

R410A 에어컨의 성능 향상에 대한 실험적 연구 (An experimental study on the performance improvement of a R410A air-conditioner)

김만희, 김권진, 주의성, 신정섭, 임병한, 배영돈, 박윤서
· 삼성전자 기술총괄 생활시스템연구소

요약

R22 대체냉매로 R410A를 사용하는 가정용 분리형 에어컨의 성능을 향상시키기 위한 연구를 실험적으로 수행하였다. R22 시스템에서 냉매와 압축기의 오일만 교체할 경우 기본시스템에 비해 냉방능력은 17% 증가하였고 에너지 소비효율은 29% 감소하였다. 이를 해결하기 위해 고압냉매 R410A에 적합한 압축기와 시스템의 효율을 향상시키기 위한 고효율 응축기를 개발하였다. R410A 압축기와 고효율 응축기를 R410A 시스템에 적용할 경우 냉방능력과 효율이 R22 시스템에 비해 각각 1.8% 와 2.2% 증가하였으며, 소음도 R22 시스템과 동등한 수준을 나타내었다.

1. 서론

가정 및 산업용 공조기의 냉매로 사용되고 있는 R22 냉매가 지구환경을 파괴하는 물질로 판명되어 생산 및 사용에 대한 규제가 진행되고 있다. 따라서 R22의 대체냉매에 대한 개발 및 이를 시스템에 적용하기 위한 응용연구가 활발히 진행되고 있다[1-9]. 냉매가 지구환경에 미치는 영향은 냉매 자체의 영향뿐만 아니라 시스템의 운전에 필요한 전력 생산시 발생하는 이산화탄소에 의한 간접적인 영향도 함께 고려하는 것이 필요하다. 이러한 냉매의 지구환경에 대한 직접적인 영향과 간접적인 영향을 함께 나타내는 척도가 총동가온난화지수(TEWI: Total Equivalent Warming Impact)이다. 이를 기준으로 보면 친환경 냉매의 선정은 물론 시스템의 효율을 향상시켜 TEWI를 최소화 하는 것이 중요하다. 더구나 가정용 냉동공조기의 경우는 냉매에 의한 직접적인 영향(4%) 보다 간접적인 영향(96%)이 대부분을 차지하고 있어 시스템의 효율을 향상시키는 것은 대단히 중요한 일이다. 그러나 아직까지 R22에 비해 시스템의 성능이 우수한 단일냉매는 개발되지 않고 있으며, HFC 계의 혼합냉매가 가장 많이 검토되고 있다. HFC계의 혼합냉매로는 변온 혼합냉매인 R407C와 단일냉매와 유사한 거동을 보이나 고압냉매인 R410A가 있다. 두 가지 냉매 모두 이론적인 성능이 R22에 비해 떨어지며, R410A는 압축기를 포함한 시스템의 대폭적인 설계변경이 요구되는 냉매이다. Domanski와 Didion[1]은 R22와 R502의 대체냉매에 대한 이론적인 특성을 냉매의 열역학적 성질을 이용하여 해석하고 냉매의 선정에 대한 기초자료를 제시하였다. 김[2]은 열교환기의 구조 및 내부열교환기가 R22 대체냉매

시스템에 미치는 영향을 평가 하였으며, Kim[3], Bivens 등[4], Furuhashi[5]는 변온 혼합냉매인 R407C 와 고압냉매인 R410A(또는 R410B)를 이용한 시스템의 성능 및 사이클 특성을 고찰하고 시스템의 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. Burns 등[6]은 R410A 시스템의 설계, 설치 및 서비스 등에 대한 전반적인 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 R22와 대체냉매의 사이클 및 성능 특성을 이론 및 실험적으로 분석하였다. 우선 R22의 대체냉매 후보들에 대한 이론적인 특성을 NIST REFPROP[7]을 이용하여 해석하고 R22와 비교 분석하였다. 가정용 소형 분리형 에어컨에 냉매와 압축기의 오일을 R410A와 합성유로 교체하여 시스템의 성능 및 사이클의 특성을 R22 기본시스템과 비교하고, 시스템의 효율을 향상시키기 위하여 압축기와 응축기의 구조를 개선하였다. 이를 통하여 R410A 시스템의 성능 및 소음을 R22의 수준 이상으로 확보하였다.

2. 냉매의 이론적 특성

Table 1에 R22와 대체냉매에 대한 주요 성질과 이론적 특성을 나타내었다. 냉매의 이론적 특성은 ASHRAE 시험조건(응축온도: 54.4℃, 증발온도: 7.26℃, 과냉도: 46.1℃, 과열도: 35℃)에 대해 NIST REFPROP[7]을 이용하여 구하였다. R22 대체냉매에 대한 이론적 특성은 참고문헌[8]에 잘 기술되어 있으므로, 여기서는 R410A에 대해서만 간단히 기술하기로 한다. R410A의 경우 냉동능력은 R22에 비해 6% 상승하나 성능계수가 R22에 비해 7% 저하한다. 또한, 고압측의 압력이 R22에 비해 약 60% 정도 높으며 압축기의 행정체적도 30% 정도 감소시켜야 함을 알 수 있다.

Table 1 Theoretical results of various refrigerants in the ASHRAE cycle

	Pure Fluid					Mixture		
	R22	R32	R125	R134a	R290	R407C	R410A	R32/134a (30/70)
ODP(R11=1)	0.05	0	0	0	0	0	0	0
GWP(CO ₂ =1)	1700	580	3200	1300	3	1370	1370	970
Temp. glide(℃)	-	-	-	-	-	6.3	0.1	6.7
Condenser pressure (kPa)	2146	3478 (162%)	2798 (130%)	1480 (69%)	1883 (88%)	2337 (109%)	3389 (158%)	2178 (101%)
Compressor displacement* (cc/rev)	17.44	11.18 (67%)	15.61 (90%)	26.24 (150%)	20.10 (115%)	16.71 (96%)	11.85 (68%)	17.48 (100%)
Latent heat of evaporation (kJ/kg)	170	261 (154%)	98 (58%)	162 (95%)	308 (181%)	170 (100%)	180 (106%)	195 (115%)
COP(%)	100	91	92	100	100	97	93	100

주) * 는 압축기 회전수 3500 rpm 에서의 값을 나타냄

3. 실험

3-1. 실험장치

성능실험은 한국공업규격(KS B-6369)에 따라 열량계(Psychrometric calorimeter)에서 수행하며, 소음실험은 한국공업규격(KS A-0701)에서 규정하는 A특성으로 측정한다. Table 2에 열량계의 간단한 제원을 나타내었다. 열량계는 두개의 향온향습조로 구성되어 있으며, 향온향습조내의 온도와 습도는 실험조건에 따라 설정할 수 있다. 온도와 습도는 냉동기, 가열기 및 가습장치를 이용하여 제어한다. 건 습구온도는 한국공업규격(KS B-6369)의 오차범위(건구온도 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$, 습구온도 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) 이내에서 관리하고 있으며, 실제 실험장치의 오차는 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 정도이다. 에어컨의 능력은 공기 엔탈피법을 이용하여 구하며, 제습성능은 실내기를 통과하는 공기의 습도와 공기의 풍량을 측정하여 구한다. 에어컨의 성능을 평가하는데 필요한 건습구 온도는 에어컨의 실내외기를 통과하는 입출구공기를 샘플링하여 측정한다. 실내기를 통과하는 풍량은 노즐과 보조송풍기로 구성된 Cord-tester에서 측정한다. 풍량의 오차 한계는 $\pm 1\%$ 이며 공기의 물성치에 대한 불확실성은 0.05% 미만으로 매우 작으므로 실험장치는 3% 내의 오차 내에서 신뢰성을 갖는다.

Table 2 Specifications of the psychrometric calorimeter

Items	Specifications	
Available test ranges	Cooling capacity	1,000 ~ 10,000 kcal/hr(1.163 ~ 11.63 kW)
	Heating capacity	1,500 ~ 12,000 kcal/hr(1.745 ~ 13.96 kW)
	Indoor air flow	4.0 ~ 40 m ³ /min
	Temperature and humidity	+10 ~ 40°C, 30 ~ 85% (indoor) -15 ~ 55°C, 30 ~ 95% (outdoor)
Cooling unit	2 x 4.0 kW(indoor), 2 x 5.5 kW (outdoor)	
Heater	24 kW (indoor), 30 kW (outdoor)	
Humidifier	Max. 7.5 ℓ/hr (indoor) Max. 4.5 ℓ/hr (outdoor)	
Cooling tower	40 RT	

3-2. 실험모델

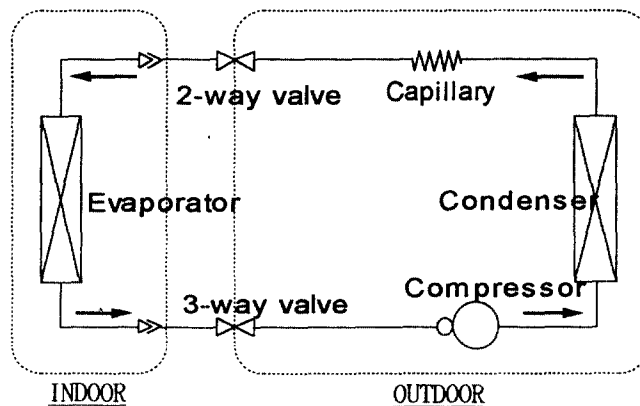


Fig. 1 Schematic diagram for the test unit.

Table 3 Specifications of the baseline unit



Items	Specifications
Rated cooling capacity	4.13 kW
Refrigerant/Oil	R22/Mineral Oil(VG56)
Compressor	Rotary type
Evaporator	ϕ 7 mm, 2-row 12 tubes(719x252 mm)
Condenser	ϕ 9.52 mm, 1-row 28 tubes(690x700 mm)
Expansion device	Capillary(ϕ 1.7 mm, L=800 mm)
Indoor fan	Cross flow fan(ϕ 95.5 mm, L=734 mm)
Outdoor fan	Propeller fan(ϕ 400 mm, L=96 mm)

본 실험에서 사용한 실험모델은 공칭 냉방능력이 4.13 kW인 가정용 분리형 에어컨으로 시스템의 간단한 구조와 사양을 Fig.1과 Table 3에 나타내었다. 시스템은 로터리압축기, 응축기, 모세관, 증발기 등의 증기 압축 시스템의 기본사이클의 구성요소와 어큐물레이터 및 실 내의 열교환용 송풍기 등의 부속장치로 구성되어 있다. 시스템의 사이클 특성을 분석하기 위해 사이클 주요부에 28개의 T형 열전대를 부착하였으며, 증발기 입구, 응축기 출구, 압축기 흡입 및 출구 부에 압력센서를 장착하였다. 실험자료 수집은 하이브리드 레코더와 적산전력계를 이용하고, GPIB로 PC와 연결하여 실시간 처리하도록 하였다.

3-3. 실험조건 및 방법

에어컨의 성능실험은 실내 및 실외의 건/습구온도를 27/19.5℃ 와 35/24℃ 로 각각 설정하는 한국공업규격(KS B-6369)의 고온 냉방 실험 조건에서 수행하였다.

Table 4 Specifications of copper tubes for the condenser

Items	Inner diameter (mm)	Minimum wall thickness (mm)	Mean wall thickness (mm)	Groove depth (mm)	Helix angle $\beta(^{\circ})$	No. of fins n	Vertical angle of fin $\alpha(^{\circ})$	Surface area (A/A _p)*	Condensation heat transfer coefficient (kW/m ² K)
Smooth tube	8.70	0.41	0.41	-	-	-	-	1.0	2.43/2.56**
Type A 	8.68	0.30 ±0.03	0.35	0.12 ±0.02	25 ±2	60	-	1.28	4.28/4.36
Type B 	8.52	0.30 ±0.03	0.36	0.20 ±0.02	18 ±3	60	40 ±10	1.60	7.49/6.68

주) * 는 평관 대비 전열면적을 나타내며, ** 는 R22/R410A의 응축열전달계수를 나타냄

실험은 먼저 기본시스템에 대해 시스템의 변경없이(팽창장치는 용량조절이 용이한 모세관/니들밸브로 변경) R22 냉매를 봉입하여 성능을 측정 한 후, 냉매와 오일만 R410A와 합성유(POE, VG68) 로 각각 변경하여 사이클 매칭 실험을 수행한다. 다음에 R410A용

으로 개발한 압축기의 종류(Type-I, II, III)를 변경하면서 동일한 실험을 반복한다. 시스템에 가장 적합한 압축기(Type-III)를 선정 후 응축기의 구조를 변경하면서 동일한 방법으로 성능 실험을 수행한다. 응축기는 먼저 핀형상을 파형슬릿핀에서 신형핀(D-fin: 파형슬릿핀에 비해 공기측 열전달 계수 25% 우수)으로, 핀피치를 1.2mm에서 1.3mm로 변경한 것을 적용한 시스템에 대한 성능실험을 수행하고, 마지막으로 응축기의 전열관을 Type-A에서 Type-B(Type-A에 비해 R410A의 응축열전달계수 53% 우수)로 변경하고 신형핀(D-fin)을 적용한 시스템에 대한 실험을 같은 방법으로 진행한다. Table 4에 본 연구에서 적용한 냉매관에 대한 사양과 응축열전달계수를 나타내었다.

소음은 룸에어컨의 실험규격인 KS C-0701에 규정하는 A특성으로 에어컨을 운전시킨 상태에서 측정하였다. 소음 측정실은 암소음이 17~18dB인 두개의 무향실로 구성되어 있다. 실내측 소음은 실내기 전면의 중앙에서 1m 거리에 마이크로폰을 설치하여 측정하였으며, 실외측은 전후면 중앙에서 1m 거리에서 같은 방법으로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

Figs. 2~4와 Table 5에 R410A 시스템의 성능 및 소음 실험 결과를 R22의 기본 시스템의 결과와 비교하여 나타내었다.

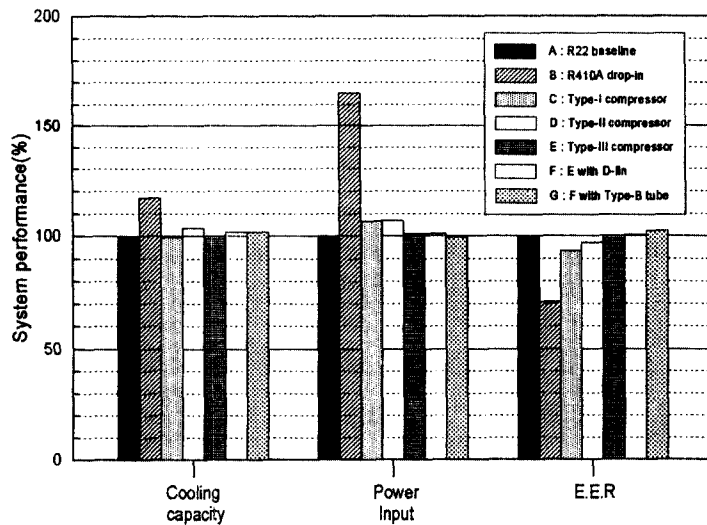


Fig. 2 System performance of different design options.

Fig. 2에는 R410A 압축기와 응축기의 설계변경에 따른 성능 실험결과를 나타내었다. R22 시스템에 냉매와 압축기의 오일만 변경한 Drop-in 실험의 경우는 기본 시스템에 비해 냉방능력은 17% 증가하였고 에너지 효율은 29% 감소하였다. 이는 이론해석에서도 알 수 있듯이 R410A 냉매는 압축기 입구의 비체적이 R22에 비해 상대적으로 작아 R22와 동일한 압축기를 사용할 경우 냉매의 질량유량이 증가하기 때문이다. 냉매의 질량유량이

증가하면 시스템의 응축압력은 상승하고 증발압력은 감소하여(Figs. 3~4 참조) 압축기의 소비전력이 증가한다. R410A용으로 개발한 압축기의 종류별 성능을 보면 Type-III 압축기가 가장 우수하나, 에너지 효율은 R22 기본 시스템에 비해 작게 나타나고 있다. 공기측 전열계수가 기본시스템에 사용된 응축기의 파형슬릿핀에 비해 25% 정도 우수한 D-fin을 적용한 결과를 Fig. 2의 막대그래프 E에 나타내었는데, D-fin의 적용으로 에너지 효율이 1.5% 정도 상승하였다. 막대그래프 G는 응축기의 전열관으로 Type-B를 사용한 결과이며, 이를 통하여 시스템 효율이 1.7% 증가하였다. 결과적으로 고효율 압축기(Type-III)와 응축기(D-fin, Type-B 전열관)의 적용으로 R410A의 냉방능력과 에너지 효율이 기본시스템에 비해 1.8% 와 2.2%가 각각 증가하였다. 이는 Figs. 3~4에서도 알 수 있듯이 응축기의 전열능력이 증가하면서 응축압력이 상대적으로 감소하여 압축기의 소비전력이 감소하기 때문이다.

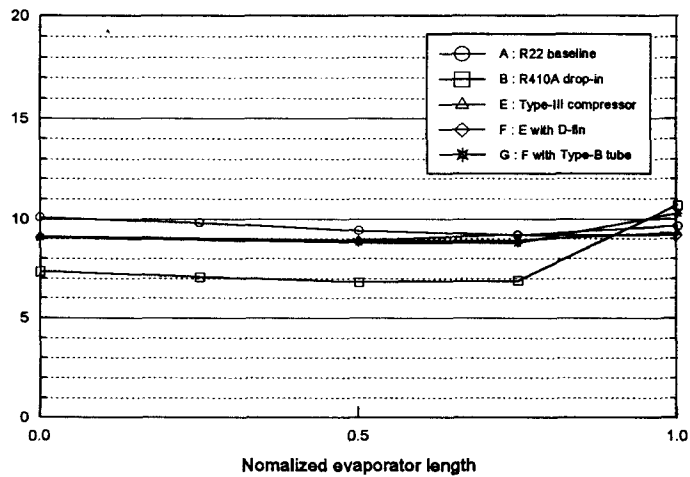


Fig. 3 Evaporator wall temperature profiles along the heat exchanger length.

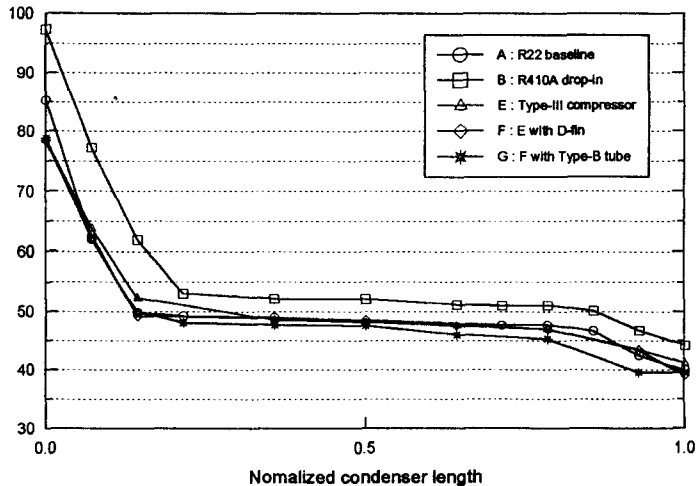


Fig. 4 Condenser wall temperature profiles along the heat exchanger length.

Fig. 3과 Fig. 4에는 R410A 압축기 및 응축기의 종류에 따른 증발기 및 응축기관 벽면의 온도분포를 R22 기본시스템의 결과와 비교하여 나타내었다. Drop-in 실험의 경우는 냉매의 비체적이 작아 R22와 동일한 행정체적의 압축기를 사용하면 냉매의 유량이 상대적으로 증가하여, 응축압력은 증가하고 증발압력은 감소하게 된다. 따라서 응축온도는 상승하게 되고 증발온도는 감소한다. 압축기의 행정체적을 30%정도 감소시킨 R410A 압축기를 사용할 경우 열교환기에서의 온도분포는 R22의 기본시스템과 유사함을 볼 수 있다. 다만 증발기의 온도분포를 보면 R410A의 경우가 R22에 비해 열교환기의 길이에 따른 온도변화가 작은 것을 알 수 있는데, 이는 R410A의 냉매의 압력강하가 R22에 비해 상대적으로 작기 때문이다. 또한 고효율 응축기를 적용할 경우 응축온도가 약간 저하하는 것을 알 수 있는데 이는 시스템의 효율을 향상시키는 요인이 된다.

Table 5에는 R410A 시스템의 소음 수준을 R22 시스템과 비교하여 나타내었다. R410A 시스템의 소음 수준은 R22 시스템에 비해 약간 향상 되었음을 알 수 있다.

Table 5 Noise level of R410A system compared to R22 system

		Standard(dB)	R22(dB)	R410A(dB)
Indoor Unit		38 + 3	40.1	38.6
Outdoor unit	Front part	53 + 3	53.9	52.7
	Rear part		55.2	54.6

5. 결론

R22의 대체냉매에 대한 열역학적 특성을 해석하고, 대체냉매로 R410A를 사용하는 가정용 분리형 에어컨의 성능을 향상시키기 위한 연구를 실험적으로 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. R410A의 ASHRAE 사이클에서의 이론적 냉방능력은 R22에 비해 6% 정도 크며, 에너지효율은 7% 정도 작게 나타났다.
2. R410A의 고압축 압력은 R22에 비해 60% 정도 크며, 냉매의 비체적이 작아 압축기의 행정체적을 30% 정도 감소시켜야 한다.
3. R22 시스템에 냉매와 오일만 변경한 Drop-in 실험에서는 시스템의 능력은 17% 증가하였으며, 에너지 효율은 29% 감소하였다.
4. 압축기의 행정체적을 30% 정도 감소시킨 R410A 압축기를 채용한 시스템의 성능은 R22과 유사하며, 압축기의 설계는 시스템의 효율에 큰 영향을 미친다.
5. 시스템의 효율은 응축기의 전열능력을 증가시키면 비교적 용이하게 향상시킬 수 있으며, 신형핀(D-fin)과 고효율 전열관(Type-B)을 사용한 응축기의 적용으로 R410A 시스템의 냉방능력과 효율이 R22 기본시스템 대비 1.8%, 2.2% 가 각각 증가하였다.
6. R410A 시스템의 소음 수준은 R22 시스템에 비해 약간 우수하게 나타났다.

참고문헌

1. P.A. Domanski and D.A. Didion, 1993, "Theoretical evaluation of R-22 and R-502 alternatives," NIST Report Prepared for ARTI.
2. 김만희, 1995, "R-22 대체냉매 에어컨의 성능향상 방안," 한일냉동공조세미나, pp.133-165.
3. Man-Hoe Kim, 1996, "Performance evaluation of R-407C and R-410B in a residential air conditioner," AREP Technical Committee Meeting, Atlanta, USA.
4. D.B. Bivens et al., 1995, "HCFC-22 alternatives for air conditioners and heat pumps," ASHRAE Trans, Vol.101, Pt.2, pp.1065-1071.
5. K. Furuhashi, 1996, "Experiences in air conditioning heat pumps with mixed refrigerants," 5th International Energy Agency Conference on Heat Pumping Technologies, Toronto, Canada, Vol.1, pp.199-205.
6. L.D. Burns, L. Hoffman, D. Schuster, 1996, "R410A experiences in unitary air conditioner systems," Proceedings of the International Symposium on HCFC Alternative Refrigerants, Kobe, Japan, pp.61-66.
7. M. Huber, J. Gallagher, M. McLinden, and G. Morrison, 1996, NIST Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures Database (REFPROP), Version 5.0, NIST.
8. 김만희, 박윤서, 1996, "신냉매 적용 냉동공조기기 개발 동향," 공기조화 냉동공학, Vol.25, No.6, pp.489-505.
9. 신정섭, 임병환, 김만희, 배영돈, 박윤서, 1997, "R22와 R410A의 수평관내 응축열전달 특성," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, B권, pp.323-327.