

## 냉매 R1234yf 적용 자동차용 에어컨 Drop-in 성능 특성

조 홍 현, 이 호 성\*, 박 차 식\*\*†

조선대학교 기계공학과, \*한국자동차부품연구원, \*\*호서대학교 기계공학부

### Performance Characteristics of a Drop-in System for a Mobile Air Conditioner Using Refrigerant R1234yf

Honghyun Cho, Hoseong Lee\*, Chasik Park\*\*†

Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju 510-759, Korea

\*Division of the Thermal Management System Research Center, KATECH, Cheonan 330-912, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

(Received July 4, 2012; revision received October 17, 2012)

**ABSTRACT:** In this study, the performance of mobile air conditioner(MAC) systems to which the refrigerants R134a and R1234yf were used was evaluated to compare the characteristic of automotive refrigeration cycles with refrigerant. The experimental setup of a MAC consists of an belt driven compressor, a condenser, an evaporator and a block type thermal expansion valve. The drop-in test on MAC were carried out under variable compressor speed from 800 to 2500 rpm. Performance test by using R1234yf and R134a in the same system revealed low the charge amount and mass flow rates for using R1234yf, that is, up to 10% and 17%, respectively. The compressor discharge temperature of R1234yf is 8°C lower than that of R134a. The cooling capacity with R1234yf system decreased by 4~7% compared with R134a system. In addition, The COP of R1234yf system is lower 3~4% than that of R134a system.

**Key words:** Alternative refrigerant(대체냉매), R1234yf(R1234yf), GWP(지구온난화지수), Mass flow rate(질량유량), COP(성능계수)

#### 기 호 설 명

$COP$  : 성적계수  
 $h$  : 엔탈피 [kJ/kg]  
 $Q$  : 냉방용량 [kW]  
 $\dot{V}$  : 풍량 [m<sup>3</sup>/h]  
 $W$  : 압축기 소요동력 [kW]

#### 그리스 문자

$\nu$  : 비체적 [m<sup>3</sup>/kg]

#### 하첨자

$air$  : 공기  
 $comp$  : 압축기  
 $e$  : 증발기  
 $in$  : 입구  
 $out$  : 출구

#### 1. 서 론

온실가스에 의한 지구온난화 문제에 공동으로 대처하기 위하여 전 세계적으로 환경규제를 하는 국제협약이 이루어지고 있으며, 그 중의 하나가 교토

† Corresponding author

Tel.: +82-41-540-5815; fax: +82-41-540-5818

E-mail address: cspark@hoseo.edu

의정서에서 채택한 기후변화협약인 온실가스 사용에 대한 규제이다.<sup>(1)</sup> 교토의정서에 의하면 지구온난화 방지 규제 대상가스를 화석연료 연소에 따른 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>와 기타 화학공정 등의 물질인 N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub>의 6종으로 정하고, 1차 공약기간인 2008년부터 2012년까지 1990년 대비 5.2% 감축을 결정하였으며 우리나라도 이에 대한 준비가 필요하다.

유럽 연합은 자동차용 에어컨 시스템에서 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)가 150 이상인 냉매를 사용하는 자동차에 대하여 형식승인, 운행, 판매금지 법안을 발효하였다. 구체적으로 2011년부터 신규승인 차량과 2017년부터 생산되는 모든 신차는 지구온난화지수가 150 이상인 차량은 판매를 금지하는 법안을 통과시켰다. 따라서 현재 생산되는 차량에 적용중인 냉매 R134a에 대한 적용이 불가하게 되므로 지구온난화지수가 150 이하인 대체 냉매 적용을 위하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

지금까지 개발된 냉매중에 R134a를 대체하고 지구온난화 방지를 위한 환경규제를 만족할 수 있는 냉매는 크게 R744, R152a, R1234yf로 나눌 수가 있다. R744(CO<sub>2</sub>)는 자연냉매로서 오존파괴지수(Ozone Depletion potential, ODP)가 0이고, 지구온난화지수가 1인 우수한 대체냉매 조건을 갖추고 있으나 열역학적 특성상 작동범위가 고압조건에서 운전되므로 시스템의 신뢰성 확보가 매우 중요하며 기존 에어컨시스템과 비교하여 사양이 대폭 변경되고 원가가 크게 상승되는 문제가 있다. R152a는 높은 잠열, 낮은 동점성 계수를 보유하고 있어 열전달 및 열역학적 성능이 매우 우수하며 오존파괴지수가 0이고 지구온난화 지수가 124로 지구온난화 협약이행을 만족시키는 대체냉매이다. 그러나 이 냉매는 약가연성을 가지고 있기 때문에 미국환경청(EPA)은 R152a가 대체냉매로 채택되기 위해서는 차량 실내로 냉매유입이 방지될 수 있는 대책을 마련할 경우 대체냉매로 사용가능하다는 조건부적용 승인을 하였다. 마지막으로 R1234yf 냉매는 화학 냉매로 지구온난화지수가 4이고, 오존층 파괴지수도 0이어서 유럽 환경법규에서 요구하는 GWP 150 이하를 만족하는 환경 친화적인 냉매이다. 또한, 독성이 없고 대기 중에서 분해되는 속도가 기존 R134a 냉매보다 훨씬 빠른 시간에 분해되어 없어지는 것으로 보고되어 있다.<sup>(2)</sup> 특히, 현재 자동차용 냉매로 사용중인 R134a와도 열역학적 특성이 비슷한 것으로 알려져 있으나 비교적 최근에 개발되어 가격이 고가이며 성능평가

에 대한 연구가 많지 않은 실정이다.

Park et al.<sup>(3)</sup>은 R1234yf와 R134a에 R134a를 혼합하여 난방성능과 냉방성능을 평가하고 그 결과를 R134a 성능과 비교하였다. 냉방의 경우 4.0% 정도 냉방용량이 감소하였고 난방의 경우 동등한 난방용량을 나타내었다. Han et al.<sup>(4)</sup>은 가정용 냉장고에 R1234yf를 적용하여 성능 최적화에 대한 실험적 연구를 수행하였다. R134a 시스템과 비교하여 냉매충전량은 비슷한 수준을 나타내었고 냉각속도 개선을 위하여 모세관경을 변경하여 최적화된 시스템을 구성하였다. Lee et al.<sup>(5)</sup>은 대체냉매 R1234yf용 압축기 개발과 관련하여 R134a 대비 흡입 밀도 증가에 의한 냉매유량증가로 압축기 흡입 및 토출 밸브에서의 압력손실이 증가한다고 보고하였다. Del Col et al.<sup>(6)</sup>과 Longo<sup>(7)</sup>는 열교환기 내에서 열전달 계수와 압력강하를 측정하는 실험을 수행하여 R1234yf와 R134a 냉매의 열역학적 특성을 분석하였다. Park et al.<sup>(8)</sup>은 냉매 R134a와 R1234yf의 외부 응축 열전달계수를 측정하여 R1234yf의 대체냉매로서의 가능성을 확인하였다. Zilio et al.<sup>(9)</sup>은 자동차용 공조 시스템에 R1234yf 냉매를 적용하여 기존의 R134a 냉매의 사이클 특성을 비교하고, 성능 개선을 위하여 팽창장치인 TXV와 가변용량 압축기의 내부조절밸브를 변경하여 압축기 토출온도와 성능을 개선하였다. Lee et al.<sup>(10)</sup>은 냉매 R134a와 R1234yf를 각각 적용하여 물 대 냉매 bench tester에 성능 평가를 실시하였는데, 냉매 R1234yf의 냉방 COP가 R134a과 비교하여 0.8~2.7% 낮은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 기존의 R134a 에어컨 시스템에 R1234yf 냉매를 Drop-in 성능 평가를 실시하여 두 냉매의 냉동 사이클 특성을 분석하였다. 이를 통하여 향후 R1234yf 적용 자동차용 공조시스템의 사이클 최적화를 위한 설계 변수에 참고하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

대체냉매 R1234yf는 기존 R134a 냉매 적용 에어컨 시스템과 작동 압력범위도 비슷하고 동일한 냉매오일(POE Oil)의 적용이 가능하므로 현재 양산중인 기존 공조시스템에 Drop-in 평가를 수행하였다.

성능평가는 먼저 R134a 냉매를 실험장치의 시스템에 충전하여 냉매 최적충전량 실험과 압축기 회전속도에 따른 기본 성능 평가를 수행하였다. 기존 R134a 냉매에 대한 성능평가가 완료되면 시스템 내

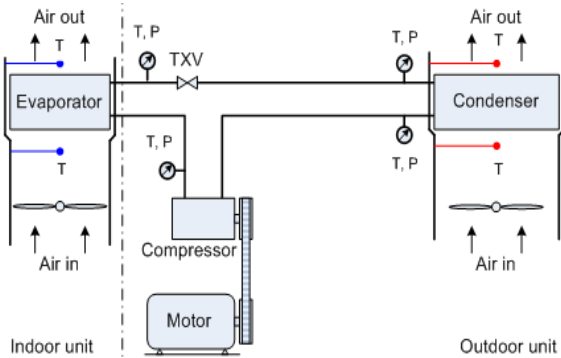


Fig. 1 Experimental setup.

부를 진공으로 만들고 냉매 R1234yf를 다시 주입하면서 동일한 실험을 반복하였다. 냉매의 충전은 증발기 출구와 압축기 입구사이에 충전포트를 설치하고 메니폴드 케이지를 이용하여 냉매저장 용기와 연결하여 밸브를 열어 충전하였다. 이때 냉매저장 용기의 무게를 전자저울로 무게를 측정하여 주입된 냉매의 양을 알 수 있도록 하였다.

Fig. 1은 기본 성능 평가를 위한 실험장치 개략도를 나타낸다. 사이클의 성능 측정을 위하여 실내측과 실외측의 두 개의 챔버로 나누어 벤치용 실험장치를 구성하였다. 실내측에는 증발기를 밀폐형 덕트에 삽입하여 설치하고 실외측에는 응축기와 압축기를 설치하였다. 압축기는 벨트로 전동모터와 연결하여 구동하도록 하였고 압축기의 회전수를 가변시키기 위하여 인버터를 사용하여 전동모터를 제어하였다. 압축기를 구동하기 위한 소비전력은 파워미터(power meter)를 이용하였으며 측정값의 정확도는 ±0.1%이다. 팽창장치는 블록식(block type) 온도감응 팽창밸브(TXV)를 적용하였다. 실험에 구성된 주요 부품은 국내 완성차 K사의 공조시스템을 사용하여 조립하였다. 압축기는 벨트로 전동모터와 연결하여 구동하도록 하였다. Table 1에서 본 실험 장치의 주요 제원을 나타낸다.

시스템 운전조건은 압축기의 회전수를 800~2500 rpm까지 변화시키고, 증발기와 응축기측에 유입되는 공기는 각각 27℃와 35℃로 유지하면서 시스템의 성능변화를 고찰하였다. Table 2는 본 실험에 적용한 운전조건을 나타낸다.

냉동사이클의 분석을 위하여 주요 구성기기 전후의 온도, 압력 및 유량을 측정하였다. 시스템의 온도는 T-타입의 열전대를 사용하여 측정하였으며, 정밀도는 ±0.2℃이다. 냉매압력은 디지털식 냉매압력계를 사용하였으며, 압력계의 정밀도는 전체 측정

Table 1 Component specifications

Items	Specifications
Condenser	500(W)×400(H)×12(t)
Evaporator	280(W)×200(H)×35(t)
TXV	1.5 RT
Compressor	Belt driven type

Table 2 Test conditions

Items	Conditions
Compressor speed(rpm)	800/1200/1800/2500
Indoor temperature	27℃
Outdoor temperature	35℃

범위에서 ±0.13%이다. 냉매유량은 코리올리(coriolis) 질량유량계를 사용하여 유량값을 측정하였으며, 정밀도는 측정값의 ±0.1%이다.

운전결과에 따른 증발기측의 냉방용량을 구하기 위하여 공기측 열량과 냉매측 열량을 비교하였다. 공기측과 냉매측의 에너지 평형 오차율은 식(1)을 이용하여 평가하였다. 실험 결과에 의하면 에너지 평형 오차율은 5% 이내로 분포하였다. Fig. 2는 운전조건에 따른 공기와 냉매측의 냉방용량을 측정하여 비교한 값을 나타낸다.

$$Q_{dev}(\%) = \frac{Q_{e,air} - Q_{e,ref}}{Q_{e,air}} \times 100 \quad (1)$$

냉방용량은 공기측 열량계산에 의해 산출하였으며, 실내기 입구 및 출구의 건구온도 및 습구온도에

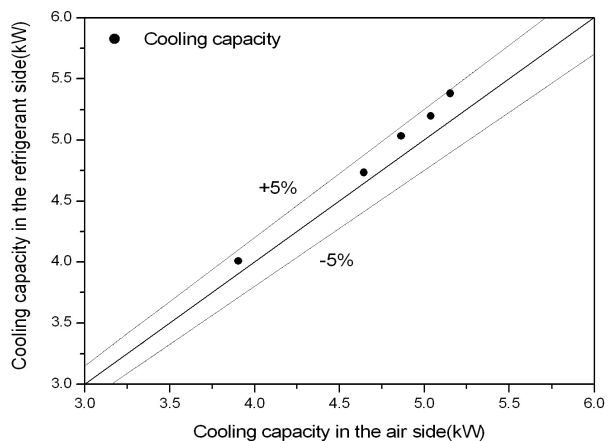


Fig. 2 Energy balance between the refrigerant and air side cooling capacity.

의해 엔탈피 차이와 노즐차압에 의해 측정된 풍량과 비체적을 이용하여 식(2)를 이용하여 구하였다. 시스템 성능계수(COP)는 압축기 소요동력에 대한 냉방용량의 비로서 식(3)을 이용하여 계산하였다.

$$Q_{e, air} = \frac{\dot{V}}{v} (h_{air, out} - h_{air, in}) \quad (2)$$

$$COP = \frac{Q_e}{W_{comp}} \quad (3)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 먼저 R134a 냉매에 대하여 충전량 실험을 통하여 냉매를 최적으로 충전하고 실험을 수행한 후, 동일한 방법으로 R1234yf 냉매를 충전하여 실험을 수행하였다. 최적 충전량은 시스템 성능계수가 최대인 곳에서 선정하였다. 냉매 R134a의 최적 충전량은 750 g으로 나타났고, R1234yf의 최적 충전량은 R134a보다 10%로 낮은 675 g에서 최적 충전량을 나타내었다. 이는 R1234yf 냉매의 열역학적 물성치인 포화액체 상태의 밀도가 R134a보다 작기 때문인 것으로 판단된다. Table 3은 본 연구에서 실험한 주요 성능 결과값을 요약하여 나타낸다.

Fig. 3은 압축기 회전수 변화에 따른 증발기와 응축기 출구에서의 압력을 나타낸다. 동일한 운전조건에서 증발기 출구에서는 냉매 R1234yf의 증발압이 6~10% 정도 높게 나타났다. 반면에 응축기 출구에서는 R1234yf 냉매의 응축압이 1~5% 정도 낮게 나타났다. 이는 R1234yf 냉매의 열역학적 물성치의 특성이 동일한 온도에서 저압측에서는 포화압력이 R134a에 비하여 높고, 고압측에서는 R134a에 비하여 낮기 때문이다.

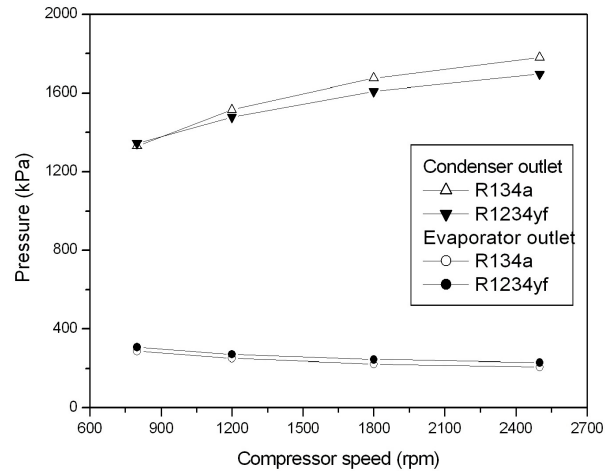


Fig. 3 Comparison of condenser/evaporator pressure between R134a and R1234yf with compressor speed.

Fig. 4는 압축기 회전수 변화에 따른 시스템에 흐르는 냉매의 질량유량을 나타낸다. 압축기의 회전수가 증가함에 따라 시스템을 흐르는 냉매의 질량유량은 증가하였고, 냉매 R1234yf 적용 시스템이 냉매 R134a 적용 시스템에 비하여 압축기 회전수의 전영역에 걸쳐서 14~17% 정도 많이 흐르는 것으로 나타났다. 이는 냉매 R1234yf를 적용할 경우 압축기 전후단에서의 압축비가 R134a에 비하여 낮게 나타나고 압축기 입구에서의 동일 포화온도 조건에서 냉매의 비체적이 낮기 때문에 동일용량의 압축기인 경우에 더 많은 냉매유량을 이송할 수 있기 때문이다.

Fig. 5는 압축기 출구에서의 토출온도의 변화를 나타낸다. 냉매 R1234yf가 냉매 R134a를 적용한 경우보다 5~8℃ 정도 압축기의 토출온도가 낮게 나타났다. 과도한 압축기 토출온도의 상승은 냉매의 오

Table 3 Summary of test results

Comp. speed (rpm)		Mass flow rate (kg/s)	Comp. discharge temperature(℃)	Cooling capacity (kW)	COP
800	R134a	0.0282	73.1	3.9	2.91
	R1234yf	0.0330	68.2	3.74	2.78
1200	R134a	0.0354	82.2	4.64	2.21
	R1234yf	0.0410	76.3	4.4	2.13
1800	R134a	0.0408	92.0	5.04	1.67
	R1234yf	0.0472	84.7	4.72	1.61
2500	R134a	0.0444	100.6	5.25	1.36
	R1234yf	0.0508	92.3	4.88	1.31

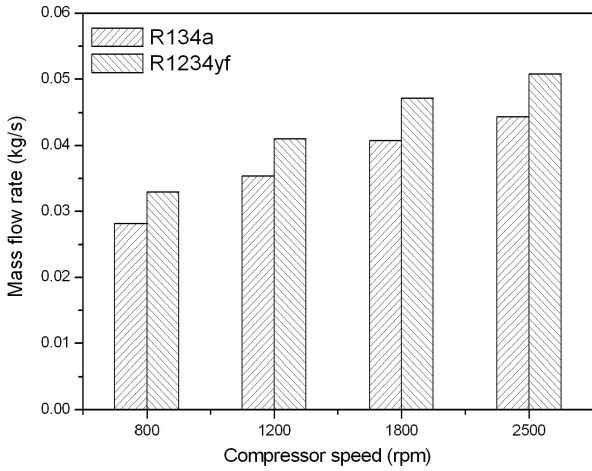


Fig. 4 Comparison of mass flow rate between R134a and R1234yf with compressor speed.

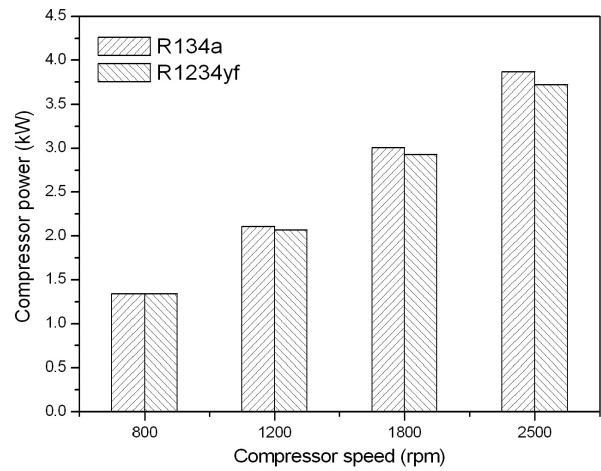


Fig. 6 Comparison of compressor power between R134a and R1234yf with compressor speed.

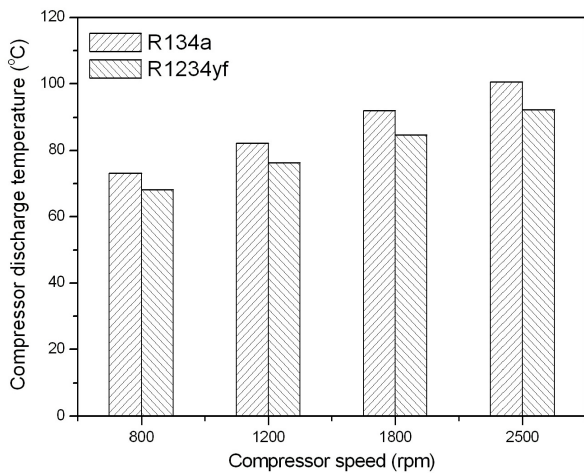


Fig. 5 Comparison of compressor discharge temperature between R134a and R1234yf with compressor speed.

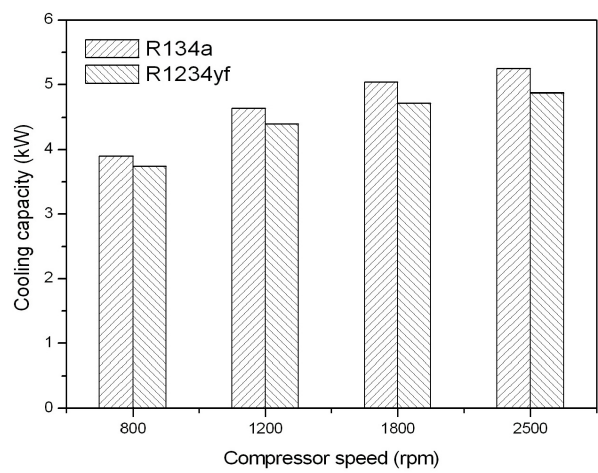


Fig. 7 Comparison of cooling capacity between R134a and R1234yf with compressor speed.

일을 변질시키고 시스템의 신뢰성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 R1234yf 냉매는 시스템의 안정성과 내구성 측면에서 더 우수한 성능을 나타낸다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 운전조건 변화에 따른 압축기 소비동력을 나타낸다. 자동차용 공조 시스템에서 압축기의 소비동력이 크다는 것은 엔진축에 부하를 크게하여 연비가 나빠지는 것을 의미한다. 압축기의 회전수가 증가할수록 R134a 냉매 시스템의 압축기 소비동력이 최대 4% 크게 나타났다. 이것은 R1234yf 냉매의 열역학적 특성상 저단축과 고단축이 압축비가 낮아 R134a 냉매 시스템보다 소비동력 측면에서 유

리하기 때문이다.

Fig. 7은 운전조건 변화에 따른 냉방용량을 나타낸다. 전체적으로 냉매 R1234yf 적용 시스템이 냉매 R134a 적용 시스템과 비교하여 최대 4~7% 정도 냉방용량이 낮게 나타났다. 냉매 R1234yf를 적용한 시스템의 냉매질량 유량이 증가하였음에도 냉방용량이 낮게 나타난 것은 냉매 R1234yf의 증발잠열이 작기 때문이다. Fig. 8은 EES<sup>(11)</sup>를 이용하여 두 냉매의 증발잠열 구간을 비교하여 나타낸 것으로, 동일한 포화온도에서 R1234yf 냉매가 R134a 냉매와 비교하여 증발잠열이 작음을 나타낸다. 이는 R1234yf 냉매를 적용한 시스템에서 R134a와 동일한 냉방능력

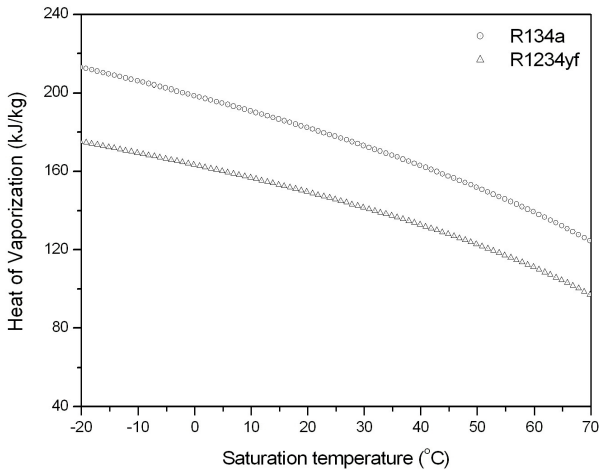


Fig. 8 Comparison of the heat of vaporization between R134a and R1234yf.

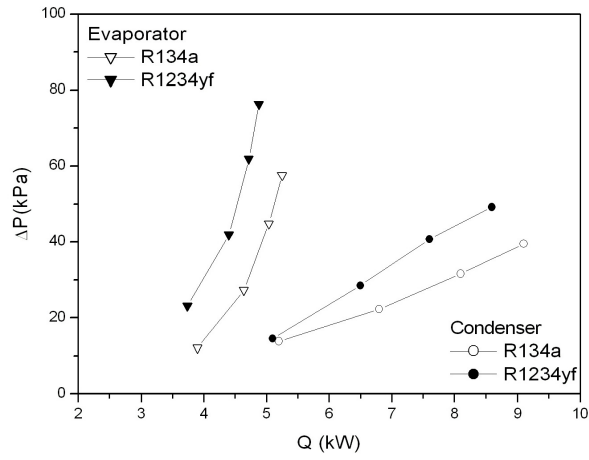


Fig. 10 Comparison of pressure drop between R134a and R1234yf with heat capacity in the evaporator and condenser.

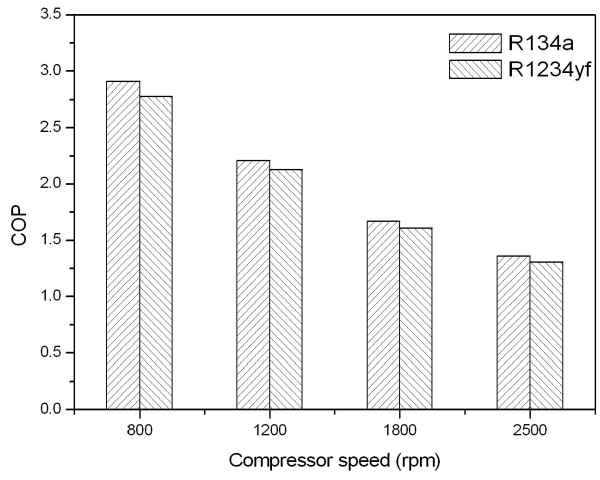


Fig. 9 Comparison of COP between R134a and R1234yf with compressor speed.

을 확보하기 위해서 시스템 개선이 필요함을 나타낸다.

Fig. 9는 운전조건에 따른 두 냉매의 시스템 성능계수를 나타낸다. 전반적으로 압축기 소요동력은 R134a 냉매적용 시스템이 크게 나타났지만 R1234yf 냉매 적용 시스템의 냉방용량 감소가 커서 시스템 성능계수는 R1234yf 적용 시스템이 3~4% 정도 작게 나타났다. 이러한 결과는 기존의 연구<sup>(9, 10)</sup>에서도 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 10은 증발기와 응축기에 냉매가 흐를 때 발생하는 압력손실을 증발기에서 흡수한 열량과 응축기에서 방출한 열량에 대하여 각각 나타내었다. 전체적으로 R1234yf 냉매에서 압력강하가 크게 나타났는데 이는 동일한 열용량을 나타내기 위해서 냉매의

열역학적 특성상 R1234yf의 질량유량이 더 많이 필요하므로 열교환기에서 압력강하가 더 크게 발생함을 알 수 있다. 특히, 증발기에서는 냉매가 증발기를 통과할수록 건도가 증가하면서 R1234yf 냉매의 유속 증가 및 R134a 냉매 대비 이상유동의 마찰 압력강하가 전체 압력강하에 영향을 준 것으로 나타났다. 따라서 기존의 R134a 냉매에서 R1234yf 냉매로 시스템을 변경하여 사이클의 최적화하기 위해서는 열교환기의 압력강하를 최소화하는 방향으로 튜브의 패스와 형상을 설계시에 고려하여야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 R134a 냉매 시스템에 R1234yf 냉매를 Drop-in 성능 평가를 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) R1234yf 냉매가 R134a 냉매와 비교하여 시스템의 냉매 충전량이 10% 낮게 나타났다.
- (2) R1234yf 냉매를 적용한 경우에 시스템을 흐르는 냉매의 질량유량이 14~17% 높게 나타났다.
- (3) 압축기에서 냉매의 토출온도는 R1234yf 냉매가 R134a 냉매에 비해 5~8°C 정도 낮게 나타났다.
- (4) R1234yf 시스템이 R134a 시스템과 비교하여 압축기 소비동력은 최대 4%, 냉방용량은 4~7% 낮게 나타났으며, 이에 따른 시스템 성능계수가 3~4% 정도 낮게 나타났다.
- (5) 기존의 R134a 시스템에 냉매 R1234yf를 적용

한 경우 증발기와 응축기에서 냉매유량이 증가하여 압력강하가 크게 증가하는 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 2010년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비(2010-0134) 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## 참고문헌

1. Global Environmental Change Report, 1997, A Brief Analysis of the Kyoto Protocol, Vol. 4, No. 24, December.
2. Koban, M., 2009, HFO-1234yf low GWP refrigerant LCCP analysis, Proceedings of SAE world congress, Detroit, USA.
3. Park, K. J., Lee, Y. H., Choe, D. S., and Jung, D. S., 2010, Performance of R1234yf and R1234yf/R134a Mixture under Mobile Air-conditioner Operating Conditions, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 12, pp. 837-844.
4. Han, J. S., Lee, J. S., Lee, M. R., and Jeon, S. M., 2011, An Experimental Study on the Optimization of the Performance Characteristics of HFO-12234yf in a Household Freezer/Refrigerator, Proceedings of the SAREK summer annual conference, pp. 1135-1138.
5. Lee, T. J., Kim, K. B., Lee, S. W., and Lee, G. H., 2011, Development of Performance Analysis Program and the Study of Substitution Refrigerant R1234yf for Vehicle Refrigerant Compressor, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 11, pp. 699-704.
6. Del Col, D., Torresin, D., and Cavallini, A., 2010, Heat transfer and pressure drop during condensation of the low GWP refrigerant R1234yf, International Journal of Refrigeration, Vol. 33, pp. 1307-1318.
7. Longo, A. G., 2012, Vaporisation of the low GWP refrigeration HFO1234yf inside a brazed plate heat exchanger, International Journal of Refrigeration, Vol. 35, pp. 952-961.
8. Park, K., Lee, C., Kang, D. G., and Jung, D., 2010, External Condensation Heat Transfer Coefficients of R1234yf, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 345-352.
9. Zilio, C., Steven Brown, J., Schiochet, G., and Cavallini, A., 2011, The refrigerant R1234yf in air conditioning systems, Energy, Vol. 36, pp. 6110-6120.
10. Lee, Y. and Jung, D., 2012, A brief performance comparison of R1234yf and R134a in a bench tester for automobile applications, Applied Thermal engineering, Vol. 35, pp. 240-242.
11. Engineering Equation Solver(EES) Ver.8.688, F-Chart software, 2010.