

인버터 스크롤 압축기를 적용한 루프형 전동공조시스템의 냉방성능특성에 관한 연구

이무연¹, 원종필¹, 이동연^{2*}, 조중원¹

¹자동차 부품 연구원 열제어시스템 연구센터, ²영남대학교 기계공학부

Study on the Performance Characteristics of the Roof Mounted Electrical Air Conditioning System Using Inverter Scroll Compressor

Moo-Yeon Lee¹, Jong-Phil Won¹, Dong-Yeon Lee^{2*} and Chung-Won Cho¹

¹Thermal Management System Research Center, KATECH

²School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

요 약 본 연구에서는 친환경 대형 버스 차량에 적용되는 루프형 전동식 냉방시스템의 성능특성을 파악하기 위하여 스크롤 압축기의 주파수 및 승차 공간의 온도인 내기온도를 변화시켜가면서 다양한 실험을 진행하였다. 이를 위하여 인버터로 구동되는 전동식 스크롤 압축기를 적용한 냉방시스템을 설계 및 제작 하였고 냉매 충전량 실험을 통하여 루프형 전동식 냉방시스템의 충분한 과냉도를 확보할 수 있는 최적 냉매 봉입량을 선정하였다. 압축기 주파수가 55 Hz에서 65 Hz로 증가함에 따라 냉방시스템의 증발용량은 4.3% 증가하였으나 냉방 COP는 14.1% 감소하였고, 내기온도가 27°C에서 35°C로 증가함에 따라 냉방시스템의 증발용량 및 COP는 각각 9.17%와 1.43% 증가하였다. 더불어 전동식 스크롤 압축기를 구동하는 인버터의 작동 효율은 내기온도 변화보다는 압축기 주파수 변화에 더 큰 영향을 받는 것을 확인하였다.

Abstract The objective of this study is to investigate the cooling performance of the roof mounted air-conditioning system using electric driven scroll compressor for zero emission vehicles. This air conditioner with air source was used R-134a as a refrigerant and tested under various operating conditions such as refrigerant charge amount and indoor temperature, and compressor frequencies. Experimental results revealed that at all tested compressor frequencies, heat transfer rate of the evaporator increased and the cooling COP increased with the indoor temperature. In addition, the heat transfer rate of the evaporator was over 25.0kW sufficient for the cooling loads of an electric bus.

Key Words : Cooling capacity, COP, Compressor work, Heat pump, R-134a

기호설명

COP : 성능 (coefficient of performance)

Hz : 주파수 (frequency)

i : 엔탈피, (kJ/kg)

m : 질량유량 (kg/h)

\dot{Q} : 열전달률, (W)

R : 압축비

SC : 과냉도 (subcooled)

T : 온도, (°C, K)

\dot{W} : 압축기일, (W)

η : 효율 (efficiency)

본 논문은 지식경제부에서 지원하는 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행되었음.

*교신저자 : 이동연(dylee@ynu.ac.kr)

접수일 11년 08월 23일

수정일 11년 09월 22일

게재확정일 11년 10월 06일

하첨자

- c* : 냉방(cooling), 응축기 (condenser)
- comp* : 압축기 (compressor)
- d* : 출구
- evap* : 증발기 (evaporator)
- ind* : 내부, 내기 (indoor)
- inv* : 인버터 (inverter)
- p* : 압력
- ref* : 냉매
- s* : 입구

1. 서론

석유자원의 고갈 및 환경 오염문제에 대응하기 위하여 내연기관을 이용하는 자동차들은 각종 환경규제에 직면하게 되었다. 이를 해결하기 위하여 국내외 자동차 업계에서는 내연기관의 사용을 최소화하기 위한 하이브리드 개념의 자동차, 내연기관을 사용하지 않는 전기 자동차 및 연료전지 자동차와 같은 친환경 자동차 (zero emission vehicle)에 대한 연구를 지속적으로 진행하고 있다. 이러한 친환경 차량은 내연기관에서 발생하는 엔진 폐열을 이용할 수 없기 때문에 이를 대체할 수 있는 난방시스템에 대한 개발 및 연구는 친환경 차량의 상용화를 위하여 해결해야 할 중요한 과제 중 하나가 되었다. 이와 더불어 기존의 내연기관에서는 엔진 회전수에 영향을 받는 벨트 구동형 압축기를 적용한 냉방시스템을 사용하고 있으나 친환경 차량에서는 압축기를 구동할 수 있는 엔진이 없어지기 때문에 독립적인 에너지를 사용하여 구동되는 전동식 고전압 압축기를 장착한 전동식 냉방시스템이 필요로 하게 되었다. 최근에 이러한 추세에 맞추어, 향후 다양한 운전자들이 이용할 것으로 예상되는 친환경 승용 차량의 냉방시스템에 대한 연구를 진행하고 있다. Park et al. (2011)은 친환경 승용 차량에 대하여 전동압축기를 이용한 냉방시스템에 대한 연구를 진행하였고, 운전자 요구 냉방성능을 최적제어 함으로써 궁극적으로 에너지 소비를 낮추는 연구를 진행하였다.[1] Kim et al. (2010)은 연료전지 승용 자동차에서의 냉방시스템에 대한 연구를 진행하였다[2].

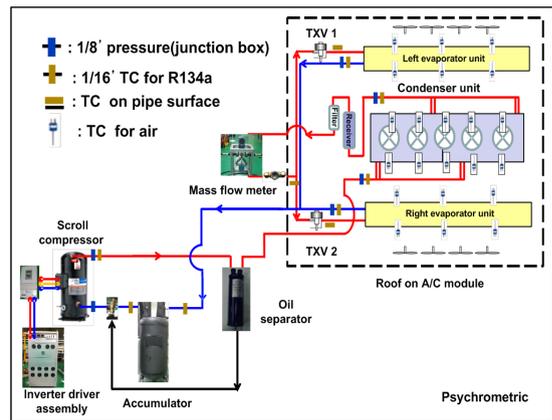
그러나 이러한 친환경 승용차량의 냉방시스템에 대한 연구는 활발히 이루어진 반면 친환경 대형 차량의 냉방시스템에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 더불어 친환경 승용차량의 냉방시스템에 대한 연구결과를 대형 차량의 냉방시스템 설계에 직접 적용하기에는 냉방 용량, 시스템 구성요소, 구성요소간 배열의 차이 등의 다양한

문제가 있을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 그 동안 연구가 많이 이루어지지 않은 친환경 대형 차량에 적용되는 루프형 냉방시스템에 대한 연구를 수행하고자 한다. 이를 위하여 부하 대응이 가능한 인버터로 구동되는 전동식 스크롤 압축기를 장착한 루프형 냉방시스템을 구축하였고, 내기온도 및 압축기 회전수 변화에 따른 냉방 성능특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치



[그림 1] 실험장치 개략도

[Fig. 1] Schematic diagram of the experimental setup

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 친환경 대형 버스의 냉방시스템을 조사하기 위하여 스크롤 압축기와 인버터로 구성된 압축부, 5개의 개별 응축팬 및 응축기로 구성된 응축부, 승차 공간의 효율적인 좌/우 냉방을 위한 2개의 증발기와 4개의 개별 증발팬으로 구성된 증발부 그리고 좌/우 증발기 전단에 2개의 팽창장치 (TXV, thermostatic expansion valve)로 구성된 팽창부로 구성된 냉방사이클을 구성하였다. 압축기 출구단에는 냉매 오일의 효율적인 회수를 위하여 오일분리기 (oil separator)를 설치하고 응축기 출구에는 과냉도 확보를 위하여 수액기 (receiver)를 설치하였으며 압축기 입구단에는 압축기로의 액냉매 유입을 차단하기 위하여 어큐뮬레이터 (accumulator)를 설치하였다. 이렇게 구성된 실험장치는 자동차의 주행 조건과 실내/실외 외기 조건 등을 구현하기 위하여 공기의 온도 및 습도를 자동적으로 제어할 수 있는 환경 챔버에 설치하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 냉방시스템의 사양이다. 압축기는 기존의 왕복동식이나 사판식 압축기에 비하여 구조가 간단하고 체적

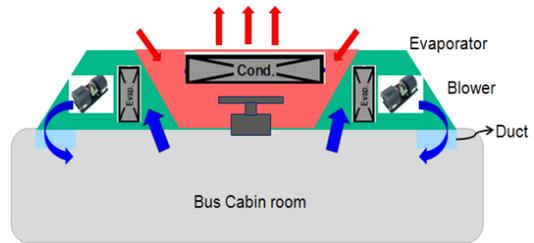
효율이 우수한 스크롤 압축기를 사용하였다. 전동식 스크롤 압축기는 0.1453 m³/s의 행정 체적을 가지고 있으며 인버터로 압축기의 회전수를 제어하도록 설치되었다. 응축기 및 증발기는 평판 핀과 튜브로 구성된 평판 핀-튜브 열교환기를 사용하였고, 응축기 팬의 정격전압/전류는 28 V/5 A이며 증발기 팬의 정격전압/전류는 28 V/12 A이다.

[표 1] 시스템 사양

[Table 1] Specifications of the tested system

Components	Specifications
Compressor (1, displacement rate)	Scroll type (0.1453 m ³ /s)
Condenser (1.0)	Fin-tube heat exchanger
Condenser fans (5.0)	28.0 V/ 5.0 A
Evaporator (2.0)	Fin-tube heat exchanger
Evaporator fans (8.0)	28.0 V/ 12.0 A
Expansion devices (2.0)	Thermostatic expansion valve (TXV)
Accumulator (1.0)	0.015 m ³
Receiver tank (1.0)	0.010 m ³

Fig. 2 (a)는 본 연구에서 개발한 친환경 대형 버스의 승차공간 냉방을 위하여 설치한 루프형 전동식 냉방시스템의 개념도이다. 일반적으로 시내/고속 버스에 사용되는 냉방시스템과 유사하지만 전동식 인버터 압축기를 사용하여 실내 부하에 따른 냉방 용량을 적절히 제어할 수 있도록 설계 되었다[3-4]. Fig.2(b)는 본 연구에서 사용된 실험장치의 사진들이다. 실험의 정확도 및 향후 실차 성능 실험을 진행하기 위하여 실제 시내/고속 버스에 사용되고 있는 동일한 규격의 상부에 본 연구에서 개발된 응축기, 2개의 증발기 및 2개의 개별 TXV 그리고 좌/우 증발기에 4개의 증발팬을 설치하여 승차공간을 효율적으로 냉방 할 수 있도록 장착된 모습이다. Table 2는 본 연구에서 사용한 실험조건이다. 압축기 주파수는 55 Hz, 60 Hz, 65 Hz로 변경하면서 실험을 진행하였고, 외기온도는 31°C 및 35°C로 설정된 상태에서 실험을 진행하였다. 여름철 승객들이 타고 있는 승차 공간의 냉방 부하에 따른 증발 용량을 관찰하기 위하여 내기온도를 27°C, 32°C, 35°C로 변경하면서 실험을 수행하였다.



(a) Schematic diagram

Left evaporator unit Condenser unit Right evaporator unit



Roof of the tested bus

(b) Real pictures

[그림 2] 실험장치 사진

[Fig. 2] Schematic of roof mounted air conditioning system

2.2 실험계산

냉방시스템의 증발용량 및 냉방 COP를 계산하기 위하여 응축기 출구에 불확실도 ±0.2% 를 가지는 질량유량

계 (Coriolis type mass flow meter)를 설치하였고 운전 중 냉방 시스템의 냉매 질량유량을 측정하였다. 증발용량은 냉매의 엔탈피를 이용하여 식 (1)과 같이 계산하였고, 냉방 COP (coefficient of performance)는 식 (2)을 이용하여 계산하였다. 여기서 압축기의 소비전력 (compressor power)은 불확실도 ±0.2%를 가지는 소비전력계를 이용하여 측정하였다.

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{m}_{c,ref} \Delta i_{c,ref} \quad (1)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{ref}}{W_{comp}} \quad (2)$$

[표 2] 실험 조건

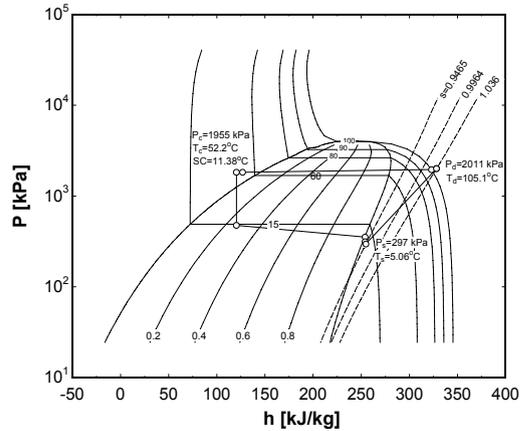
[Table 2] Test conditions

Components	Conditions
Outdoor air temperature (°C)	31.0/ 35.0
Indoor air temperature (°C)	27.0/ 31.0/ 32.0/ 35.0
Air flow rate & pressure drop for condenser fan (m ³ /min, mmAq)	Max 35.0/ Max 27.0
Air flow rate & pressure drop for evaporator fan (m ³ /min, mmAq)	Max 30.0/ Max 29.0
Compressor frequency	50.0(baseline)/ 55.0/ 60.0
Refrigerant	R-134a
Working fluid	Air

3. 실험결과 및 고찰

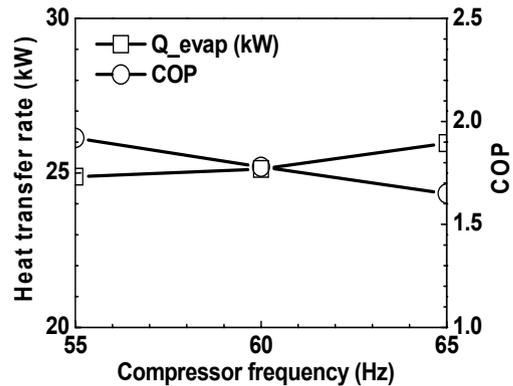
Fig. 3은 압력-엔탈피 선도를 나타내고 있다. 시스템의 냉매 봉입량은 냉방시스템을 구성하는 각 요소 부품의 내부 체적 및 수액기와 어큐뮬레이터의 내부 체적을 고려하여 결정하였고, 일반적으로 자동차에서 요구되는 과냉도 5°C이상을 맞춰주는 범위 내에서의 시스템의 최적 냉매 봉입량을 선정하였다[5]. 자동차에서 필요로 하는 과냉도를 5°C이상으로 설정하는 이유는 다양한 실 도로 운전조건에서 안정적인 냉방 성능을 내기 위해서이다. 따라서 본 연구에서는 최적 냉매 봉입량은 8.5 kg로 선정하였다. Fig. 3은 압축기 주파수 65 Hz에서 일반적으로 여름철 평균 외기온도인 31°C에서 자동차의 실내온도를 31°C안정화 시킨 후 냉방실험을 진행하였다. 냉매 봉입량 8.5 kg에서 응축기 출구 과냉도는 11.38°C로 안정적으로 5°C이상을 확보하였으며 압축기 입구 과열도는 4.7°C

를 나타내었다. 냉방시스템의 COP는 2.28이고 압축비는 6.77로 나타났다.



[그림 3] 압력-엔탈피 선도

[Fig. 3] Pressure and enthalpy diagram

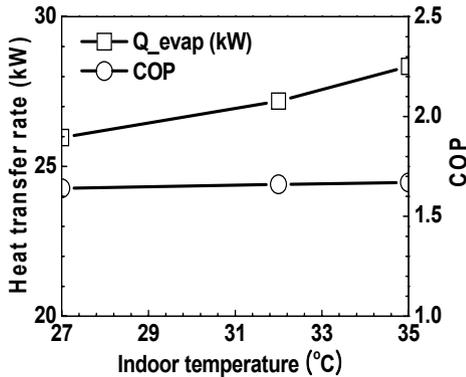


[그림 4] 압축기 주파수변화에 따른 열전달성능

[Fig. 4] Heat transfer performance with the compressor frequencies

Fig. 4은 압축기 주파수 변화에 따른 냉방시스템의 성능 변화를 나타내고 있다. 내기/외기 온도 27/35°C에서 압축기 주파수를 55 Hz에서 65 Hz로 변화시켜가면서 실험을 진행하였다. 압축기 주파수가 증가함에 따라 냉방시스템의 증발용량은 4.3% 증가하였으나 COP는 14.1% 감소하였다. 이러한 이유는 압축기의 소비전력 증가가 증발용량의 증가보다 더 크기 때문이다. Table 3은 압축기 주파수 증가에 따른 압축기 및 인버터의 소비전력 및 작동 효율을 나타내고 있다. Table 3에서 보는 것처럼 압축기 주파수가 증가함에 따라 인버터 및 압축기의 소비전력은 각각 23.2%와 21.5% 증가하였다. 인버터 효율은 압축기 주파수 60 Hz에서 99.36%로 최대로 나타났다. 이는 압축

기의 정격 전압이 60 Hz에서 설계되었고 인버터 자체의 효율특성에 기인한 것으로 판단된다. 모든 시험 조건에서 인버터의 작동효율은 95.0% 이상임을 확인하였고, 본 연구에서 사용한 전동식 스크롤 압축기는 구동 주파수가 55 Hz에서 65 Hz로 증가함에 따라 압축비가 14.14% 증가하였다.



[그림 5] 내기온도변화에 따른 열전달성능
[Fig. 5] Heat transfer performance with the indoor temperature

Fig. 5은 내기온도 변화에 따른 냉방시스템의 성능변화를 나타내고 있다. 압축기 주파수를 65 Hz 및 외기온도를 35°C로 설정하고 내기온도를 27°C에서 35°C로 변화시켜가면서 실험을 진행하였다. 외기온도는 한여름의 외기온도를 묘사하기 위하여 35°C로 선정하였다. 내기온도가 27°C에서 35°C로 증가함에 따라 증발용량은 9.17% 증가하고 냉방 COP는 1.43% 증가하였다. 이러한 이유는 압축기의 소비전력 증가보다 냉방시스템의 증발용량 증가가 더 크기 때문이다. Table 4는 내기온도 증가에 따른 압축기 및 인버터의 소비 전력 및 작동 효율을 나타내고 있다. 내기온도가 27°C에서 35°C로 증가함에 따라 인버터 및 압축기의 소비전력은 각각 8.75%와 7.63% 증가하였고 인버터의 작동 효율은 전구간에 걸쳐 비교적 일정하게 나타났다. Tables 3과 4의 결과에서 보듯이, 인버터의 작동효율은 내기온도 변화보다 압축기 주파수변화에 더 큰 영향을 받았다.

[표 3] 압축기 주파수변화에 따른 인버터의 실험결과
[Table 3] Test results of the inverter driver with the compressor frequency

Hz_comp (Hz)	W_inv (kW)	W_comp(kW)	η_{inv} (%)	R_comp(-)
55	13.12	12.95	98.70	6.33
60	14.21	14.12	99.36	6.55
65	16.17	15.74	97.34	7.39

[표 4] 내기온도변화에 따른 인버터의 실험결과
[Table 4] Test results of the inverter driver with the indoor temperature

T_ind (°C)	W_inv (kW)	W_comp(kW)	η_{inv} (%)	R_comp (-)
27	16.17	15.74	97.35	7.39
32	16.84	16.37	97.25	7.16
35	17.58	16.94	96.35	7.01

4. 결론

본 연구에서는 친환경 대형 버스 차량에 적용되는 루프형 전동식 냉방시스템의 성능특성을 파악하기 위하여 인버터로 구동되는 전동식 스크롤 압축기를 적용한 냉방시스템을 설계하였다. 또한 전동식 냉방시스템의 성능 특성을 파악하기 위하여 스크롤 압축기의 주파수 및 승차 공간의 온도인 내기온도를 변화시켜가면서 다양한 실험을 진행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 루프형 전동식 냉방시스템의 냉매 충전량 실험을 통하여 충분한 과냉도를 확보할 수 있는 최적 냉매 봉입량을 8.5kg로 선정하였다.
- (2) 압축기 주파수가 55 Hz에서 65 Hz로 증가함에 따라 냉방시스템의 증발용량은 4.3% 증가하였으나 냉방 COP는 14.1% 감소하였다.
- (3) 내기온도가 27°C에서 35°C로 증가함에 따라 냉방시스템의 증발용량은 9.17% 증가하였고 냉방 COP는 1.43% 증가하였다.
- (4) 스크롤 압축기를 구동하는 인버터의 작동 효율은 내기온도 변화보다 압축기 주파수 변화에 더 큰 영향을 받았다.

References

[1] Park, I. Y., Won, J. B., Goh, H. B. and Lim, K. S., "Optimum Control of A/C System for Hybrid Car by Electric Compressor", Proceeding of KSAE 2011, pp. 2155-2159, 2011.

[2] Kim, S. C., Park, J. C., Kim, M. S., "Performance Characteristics of a Supplementary Stack-Cooling System for Fuel-cell Vehicles using a Carbon Dioxide Air-conditioning Unit", Int. J. of Automotive Technology, 11(6), pp. 893-900, 2010.

- [3] Shin, S. K., Lim, S. J., Moon, J. H., Cho, Y., Koo, T. and Lee, S., "R-134a Heat Pump Application for the Buses by using Engine Coolant as a Heat Source", SAE, 2008-01-2697, 2008.
- [4] Cho, C. W., Lee, M. Y., Lee, H. S., Mo, J. H., Oh, S. T. and Won, J. P., "Heating Performance Characteristics of a Coolant Source Heat Pump using Wasted Heat of Electric Devices for an Electric Bus", Int. J. Automotive Technology, In Review, 2011.
- [5] Lee, M. Y., Cho, C. W., Lee, H. S., Lee, D. Y., Park, Y. C. and Won, J. P., "Performance Characteristics of a Simultaneous Hybrid Heat Pump using Coolant and Air Sources for an Electric Bus", Int. J. of Refrigeration, In Review, 2011.

이 무 연(Lee, Moo-Yeon) [정회원]



- 2003년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학석사)
- 2007년 2월 : LG연구소(연구원)
- 2010년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 1월 : 고려대학교 기계공학과 (연구교수)
- 2011년 2월 ~ 현재 : 자동차부품 연구원 선임연구원

<관심분야>
친환경 자동차 열관리, 전동식 히트펌프, 신재생에너지 변환시스템, 열/물질전달

원 중 필(Won, Jong-Phil) [정회원]



- 1992년 2월 : 경희대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 경희대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1993년 2월 ~ 현재 : 자동차부품 연구원 열제어시스템 연구센터 책임연구원

<관심분야>
자동차 냉각장치, 열교환기, 연료전지

이 동 연(Dong-Yeon Lee) [정회원]



- 1999년 2월 : 한국과학기술원 기계공학부 (공학석사)
- 2007년 2월 : 한국과학기술원 기계공학부 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2008년 8월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
Nano-mechatronics, Nano-design, Scanning-Probe Microscope

조 중 원(Cho, Chung-Won) [정회원]



- 1999년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 : 두산중공업 신재생에너지 개발팀
- 2008년 5월 : 에너지기술연구원 고분자 연료전지 연구단
- 2008년 7월 ~ 현재 : 자동차부품 연구원 열제어시스템 연구센터

<관심분야>
친환경 자동차 열관리 시스템 , 연료전지 및 BOP