

# 대체냉매 R1234yf를 적용한 자동차용 에어컨 시스템의 성능 향상 연구

조 흥 현

조선대학교 기계공학과  
(hhcho@chosun.ac.kr)

## 서 론

현재 자동차용 에어컨 냉매로 사용되는 R134a는 오존층 파괴지수(Ozone Depletion Potential, ODP)가 전혀 없는 CFC계의 대체냉매로 사용되어 왔으나, 최근에는 지구온난화 문제로 인하여 점차로 사용이 규제되고 있다. 교토의정서에 의하면 지구 온난화방지 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 결정하였으므로 우리나라도 이에 대한 준비가 필요하다.

유럽 연합은 자동차용 에어컨 시스템에서 지구 온난화지수(Global Warming Potential, GWP)가 150 이상인 냉매를 사용하는 자동차에 대하여 적용을 제한하는 법안을 발표하였다. 따라서 현재 생산되는 차량에 적용중인 냉매 R134a에 대한 적용이 불가하게 되므로 지구온난화지수가 150 이하인 대체냉매 적용을 위하여 활발한 연구가 진행되고 있다. 그 가운데 미국의 냉매 제조업체인 하니웰과 듀폰은 R134a를 대체하기 위한 R1234yf를 개발하였

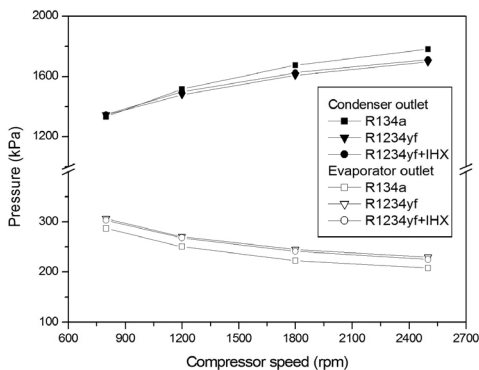
다. 이 냉매는 지구온난화지수가 4이고, 오존층 파괴지수도 0이어서 유럽 환경법규에서 요구하는 GWP 150 이하를 만족하는 환경친화적인 냉매이다. 또한, 독성이 없고 대기 중에서 분해되는 속도가 기존 R134a 냉매보다 훨씬 빠른 시간에 분해되어 없어지는 것으로 보고되어 있다.

R1234yf 냉매는 R134a 냉매와 비교적 비슷한 열역학적 특성을 가지고 있으나, 증발잠열 구간이 작기 때문에 동일 에어컨 시스템으로 Drop-in 성능 평가 시에 냉방 성능저하가 발생하므로 성능 향상에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나 냉매의 가격이 고가이고 냉매의 구입 절차가 까다로워 자동차 및 자동차공조 업체 위주로 성능평가가 이루어지고 있으며, 아직 학계에서는 연구가 많지 않은 실정이다. 본 원고에서는 냉매 R134a와 R1234yf의 냉동시스템의 기본 성능 평가와 대체냉매 R1234yf 적용시스템의 성능 개선을 위하여 내부 열교환기를 적용하여 성능을 비교 분석하여 제시하였다.

## R134a와 R1234yf 냉동시스템의 운전 특성 비교

본 연구에서는 R134a 냉매와 R1234yf 냉매의 냉동 사이클 특성을 분석하기 위하여 자동차용 에어컨 실험장치를 제작하여 성능 평가를 수행하였다. 대체냉매 R1234yf는 기존 R134a 냉매 적용 에어컨 시스템과 작동 압력범위도 비슷하고 동일한 냉매오일(POE Oil)의 적용이 가능하므로 국내 완성차 공조시스템의 주요 부품을 사용하여 실험장치를 제작하여 Drop-in 평가를 수행하였다. R1234yf 시스템의 경우 성능향상을 위하여 내부열교환기는 이중관식 열교환기 형태로 본 연구에서는 운전범위에서 내부열교환기를 통한 응축기 출구에서의 과냉도 효과가 5~8°C가 되도록 설계하였다.

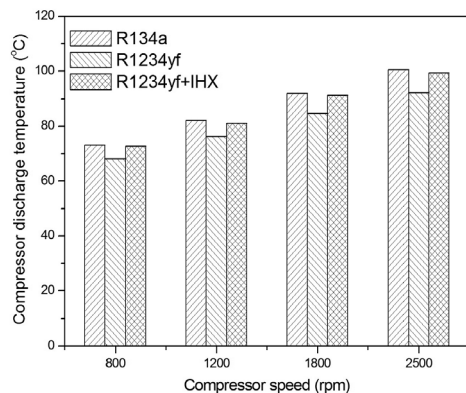
그림 1은 압축기 회전수 변화에 따른 증발기와 응축기 출구에서의 압력을 나타낸다. 동일한 운전 조건에서 증발기 출구에서는 냉매 R134a와 비교하여 냉매 R1234yf의 증발압이 내부열교환기가 없는 경우에는 6~10%, 내부열교환기가 있는 경우에는 5~8% 정도 높게 나타났다. 반면에 응축기 출구에서는 R1234yf 냉매의 응축압이 내부열교환기가 없는 경우에는 최대 5%, 내부열교환기가 있는 경우에는 최대 4% 정도 낮게 나타났다. 이는 R1234yf 냉매의 열역학적 물성치의 특성이 동일한 온도에서 저압측에서는 포화압력이 R134a에 비하여 높고, 고압측에서는 R134a에 비하여 낮기 때문이다.



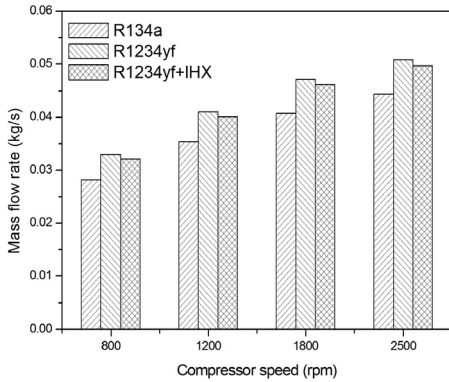
[그림 1] 압축기 속도에 따른 R134a와 R1234yf 사이의 콘덴서/증발기 압력 비교

그림 2는 압축기 출구에서의 토출온도 변화를 나타낸다. 기존 시스템에서 냉매 R1234yf는 냉매 R134a에 비하여 압축기의 토출온도가 4.9~8.3°C 정도 낮게 나타났다. 이는 R1234yf 냉매의 압축기 입구에서의 포화증기의 밀도가 높아 압축기를 지나 는 냉매유량이 증가하면서 압축기 토출부의 압력이 R134a에 비하여 낮아지기 때문이다. 과도한 압축기 토출온도의 상승은 냉매의 오일을 변질시키고 시스템의 신뢰성에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 내부열교환기를 장착한 경우에는 압축기 입구에서의 과열도 증가로 인하여 압축기 토출온도도 상승하였으나, 냉매 R134a에 비하여 0.3~1.2°C 정도 낮게 나타났다. 따라서 R1234yf 냉매는 R134a 냉매와 비교하여 압축기 토출온도 상승에 따른 시스템의 신뢰성 측면에서 더 우수한 성능 특성을 나타낸다.

그림 3은 내부열교환기를 적용한 개선 시스템과 기존의 시스템에 흐르는 냉매유량을 나타낸다. 압축기의 회전수가 증가함에 따라 시스템을 흐르는 냉매의 질량유량은 증가하였고, 냉매 R1234yf 적용 시스템이 냉매 R134a 적용 시스템에 비하여 압축기 회전수의 전 영역에 걸쳐서 내부열교환기를 장착하지 않은 경우에는 14~17%, 내부열교환기를 장착한 경우에는 12~14% 정도 증가하였다. 기존 시스템에서 냉매 R1234yf를 적용할 경우 압축기 전후단에서



[그림 2] 압축기 회전수 변화에 따른 압축기 토출온도 비교



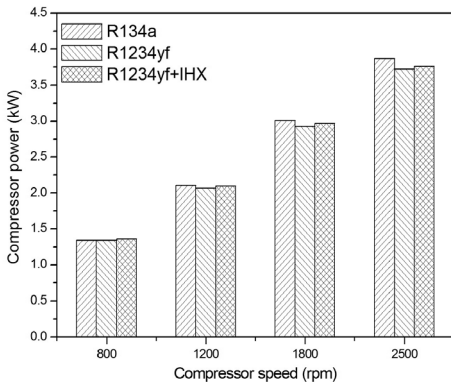
[그림 3] 압축기 회전수 변화에 따른 질량유량 비교

의 압축비가 R134a에 비하여 낮게 나타나고 압축기 입구에서의 동일 포화온도 조건에서 냉매의 비체적이 낮기 때문에 동일용량의 압축기인 경우에 더 많은 냉매유량을 이송할 수 있기 때문이다. 압축기의 회전수가 증가함에 따라 시스템을 흐르는 냉매의 질량유량은 증가하였고, 냉매 R1234yf 적용 시스템이 냉매 R134a 적용 시스템에 비하여 압축기 회전수의 전영역에 걸쳐서 내부열교환기를 장착하지 않은 경우에는 14~17%, 내부열교환기를 장착한 경우에는 12~14% 정도 증가하였다. 기존 시스템에서 냉매 R1234yf를 적용할 경우 압축기 전후단에서의 압축비가 R134a에 비하여 낮게 나타나고 압축기 입구에서의 동일 포화온도 조건에서 냉매의 비체적이 낮기 때문에 동일

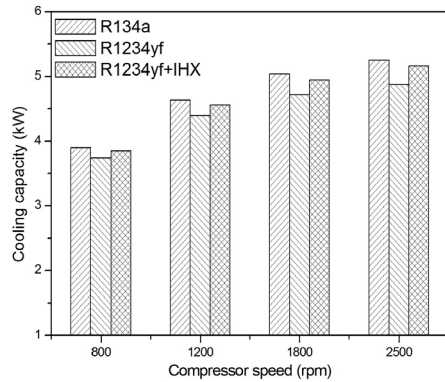
용량의 압축기인 경우에 더 많은 냉매유량을 이송할 수 있기 때문이다. 내부열교환기를 장착한 경우에는 냉매유량의 증가량이 다소 감소하였는데 이는 압축기 입구에서의 과열도 증가에 따른 비체적 증가와 압축기 효율의 감소가 발생했기 때문이다.

### R134a와 R1234yf 냉동시스템의 성능 특성 비교

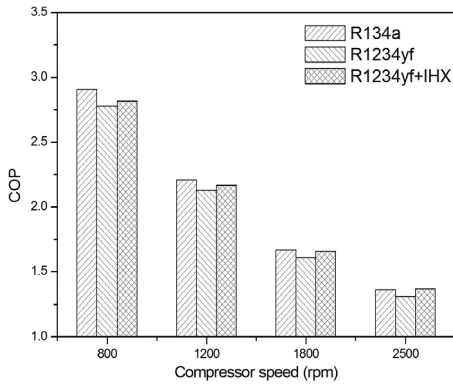
그림 4는 운전조건 변화에 따른 압축기 소비동력을 나타낸다. 동일한 시스템에서 R1234yf 냉매를 적용한 경우 R134a 냉매보다 질량유량이 증가함에도 압축기의 소비동력은 더 작게 나타났다. 이것은 R1234yf 냉매의 열역학적 특성상 저단과 고단측의 압축비가 R134a 냉매보다 낮아 소비동력 측면에서 유리하기 때문이다. 자동차용 공조시스템에서 압축기의 소비동력이 크다는 것은 엔진의 부하를 크게 하여 연비가 나빠지는 것을 의미한다. 압축기 회전수가 증가함에 따라 내부열교환기를 적용하지 않은 경우에는 최대 3.9%까지 감소하였고, 내부열교환기를 적용한 경우에는 최대 2.9% 감소하였다. 그러나, 내부열교환기를 장착할 경우에는 압축기에서의 과열도와 압축비 증가로 인하여 내부열교환기를 장착하지 않은 경우와 비교하여 압축일은 증가



[그림 4] 압축기 회전수 변화에 대한 압축기 소비동력 비교



[그림 5] 압축기 회전수 변화에 대한 냉방용량 비교



[그림 6] 압축기 속도 변화에 대한 COP 비교

하였다.

그림 5는 운전조건 변화에 따른 냉방용량을 나타낸다. 내부 열교환기를 적용하지 않은 R1234yf 시스템의 경우 기존의 R134a 냉매 시스템과 비교하여 4~7% 정도 냉방용량이 낮게 나타났다. R1234yf 시스템의 냉방성능 개선을 위해 내부 열교환기를 적용한 경우에는 R134a 시스템과 비교하여 1.3~1.8%의 냉방용량 감소를 나타내었다. 이는 내부열교환기 적용에 따른 응축기출구에서의 과냉도 증대로 증발기에서 냉방능력이 증대되었기 때문이다. 그러나 냉매 R1234yf를 적용한 시스템의 냉매질량 유량이 증가하였음에도 냉방용량이 낮게 나타난 것은 냉매의 열역학적 특성상 R1234yf 냉매의 증발잠열이 작고 증발기측에서의 포화압력과 증발온도가 R134a 시스템에 비하여 높기 때문이다.

그림 6은 R1234yf 냉매에 대하여 내부열교환기를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우에 대하여 R134a 냉매 시스템과의 성능(COP) 비교를 나타낸다. 압축기의 소요동력은 R134a 냉매적용 시스템이 크지만, 내부열교환기를 적용하지 않은 경우에는 R1234yf 냉매적용 시스템의 냉방용량 감소가 크기 때문에 시스템의 성능이 3.6~4.5% 정도 낮게 나타났다. 그러나 내부열교환기를 적용한 경우에는 시스템의 냉방용량의 증대로 인하여 압축기 회전

영역이 800~1,800 rpm 구간에서는 시스템의 성능이 0.3~2.9% 낮게 나타났고, 압축기의 회전속도가 2,500 rpm에서는 시스템의 성능이 0.9% 정도 높게 나타났다. 전반적으로 R134a 자동차용 냉방시스템이 다양한 운전조건 변화에 대하여 R1234yf 시스템에 비하여 높은 성능을 가지고 있으며 R1234yf 시스템의 경우 내부열교환기를 장착함으로써 성능의 향상을 기대할 수 있다.

### 참고문헌

1. Global Environmental Change Report, 1997, A Brief Analysis of the Kyoto Protocol, Vol. 4, No. 24, December.
2. Official Journal of the European Union, 2006, Directive 2006/40/EC of the European Parliament and of the Council.
3. Cho, H.H., Lee, H.S., and Park, C.S., 2012, Performance Characteristics of a Drop-in System for a Mobile Air Conditioner Using Refrigerant R1234yf, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 12, pp. 823-829.
4. Tanaka, K. and Higashi, Y., 2010, Thermodynamic properties of HFO-1234yf, International Journal of Refrigeration, Vol. 33, pp. 474-479.
5. 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.
6. Han, J.S., Lee, J.S., Lee, M.R., and Jeon, S.M., 2011, An Experimental Study on the Optimization of the Performance Character-

istics of HFO-1234yf in a Household Freezer/  
Refrigerator, Proceedings of the SAREK 2011  
summer annual conference, pp. 1135-1138.  
7. Lee, J.S., Han, J.S., Lee, M.R., and Jeon, S.M.,

2011, Performance Evaluation of HFO-1234yf as  
a substitute for R-134a in a Household Freezer/  
Refrigerator, Trans. of KSME(B), Vol. 35, No. 7,  
pp. 743-748. 