

## 증발기와 응축기 온도변화에 따른 R22 대체냉매의 성능평가

백 인 철, 심 윤 보, 정 동 수\*†  
 인하대학교 대학원 기계공학과, \*인하대학교 기계공학과

### Performance Evaluation of R22 Alternative Refrigerants

#### According to Temperature Variations of Evaporator and Condenser

In-Cheol Baek, Yun-Bo Shim, Dongsoo Jung\*†

**ABSTRACT:** In this study, performance of 2 pure hydrocarbons and 3 mixtures was measured in an attempt to substitute R22 under 3 different temperature conditions. The mixtures were composed of R1270(propylene), R290(propane) and R152a. They were tested in a refrigerating bench tester with a hermetic rotary compressor. The test bench provided about 3.5 kW capacity and water and water/glycol mixture were employed as the secondary heat transfer fluids. All tests were conducted under the same external conditions resulting in the average saturation temperatures of 7°C/45°C and -7°C/41°C and -21°C/28°C in the evaporator and condenser, respectively. Test results show that the coefficient of performance (COP) of these refrigerants is up to 11.54% higher than that of R22 in all temperature conditions. Compressor discharge temperatures were reduced by 14 ~ 31°C with these fluids. There was no problem with mineral oil since the mixtures were mainly composed of hydrocarbons. The amount of charge was reduced up to 58% as compared to R22. Overall, these fluids provide good performance with reasonable energy savings without any environmental problem and thus can be used as long term alternatives for residential air-conditioning and heat pumping application.

**Key words:** Alternative refrigerant(대체냉매), COP(성능계수) Evaporator(증발기), Condenser(응축기), Heat pump(열펌프), Air-conditioning(공조기), Discharge temperature(압축기토출온도)

<hr style="border: 1px solid black;"/>	<b>기 호 설 명</b>			
		$P$	:	압력 [MPa]
		$Q$	:	냉동 능력 [W]
		$T$	:	온도 [°C]
$COP$	:	성능 계수		
$GTD$	:	온도구배 [°C]		
$GWP$	:	지구 온난화 지수		
$\dot{m}$	:	질량유량 [g/s]		하첨자
$ODP$	:	오존층 파괴 지수		
		$avg.$	:	평균값
		$c$	:	응축기
		$dis.$	:	압축기 토출 부분
		$e$	:	증발기
		$w$	:	2차유체

†Corresponding author  
 Tel.: +82-32-860-7320; fax: +82-32-868-1716  
 E-mail address: dsjung@inha.ac.kr

## 1. 서론

지난 반세기동안 R22는 우수한 열역학적, 화학적 성질들과 높은 안정성 때문에 냉동 공조 분야에서 널리 사용되어 왔다. 그러나 1970년대 중반에 CFC들이 대기권에서 분해되지 않고 성층권의 오존층을 파괴한다는 사실이 알려지면서 미국을 비롯한 여러 선진국들은 CFC 및 HCFC 계열의 냉매들을 대체하기 위한 노력을 하기 시작했다. 이에 선진국들은 몬트리올 의정서에 의거하여 1996년 1월 1일부터 HCFC 사용량을 동결하게 되었고 2019년말까지는 전폐시키기로 합의하였다.<sup>(1)</sup> 또한 R22는 지구온난화의 원인이 되는 물질중의 하나이기 때문에 최근 심각하게 문제가 되고 있는 환경문제를 해결하기 위해서는 R22의 대체냉매 개발이 시급하다. 이에 따라 R22를 대체할 가능성이 있는 물질들에 대한 여러 연구가 이미 발표된 바 있다.<sup>(2-4)</sup>

한편 최근에는 오존층을 파괴하지 않는 HFC 역시 지구온난화를 유발한다는 사실이 밝혀짐에 따라 교토 의정서에 의거하여 HFC 사용 또한 규제토록 제안되었다.<sup>(5)</sup> 따라서 많은 EU 국가들은 공기조화기와 히트펌프 등에서 HFC의 사용을 금지토록 하는 것을 고려하고 있다.<sup>(6)</sup>

HFC 사용 규제에 의한 문제들을 해결하기 위한 방법 중의 하나는 탄화수소와 같은 자연냉매를 대신 사용하는 것이다. 많은 탄화수소들이 냉매로서 여러 가지 장점들을 갖고 있음에도 불구하고 가연성 문제 때문에 유럽을 제외한 미국 등 다른 선진국에서는 사용이 거의 무시되어 왔다. 그러나 최근에 환경 보호에 대한 관심이 증대되면서 친환경적인 탄화수소 계열 냉매의 사용이 적극 검토되고 있다. 그 결과 탄화수소에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 몇몇 탄화수소 계열 냉매들이 냉동 공조 분야에 적용되었다.<sup>(7-9)</sup>

현재 EU 국가들과 일본, 한국, 중국, 인도 등에서는 탄화수소인 R600a(Isobutane)를 가정용 냉동/냉장고에 사용하고 있고 유럽에서는 가정용 에어컨, 히트펌프, 상업용 자판기 등에 R290(Propane)과 R1270(Propylene)을 사용하고 있다. 탄화수소 계열의 냉매들은 가격이 저렴하며, 냉동 장치에 쓰이는 물질들과 호환성이 좋고, 기존의 미네랄 오일을 그대로 사용할 수 있으며,

친환경적인 냉매이기 때문이다.

이에 따라 본 연구에서는 ODP는 0이고 GWP가 50미만으로 2개의 순수 하이드로카본 냉매인 R290(Propane), R1270(Propylene) 과 R152a를 각기 공비에 가까운 조성으로 혼합하여 증발기와 응축기내 냉매의 포화온도를 7°C/45°C, -7°C/41°C, -21°C/28°C로 변화시켜가며 성능을 측정하고 그 특성을 비교, 분석 하였다.

## 2. 실험장치

### 2.1 벤치 테스트 설계 및 제작

위의 연구 목표를 달성하기 위해 본 연구에서는 냉매와 물이 대향류를 이루며 흐르면서 외부 조건을 균일하게 맞추어 줄 수 있는 벤치 테스트 장비를 설계하고 제작하여 여러 가지 대체냉매의 냉동 용량, 성능 계수, 압축기 토출 온도 등을 측정하고 비교, 분석 하였다. Fig. 1은 대체 혼합냉매를 실험하기 위해 Mulroy et al.<sup>(10)</sup>이 사용한 것과 비슷하게 설계한 벤치 테스트를 개략적으로 보여준다. 실험장치중 증발기에 대한 자세한 내용은 Jung et al.<sup>(2)</sup>의 연구를 참고하기 바란다.

한편 응축기는 상용 열교환기인 FW 1(미국 Doucette industries사 제작)을 사용하였다.

압축기는 흡입측에 어큐뮬레이터가 부착되어 있는 R22용으로 제작되어진 밀폐형 로타리

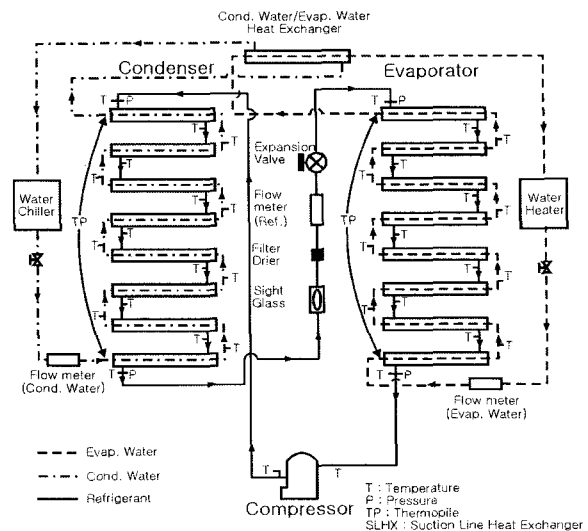


Fig. 1 Schematic diagram of the breadboard heat pump.

식 압축기(QK191KAC LG사 제작)를 사용하였으며, 이 압축기는 냉방능력이 3928W이다. 응축기를 통과한 냉매가 완전히 과냉 되었는지 확인하기 위해 유리로 된 가시화 장치(Sight Glass)를 설치하였으며 팽창밸브 전에 필터 드라이어를 설치하여 냉매 속에 있을지도 모르는 불순물이나 수분 등을 제거하였다. 그리고 미세조절이 가능한 수동식 팽창 밸브를 사용하여 증발기로 들어가는 냉매의 양과 압력을 조절하였다.

증발기의 2차유체로는 에틸렌글리콜이 40wt%로 혼합된 물/에틸렌글리콜 혼합물을 사용하였고, 응축기에는 물을 사용 하였다. 물의 온도를 일정하게 맞추기 위해 응축기에는 칠러를 사용하였으며, 증발기에는 히터를 사용하였다. 그리고 열교환기의 물 측 입구에는 필터를 설치하여 물속에 섞여 있을지도 모르는 불순물을 제거하였다.

## 2.2 데이터 측정

증발기 내에서 냉매 및 물의 온도를 측정하기 위해 각각 20개 이상의 T-type 열전대를 열교환기 연결 부위의 냉매 및 물이 흐르는 관속에 삽입하였고, 모든 열전대들은 사용에 앞서 정도  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 의 정밀 온도계로 보정하였다. 응축기의 냉매와 물의 온도를 측정하기 위해서는 T-type 열전대를 열교환기 표면에 부착하였다. 증발기 및 응축기의 용량을 결정하기 위해서는 각 열교환기로 흐르는 2차유체 측의 온도차를 정확히 측정해야 한다. 2차유체 측의 온도차를 정확히 측정하기 위해 6개의 열전대를 연결하여 Thermopile을 제작하였고 이 역시 정밀 온도계로 보정한 뒤 물 측 입출구에 삽입하여 직접 온도차를 측정하였다. 압축기의 흡입온도와 토출온도도 측정하여 압축기의 안정성과 냉매의 혼합비에 따른 변화도 살펴보았다.

한편 증발기와 응축기의 입출구에는 모세관을

삽입하여 압력 측정포트를 만들었고 정도가  $\pm 0.1\%$  미만인 정밀 압력 변환계를 이용하여 냉매 측 압력을 측정하였다. 한편 압축기의 소요동력은 정도가  $\pm 0.5\%$  미만인 정밀 와트미터를 이용하여 측정하였다. 냉동기의 용량을 정확히 결정하기 위해서는 증발기 측 2차유체의 질량유량을 정확하게 측정해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 점도나 밀도 등 유체의 물성치에 영향을 받지 않고  $\pm 0.2\%$ 의 고정도를 갖는 질량 유량계를 이용하여 증발기 측 2차유체의 유량을 정확하게 측정하였다.

끝으로 온도, 압력, 유량 등의 데이터는 PC와 데이터 로깅 시스템(HP3852A)을 상호 연결하여 수집하였으며, 이렇게 수집한 데이터는 PC의 하드디스크에 저장하여 추후에 데이터 해석을 위한 프로그램을 이용하여 분석하였다.

## 2.3 실험 조건 및 방법

냉매의 성능들을 공정하게 비교하기 위해서는 동일한 실험조건 하에서 데이터를 취해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 실험 조건으로 R22의 증발기 및 응축기내 냉매의 포화온도를  $7^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$ 와  $-7^\circ\text{C}/41^\circ\text{C}$  그리고  $-21^\circ\text{C}/28^\circ\text{C}$ 로 하였을 때 증발기와 응축기의 2차유체의 입구온도와 유량 조건을 실험냉매에 적용하여 성능을 테스트 하였다.

Table 1은 본 연구에 적용된 실험조건으로서 증발기와 응축기에서의 냉매의 포화온도에 따른 2차유체의 입구온도와 유량 조건을 나타낸다. 외부 유체의 입구온도와 유량을 고정하였으므로 실험 냉매들의 포화 온도는 열전달계수 등에 따라 조금씩 다르며 이렇게 실험 데이터를 구해야 공정한 비교와 평가를 할 수 있다. 한편 본 실험에서 증발기 출구의 과열도와 응축기 출구의 과냉도를 각각  $5^\circ\text{C}$ 로 그리고 그 편차는  $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지했다.

Table 1 Test conditions in this study

Test condition no.	$T_c$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_c$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{e,w}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{c,w}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\dot{m}_{c,w}$ (g/s)	$\dot{m}_{c,w}$ (g/s)
1	7	45	26	30	90	100
2	-7	41	9	30.5	90	100
3	-21	28	-5.6	21	90	100

Table 2 Refrigerants tested in this study

Ref. No.	Refrigerant (Mass fraction)	GTD (°C)	GWP
1	R22	0	1700
2	R290 (Propane)	0	<3
3	R1270 (Propylene)	0	<3
4	30%R1270/70%R290	0.59	<3
5	80%R1270/20%R290	0.03	<3
6	71%R290/29%R152a	0	42.7

실험방법에 대한 자세한 내용은 Jung et al.<sup>(2)</sup>의 연구를 참고하기 바란다.

### 2.4 실험 냉매 및 윤활유 선정

본 연구에서는 R22를 효과적으로 대체하기 위해 R22를 기준으로 하여 증기압이 비슷한 탄화수소인 R1270과 R290의 성능 실험을 우선 시행하였다. 그리고 2개의 순수 탄화수소와 R152a의 혼합 냉매를 근공비점에서 조성을 선택하여 성능 평가를 실행하였다.<sup>(11)</sup> 대체혼합냉매의 조성을 결정하기 위해 Radermacher and Jung<sup>(12)</sup>이 만든 사이클 해석 프로그램을 이용하였으며 냉매의 물성치는 미국의 표준 연구소에서 개발한 REFPROP 6.0<sup>(13)</sup>을 이용하여 구하였다.

Table 2는 본 연구에서 실험한 냉매들의 조성과 지구 온난화 지수를 나타낸다. 또한 본 연구에서는 가능한 한 기존의 압축기나 윤활유를 바꾸지 않아도 되는 냉매를 선정하는데 초점을 맞추었으므로 기존에 R22 시스템에 사용되어 온 미네랄 오일을 그대로 사용했다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 밀폐형 로타리식 압축기를 사용하는 수냉식 벤치 테스트에서 R22와 두 종류의 탄화수소 순수 냉매, 탄화수소 냉매와 R152a로 구성된 3개의 2원혼합냉매의 성능을 증발기와 응축기에서의 포화온도를 바꾸어가며 측정하였다.

모든 냉매에 대해 최소한 2번씩 반복 실험을

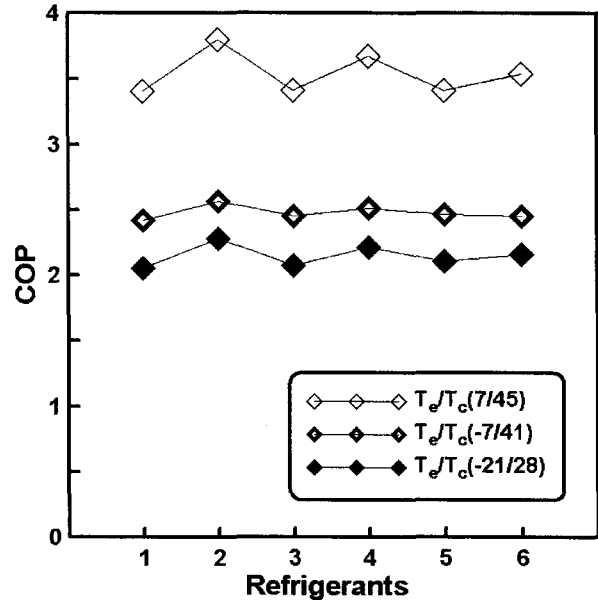


Fig. 3 COP of various refrigerants.

수행해서 각각의 편차가 1% 미만이 되는 것을 확인하여 데이터로 간주했다.

### 3.1 성능 계수

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 냉매들의 3가지 2차유체 온도 및 유량 조건에서의 성능계수를 보여준다. 모든 실험 조건에서 R290이 R22보다 6.1~11.5%정도의 가장 좋은 성능계수 향상을 보였다. 또한 나머지 냉매들도 R22와 같거나 더 좋은 성능계수를 보였다. 따라서 성능계수 측면에서는 실험에 사용된 모든 냉매가 R22의 대체냉매로 적합하다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 냉동 용량

냉동 용량은 냉동에서 성능 계수만큼 중요하게 여겨진다. 만약 대체 냉매의 용량이 기준유체의 용량과 많은 차이를 보인다면, 압축기를 완전히 다르게 설계해야 하므로 설비 제조업체들의 제조 비용이 증가 할 것이다.

Fig. 4는 각각의 2차유체 조건에서 얻은 실험냉매들의 냉동 용량을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 첫 번째와 두 번째 실험 조건에서는 R1270과 R1270의 조성이 높은 5번 냉매의 냉동용량이 R22에 비해 최대 9%까지 높게 나타났다. 그리고

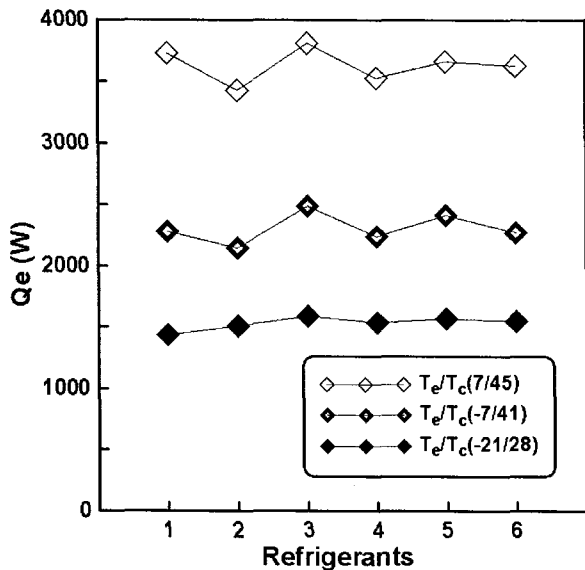


Fig. 4 Refrigerating capacity of various refrigerants.

나머지 냉매들은 R290이 5.8~8.2%까지 감소하는 것을 제외하면 모두 R22와 비슷한 용량을 보였다. 저온실험조건인 세 번째 실험 조건에서는 실험에 사용된 모든 냉매가 R22보다 소폭 향상된 냉동용량을 보였다.

### 3.3 압축기 토출 온도

대체냉매를 적용하려 할 때 시스템의 수명이나 윤활유 및 냉매의 안정성 등을 반드시 고려해야 하는데 압축기의 토출온도는 간접적으로 이런 특성을 알려주는 지표가 된다. Fig. 5는 실험에 사용된 냉매들의 3가지 실험조건에 따른 압축기 토출온도를 보여준다. 그림을 통해 알 수 있듯이 실험에 사용된 냉매들의 압축기 토출 온도는 모든 온도 조건에서 R22와 비교하여 14.1~30.9℃ 만큼 감소하였다. 이 결과로 미루어 볼 때 실험한 냉매들은 윤활유 및 냉매의 안정성에 관해 큰 문제점이 없을 것으로 사료된다.

### 3.4 냉매 충전량

대부분의 탄화수소는 할로카본 냉매들에 비해 액체의 밀도가 현저히 작기 때문에 충전량이 작다.<sup>(14)</sup> 실제로 실험 냉매들은 냉매 충전량이 58% 이상 감소하고, 지구 온난화 지수가 3이하인 탄화

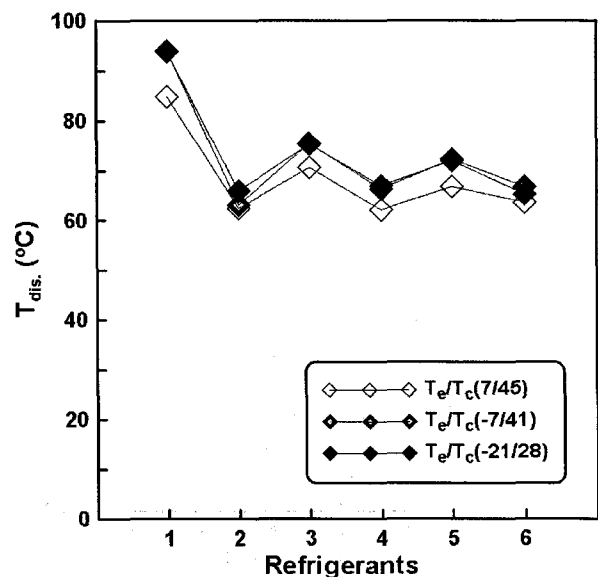


Fig. 5 Discharge temperature of various refrigerants.

수소 이므로 지구 온난화 문제 해결에도 큰 기여를 할 것이라 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 R22를 대체할 수 있는 2가지의 순수 탄화수소와 3가지의 혼합냉매를 선정하여 그 성능을 측정했다. 이를 위해 밀폐형 로타리식 압축기가 장착된 수냉식 벤치 테스터를 설계·제작하였다. 그리고 기준이 되는 냉매인 R22의 증발기와 응축기 내 냉매의 포화온도가 7℃/45℃와 -7℃/41℃ 그리고 -21℃/28℃가 되는 2차유체의 3가지 입구온도 및 유량 조건하에서 실험냉매들의 성능을 측정하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) R290은 저온 조건인 세 번째 온도 조건에서 제외하고 나머지 2가지 온도 조건에서는 R22에 비해 5.8~8.2% 냉동 용량이 감소하였으나 소요동력이 현저히 작아서 성능계수는 오히려 6.1%~11.5% 향상되었다.

(2) R1270은 모든 실험 조건에서 R22에 비해 2.1%~11.1%의 냉동 용량 향상을 보였지만 소요동력이 더 증가하여 성능계수는 비슷하거나 소폭 상승하였다.

(3) R1270/R290과 R290/R152a의 2원혼합냉매는 모든 실험 조건에서 냉동용량은 R22와 비슷하면서 성능계수는 향상되어 R22를 효과적으로 대체

할 수 있는 좋은 냉매라 할 수 있다.

(4) 본 연구에서 사용한 냉매들의 압축기 토출 온도는 R22에 비해 14.1~30.9℃ 정도 낮으므로 시스템의 안정성과 신뢰성에 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

(5) 본 연구에서 사용한 냉매들의 충전량은 탄화수소 특유의 저밀도 액체 특성에 의거하여 R22에 비해 최대 58%까지 감소되었다.

### 참고문헌

1. Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, 1989, Final Act, United Nations Environment Programme.
2. Jung, D., Song, Y. and Park, B., 2000, Performance of Alternative Refrigerant Mixtures for HCFC22, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 23, No. 6, pp. 466-474.
3. Calm, J. M. and Domanski, P. A., 2004, R-22 replacement status, *ASHRAE Journal*, August, pp. 29-39.
4. Domanski, P. A. and Didion, D. A., 1993, Thermodynamic Evaluation of R-22 Alternative Refrigerants and Refrigerant Mixtures, *ASHRAE Transactions*, Vol. 99, Part 2, pp. 636-648.
5. Global Environmental Change Report, 1997, A Brief Analysis of the Kyoto Protocol, Vol. IX, No. 24, December.
6. Cox, N., 2004, Energy Comparison of A Ground Source Heat Pump Using Hydrocarbon Refrigerants, *Prod. of the 6th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference*, Glasgow, UK.
6. Kruse, H., 1996, The State of the Art of the Hydrocarbon Technology in Household Refrigeration, *Proc. of the Int. Conferences on Ozone Protection Technologies*, Washington, DC, pp. 179-188.
7. Jung, D., Song, Y. and Park, B., 2000, Testing of Propane/Isobutane Mixture in Domestic Refrigerators, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 23, No. 7, pp. 517-527.
8. Granryd, E., 2001, Hydrocarbons as Refrigerants - an overview, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 24, pp. 15-24.
9. Primal, WDF., Palm, B. and Lundqvist, P., 2004, Propane Heat Pump with Low Refrigerant Charge : Design and Laboratory Tests, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 27, No. 7, pp. 761-773.
10. Mulroy, W., Kauffeld, M., McLinden, M. O., and Didion, D. A., 1988., Experimental Evaluation of Two Refrigerant Mixtures in a Bread-board Air Conditioner, *Proc. of Int. Inst. Refrigeration*, Purdue Conference on CFCs, Commissions B1, B2, E1 & E2, pp. 27-34.
11. Didion, D. A., and Bivens, D. B., 1990, Role of Refrigerant Mixtures as Alternatives to CFCs, *Int. J. Refrigeration*, Vol. B, pp. 163 ~ 175.
12. Radermacher, R. and Jung, D., 1993, Theoretical Analysis of Replacement Refrigerants for R22 for Residential uses, *ASHRAE Trans.*, Vol. 99, Part1, pp. 333-343.
13. McLinden, M. O., Klein, S. A., Lemmon, E. W. and Peskin, A. P., 1998, NIST Thermodynamics and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures, REFPROP version 6.0.
14. Maclaine-cross, I. L. and Leonardi, E., 1997, Why Hydrocarbons save Energy?, *Australian AIRAH Journal*, Vol. 51, pp. 33-37.