

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.5.431>

ISSN 1226-4881

항공전자기기용 냉각시스템의 대체냉매 적용에 관한 실험적 연구

강 훈* · 정종호* · 정민우* · 지용남** · 유용선** · 최희주*** · 변영만*** · 김영진**** · 오광윤*** · 김용찬*†

* 고려대학교 기계공학과, ** 부광씨엔에스 주식회사, *** 퍼스텍 주식회사 기술센터

Experimental Study of Adoption of Alternative Refrigerant for Avionic Equipment Cooling System

Hoon Kang*, Jongho Jung*, Minwoo Jung*, Yongnam Chi**, Yongseon Yoo**, Heeju Choi***, Youngman Byeon***, Youngjin Kim**, Kwangyoon Oh*** and Yongchan Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

** Bookwang Corporation & System Co., Ltd,

*** R&D Center, FIRS TEC Co., Ltd

(Received June 5, 2012 ; Revised February 25, 2013 ; Accepted February 26, 2013)

Key Words: Cooling System(냉각시스템), Alternative Refrigerant(대체냉매) Vapor Compression Cycle(증기압축사이클), Avionic Equipment(항공전자기기)

초록: 항공전자기기의 정상적인 동작을 위해서는 내부에서 발생하는 열부하를 적절히 처리해야 하기 때문에 냉각시스템의 장착이 요구된다. 본 연구에서는 항공용 냉각시스템으로의 대체냉매 적용 가능성을 분석하기 위하여 증기압축 사이클 방식의 밀폐 공기순환 냉각시스템을 설계·제작하였다. 대체냉매로 가장 유력한 R236fa를 냉각시스템에 적용하여 냉매 충전량, 팽창밸브 개도, 그리고 압축기 운전회전수 변화에 따른 성능특성을 실험적으로 고찰하였다. 또한, 실험결과를 기존 냉매인 R124의 실험결과와 비교·평가를 수행하여, R236fa가 대체냉매로서 적용 가능함을 확인하였다. 최종적으로 R236fa를 적용한 냉각시스템의 효율 향상을 위한 설계 개선안을 제시하였다.

Abstract: A cooling system is adopted to control the thermal load from the avionic equipments in an aircraft for stable operation. In this study, an avionic cooling system was designed and manufactured by adopting a vapor compression cycle with a closed-loop air-circulation system to investigate the operating characteristics of an alternative refrigerant. The performance characteristics of a cooling system adopting R236fa as an alternative refrigerant were experimentally determined by varying the refrigerant charging amount, expansion valve opening, and compressor rotation speed. The experimental results were analyzed and compared with those of a cooling system adopting R124 as a refrigerant. The possibility of the adoption of R236fa as an alternative refrigerant was verified, and design solutions were suggested to improve the system efficiency.

1. 서 론

기존의 항공기에 새로운 항공전자기기를 부착하고자 하는 경우에 항공기 내부의 여유 공간 부족으로 인해, 전자장비용 포드(pod)라고 불리는 부가적인 시스템이 항공기 동체 하부에 장착되어진다. 전자장비용 포드는 급격한 온도 및 기압 변화를 받게 되며 전자기기의 정상적인 운용을 위해서는 포드 내부의 적절한 환경제어가 필요하

다. 또한, 포드 내부에 장착되어 있는 모든 전자 기기들은 자체적인 열부하(thermal load)를 가지고 있기 때문에, 정상적인 작동을 위해서는 적절히 열부하를 제어할 필요가 있다. 따라서 포드 내부에는 별도의 냉각시스템이 장착되어지며, 본 냉각시스템은 크게 공기사이클(air cycle)과 증기압축사이클(vapor compression cycle), 두 가지 방식으로 나누어진다.

일반적으로 증기압축사이클의 시스템 효율은 공기 사이클에 비해 상당히 높은 것으로 보고되고 있다.^(1~3) 공기사이클은 비행 중에 얻어지는 고압 공기

† Corresponding Author, yongckim@korea.ac.kr

를 이용하기 때문에 고속비행에서는 높은 성능을 발휘하지만 저속비행에서는 냉각성능이 감소하는 반면에,⁽²⁾ 증기압축사이클은 저속에서도 정상적인 냉각성능 확보가 가능하다.⁽³⁾ 전력소비 측면에서 증기압축 사이클은 압축기 및 송풍기에서의 소비전력이 매우 높은 반면에, 공기사이클에서는 제어용 전력 이외의 별도 동력이 필요 없다. 따라서 항공기로 부터의 전력공급의 확보가 가능한 곳에서는 주로 증기압축 냉각방식이 선호되며, 사용 가능 전력에 제약이 있는 시스템에서는 공기사이클이 주로 적용되고 있다.

본 연구에서는 시스템 효율이 높고 비행조건에 따른 냉각성능 편차가 적은 증기압축 사이클을 항공포드용 냉각시스템에 적용하고자 한다. 항공 포드용 냉각시스템에 적용되는 증기압축사이클에 관한 논문은 상당히 제한적으로 발표되었다. 따라서 증기압축식 냉동시스템에 관한 현재까지의 기술동향을 검토하여, 환경제어시스템의 개발에 적용하고자 한다. 증기압축식 냉동시스템에 적용되는 주요 기술은 압축기 용량제어, 냉매 유량제어 및 대체냉매 적용 등으로 요약될 수 있다. 압축기의 용량제어 방법으로 주로 회전수 제어형을 채용하고 있다. 초기에는 AC 인버터 방식이 주종을 이루었으나, 현재에는 DC 인버터 방식의 채용이 증가하고 있는 추세이다.⁽⁴⁾ 냉매 유량제어 기술의 발전에 가장 큰 영향을 준 것으로 전자팽창밸브(EEV, Electronic Expansion Valve)를 들 수 있다. 전자팽창밸브는 부하변동에 따른 정밀한 제어가 가능하기 때문에 냉동시스템에 있어서는 필수부품으로 자리잡고 있다.^(5,6)

Table 1 The characteristics of selected refrigerants

구분	Unit	R114	R124	R227ea	R236fa
화학식	-	CCl ₂ F ₂ ClF ₂	CHClFC F ₃	CF ₃ CHF CF ₃	CF ₃ CH ₂ C F ₃
임계온도	°C	145.7	122.3	101.6	124.9
임계압력	kPa	3257.0	3624.3	2926.0	3200.0
응축압력	kPa	1131.8	1906.6	2251.3	1530.8
증발압력	kPa	221.4	394.6	469.1	281.6
압축비	-	5.11	4.83	4.80	5.43
압축일	W	1476.9	1524.0	1909.1	1585.5
냉매유량	kg·h ⁻¹	128.6	114.3	200.0	124.1
COP	-	1.896	1.837	1.467	1.766

항공전자기기용 냉각시스템에 적용되는 냉매는 상업용 시스템과는 달리 외기온도가 75°C인 고온 조건에서도 정상적인 냉각성능 및 운전 신뢰성을 확보해야 한다. 따라서, 상업용 시스템에 적용되는 냉매들보다 임계온도가 높은 냉매의 적용이 요구된다. Table 1은 후보 냉매군의 물성과 증발온도 26.0°C, 응축온도 89.0°C에서의 운전특성을 나타낸다. 팽창밸브 입구 과냉각도는 8.3°C, 압축기 입구 과열도는 11.1°C로 고정하였다. 일반적으로 임계온도가 높은 냉매들은 동일 온도조건에서 압력이 낮은 특성이 있기 때문에 사이클 설계시에 이에 대한 충분한 고려가 필요하다.

CFC 계열의 냉매인 R114는 냉각성능이 매우 좋은 특성을 나타내면서도 불구하고 높은 오존파괴지수로 인해 그 사용이 금지되어 있다. HCFC 계열의 냉매인 R124는 오존파괴지수가 R114와 비교했을 때 매우 낮은 0.05 수준이지만, 여전히 환경문제를 야기시키기 때문에 그 사용이 규제되고 있는 실정이다. 따라서, 오존파괴 문제가 없는 HFC 계열 냉매의 적용이 검토되어야 한다. 대표적인 HFC 계열의 냉매로는 R134a가 있지만, 임계온도가 96°C로서 75°C의 고온 조건에서는 응축압력이 매우 높아 시스템 효율이 저하되기 때문에 본 냉각시스템에는 적합하지 않다고 판단된다. 항공장비용 냉각시스템에 적합한 대체냉매로서는 R227ea와 R236fa가 있으며, R227는 R236fa와 비교하여 상대적으로 낮은 성적계수(COP, Coefficient Of Performance)와 임계온도 때문에 R236fa의 적용이 타당하다고 판단된다.

본 연구에서는 대체냉매 적용에 따른 항공전자기기용 냉각시스템의 성능특성 평가를 위한 실험장치를 설계 및 제작하였다. 실험 냉매로는 기존 냉각시스템에 적용되는 R124와 사전 검토를 통해 가장 유력하다고 판단되는 R236fa의 냉각성능 특성을 실험적 방법으로 비교·평가하였다. 또한, 실험결과 분석을 통해 R236fa를 적용함으로써 예상되는 문제점과 그 해결방안에 대한 고찰을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 대상으로 하는 항공전자기기용 포드 내부의 구조는 Fig. 1에서와 같이 전자장비부와 냉각시스템으로 구성되어 있다. 포드 내부에 장착된 장비들로부터의 열부하 뿐만 아니라, 항공기가 고속으로 비행함에 따라 발생하는 공력가열(aerodynamic heating)에 의해 포드 내부온도는 정상적인 작동 성능을 저해시킬 만큼 온도가 상

승하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 포드 후미(tail)에 냉각시스템을 장착하고 냉각공기의 공급을 통해 전자장비부의 온도를 일정 온도 이하로 유지시키게 된다.

본 연구에서는 증기압축사이클 방식의 냉각시스템을 대상으로 하였으며, 냉매 압축기, 증발기, 응축기, 팽창밸브 및 송풍기로 구성하였다. 송풍기에 의해 증발기를 통과하면서 냉각된 저온의 공기는 덕트를 통해 전자장비부를 통과하여 다시 증발기로 돌아오는 구조이다. 증발기에서 증발된 저온저압의 냉매가스는 압축기에서 압축되어 고온고압 상태로 응축기로 유입·응축되어 팽창밸브를 통해 다시 증발기로 공급된다. 항공기가 비행중인 경우에는 스쿠프(scoop)를 통해

유입되는 공기에 의해 냉매가스는 액상으로 응축되며, 지상운전의 경우에는 별도의 응축기용 송풍기의 운전을 통해 응축시키는 방식이다.

실험장치의 구성도를 Fig. 2에 나타내었다. 실험장치는 크게 냉매사이클부, 증발측 환경 모사부, 그리고 응축측 환경 모사부로 구성되어 있다. 본 냉각시스템의 정격 냉각용량은 2.0 kW이다. 압축기는 로터리(rotary) 타입으로서, 이론 압축체적은 운전회전수 1,270 RPM에서 10.58 m³/h이다. 팽창밸브로는 오리피스 직경이 1.6 mm인 전자식 팽창밸브(EEV, Electronic Expansion Valve)를 적용하였으며, 4상 24극 스텝모터 구동방식으로 500 스텝까지 개도가 조절된다. 증발기와 응축기는 알루미늄 재질의 CF(Cross Flow) 열교환기를 장착하였으며, 증발기의 사이즈는 폭 175 mm, 높이 170 mm, 깊이 110 mm 이며, 응축기의 사이즈는 폭 150 mm, 높이 173 mm, 깊이 100 mm 이다. 전열관의 높이는 2.0 mm, 두께는 0.45 mm이며, 증발기 및 응축기 모두 17개의 전열관으로 구성되어 있다. 전열핀은 오프셋-스트립 핀(offset-strip fin)을 적용하였으며, 핀 높이는 6.5 mm, 핀 피치는 1.7 mm이다.

냉매사이클 주요 부위의 온도 및 압력을 Fig. 2

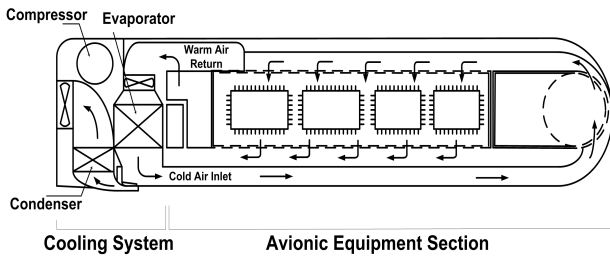


Fig. 1 Schematic diagram of avionic pod

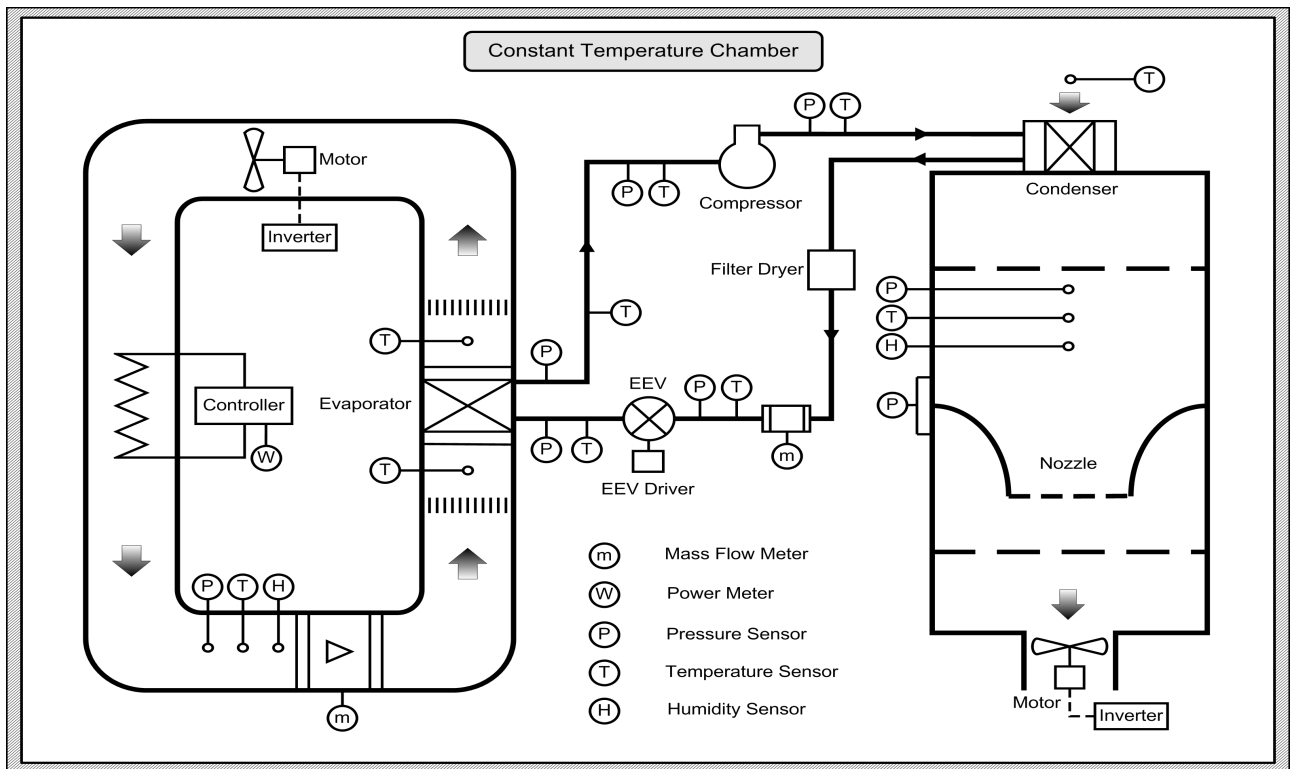


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Experimental conditions

No	구 분	설정값
1	내부 열부하량	2,000 W
2	증발기 공기유량	75 g/s
3	응축기 입구 공기온도	43°C
4	응축기 공기유량	180 g/s

와 같이 계측하였으며, 냉매온도는 정밀도 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 의 백금측온저항체(PT 100 Ω)를 배관내에 삽입하여 측정하였다. 냉매압력의 계측은 정밀도 $\pm 0.5\%$ 의 디지털 압력계를 사용하였으며, 냉매유량의 측정은 정밀도 $\pm 0.2\%$ 의 질량유량계(Coriolis type)를 사용하였다.

증발측 환경 모사부는 포드 내부에서의 열부하량과 증발기 공기유량을 모사하기 위한 장치로서 실제 시스템과 같이 밀폐시스템으로 구성하였다. 유로 내부에는 증발기, 송풍기, 가열기, 유량계, 온도계 및 압력계로 구성되어 있다. 증발기 입·출구 온도를 측정하기 위하여 정밀도 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 의 3선식 Pt 100 Ω 의 측온저항체를 설치하였다. 또한, 풍량은 볼텍스 유량계(vortex flow meter)를 이용하여 측정하였으며, 정밀도는 측정값의 $\pm 0.4\%$ 이다. 가열기로의 입력전력량은 전력계로 측정하였으며, 전력계의 최대 측정범위는 4,000 W, 정밀도는 측정값의 $\pm 0.2\%$ 이다.

응축측 환경 모사부는 응축기를 통과하는 공기의 질량유량과 입구온도를 모사하기 위한 것으로서, 응축기 입구 공기온도는 항온실의 온도제어를 통해 조절하였으며, 응축기 입구 공기유량은 흡입송풍기 모터의 회전수를 인버터를 통해 조절하였다. 응축기 입·출구에 정밀도 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 의 3선식 Pt 100 Ω 의 측온저항체를 설치하였다. 공기유량은 노즐법⁽⁷⁾으로 측정하였다. 노즐전후의 차압은 디지털 차압계를 사용하였으며, 정밀도는 측정값의 $\pm 0.3\%$ 이다. 본 실험장치의 측정 불확실도는 ASHRAE Guideline 2⁽⁸⁾에 근거하여 평가되었으며, 소비전력은 2.3%, COP는 3.5% 수준으로 나타났다.

R236fa 및 R124 적용에 따른 냉각성능 비교 실험은 냉매 충전량, EEV 개도 및 압축기 운전회전수를 변화시키면서, 냉각성능 및 사이클 운전 특성 변화를 고찰하였다. 이때, 열부하량, 증발기 공기유량, 응축기 입구온도 및 응축기 공기유량

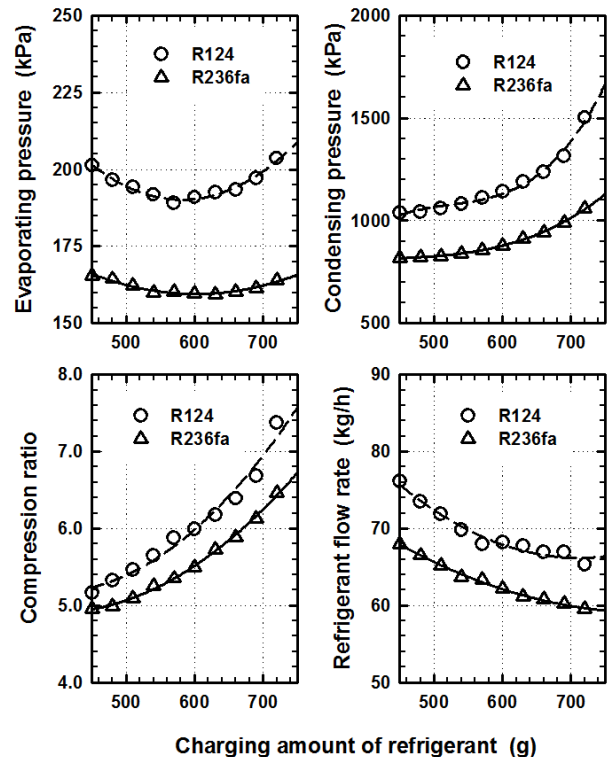


Fig. 3 Variations of pressures, compression ratio, and mass flow rate with refrigerant charging amount.

은 Table 1과 같이 일정한 조건으로 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

냉매 충전량에 따른 증발압력, 응축압력, 압축비 및 냉매유량의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 압축기 운전회전수는 1,264 RPM, EEV 개도는 26.4%(of full-opening)로 고정하였다. 증발압력은 냉매충전량의 증가와 함께 R236fa 및 R124 모두 감소하며, 충전량 600g 부근에서 최저점을 나타내었다. 하지만, 냉매 충전량의 지속적인 증가는 증발압력을 다시 상승시키는 경향을 나타내었다. 응축압력은 냉매충전량의 증가와 함께 응축기에서의 과냉각 영역의 증가로 인해 지속적으로 상승하는 경향을 나타내었다. R236fa는 R124와 비교하여 임계온도가 높고 동일 포화온도에서의 압력이 R124대비 낮기 때문에, 증발압력 및 응축압력 모두 R124 충전시보다 낮게 나타났다. 냉매 충전량 600g에서 압축비는 R124 충전시 6.0, R236fa 충전시 5.5로서, R236fa가 0.5정도 낮게 나타났으며, 이는 동일 냉매 충전량에서 R124의 응

축압력이 R236fa 대비 높기 때문이다.

냉매유량은 R236fa 및 R124 모두 냉매 충전량의 증가와 함께 감소하는 경향을 나타내었다. 냉매 충전량의 증가와 함께 EEV 입구 과냉각도 증가로 증발기 입출구 냉매 엔탈피차가 증가하여, 동일 열부하량을 냉각하기 위한 필요 냉매유량이 감소하기 때문이다. 냉매 충전량 600g 조건에서, R236fa 충전시의 압축기 흡입압력은 159.8 kPa로서 R124 충전시의 190.9 kPa보다 31.1 kPa 낮게 나타났다. 이러한 압축기 흡입압력 감소는 냉매 밀도의 저하로 인해 냉매유량을 감소시키며, 동일 충전량 조건에서 R236fa 충전시의 냉매유량은 R124와 비교하여 약 8% 낮게 나타났다.

냉매 충전량에 따른 냉각시스템 공기온도의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. R236fa 및 R124 모두,

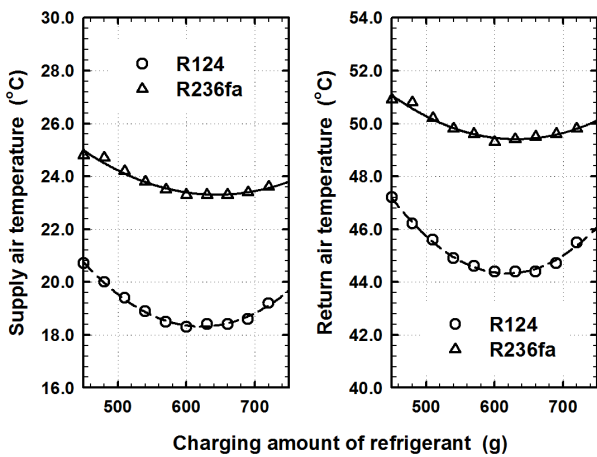


Fig. 4 Variation of air temperatures with refrigerant charging amount

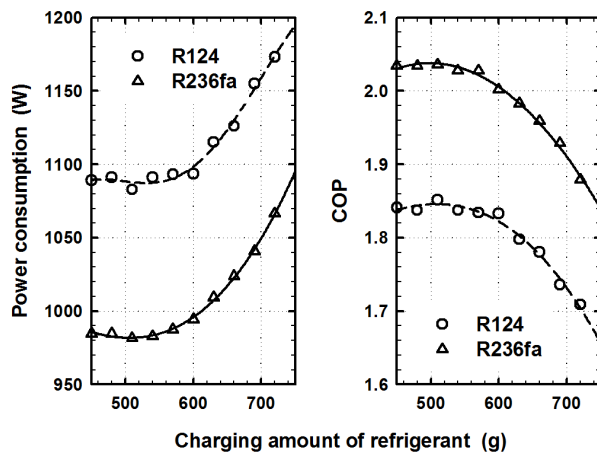


Fig. 5 Variations of power consumption and COP with refrigerant charging amount

냉매 충전량 600g 부근에서 가장 낮은 공기 온도 값을 나타내었으며, 이는 포화증발온도에 해당하는 증발압력이 가장 낮은 영역이기 때문이다. 공급 공기온도는 R236fa 충전시에 23.3°C로서 R124 충전시의 18.3°C보다 5.0°C 높게 나타났으며, 이는 R236fa 충전시의 증발온도가 R124 충전시보다 평균 5.8°C 높기 때문이다. 회수 공기온도의 경우도 공급 공기온도와 동일한 경향을 나타내었다. 이는 냉매 순환량의 차이로 인해 R236fa 충전시의 냉각성능이 R124 보다 낮음을 의미한다. 열부하량과 증발기 공기유량이 일정하기 때문에 공급 및 회수 공기온도차는 26.0°C로 두 냉매 모두 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 냉매 충전량 변화에 따른 냉각시스템의 소비전력 및 COP의 변화를 나타낸다. 냉각시스템 소비전력의 대부분을 압축기가 차지하며, 압축기로의 소비전력은 압축비 및 냉매 순환량에 의해 결정되어진다. 냉매 충전량의 증가와 함께 압축비는 증가하지만 냉매유량은 감소하기 때문에, 600g 이하의 충전량 영역에서의 소비전력 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 하지만, 냉매 충전량이 증가함에 따라 압축비의 증가율이 냉매유량의 감소율보다 크기 때문에, 압축기의 소비전력

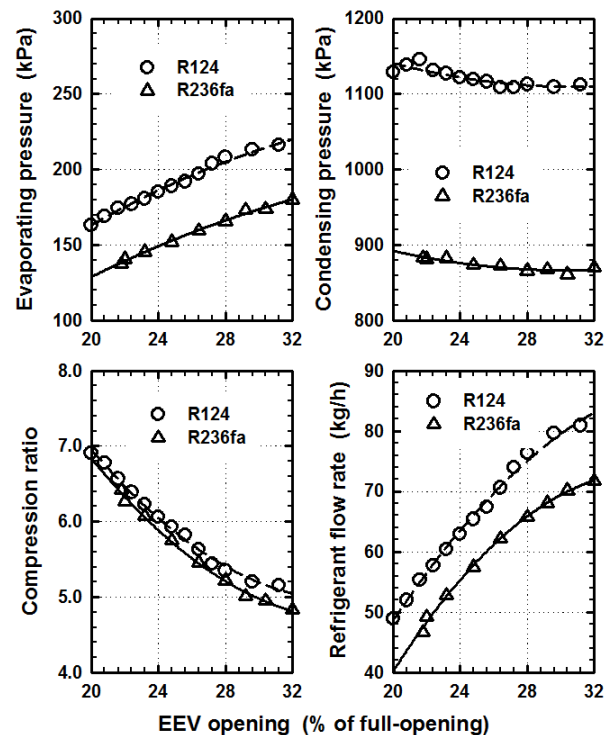


Fig. 6 Variations of pressures, compression ratio and mass flow rate with EEV opening

은 충전량의 증가와 함께 상승함을 알 수 있다. 모든 충전량 영역에서 R236fa 충전시의 소비전력이 R124의 경우보다 낮게 나타났으며, 이는 R236fa 충전시의 냉매유량이 적기 때문이다. 냉매 충전량 600g 조건에서, R236fa 충전시의 소비전력은 994.3W로서, R124 충전시의 1,093.7W 보다 9% 낮게 나타났다.

냉각시스템으로 인가되는 열부하량은 동일하기 때문에, COP는 소비전력과 반대의 경향을 나타내었다. 600g 이하의 낮은 충전량 영역에서는 COP의 변화는 매우 미소하지만, 충전량이 증가함에 따라 COP는 급격히 감소함을 알 수 있다. 냉매충전량 600g 조건에서 R236fa 충전시의 COP는 2.002로서, R124 충전시의 1.833 보다 약 9% 높은 값을 나타내었다.

Fig. 6에 EEV 개도에 따른 증발압력, 응축압력, 압축비 및 냉매순환량의 변화를 나타내었다. 이때 냉매 충전량은 600g, 압축기 운전회전수는 1,264 RPM으로 고정하였다. EEV 개도의 증가는 냉매가 통과하는 오리피스 단면적의 증가를 의미하며, EEV 입출구 압력차가 일정한 조건에서는 개도가 증가함에 따라 냉매유량은 상승하게 된다. R236fa 및 R124 모두, EEV 개도가 증가함에 따라 증발압력은 증가하고 응축압력은 감소함을 알 수 있다. EEV 개도 증가에 따른 냉매유량의 상승은 증발기 출구 과열도를 감소시킴으로서 증발압력은 상승하게 된다. 또한, EEV 개도 증가에 따른 응축기 출구 과냉각도의 감소는 응축효율을 상승시켜 응축압력은 감소하게 된다.

압축비는 개도의 증가와 함께 감소하는 경향을

나타내며, R236fa 충전시의 압축비는 R124와 비교하여 약간 낮은 경향을 나타내었다. EEV 개도 26.4%(of full-opening) 조건에서, R236fa 충전시의 냉매유량은 62.2 kg/h로서 R124 충전시보다 약 12% 낮은 수준으로 나타났다. 이는 동일 EEV 개도에서 R236fa 충전시의 압축기 흡입압력이 R124 충전시보다 낮아 흡입 냉매의 밀도가 감소했기 때문이다.

EEV 개도에 따른 냉각시스템의 공급 및 회수 공기온도의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. EEV 개도가 상대적으로 낮은 영역에서는 공급 및 회수 공기온도 모두 높은 값을 보이면서 냉각성능의 저하를 나타내었다. 낮은 EEV 개도에서는 냉매순환량의 감소로 증발기 출구에서의 과열도가 증가하여, 증발기에서의 현열교환 영역이 증가했기 때문이다. 특히, EEV 개도가 감소함에 따라 증발기 출구에서의 과열도의 변화는 크게 나타났으며, 이와 함께 공급 및 회수 공기온도가 크게 상승함을 알 수 있었다.

하지만 EEV 개도가 증가함에 따라 과열도의 감소로 인해 공기온도는 감소하였으며, EEV 개도 26.4%(of full-opening)에서 R236fa 및 R124 모두 가장 낮은 공기온도를 나타냈다. 이때의 증발기 출구 과열도는 R124 및 R236fa 모두 11.0°C 수준으로 나타났으며, 향후 과열도 제어 알고리즘을 위한 기준값을 11.0°C로 하여 설정하는 것이 최적의 냉각성능을 나타낼 것으로 판단된다. R124 충전시의 최저 공급 및 회수 공기온도는 각각 17.8°C 및 44.1°C를 나타내었으며, R236fa 충전시에 각각 23.4°C 및 49.3°C를 나타내었다.

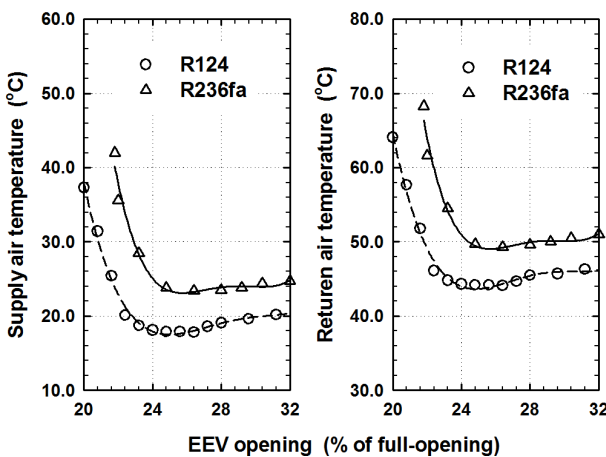


Fig. 7 Variation of air temperatures with EEV opening

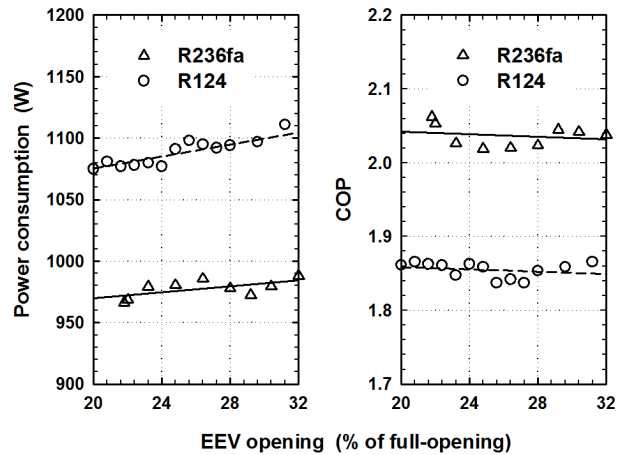


Fig. 8 Variations of power consumption and COP with EEV opening

R236fa 충전시의 공기온도가 R124보다 평균 5.4°C 높음을 알 수 있는데, 이는 R124와 비교하여 증발압력이 낮음에도 불구하고 포화증발온도는 상대적으로 높기 때문이다. EEV 개도가 점차 증가함에 따라, 증발기 출구 과열도는 감소하지만 증발온도의 상승의 영향으로 R236fa 및 R124 모두 공급 및 회수 공기온도는 미소하게 상승하는 경향을 나타내었다.

EEV 개도에 따른 냉각시스템의 소비전력 및 COP의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. R124 및 R236fa 모두 EEV 개도의 증가와 함께 소비전력이 미소하게 증가하는 경향을 나타내지만, 그 증가량은 매우 미비함을 알 수 있다. EEV 개도의 증가는 압축기의 압축비를 감소시키지만, 냉매유량의 증가폭이 상대적으로 크기 때문에 압축기 소비전력이 미소하게 상승하게 된다. 냉각성능이 가장 높은 EEV 개도인 26.4% 조건에서, R236fa 충전시의 소비전력은 985.6 W로서 R124 충전시의 1095.0 W보다 약 10% 낮은 값을 나타내었다. 시스템 COP는 소비전력의 증가로 인해 두 냉매 모두 미소하게 감소하는 경향을 나타내었지만, EEV 개도에 따른 COP의 변화량은 크지 않음을

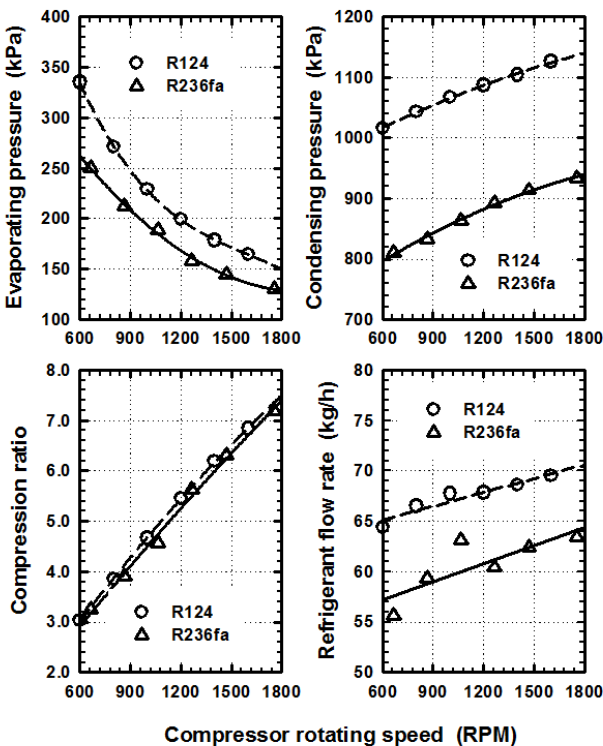


Fig. 9 Variations of pressures, compression ratio and mass flow rate with compressor rotating speed

알 수 있다. EEV 개도 26.4% 조건에서 R236fa 충전시의 COP는 2.020으로서, R124 충전시의 1.842보다 9.7% 높게 나타남을 알 수 있었다.

압축기의 회전수에 따른 증발압력, 응축압력, 압축비 및 냉매유량의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 냉매 충전량은 600g, EEV 개도는 26.4%(of full-opening)로 고정하여 시험을 진행하였다. 압축기 회전수의 상승은 단위시간당 압축량을 증가시켜 증발압력은 감소하였으며, 압축기 소비동력의 상승으로 인한 응축부하의 증가로 응축압력은 상승하였다. 이러한 증발압력의 감소와 응축압력의 상승은 압축비를 크게 증가시키지만, 압축기 회전수에 따른 두 냉매의 압축비는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

회전수 증가로 인한 단위시간당 압축량의 증가는 냉매유량을 증가시키는 경향을 보이지만, 냉매유량의 증가율은 압축기 회전수의 상승율보다 낮음을 알 수 있었다. 압축기 회전수의 증가는 압축기 흡입부에서의 냉매가스 유속의 증가로 인해 압축기 체적효율을 감소시키게 된다. 또한, 증발압력 감소로 압축기 흡입구에서의 냉매 비체적이 증가하기 때문에 실제 냉매유량의 증가폭은 크지 않음을 알 수 있었다. 압축기 회전수 1,200 RPM 운전조건에서 R236fa 충전시의 냉매유량은 61 kg/h로서 68 kg/h인 R124 충전시와 비교하여 약 10% 낮은 수준으로 나타났다.

Fig. 10에 압축기 운전회전수 변화에 따른 냉각시스템 공기온도의 변화를 나타내었다. R236fa 및 R124 모두 압축기 회전수의 증가에 따라 공급 및 회수되는 공기온도는 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 냉각성능의 상승을 의미한다. 이

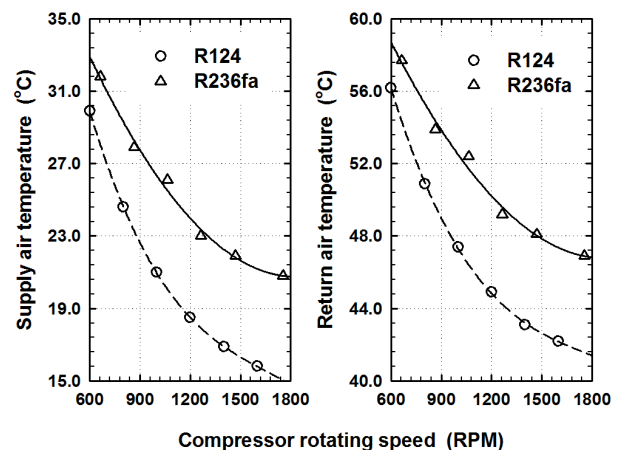


Fig. 10 Variation of air temperatures with compressor rotating speed

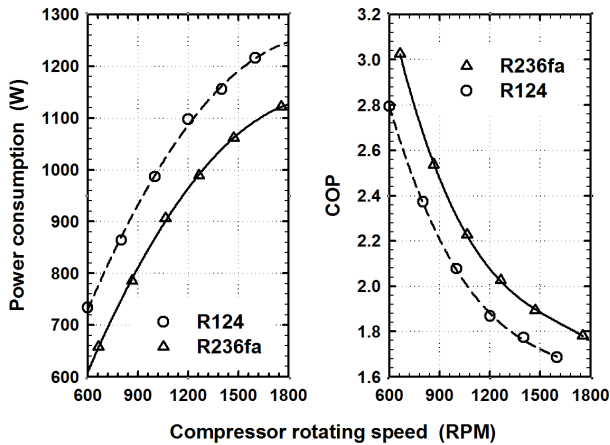


Fig. 11 Variations of power consumption and COP with compressor rotating speed

때, 공기유량 및 열부하량은 일정하기 때문에 공기온도차는 평균 26°C 로 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 동일 회전수 조건에서 R236fa를 충전한 시스템의 공기온도는 R124를 충전한 시스템보다 높게 나타났으며, 이는 R236fa를 충전한 시스템의 냉매 순환량이 R124 충전시보다 상대적으로 낮은 반면에 증발온도는 높기 때문이다.

따라서, R236fa를 적용한 시스템이 R124를 충전한 시스템과 동일한 냉각성능을 확보하기 위해서는 압축기의 압축체적 또는 운전 회전수의 증가가 필요함을 알 수 있었다. 본 실험결과에서 R124를 충전한 시스템이 1,000 RPM으로 회전할 때의 공급 및 회수 공기온도는 각각 21.0°C 및 47.4°C 로서, R236fa를 적용한 시스템이 동일한 냉각성능을 확보하기 위해서는 1,750 RPM 수준으로 운전되어야 함을 알 수 있었다. 즉, R236fa 충전시에는 압축기 운전회전수를 R124 충전시와 비교하여 약 75% 상승시켜야 동일한 냉각성능을 확보할 수 있다.

압축기 회전수의 변화는 냉각시스템의 소비전력 및 COP에 큰 영향을 미치게 되며, 그 변화량을 Fig. 11에 나타내었다. 압축기 운전회전수가 증가함에 따라 R236fa 및 R124 모두 시스템 소비전력이 급격하게 증가하였으며, 이는 운전회전수의 증가가 압축비의 상승과 함께 냉매유량을 증가시키기 때문이다. 이러한 소비전력의 급격한 상승은 시스템 COP를 크게 저하시킴을 알 수 있었다. 동일 압축기 회전수 운전조건에서는 R124 충전시와 비교하여 R236fa 충전시의 소비전력은 낮고 COP는 높게 나타나는데, 이는 R236fa 충전

시의 압축비와 냉매유량이 R124와 비교하여 상대적으로 낮기 때문이다. 하지만, 동일 냉각성능을 확보하기 위해서는 R236fa를 적용한 시스템은 더 높은 회전수로 운전되어야 하기 때문에 동일 냉각성능에서의 두 냉매 적용시의 운전특성을 고찰할 필요가 있다.

R124를 충전한 시스템의 경우, 압축기 회전수 1,000 RPM 운전조건에서 냉각시스템의 공급 공기온도는 21.0°C 로서, 이때의 소비전력은 986.8 W, COP 2.077이다. 하지만, R236fa를 충전한 시스템이 동일한 냉각성능을 확보하기 위해서는 1,750 RPM 수준의 회전수로 운전되어야 하며, 이때의 소비전력은 1,121.7 W, 시스템 COP 1.686이다. 따라서 R124 충전시와 비교하여 R236fa 충전시의 소비전력은 13.7% 높고, COP는 18.8% 낮은 수준으로 나타남을 알 수 있다. 즉, R236fa를 적용한 시스템의 냉각성능 및 시스템 효율을 최적화시키기 위해서는 압축기 및 흡입배관 계통에서의 재설계가 필요함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 항공전자기기용 냉각시스템으로의 대체냉매 적용에 대한 실험적 고찰을 수행하였다. 기존 냉각시스템에 적용되고 있는 R124와 대체냉매로서 가장 유력한 R236fa, 두 냉매의 냉각성능 및 사이클 운전특성을 냉매 충전량, EEV 개도, 그리고 압축기 운전 회전수를 변화시키면서 비교·평가하였다. 대체냉매인 R236fa를 적용하여 냉각시스템을 설계·제작할 경우, 압축기 흡입냉매의 비체적 증가로 인해 압축기의 운전회전수가 R124를 적용한 시스템과 비교하여 상대적으로 크게 요구됨을 알 수 있었다. 이러한 압축기 운전 회전수의 증가는 시스템 소비전력을 증가시키게 되고, 냉각시스템의 에너지효율은 감소함을 알 수 있었다. 따라서, 대체냉매인 R236fa를 적용한 시스템의 최적화를 위해서는, 압축기의 압축체적의 개선 및 체적효율 향상을 위한 설계상의 고려가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국항공우주기술연구조합의 지원 과제(KATRA 10_A00151)와 한국에너지기술평가원의 인력양성지원 과제(No. 20124010203250)를 통해 수행

되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Price, D. C., 2003, "Thermal Management of Military Fighter Aircraft Electro-Optics Pod," *10th IEEE SEMI-THERM Symposium*, pp. 341~350.
- (2) Grabow, R. M. and Kazan, T. J., 1996, "Design of a RAM Air Driven Air Cycle Cooling System for Fighter Aircraft Pods," *31st AIAA Thermophysics Conference*, AIAA 96-1907.
- (3) Godecker, W. J., Lentz, J. C., Parme, C. B., Wigmore, D. B. and Winans, K. B., 1992, "Vapor Cycle System for a Fighter Aircraft-the Lantim ECU Lessons Learned," *22nd International Conference on Environmental Systems*, SAE 921184.
- (4) Nagatomo, S., 1998, "Positive Displacement Compressor Technology for Aair Conditioners," *Transactions of the JSRAE*, Vol. 15, No. 4, pp. 305~326.
- (5) Han, D. and Kwon, H., 1999, "Zone Temperature Control of the Multi-Type Heat Pump System," *Proceedings of the SAREK*, pp. 611~616.
- (6) Outtagarts, A., 1997, "The Transient Response of an Evaporator Feed Through an Electronic Expansion Valve," *Int. J. of Energy Research*, Vol. 21, pp. 793~807.
- (7) ASHARE Standard 51-75, 1975, Laboratory Methods of Testing Fans For Rating.
- (8) ASHRAE Guideline 2, 1986, Engineering Analysis of Experimental Data.