

## HFO-1234yf를 적용한 가정용 냉동/냉장고의 성능평가<sup>§</sup>

이장석\*<sup>†</sup> · 한준수\* · 이명렬\* · 전시문\*

\* LG전자 HA연구소

### Performance Evaluation of HFO-1234yf as a substitute for R-134a in a Household Freezer/Refrigerator

Jang Seok Lee\*<sup>†</sup>, Jun Soo Han\*, Myung Ryul Lee\* and Si Moon Jeon\*

\* HA Laboratory, LG Electronics Inc.

(Received December 16, 2010 ; Revised April 14, 2011 ; Accepted April 23, 2011)

**Key Words:** Household Freezer/Refrigerator(가정용 냉동/냉장고), System Characteristic(시스템 특성), Alternative Refrigerant (대체 냉매)

**초록:** R-134a 대체 냉매인 HFO-1234yf의 성능을 가정용 냉동/냉장고에서 평가하였다. AHAM(Association of Home Appliance Manufacturers) 규격에 의거하여 HFO-1234yf를 Drop-in하여 냉매 봉입량 시험, Pulldown 시험, 냉각속도 시험 그리고 소비전력 시험을 수행하였으며, R-134a 실험 결과와 비교하였다. 43℃ 고온 가혹 조건에서도 시험을 수행하였다. 결과적으로 HFO-1234yf 냉매는 Cycle 성능면에서는 R-134a와 유사하나, 냉각속도는 모세관경을 더 크게 변경시켜야 한다.

**Abstract:** The performance of HFO-1234yf as a substitute for R-134a was evaluated in a household freezer/refrigerator. A series of tests such as 'refrigerant charging test, pull-down test, cooling speed test, and energy consumption test were carried out under the AHAM (Association of Home Appliance Manufacturers) standard. The results of a drop-in test were compared with those of a test conducted using R-134a. A test under a severe ambient air condition (43°C) was also conducted. The result shows that the refrigeration cycle performance of HFO-1234yf is as good as that of R-134a ; however, the diameter of capillary tube should be increased in order to improve its performance in the cooling speed test.

- 기호설명 -

- E/C : 소비전력(kWh/month)
- VCR : 체적냉동능력(W/m<sup>3</sup>)
- R : 냉장실
- F : 냉동실
- I : 제빙실

### 1. 서 론

세계적인 관심이 고조되고 있는 지구온난화문제로 인하여 환경규제가 갈수록 강화되고 있다. 가전 산업도 예외는 아니며, 특히 냉동냉장고등에 사용되고 있는 냉매가 그중 하나이다. 초기에 개발된

CFC(Chlorofluorocarbon)계 냉매물질은 우수한 열역학적 성질, 화학적 안정성, 비가연성 그리고 독성에 있어서 안전한 냉매 구비조건을 잘 갖추고 있었기에 오랜 기간 사용되어 왔다. 하지만 오존파괴 물질로 분류되어 ODP(Ozone Depletion Potential)가 0인 R-134a와 같은 HFC (Hydrofluoro carbon) 냉매로 대체되어 사용되어 왔고, 현재 북미를 중심으로 사용되어 오고 있다. 이에 반해 유럽과 한국을 비롯한 아시아 국가들에서는 ODP가 3이며, GWP(Global Warming Potential)가 0인 R600a와 같은 탄화수소계열 천연가스 냉매를 사용하고 있다. 북미시장에서 R600a와 같은 탄화수소계열 냉매를 사용하지 않는 이유는 발화로 인한 폭발 위험에 대한 규제가 강하기 때문이다. 당연히 북미시장에서도 세계적인 환경문제에 대한 인식을 같이 하고 있으므로, 환경문제에 대한 대응과 함께 발화로 인한 폭발의 위험성이 없는 냉매를 연구개발해 왔으

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, jang.lee@lge.com

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

며,<sup>(1-4)</sup> 그 것이 바로 HFO-1234yf라는 냉매이다. Table 1에 HFO-1234yf와 R-134a의 열물성치 비교를 나타내었다.<sup>(5)</sup> Minor and Spatz<sup>(6)</sup>는 HFO-1234yf가 자동차용 대체냉매로 사용가능성이 높다는 연구결과를 보고한 바 있으며, 실제로 유럽연합규제인 (EC)No 842/2006과 Directive 2006/40/EC에는 2011년 신 모델부터 그리고 2017년부터는 새로 출고되어 나오는 전차에 대해서 GWP가 150을 넘지 않도록 규정하고 있다. 따라서 자동차의 경우는 공조장치에 R-134a 대체용으로 HFO-1234yf가 사용될 예정이나, 가전용에 대해서는 성능면이나, 신뢰성 등 많은 부분에 대한 연구개발이 필요한 상태이며, 특히, 냉동냉장고에 대해서 본 냉매를 통한 연구가 전무한 실정이다. 본 연구에서는 HFO-1234yf 냉매를 750리터급 3Door Bottom Freezer 형식의 동일한 냉동냉장고에 적용하여, 그 적용가능성을 알아보기 위한 냉각력, 냉각속도, 주위온도를 과부하조건으로 한 시험 그리고 소비전력시험에 이르기 까지 기존냉매인 R-134a냉매와 교번으로 실험을 수행하였다. 또한 결과 비교를 통하여 HFO-1234yf로 대체하게 되면 냉동사이클에 어떠한 문제가 발생할지, 그리고 그것을 어떻게 해결해야할지 등에 대한 제언을 하였다. Fig. 1은 이를 설명하기 위한 간략한 도식이며, Table 2에 본 연구에 사용된 냉장고 사양을 나타내었다.

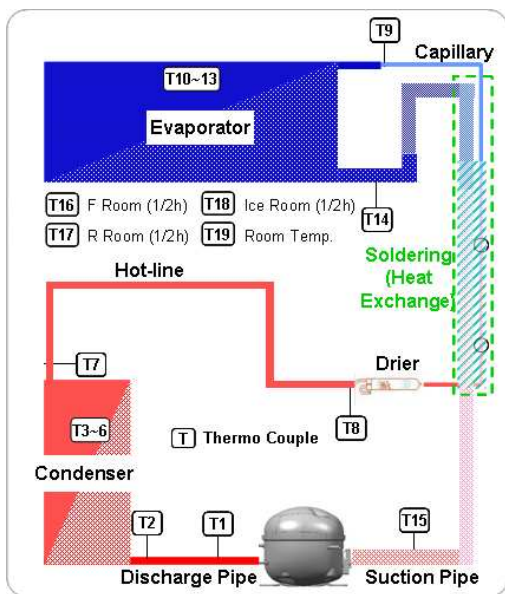


Fig. 1 Schematic diagram of refrigerator

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 기준 시료는 750리터급 3Door Bottom Freezer 형식의 가정용 냉동냉장고이며, 냉매 충진을 위한 Port 등 일부 배관부에 수정을 하였다. 냉동사이클 특성을 알아보기 위해  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 의 불확실도를 갖는 15개의 T형 열전대(구리-콘스탄탄)를 설치하였다. 또 냉장실, 냉동실, 제빙실 각각 높이의 1/2지점에 직경30mm, 길이30mm의 구리봉을 설치하고, 그 내부에 열전대를 삽입하여 각부의 온도를 측정하였다. 입력 전원은  $\pm 0.1\%$  of rated output의 불확실도를 갖는 VVVF를 이용하였고, 측정 자료는 요코가와 기록계와 파워미터를 설치하여 무부하운전시의 소비전력을 측정하였다.

### 2.2 실험조건

모든 실험에 대해서 AHAM규격<sup>(7)</sup>을 적용하였으며, 이때의 항온항습기내의 온도는  $32.2^{\circ}\text{C}$ 이다. 압축기오일은 두 냉매 모두에 대해 동일한 에스테르계 오일(JOMO Freona-10G)을 사용하였다.

Table 1 Thermodynamic properties for various refrigerants

Thermodynamic Property	HFO-1234yf	R134a
Chemical Formula	$\text{C}_3\text{F}_4\text{H}_2$	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$
Molar Mass (kg/kmol)	114.04	102.03
Boiling Point at 1 atm ( $^{\circ}\text{C}$ )	-29.45	-26.07
Critical Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	94.70	101.06
Critical Pressure (MPa)	3.38	4.06
Critical Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	478.01	511.90

Table 2 The specification of household freezer / refrigerator

Type	3Door Bottom Freezer
Refrigerant	R-134a 142g
Compressor	Linear compressor
Evaporator	Fin & tube Type. (2열 9단)
Condenser	Spiral fin condenser (10열)
Capillary	Diameter 0.00075m Length 2.65m

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 최적 냉매량 도출

최적 냉매량을 도출하기 위하여 냉매량을 120g에서 5g씩 더해가며, 165g까지 실험을 수행하였다. 실험은 48시간에 걸쳐 진행되었으며, 155g까지는 2시간 간격으로 진행되었고, 155g 이후부터 액 냉매의 압축기 유입에 따른 신뢰성을 고려하여 1시간 간격으로 진행하였다. 또한 계속 냉매를 넣어가며 사이클 온도가 안정되면 Data를 취하고, 다시 냉매를 넣는 반복적인 실험을 수행하였다. 냉매 봉입이후 사이클 온도는 5~10분 이후에 안정화 되었다.

Fig. 2는 냉매봉입량 시험결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 냉매가 부족한 130g 이전영역까지는 증발기 입구온도보다 출구온도가 높다. 하지만 냉매를 더 넣게 되면 증발기의 입출구가 붙거나, 냉매측 관내 마찰에 의한 유로저항 압력강화로 출구 측의 온도가 약간 내려갈 수도 있게 되는데, 본 결과는 이를 잘 나타내고 있다. 145g 이후부터는 냉매 과충진 상태로 볼 수 있고, 165g까지 넣게 되면 액 냉매가 압축기 흡입관까지 넘쳐 흐르게 되어 실험 진행 후 50시간(3000min) 부근에서 증발기 온도가 순간 급격히 떨어지는 현상이 발생하였으며, Fig. 3에 나타낸 것과 같이 Suction 온도가 급격히 떨어진 결과를 보인다.

Fig. 4는 R-134a시스템과 비교해서 냉매충진량과 소비전력을 %로 표시한 것으로 R-134a의 100%충진량에 못 미치는 냉매 충전량일때 최소 소비입력전력이 확인되었다.

Fig. 5는 R-134a 시스템의 운전율 59.4%와 비교해서 도시한 HFO-1234yf 시스템의 냉매충진량별 운전율을 나타낸다. 100%이후부터 점근되는 경향이 보인다. Fig. 6, Fig. 7 그리고 Fig. 8은 응축기와 증발기 그리고 냉장고내 각 실의 온도를 도시한 것으로써 증발기온도의 경우 냉매량이 부족하면 출구측 과열구간이 증대되어 과열온도가 올라가는 경향을 보인다. 소비전력과 각부의 온도를 고려하면 최적 냉매량은 138g 정도로 합이 타당하다.

#### 3.2 냉각력 및 냉각속도비교

전 실험을 통해서 정해진 냉매량을 고정 인자로 하여 냉각력과 냉각속도를 실험하였다. 냉각

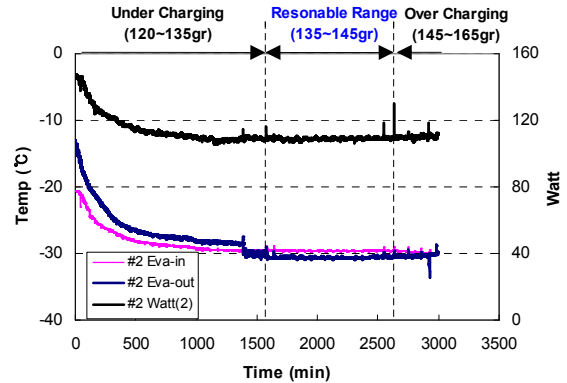


Fig. 2 Refrigerant charging optimization(refrigerant vs evaporator temperature & power)

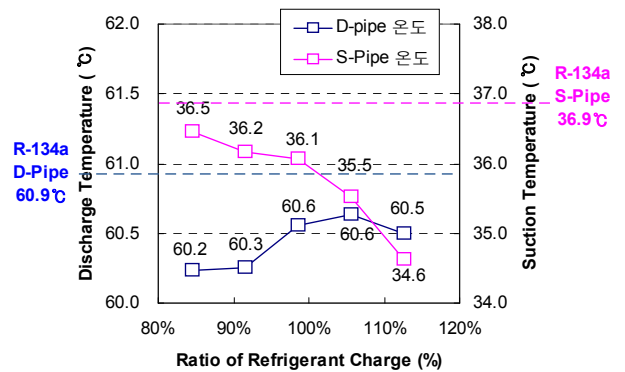


Fig. 3 Temperatures(refrigerant vs discharge & suction pipe)

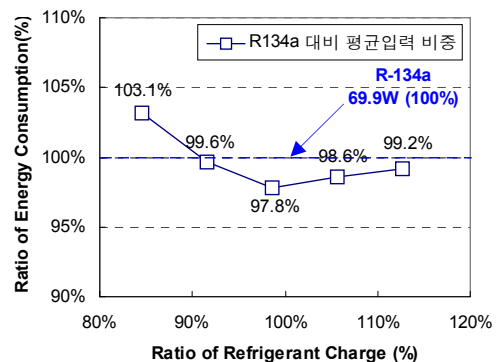


Fig. 4 Refrigerant charging optimization(refrigerant% vs power% over R134a)

력은 주위온도 32.2℃하에서 냉장고내 온도를 주위온도와 같게 안정시키고, 냉장고를 연속으로 냉각 운전하여 온도를 최저로 안정시킨 후의 각부위 온도를 측정하였고, 냉각속도는 냉각력과 동일한 시험 조건에서 냉장실이 10℃, 냉동실이 -5℃까지 도달하는데 걸리는 시간만을 측정하

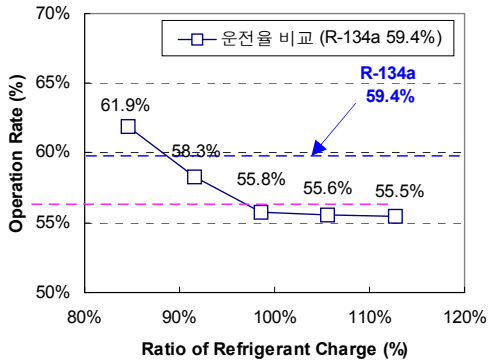


Fig. 5 Refrigerant charging optimization(refrigerant% vs running Rate%)

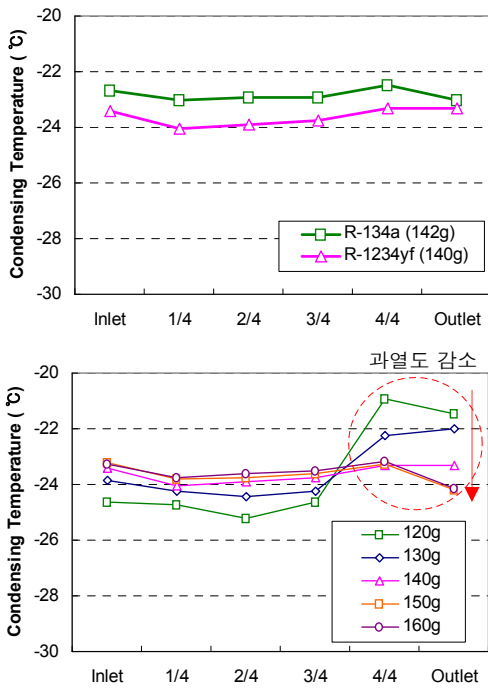


Fig. 6 Evaporator temperature

였다. Fig. 9에서 R-134a 대비 HFO-1234yf 시스템 냉각력은 온도 안정 후 냉장실이 1℃, 냉동실이 1.3℃ 더 낮았으며, 냉각속도는 냉매의 물성치 차이와 이를 위한 최적 모세관 적용이 안되어 있으므로 냉장실이 36% 지연, 냉동실이 58% 지연된 결과를 나타내고 있다. 이는 HFO-1234yf 시스템의 경우 초기 냉장고 부하가 클 경우인 냉매량이 많이 필요할 때의 냉매 부족현상으로 판단되며, 이는 초기 증발기 입출구의 온도가 더 오래 벌어진 상태로 운전됨을 보고 알 수 있다. 이에 대한 해결책은 교축장치인 모세관경을 키우거나 길이

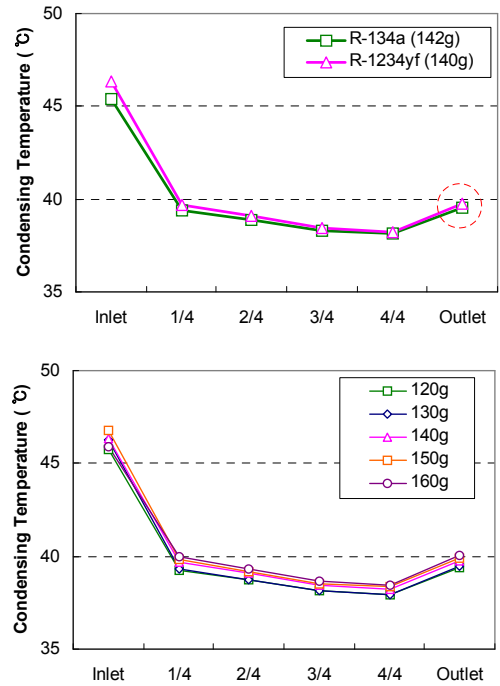


Fig. 7 Condenser temperature

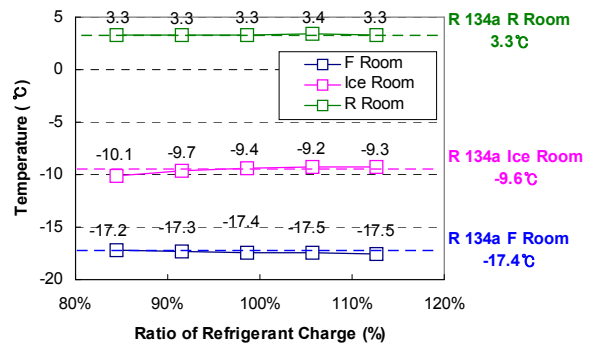


Fig. 8 Compartment temperatures

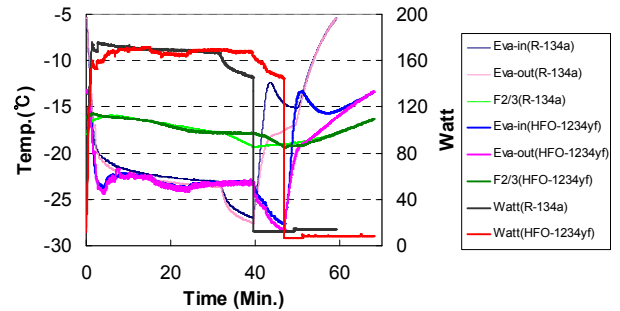
를 작게 하여 유량을 증대시켜서 냉각속도를 기존과 유사하도록 할 수 있을 것이다.

### 3.3 에너지 소비 실험

Table 3은 HFO-1234yf의 경우 결정된 최적 냉매 충전량 138g, R-134a의 경우 기존시스템에서 최적량으로 사용하고 있던 142g의 냉매 충전량을 가지고 수행한 소비전력결과를 보여준다. 소비전력 측정시 냉장실과 냉동실의 설정온도는 약/약 mode인 8°F(-13.5°C)/46°F(7.6°C)와 적/적 mode인 1°F(-17.4°C)/39°F(3.8°C) 두 가지로 기준을 잡은 후 측정을 하였다. 적/적 기준으로 HFO-1234yf

**Table 3** The results of energy consumption test

Spec.	Type	R-134a		HFO-1234yf	
	Refrigerant (g)	142		138	
	냉력 제어	적/적	약/약	적/적	약/약
Total	운전율 (%)	56.8	43.2	54.0	42.3
	On-Time (min)	47.3	31.7	46.2	31.2
	Off-Time (min)	36.0	41.7	39.3	42.5
	On-Time Input (W)	113.5	123.4	118.8	126.5
	Off-Time Input (W)	6.7	6.7	6.7	6.7
	E/C (kWh/mon)	49.2	41.7	49.1	41.9
	Rate (%)	100.0	100.0	99.9	100.5
	F-AVG (°C)	-17.5	-13.6	-17.5	-13.6
	Ice-AVG (°C)	-9.6	-4.1	-9.7	-4.2
	R-AVG (°C)	3.6	7.8	3.7	7.7



**Fig. 10** Temperatures under 43°C ambient temperature (refrigerant charge 138g)

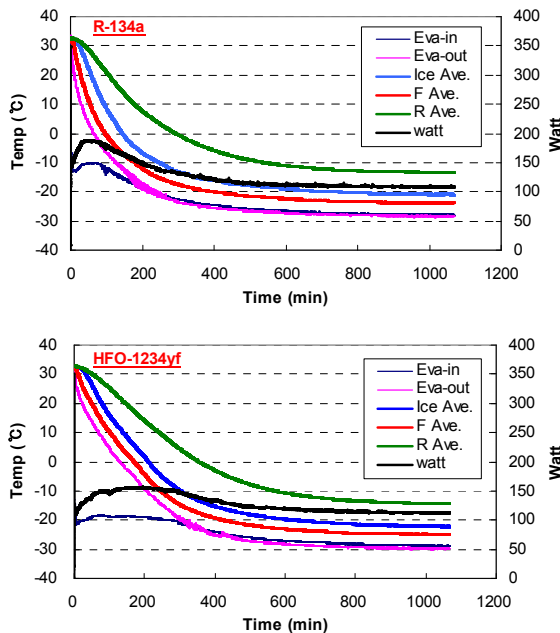
3.4 가혹 온도조건 실험

가정용 냉동냉장고의 사용조건 중 가장 가혹한 주위온도조건인 고온조건(43°C)에서 시험함으로써 냉동냉장고의 시스템특성을 알아보았다.

Fig. 10은 고온 가혹조건에서 시험한 결과를 나타내고 있다. 증발온도는 냉장/냉동/제빙실 동시 운전일 경우 -22°C와 냉동/제빙 운전일 경우 -26°C 정도로 기존 냉매시스템과 유사했으며, 응축 온도는 냉장/냉동/제빙실 동시 운전일 경우 51°C와 냉동/제빙 운전일 경우 50°C 정도로, 역시 기존시스템과 유사한 경향을 보였다. 운전율은 HFO-1234yf가 2% 더 컸고, cycle on시간은 7분, off 시간은 2분정도 더 긴 경향을 보였으나, 전체 소비전력 수준에 유의차를 보일만한 수준은 아니며, 이때 소비된 소비전력은 거의 유사하였다. 부하가 증대된 환경에서도 HFO-1234yf 시스템이나 R-134a 시스템 모두에서 유사한 특성을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 가정용 냉동냉장고에 R-134a 대체용 냉매로 HFO-1234yf의 적용성을 알아보기 위한 Drop-in시험을 수행하였다. 시험결과 최적 냉매량은 기존 R-134a 냉매량과 유사한 99% 수준임을 알 수 있었다. 고온 가혹조건(43°C)에서도 소비전력 및 Cycle 성능 면에서 유사한 특성일 나타내었다. 또한, HFO-1234yf의 NBP(Normal Boiling Point)가 3.4°C 더 낮으므로 냉각력도 냉장실, 냉동실 모두 1~1.5°C 더 낮다. 하지만, 적정 온도 도달시간을 측정하는 냉각속도는 냉장실이 36% 지연, 냉동실이 58% 지연되어 초기 냉매량이 많이 필요할 때의 냉매 부족현상이 보이므로,



**Fig. 9** Evaporator temperature vs time for cooling speed(refrigerant charge 138g)

시스템의 운전율이 2.8% 줄어드는 것으로 보이지만, 이때 운전시의 입력은 HFO-1234yf 시스템이 5.3W 더 입력되므로 소비전력은 R-134a 대비 99.9%로 유사한 수준이다.

이를 해결하기 위해 교축장치인 모세관경을 키우거나 길이를 작게 한다면 냉각속도를 기존과 유사하도록 할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- (1) Reasor, P., et al., 2010, "Refrigerant R1234yf Performance Comparison Investigation," *International Refrigeration and Air Conditioning Conf., at Purdue*, West Lafayette, IN., Paper No. 2300.
- (2) Koyama, S., et al., 2010, "Drop-in Experiments on Heat Pump Cycle Using HFO-1234ze(E) and Its Mixtures with HFC-32," *International Refrigeration and Air Conditioning Conf., at Purdue*, West Lafayette, IN., Paper No. 2514.
- (3) Tanaka, K. and Higashi, Y., 2010, "Thermodynamic Properties of HFO-1234yf (2,3,3,3-tetrafluoropropene)," *Int. J. of Refrigeration*, 33, pp. 474~479.
- (4) Leck, T. J., 2010, "New High Performance, Low GWP Refrigerants for Stationary AC and Refrigeration," *International Refrigeration and Air Conditioning Conf., at Purdue*, West Lafayette, IN., Paper No. 2160.
- (5) Reasor, P., et al., 2010, "Refrigerant R1234yf Performance Comparison Investigation," *International Refrigeration and Air Conditioning Conf., at Purdue*, West Lafayette, IN., Paper No. 2300.
- (6) Minor and Spatz, 2007, "A Low GWP Refrigerant for MAC," *Presentation at the 2nd International Workshop on Mobile Air Conditioning and Auxiliary Systems*.
- (7) ANSI/AHAM Standard HRF-1-2007 : Energy, Performance and Capacity of Household Refrigerators, Refrigerator-Freezers and Freezers, *Association of Home Appliance Manufacturing*, Washington, DC.