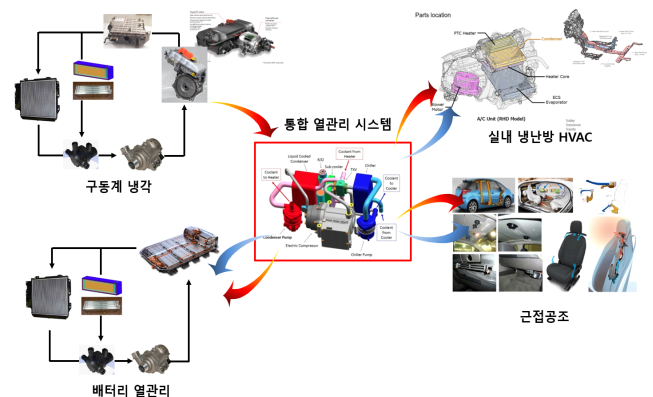


Fig. 1 전기자동차 통합 열관리 시스템

Table 1 Comparison R1234yf with R290 refrigerant

Refrigerants	R1234yf	R290
GWP	3	3
Safety	A2L	A3
Cost	66.8 \$/kg	3.1 \$/kg
Heat of vaporization at 0℃	163.3 kJ/kg	374.9 kJ/kg
Heat of vaporization at 60℃	110.4 kJ/kg	259.2 kJ/kg

이 통합 열관리 시스템 적용의 필요성에 따라 자동차 공조시스템을 구성하는 시스템이 자동차의 Cabin 공간에서 PE 공간으로 이동이 가능하여 가연성을 띄고 있지만 열역학적 물성치가 우수한 다양한 냉매에 대한 적극적인 검토가 가능하게 되었다. 그 가운데 R290 냉매는 가연성을 띄고 있지만 가격이 저렴하고 저온에서의 난방성능이 우수하여 전기자동차의 통합열관리 시스템을 위해 적용할 수 있는 냉매로 검토되고 있다[3,4]. Table 1은 R1234yf와 R290 냉매의 특성을 비교한 표이다. R290은 R1234yf 냉매보다 가격이 저렴하고 응축과 증발온도 조건에서 잠열이 훨씬 크게 나타나는 장점이 있다.

본 연구에서는 전기자동차의 통합 열관리 시스템을 위한 R290 냉매의 적용가능성을 검토하기 위하여 SL(secondary loop) 시스템을 기존의 DX(direct expansion) 시스템과 냉동사이클 성능특성을 비교하여 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 DX와 SL 냉동사이클 해석을 위하여 EES(Engineering Equation Solver, Ver10)를 사용하였다. 모델링을 위한 기본 가정은 다음과 같다.

- 1) 냉매조건은 열역학적으로 준평형상태이다.
- 2) 팽창장치내 유동은 등엔탈피 과정이다.
- 3) 압축기 효율은 등엔트로피 효율 70%로 가정하였다.
- 4) 응축기, 증발기, 그리고 배관 내에서 압력강하는 무시한다.
- 5) 압축기 입구 과열도는 10℃, 응축기 출구 과냉도는 10℃로 설정하였다.

Table 2 Operation conditions for simulation

Mode		Direct expansion system	Secondary loop system
Cooling	Evap. temp. (℃)	5	-5
	Cond. temp. (℃)	50	50
	Cooling capacity (kW)	6.7 kW (Evaporator)	6.7 kW (Cabin cooler)
Heating	Evap. temp. (℃)	-10	-10
	Cond. temp. (℃)	45	55
	Heating capacity (kW)	7.0 kW (Condenser)	7.0 kW (Cabin Heater)

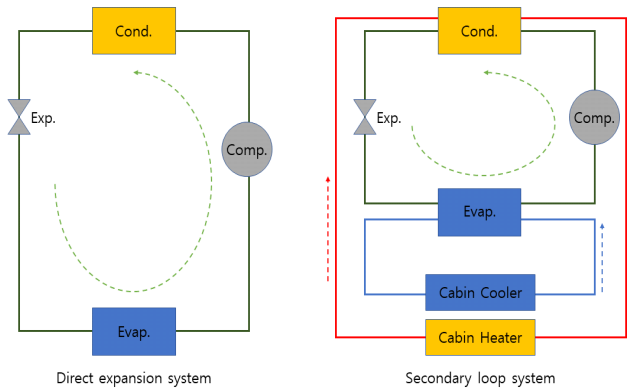


Fig. 2 Schematic diagram of direct expansion system and secondary loop system.

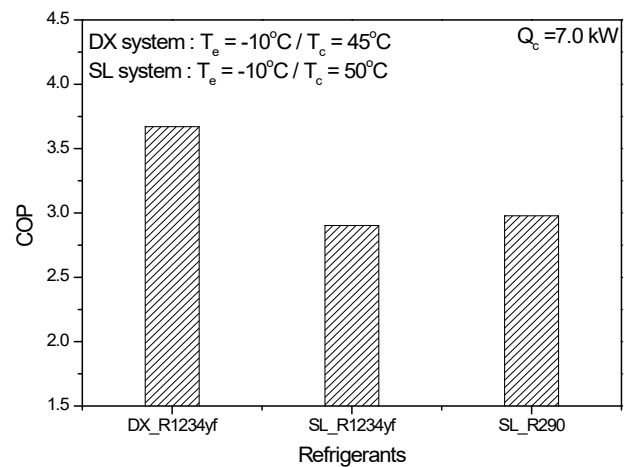
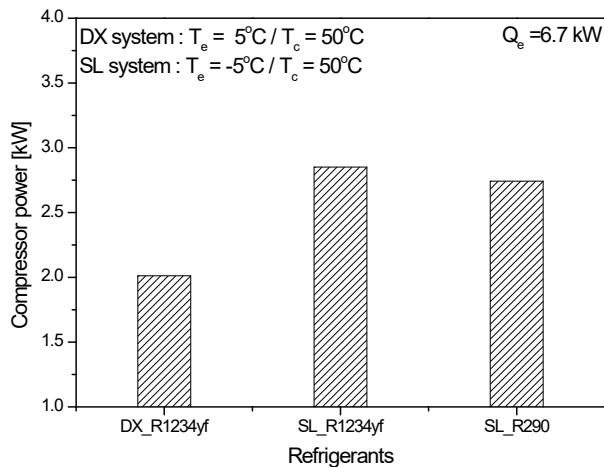
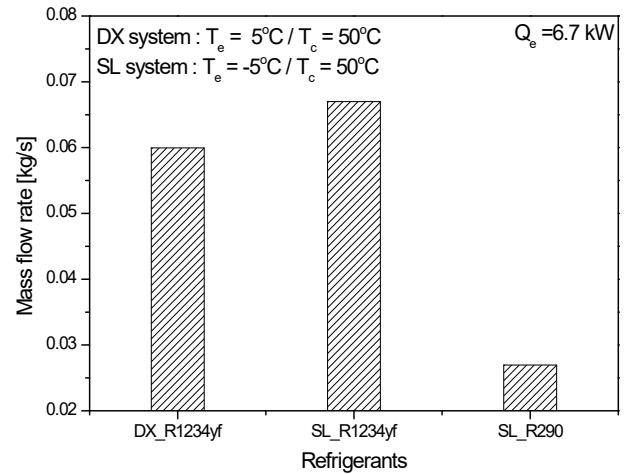
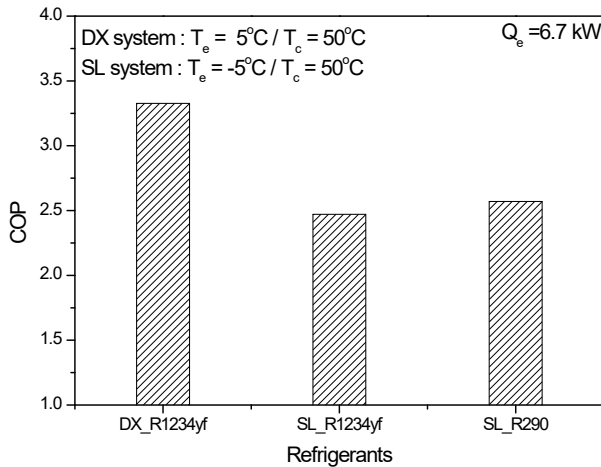
Fig. 2는 해석을 위한 DX 시스템과 SL 시스템의 개략도를 나타낸다. Table 2는 시스템의 해석을 위한 냉방과 난방시 운전조건을 나타낸다. DX 시스템은 냉방시 증발온도와 응축온도는 5℃와 50℃로 설정하였고, 난방시 증발온도와 응축온도는 -10℃와 45℃로 설정하였다. SL 시스템은 냉방시 증발온도와 응축온도는 -5℃와 50℃로 DX 시스템에 비하여 증발온도를 -10℃ 낮게 설정하였고, 난방시 증발온도와 응축온도는 -10℃와 55℃로 DX 시스템에 비하여 응축온도를 10℃ 높게 설정하여 해석하였다. 또한, DX 시스템은 냉방과 난방시 증발기와 응축기의 용량은 각각 6.7 kW와 7.0 kW로 고정하여 해석을 하였고, SL 시스템은 냉방과 난방시에 2차유체와 공기가 열교환이 이루어지는 Cabin cooler와 Cabin heater의 용량이 6.7kW와 7.0kW가 되도록 고정하여 해석을 하였다. Cabin cooler와 Cabin heater에서 열손실은 5%로 설정하였다.

3. 해석 결과

본 연구에서는 R1234yf와 R290 냉매에 대해서 먼저 DX 시스템의 냉동사이클 성능 해석을 하고, SL 시스템의 냉동사이클 성능과 비교하여 냉난방 성능특성을 비교 분석하였다.

Fig. 3은 DX 시스템과 SL 시스템의 R1234yf와 R290 냉매의 냉방 COP를 비교하여 나타낸다. DX 시스템은 응축온도와 증발온도를 각각 50℃와 5℃로 고정하고, 증발기에서 냉방능력을 6.7 kW가 되도록 냉매 질량유량을 변화시키면서 해석하였다. SL 시스템은 cabin cooler에서 2차유체의 현열 열교환을 고려하여 증발온도를 -5℃로 고정하고, cabin cooler에서의 냉방능력을 6.7 kW가 되도록 냉매의 질량유량을 변화시키면서 냉방 COP를 구하였다. R1234yf DX 시스템과 비교하여 R1234yf와 R290 SL 시스템은 각각 29.4%와 26.6% 냉방 COP가 저하되는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 DX 시스템과 SL 시스템의 냉동사이클 압축기 소



비동력을 나타낸다. R1234yf DX 시스템은 압축기 소비동력이 2.01 kW로 나타났고, SL 시스템은 R1234yf와 R290에서 각각 2.85 kW와 2.74 kW를 나타내었다. SL 시스템에서는 고단과 저단의 압력차가 DX 시스템과 비교하여 더 높게 운전되어 전체적으로 압축기 소비동력이 26-29% 높게 나타났다.

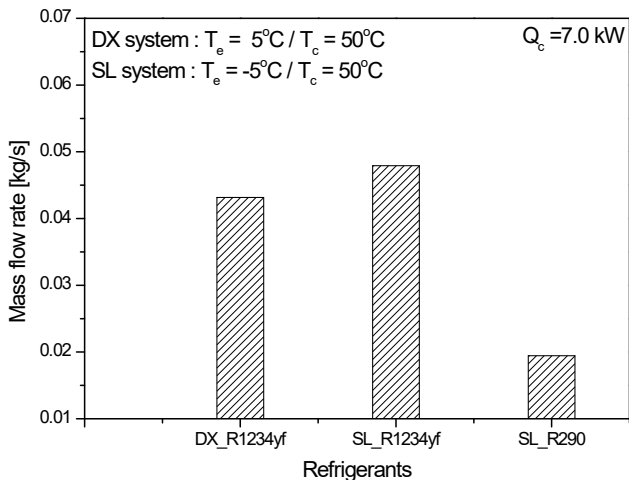
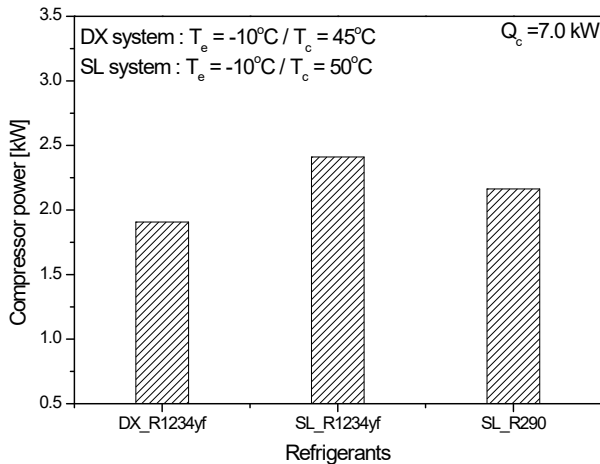
Fig. 5는 시스템에 흐르는 질량유량을 나타낸다. 증발기에서의 잠열이 우수한 R290 시스템이 R1234yf 시스템과 비교하여 질량유량이 58-65% 낮게 나타났다. 시스템에 흐르는 질량유량이 적으면 열교환기의 크기를 줄일 수 있고, 압축기 변위량을 작게 설계할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 6은 DX 시스템과 SL 시스템의 난방 COP를 비교하여 나타낸다. DX 시스템은 응축온도와 증발온도를 각각 45°C와 -10°C로 고정하고, 응축기에서의 난방능력을 7.0 kW가 되도록 냉매 질량유량을 변화시키면서 해석하였다. SL 시스템은 cabin heater에서 2차유체의 현열 열교환을 고려하여 증발온

도를 55°C로 고정하고, cabin heater에서 난방능력을 7.0 kW가 되도록 냉매 질량유량을 변화시키면서 난방 COP를 구하였다. R1234yf DX 시스템과 비교하여 R1234yf와 R290 SL 시스템은 각각 20.9%와 18.8% 난방 COP가 저하되는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 DX 시스템과 SL 시스템의 냉동사이클 압축기 소비동력을 나타낸다. R1234yf DX 시스템은 압축기 소비동력이 1.91 kW로 나타났고, SL 시스템은 R1234yf와 R290에서 각각 2.41 kW와 2.2 kW를 나타내었다. SL 시스템에서는 고단과 저단의 압력차가 DX 시스템과 비교하여 더 높게 운전되어 전체적으로 압축기 소비동력이 23-26% 높게 나타났다.

Fig. 8은 시스템에 흐르는 질량유량을 나타낸다. 응축기에서의 잠열이 우수한 R290 시스템이 R1234yf 시스템과 비교하여 질량유량이 55-59% 낮게 나타났다.



4. 결론

본 연구에서는 전기자동차의 통합열관리를 위한 R290 냉매의 적용가능성을 검토하기 위하여 SL 시스템을 기존의 DX 시스템과 성능을 비교 분석하였다. R1234yf DX 시스템과 SL 시스템의 성능특성을 비교한 결과 냉방과 난방에서 모두 성능이 저하되는 것으로 나타났다. 이는 2차유체가 흐르는 cabin cooler와 cabin heater에서의 현열열교환을 고려하여 1차측의 운전조건을 DX 시스템에 비하여 가혹한 조건으로 운전하였기 때문이고, R290 냉매를 적용하였을 경우, R1234yf 보다는 성능이 높게 나타났다. 특히, R290 냉매의 열역학적 특성상 응축기와 증발기에서의 잠열구간이 R1234yf와 비교하여 상대적으로 커서 냉매유량을 크게 감소시킬 수가 있어

R290 냉매시스템 적용이 공조시스템의 크기를 크게 줄일 수 있을 것으로 분석되었다.

후 기

본 연구는 2021년도 한국산업기술진흥원의 수소에너지 Open Lab 사업의 지원(과제번호 P0015132)을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고문헌

- [1] M. Koban, "HFO-1234yf low GWP refrigerant LCCP analysis", Proceedings of SAE world congress, Detroit, USA, 2009.
- [2] H. Cho, H. Lee, C. Park, "Study on the performance improvement for an automobile air conditioning system using alternative refrigerant R1234yf", Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.25, No.4, pp.201-207, 2013.
- [3] N. Agrawal, S. Patil, P. Nanda, "Experimental Studies of a domestic refrigerator using R290/R600a zeotropic blends", Energy Procedia, Vol.109, pp. 425-430, 2017.
- [4] Q. Chen, J. Yu, G. Yan, "Performance analysis of a modified zeotropic mixture(R290/R600) refrigeration cycle with internal subcooler for freezer applications", Applied Thermal Engineering, Vol. 108, pp.172-180, 2016.