

R32 인버터 히트펌프 시스템의 성능향상에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Performance Improvement of an R32 Inverter Heat Pump System

박윤기(Yun Ki Park)¹, 하만영(Man Yeoung Ha)^{2*}

¹LG전자 시스템 에어컨 연구소, ²부산대학교 기계공학과

¹SAC R&D Laboratory, LG Electronics, Gyeongnam 641-711, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

(Received June 5, 2014; revision received September 23, 2014; Accepted: September 29, 2014)

Abstract As global warming in recent years has raised ever more critical concern, refrigerants with high global warming potentials (GWP) are facing the challenge of being phased out. R410A, with a GWP of 2,088, has been widely used in residential air-conditioning and heat pump systems. A potential substitute for R410A is R32, which has a GWP of 675. The present study presents experimental results of an inverter heat pump system that uses R32 as an alternative refrigerant to R410A. Drop-in tests with R32 indicated that the energy efficiency ratio of the system increased by 5.3% in cooling standard mode, and by 4.2% in heating standard mode at the same capacity; and that the cooling and heating capacity increased by about 12% at the same compressor operating frequency, while the annual performance factor (APF) of the system increased by 5.3%.

Key words Air-conditioner(에어컨), Heat pump(히트 펌프), R32 refrigerant(R32 냉매), Condenser(응축기), Evaporator(증발기), Compressor(압축기), COP(성적 계수)

* Corresponding author, E-mail: myha@pusan.ac.kr

기호설명

APF : Annual performance factor
Cool. : Cooling
COP : Coefficient of performance
EER : Energy efficiency ratio
Heat. : Heating
HSPF : Heat seasonal performance factor
SEER : Seasonal energy efficiency ratio
RPS : Revolutions per second
Temp. : Temperature
Std. : Standard

1. 서 론

지구 온난화 문제가 최근 몇 년 동안 지속적으로 제기됨에 따라 지구 온난화 지수(GWP)가 높은 냉매는 단계적으로 폐지될 예정으로 있다. 주거용 및 중소형 상가용 에어컨 및 히트 펌프 시스템에 널리 사용되는 HFC 계열 R410A도 GWP가 2,088로 높아서 단계적으로 폐지되어야 할 냉매이다.

R410A를 대체 가능한 여러 가지 냉매 중 R32는 GWP가 675로 R410A 대비 낮아 매력적일 뿐 아니라 동일 시스템에서 냉매량도 25~35%정도 줄어들며 친환경 경적이며 R410A와 비슷한 성능, 효율을 나타내어 가장 강력한 R410A를 대체할 수 있는 냉매로 인식되고 있다.

1996년 Pande et al.⁽¹⁾은 Drop in test를 통하여 R410A 대비 냉방 능력 6.8%, 효율 1.8% 증가 및 난방 능력 6.8%, 효율 4.3% 증가를 확인 하였고, 2012년 Pham et al.⁽²⁾은 R410A 대비하여 냉방 능력 3.3%, 효율 1.7% 증가 및 난방 능력 3.9%, 효율 0.9% 증가를 확인 하였다.

2012년 Xu et al.⁽³⁾은 동일 응축온도와 증발온도에서 체적당 잠열이 크고 등엔트로피 압축 효율이 R410A 대비하여 높아서 능력과 효율이 향상됨을 예측하고 실험 결과 R410A 냉방 능력 3.7%, 효율 2.5% 증가 및 난방 능력 7.2%, 효율 2.0% 증가함을 확인 하였다.

2000년 Yajima et al.⁽⁴⁾은 인버터 압축기를 적용한 시스템에서 동일 능력 조건에서 사이클 최적화를 실시하여 냉방 효율 최대 10% 증가 및 난방 효율 7% 증가함을 확인 하였다.

요약하면 R32 냉매는 R410A 대비하여 우수한 성능 및 낮은 GWP에도 불구하고 가연성 이슈로 단일 냉매로 사용하지 못하고 혼합 냉매에 주로 적용되었지만 GWP가 675으로 현재 채택할 수 있는 현실성이 있는 냉매로 냉매량이 많지 않은 가정용 에어컨을 중심으로 적용할 수 있으리라 판단된다.

친환경 규제 강화뿐만 아니라 에너지 효율 규제도 상향되고 있으며 특히, 냉난방 정격, 부분부하, 착상, 한랭지 능력 및 효율을 연간 누적 사용 시간을 고려하여 통합 효율로 표시하는 연간 에너지 소비 효율(APF)가 유럽, 일본 및 한국을 중심으로 도입되고 있다.

본 연구에서는 R410A를 사용하는 시스템에 R32 냉매를 적용하고 KS C 9306 에어컨디셔너⁽⁷⁾에 의거하여 운전 및 부하 조건에 따른 냉매 특성을 비교하고 연간 에너지 소비 효율 (APF) 값을 구하여 한국 환경에 적용 시 시스템의 특성을 종합적으로 비교 하고자 한다.

2. 냉매의 이론적 특성

Table 1에 R410A와 R32 냉매의 주요 물성과 실제 제품이 사용되는 냉방 운전 조건을 모사 하여 응축 온도는 48℃, 증발 온도 10℃, 토출 과열도와 흡입 과열도는 0으로 하는 경우 체적당 냉방 능력을 EES(energy equation solver)⁽⁸⁾라는 프로그램을 이용하여 나타내었다.

R32는 단일 냉매로 GWP가 675로 R410A 2,088 대비 낮아 친환경 냉매라 할 수 있다. R410A 대비 끓는 점은 -51℃ 수준으로 유사하고 임계 압력은 5.78 Mpa로 17% 높고 임계 온도는 78.1℃로 6℃ 높음을 알 수

Table 1 Basic property comparison(EES)

Property	Unit	R410A	R32
Composition		R32/R125 (50/50 wt.%)	Pure fluid
Molecular weight	g/mol	72.6	52
Critical pressure	Mpa	4.93	5.78
Critical temperature	℃	72.1	78.1
Critical density	kg/m ³	489	424.1
Normal boiling point	℃	-51.5	-51.7
GWP		2,088	675
Vapor density @10℃	kg/m ³	42.00	30.03
Latent heat @10℃	kJ/kg	209.9	298.9
Cooling effect @10℃	kJ/kg	150.76	232.89
Cooling effect per volume @10℃	kJ/m ³	6,332	6,994

있다. 증발 온도가 10℃인 경우 R32의 잠열은 R410A 대비 42.4% 크고 밀도는 27.9% 적으므로 체적당 잠열은 약 3% 큼을 알 수 있다.

응축 온도 48℃, 증발 온도 10℃, 토출 과열도와 흡입 과열도는 0으로 하여 냉동 효과를 구하면 R410A 대비 55.5% 크고 밀도는 27.9% 적으므로 체적당 냉동 효과를 구하면 약 10% 상승함을 알 수 있는데 열교환기 설계를 최적화 한다면 동일 시스템에서 냉매의 변경만으로 성능을 약 10% 이상 향상 시킬 수 있음을 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치의 구성

인버터 히트펌프의 성능을 평가하기 위한 Fig. 1에 실험장치의 개략도와 Table 2에 실험 장치의 상세 사양을 나타내었으며 냉방능력 14.5 kW, 난방능력 17.0 kW의 용량을 갖추고 있다. 실외기는 인버터 트윈 로터리 압축기, 핀-튜브 방식의 루버형 열교환기, 전자 팽창밸브, 수액기, 압력 센서, 온도 센서와 열교환을 위한 팬, BLDC 모터로 구성이 되어 있다. 실내기는 핀-튜브 방식의 루버형 열교환기와 열교환 위한 팬, BLDC 모터로 구성된 카세트 방식의 실내기를 적용하였다.

인버터 히트 펌프의 성능 실험 장치는 실내기용과 실외기용의 두 개의 항온항습실로 이루어져 있으며 내부 온도를 ±0.2℃ 이내로 제어할 수 있도록 구성되어 있으며 실내기 측에는 실내기의 풍량을 ±2% 이내로 측정할 수 있는 수풍실이 설치되어 있다. 냉난방 성능 측정은 KS C 9306 에어컨디셔너⁽⁷⁾에 나와 있는 규정에 따라 공기열량계식 칼로리미터를 이용하여 측정을 실시하였으며 측정 시스템의 구성은 Fig. 2에 나타내었다.

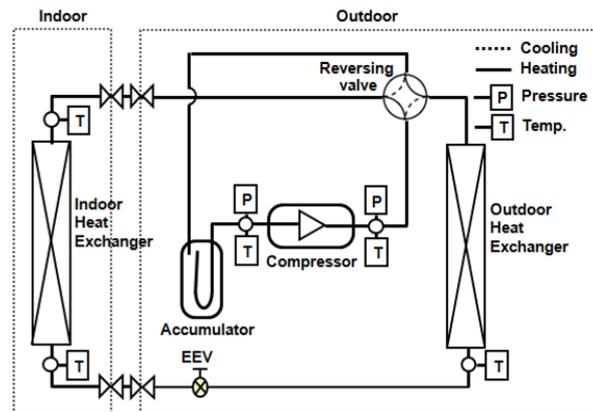


Fig. 1 Schematic diagram of system.

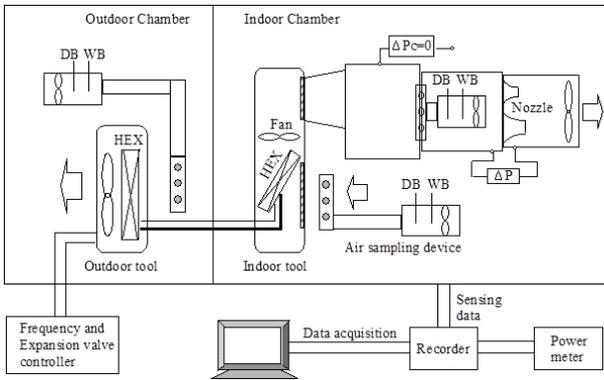


Fig. 2 Capacity measuring system.

Table 2 Specification of system

Component	Specification	
Compressor	Type	Twin rotary
	Displacement	44 cc/rev
	Motor Type	BLDC
	Range	15~95 RPS
Inverter Drive	Type	Sine wave control
	Max input	5.5 kW
	Efficiency	94~96%
Indoor Heat Exchanger	Type	Fin & tube Φ7.0 2R 12C
	Fin type	Louver
	Size	2000×252×25.4 mm
	Face area	1.28 m ²
Outdoor Heat Exchanger	Type	Fin and tube Φ7.0 2R 64 C
	Fin type	Wide Louver
	Size	950×1344×36.4 mm
Expansion valve	Type	EEV
	Nozzle size	3 mm
	Range	30~460 Pulse
Indoor Fan Motor	Fan Type	Turbo fan
	Motor Type	BLDC
	Air volume	33 m ³ /min.
Outdoor Fan Motor	Fan Type	Axial fan
	Motor Type	BLDC
	Air volume	110 m ³ /min.

측정 불확도는 ISO/TS 16491⁽⁶⁾에 나와 있는 규정에 따라 분석한 결과 냉방 ±2.21%, 난방 ±1.49% 수준임을 확인하였고 상세 내용은 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Uncertainty of measurement

Measured quantity	Uncertainty of measurement
Dry-bulb temperature	±0.2°C
Wet-bulb temperature	±0.2°C
Volume flow	±2.21%
Static pressure difference	±5 Pa
Electrical inputs	±0.5%
Mass	±1.0%
Cooling capacity	±2.21%
Heating capacity	±1.49%

3.2 실험 조건 및 방법

본 연구는 냉방 14.5 kW, 난방 17 kW인 R410A 인버터 히트 펌프 시스템에 R32 냉매를 적용하여 Drop in Test를 진행하는 것으로 하였고 R410A 대비 압축기 토출 온도가 과도하게 올라가 압축기 권선 소손되는 것을 막기 위하여 120°C로 제한하였다. 실험 결과를 얻는 정상상태 판단은 팽창 장치 개도 조작 및 압축기 회전수 변경 등의 실험 조건 변화 이후 능력, 소요 동력 및 사이클의 주요 지점에서의 상태량이 10분 이상 변화가 없을 경우로 하였고, 정상 상태 판단 이후 5분간 7회 총 35분 간 데이터를 적산 평균하여 취득하였다.

KS C 9306 에어컨디셔너⁽⁷⁾의 가변속 시스템의 3점식 시험법에 따라 Table 4에 나타낸 것처럼 냉방 표준 운전에서 설계 능력 100%, 70%, 40%를 측정하였으며 냉방 표준에서 결정된 압축기의 회전수를 고정하여 냉방 저운전에서 100%, 70%, 40%의 능력을 측정하였다.

Table 4 System test condition of each cases

	Indoor DB/WB	Outdoor DB/WB	Capacity Ratio
Cool. std. temp. [°C]	27/19	35/24	100/70/40%
Cool. Low temp. [°C]	27/19	29/19	100/70/40%
Heat. std. temp. [°C]	20/15	7/6	100/70/40%
Heat. defrost [°C]	20/15	2/1	Max
Heat. low temp. [°C]	20/15	-7/-8	Max

난방 표준 운전에서 설계 능력 100%, 70%, 40%를 측정하였으며 제상 능력 시험 및 최저 난방 실험에서는 압축기의 RPS를 최대로 상승하여 실험을 실시하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 냉매량 최적화

냉매량은 R410A의 경우 3,400 g이나 R32의 경우 동일 체적 사이클의 경우 25% 이상 감소하는 것으로 선행 연구 결과에서 확인 하였으므로 2,200~2,800g까지 100 g씩 증가시키면서 압축기 회전수와 전자 팽창 밸브를 최적화 하여 실험을 실시하였다. Fig. 3에 나타낸 것처럼 결과 난방 능력은 74% 부근에서 최적화 되며 난방 능력은 71%에서 최적화됨을 확인하였다. 난방 저온에서 표준보다 냉매가 많이 필요함으로 냉매량은 2,500 g으로 확정하여 남은 시험을 진행하였다.

4.2 난방 운전 조건에 따른 성능 비교

실험을 수행한 결과 R410A 대비 난방 표준 100%, 70%, 40% 운전에서 Fig. 4에 나타낸 것처럼 5.3%, 4.8%, 2.9% 우수하며 난방 최소 100%, 70%, 40% 운전에서

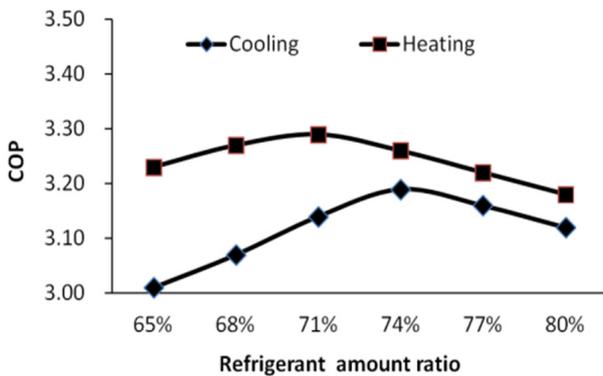


Fig. 3 COP graph of system according to refrigerant amount ratio(R410 A : 3,400 g).

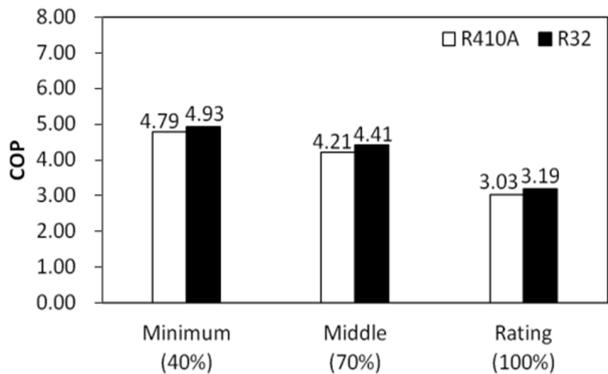


Fig. 4 Cooling COP graph of system with standard cooling conditions.

Fig. 5에 나타낸 것처럼 4.9%, 3.8%, 3.9% 우수함을 알 수 있다. 효율 상승은 기본적으로 냉매의 특성에 기인한다고 할 수 있으며 실험적으로도 효과가 있음을 확인할 수 있다.

특히, 냉매 특성으로 인하여 실내의 열교환기 용량이 확보되는 경우 압축기 운전 RPS는 R32 대비 약 10% 정도 감소하더라도 동일 능력을 낼 수 있음을 알 수 있다.

4.3 난방 운전 조건에 따른 성능 및 효율 비교

난방 표준은 난방 대비 약 15% 큰 17 kW로 설정하여 측정하였고 난방 저온 시 난방 표준과 동일한 회전수로 운전하는 경우 난방 능력이 떨어지므로 압축기 최대 운전 가능 회전수인 95 RPS로 실험을 실시하였다. 수행한 결과 난방 표준 100%, 70%, 40% 운전 시 Fig. 6에 나타낸 것처럼 R410A 대비 5.3%, 4.8%, 2.9% 우수하며 난방 저온 운전 시 Fig. 7, Fig. 8에 나타낸 것처럼 R410A 대비 능력 12% 상승하고 효율은 3.8% 상승함을 알 수 있다.

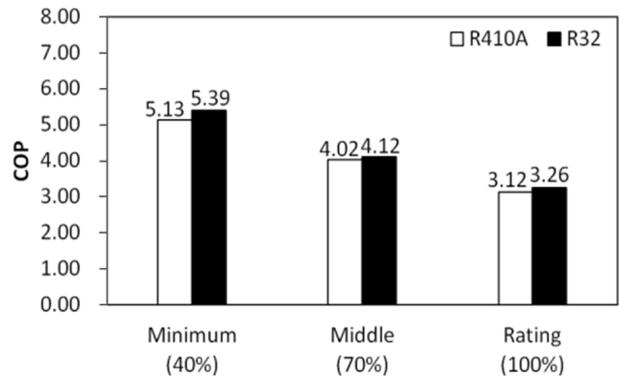


Fig. 5 Cooling COP graph of system with minimum cooling conditions.

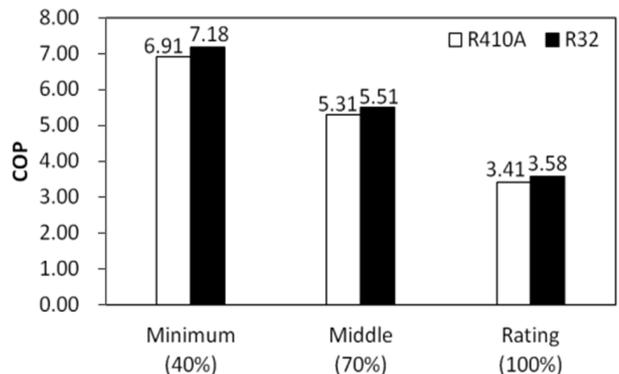


Fig. 6 Heating COP graph of system with standard heating conditions.

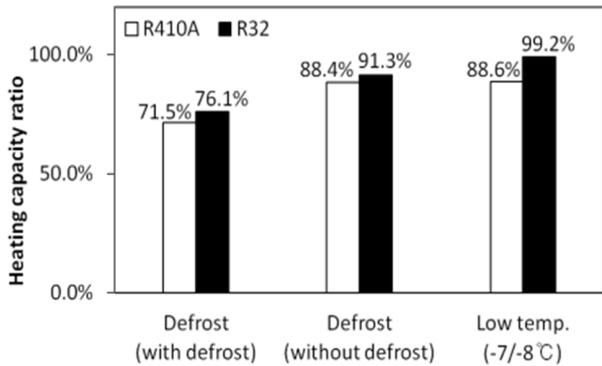


Fig. 7 Heating capacity ratio graph of system with defrost and low temp. conditions.

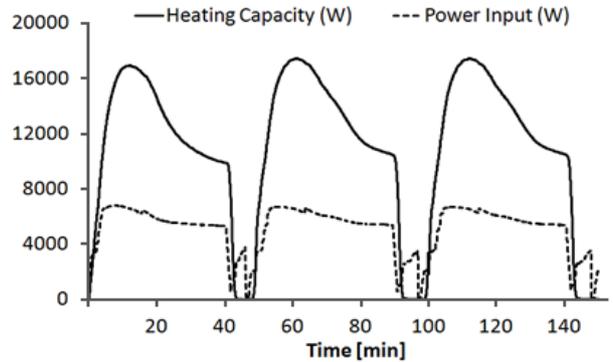


Fig. 9 Heating capacity and power input graph of system with defrost conditions.

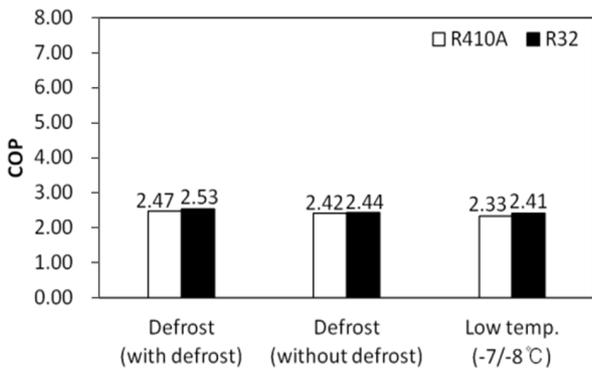


Fig. 8 Heating COP ratio graph of system with defrost and low temp. conditions.

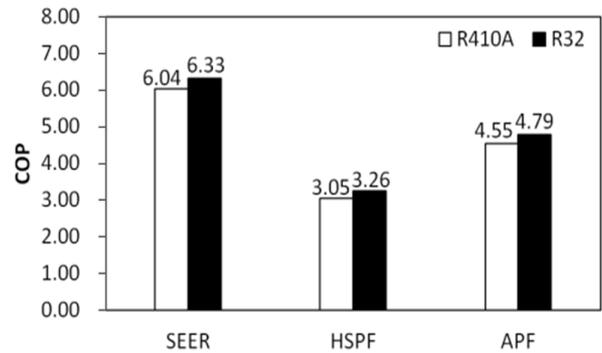


Fig. 10 Graph of SEER, HSPF and APF.

4.4 제상 조건에 따른 성능 및 효율 비교

착상 영역에서는 착상으로 인하여 열교환기 능력이 저하되며 난방 능력이 감소하므로 압축기 회전수를 최대 95 RPS까지 올려서 난방 능력을 최대화 하는 방법으로 시험을 실시하였고 난방 운전 시에는 토출 과열도를 확보하는 방향으로 전자 팽창 밸브를 제어하였으며 제상 운전 시에는 전자 팽창 밸브를 최대로 열고 실내기, 실외기 팬을 정지하여 빠른 시간 안에 제상운전을 마칠 수 있도록 하였다.

제상 능력은 초기 제품 운전 후 제상을 포함한 난방 3 사이클을 누적한 평균 난방 능력과 평균 소비 전력을 구하여 나타내었고 무제상 능력은 초기 제품 운전 후 10~30분을 누적한 평균 난방 능력과 평균 소비 전력을 구하여 나타내었다.

실험 결과 Fig. 7, Fig. 8에 나타낸 것처럼 R410A 대비 제상 능력은 6.4% 상승하고 제상 효율은 2.4% 상승함을 알 수 있으며 무제상 능력은 R410A 대비 3.2% 상승하고 무제상 효율은 0.1% 상승함을 알 수 있다.

4.5 연간 에너지 소비 효율 비교

KS C 9306 에어컨디셔너의 가변속 시스템의 3점식 시험법에 따라 냉방 6조건, 난방 5조건, 총 11조건 실험을 실시하고 R32에 맞도록 최적화를 실시한 결과 Fig. 10에 나타낸 것처럼 R410A 냉방 SEER은 4.8% 증가, 난방 HSPF는 6.8% 증가 APF는 5.2% 증가됨을 알 수 있다. 난방 HSPF의 상승이 냉방 SEER 상승률보다 높은 이유는 R32의 냉매의 특성상 동일 압축기 회전수에서 능력이 높은 영향이 반영된 효과라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 인버터 히트 펌프 시스템에 R410A 및 R32 냉매를 적용하여 다양한 냉방, 난방 운전 조건에서 능력과 에너지 소비 효율에 대한 최적화 평가를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) R32 냉매 충전량 실험 결과는 동일 R410A 시스템 대비 약 24%의 냉매량 저감 효과가 있고 GWP가

R410A 대비 2,088 대비 675로 줄어 현실적으로 가장 채택이 용이한 냉매임을 알 수 있다.

- (2) R32 냉매를 적용하는 경우 R410A 대비 냉방 표준 100%, 70%, 40% 운전에서 5.3%, 4.8%, 2.9% 효율이 우수하며 냉방 최소 100%, 70%, 40% 운전에서 4.9%, 3.8%, 3.9% 효율이 우수함을 알 수 있다.
- (3) R410A 대비 난방 표준 100%, 70%, 40% 운전 시 5.3%, 4.8%, 2.9% 효율이 우수하며 난방 저온 운전 시 R410A 대비 능력 12% 상승하고 효율은 3.8% 상승함을 알 수 있다.
- (4) R410A 대비 제상 능력은 능력 6.4% 상승하고 효율은 2.4% 상승함을 알 수 있으며 무제상 능력은 R410A 대비 능력 3.2% 상승하고 효율은 0.1% 상승함을 알 수 있다.
- (5) R410A 대비 냉방 SEER은 4.8% 증가, 난방 HSFP는 6.8% 증가, APF는 5.2% 증가됨을 알 수 있다.
- (6) R32 냉매를 적용하는 경우 열교환기를 충분하다고 가정하는 경우 R410A와 동일 사양 시스템에서 약 10%의 능력 상승효과가 있음을 냉매의 특성으로 분석하였고 실험적으로도 효과가 있음을 확인할 수 있다.

References

1. Pande, M., Hwang, Y. H., Judge, J., and Radermacher, R., 1996, An experimental evaluation of flammable and non-flammable high pressure HFC replacements for R-22, Proceedings, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, pp. 20-26.
2. Pham, H. and Rajendran, R., 2012, R32 and HFOs as low-GWP refrigerants for air conditioning, Proceedings, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, p. 2262.
3. Xu, X., Hwang, Y. H., Radermacher, R., and Pham, H., 2012, Performance measurement of R32 in vapor injection heat pump system, Proceedings, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, p. 2328.
4. Yajima, R., Kita, K., Taira, S., and Domyo, N., 2000, R32 as a solution for energy conservation and low emission, Proceedings, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, pp. 406-414.
5. Yan, C., Xu, H., Ginies, P., and Watts, S., 2012, R32 scroll compressors technology, Proceedings, International Compressor Engineering Conference, Purdue, p. 1429.
6. ISO/TS 16491, 2012, Guidelines for the evaluation of uncertainty of measurement in air conditioner and heat pump cooling and heating capacity tests, pp. 14-18.
7. KS C 9306, 2011, Air-conditioner, pp. 89-110.
8. EES website, <http://www.mhhe.com/engcs/mech/eess/>.