

상용차 하이브리드 냉방시스템 냉방 성능 특성 연구

이호성¹, 전한별¹, 김정일², 이무연^{3*}

¹자동차 부품 연구원 열제어시스템 연구센터, ²세덕 주식회사, ³동아대학교 기계공학과

Experimental study on cooling performance characteristics of hybrid refrigeration system in a heavy duty vehicle

Ho-Seong Lee¹, Hanbyeol Jeon¹, Jung-Il Kim², Moo-Yeon Lee^{3*}

¹Thermal Management System Research Center, KATECH

²Technical sales dept., CEDIC

³Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 본 연구의 목적은 상용차 운행 시, 야간 및 운휴중에 냉방시스템을 운전하기 위하여, 기계식과 전동식 압축기를 적용한 하이브리드 냉방시스템에 대한 냉방성능 특성을 분석하는 것이다. 기계식압축기는 170cc의 왕복동 형식이고, 전동식 압축기는 18cc 스크롤 형식이다. 전동식 압축기는 운휴시나 야간에 사용할 목적으로 적용되었기 때문에, 냉방용량은 기계식 압축기 대비 낮은 성능을 가지고 있다. 기계식 압축기를 사용하였을 경우, 6.0kW 수준의 냉방성능을 보이고 있고, 시스템 효율은 2.0이하의 결과를 가졌다. 반면, 전동식 압축기는 냉방성능 4.0kW수준, 시스템 효율은 3.5 수준을 가지고 있었다. 본 연구에서는 전동식 압축기는 냉방성능 4.0kW수준, 시스템 효율은 3.5 수준을 가지고 있었다. 기계식 압축기와 전동식 압축기를 운전조건에 따라서, 선택적으로 운전하는 것을 고려하였기 때문에, 운전모드가 바뀔 때의 시스템 특성을 분석하기 위하여, 운전모드 변경에 대한 영향을 알아보았다. 운전모드가 변경될 때, 토출압력이 일시적으로 증가하는 경향을 보이는데, 안정적인 운전을 위하여, 외기 부하 등을 고려한 운전모드 변경 로직에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Abstract The objective of this study was to investigate the cooling performance characteristics of a hybrid refrigeration system in a heavy duty vehicle. The tested hybrid refrigeration system had additionally an electric compressor besides the present mechanical compressor for selective use according to the operating conditions. The applied electric compressor was a scroll type and with 18.0 cc displacement. In order to analyze the performance characteristics of the hybrid refrigeration system with respect to the cooling capacity and Coefficient of Performance (COP), other components, including two different types of compressors, were installed and tested under various operating conditions such as compressor speed and air flow rate of the evaporator. When the electric compressor was operated at 4,500 rev/min, the cooling capacity was about 4.0kW and COP was 3.5. When the mechanical compressor was operated, whereas the cooling capacity was higher than the electric controlled compressor, COP was lower due to the larger displacement and higher power consumption. To analyze the hybrid system operating characteristics due to reasonable cooling capacity with electric compressor operation, the mechanical compressor and electric compressor were operated by turns every 10 minutes under certain system operating conditions. Because surge pressure occurred when both compressors were switched on, the operating strategy required some time to balance the system pressure.

Keywords : Cooling performance, Dual compressor, Heavy duty vehicle, Hybrid refrigeration system, Operating modes

본 논문은 산업통상자원부에서 지원하는 산업기술혁신사업(우수기술연구센터(ATC, 10051890)사업, 자동차산업핵심기술개발사업(20000277))으로 진행된 연구임.

*Corresponding Author : Moo-Yeon Lee(Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-7642 email: mylee@dau.ac.kr

Received November 1, 2018

Revised December 7, 2018

Accepted January 4, 2019

Published January 31, 2019

기호설명

h : 엔탈피(enthalpy, kJ/kg)

$\dot{Q}_{air}$: 냉방용량(cooling capacity, kW)

$\dot{W}$: 압축기 소모동력(compressor work, kW)

COP : 냉방시스템 효율(coefficient of performance)

R.H : 상대습도(relative humidity, %)

RPM : 압축기 회전수(revolutions per minute, rev/min)

1. 서론

최근 2013년 기후변화협약 의무 이행을 앞두고 완성차 업체에서 부품 업체에 이르기까지 국내외의 자동차 업계와 정부는 에너지 효율(연비) 향상을 위한 기술 개발에 전력을 다하고 있는 상황이다. 특히, 상용차는 연간 판매량이 승용차에 비해서 1/4수준으로 작지만, 연평균 주행거리는 승용차에 비해 3.4배, 평균 소요 부하량은 약 10배 높아 연비 1.0% 개선 당 연간 10억 킬로의 연료가 절약될 수 있다는 예상이 있어서, 배출가스 저감은 상용차의 연비개선이 필요한 이유 중에 하나이다. 상용차의 경우, 승용차와 다르게, 주행거리와 주행시간이 길기 때문에, 운전자의 휴식이 많이 고려가 되어야 하는 상황이고, 휴식 시 공조시스템에 대한 사용에 따른 연비 영향도에 대한 문제가 제기 되고 있는 상황이다. 휴식 시 냉방시스템을 가동하기 위해서는 현재, 엔진이 구동되어야 하는 단점이 있기 때문에, 엔진 구동을 하지 않는 방향에서의 연구가 많이 이루어지고 있다.

Lee et al. 은 로터리 타입의 전동식 압축기를 적용한 하이브리드 냉방시스템에서 기계식 압축기와 전동식 압축기의 운전에 따른 냉방성능 및 시스템 효율에 대한 분석을 진행하였다[1]. Han et al. 은 엔진 시동 없이 냉방시스템의 압축기 구동을 위하여서, 전력변환장치를 적용하였고, 2.5kW급 냉방성능을 확보하는 연구를 진행하였다[2]. 무시동 냉방시스템을 적용하기 위하여서, 필수적으로 적용되는 전동식 압축기 구동을 위한 전력변환기들에 대한 연구들이 많이 진행이 되었다[3, 4]. 전기구동 자동차에 대한 개발로 인하여서, 전동식 압축기를 적용한 냉방시스템의 연구가 많이 진행이 되었다. Park et al. 은 하이브리드 자동차에 적용되는 전동압축기에 대한 최적 제어에 대한 연구를 진행하여서, 시스템 성능 및

NVH 성능에 대한 분석을 진행하였다[5, 6]. 전동식 압축기와 기계식 압축기를 동시에 사용하는 하이브리드 냉방시스템에 대한 연구는 많이 진행되지 않았다. Lee et al. 의 경우, 자연냉매인 R-744를 사용하는 하이브리드 냉방시스템에 대한 연구를 진행하여서, R-744 냉매의 운전조건에 따른 전동식과 기계식 압축기에 대한 성능 특성을 분석하였다[7].

기존 연구들에서는 전동식 압축기나 기계식 압축기를 하나만 사용하는 냉방시스템에 대한 연구가 주를 이루고 있고, 두 가지를 동시에 적용하여서, 선택적으로 운전이 진행되는 하이브리드 냉방시스템에 대한 연구는 비교적 소수이다. 본 연구에서는 전동식과 기계식이 동시에 적용된 하이브리드 냉방시스템의 운전모드에 따른 시스템 특성을 분석하여서, 성능 변화 특성 및 내구성에 대한 문제 등을 분석하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로, 기계식과 전동식 압축기를 선택적으로 운전 시에 고려되어야 할 사항을 분석하였고, 부하에 따른 최적 운전에 대한 연구를 진행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

상용차용 하이브리드 냉방시스템에 대한 성능 특성을 알아보기 위하여서, 구축된 실험장치의 배치도는 Fig. 1과 같고, 주요 부품으로는 전동식 압축기(Electric controlled compressor) 및 기계식 압축기(Mechanical compressor), 컨덴서(Condenser), 온도감응형 팽창밸브(Thermal expansion valve), 증발기(Evaporator), 그리고, 방향전환 밸브(3 Way valve)로 구성되었다. 각 핵심부품들의 사양은 Table 1에 제시되었다.

기계식 압축기를 구동시키기 위해서, 모터에 연결하여서, 회전수를 조절할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 냉방시스템 운전조건에 따라서, 압축기를 선택적으로 운전할 수 있는 상황에서의 하이브리드 냉방시스템의 성능 특성을 알아보고자 하였기 때문에, Table 2와 같이 성능 평가 조건을 확립하였다.

하이브리드 냉방시스템의 성능 특성을 알아보기 위하여서, 각 핵심부품의 입·출구에 온도와 압력센서를 적용하였고, 냉매 유량의 경우, 응축기 출구에서 측정하였다.

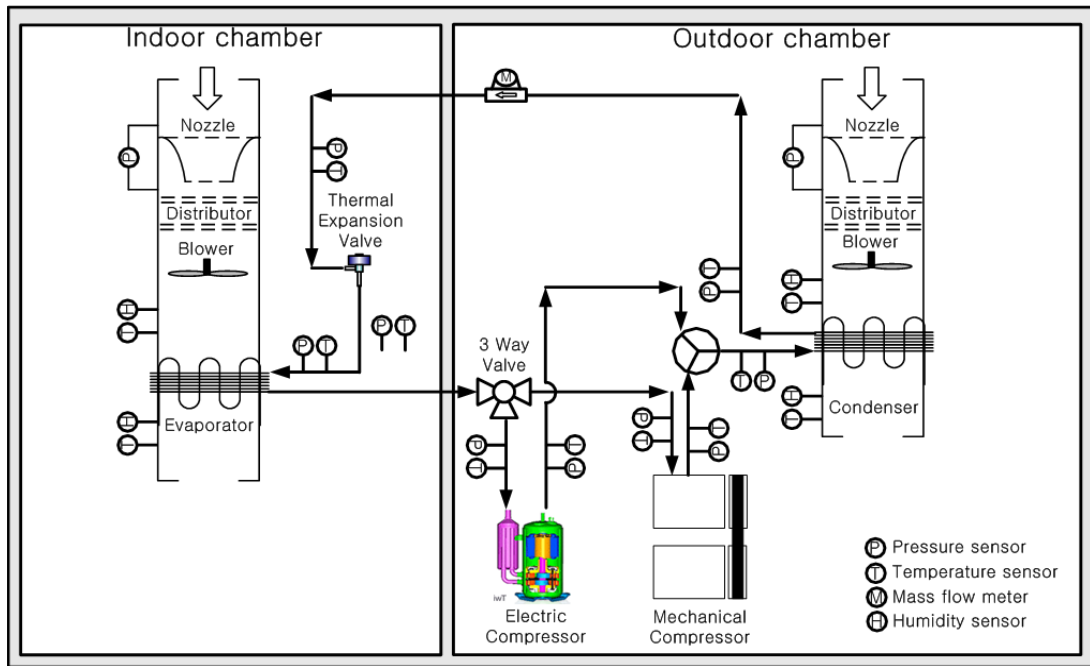


Fig. 1. Schematic diagram of the hybrid cooling system with electric-controlled compressor and mechanical compressor

Table 1. Specification of tested system components

Components	Specifications	
Condenser	Capacity (kW)	10.15 at 6 m/s
	Type, core size (mm3)	Multi-flow type, W478xH318xD16
Evaporator	Capacity (kW)	5.2 at 500 m ³ /hr
	Type, core size (mm3)	Multi-flow type, W250xH197xD55
Electric Controlled Compressor	Type	Scroll
	Displacement (cc/rev)	18.0
Mechanical Compressor	Type	Reciprocated
	Displacement (cc/rev)	170
Expansion valve	Type	Thermally controlled
	Flow rate(kg/h)	50~250

Table 2. Tested system test matrix

Components	Conditions
Tevaporator, in(°C)	27.0, 35.0, 45.0
RHevaporator, in(%)	50.0
Qevaporator, in(m ³ /hr)	250 ~ 450
Tcondenser, in(°C)	35.0
Vcondenser, in(m/s)	3.0
Electric controlled compressor speed (RPM)	4,000~6,000
Mechanical compressor speed (RPM)	600~2,100

2.2 실험계산

하이브리드 시스템 냉방성능을 측정하기 위하여, 엔탈피 방법(식 (1))을 사용하였고, 압축기 소비동력의 경우, 전동식의 경우, 소비전력을 전력계산계(WT-210)를 통하여서, 분석하였고, 기계식의 경우, 연결되어있는 모터부의 소비전력을 측정하여 분석이 진행되었다.

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air} (h_{air, \in} - h_{air, out}) \quad (1)$$

시스템 용량과 전동식 압축기 소요동력 계산한 값을 이용하여 냉방 성능계수는 식(2)에 의해서 결정된다.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{air}}{\dot{W}} \quad (2)$$

Table 3은 실험에 사용된 계측기에 대한 불확실도와 계측 후 주요하게 계산되어지는 냉방성능 및 성적계수(COP)에 대한 불확실도를 계산한 결과를 보여주고 있다.

Table 3. Test equipment and uncertainty of the experimental parameters

Items	Accuracy
Thermocouples (T-type)	± 0.1 °C
Pressure gage (Sensors, PI3H)	$\pm 0.1\%$ (Max 250 bar)
Mass flow meter (Coriolis type)	$\pm 0.15\%$, Max 680 kg/h
Data logger (Gantner)	E. Gate IP (V3) (2.93 W @ 12.06 V)
Cooling capacity	4.5%
COP	5.8%

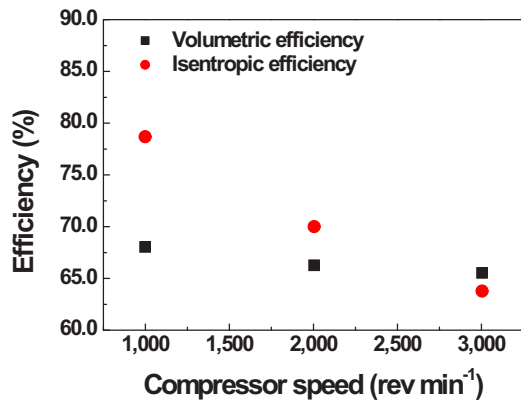


Fig. 2. Efficiency of mechanical compressor

3. 실험결과 및 고찰

본 연구의 목적은 상용차 연비향상을 위하여, 냉방 시스템 운전조건에 따른 전동식 압축기 구동과 기계식 압축기 구동을 선택적으로 활용할 수 있는 하이브리드 냉방시스템에 대한 성능 특성을 연구하고자 하였고, 기계식 압축기 운전 시와 전동식 압축기를 적용하였을 때의 성능 특성을 비교하고, 하이브리드 냉방시스템에서 압축기 운전모드 변화시에 대한 시스템 특성을 분석하였다.

3.1 기계식 압축기 적용 시 시스템 성능 특성

Fig. 2는 평가에 사용한 기계식 압축기 효율 특성을 분석한 그래프로, 왕복동식으로, 체적효율 최대 67.0% @ 1,000 RPM 이하 수준이고, 등엔트로피 효율은 최대 79.5% @ 1,000 RPM 수준을 보이고 있다.

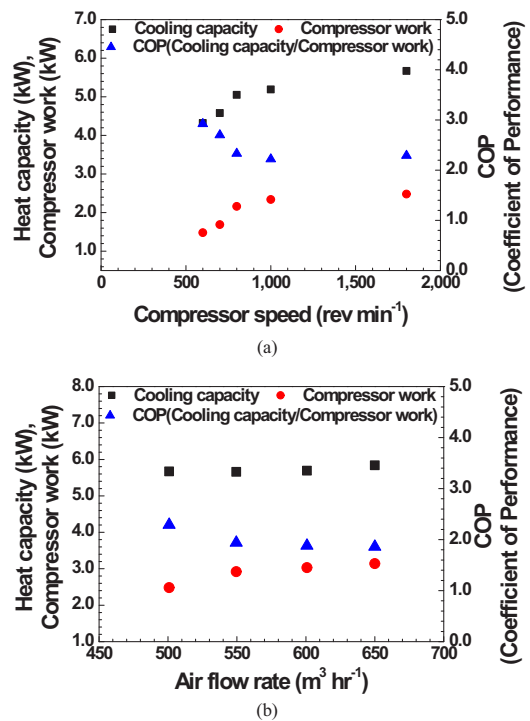


Fig. 3. Hybrid A/C system performance characteristics with the mechanical compressor

(a) Variation of compressor speed @ 500 m³ hr⁻¹
(b) Variation of air flow rate @ 1,800 RPM

Fig. 3은 기계식 압축기를 적용하여서, 시스템 운전을 진행하였을 때의 시스템 성능 특성을 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 송풍기 풍량을 500 m³ hr⁻¹로 하여서, 압축기 회전수를 변화시켰을 때의 냉방 성능과 압축기 일, 그리고 시스템 효율을 보여주고 있다. 냉방성능과 시스템 효율의 경우, 5.8 kW, 2.25 @ 1,800 RPM을 보여주고 있다. Fig. 3(b)는 압축기 회전수를 1,800 RPM으로 고정하고, 송풍기 풍량을 변경하였을 때의 시스템 성능 특성을 분석한 데이터이다. 냉방성능과 시스템 효율은 압축기 동일 회전수에서 크게 변화가 이루어지지 않고, 6.0 kW, 1.9 @ 650 m³ hr⁻¹의 결과를 보여주고 있다. 기계식 압축기를 사용하였을 때, 압축기 회전수의 경우, 엔진과 연동하기 때문에, 엔진 회전수에 따른 송풍기 풍량 조절이 가능할 것으로 판단된다.

3.2 전동식 압축기 적용 시 시스템 성능 특성

Fig. 4는 평가에 사용한 스크롤 타입 전동식 압축기를 적용하였을 때, 냉방성능 특성을 보여주고 있다. 전동식

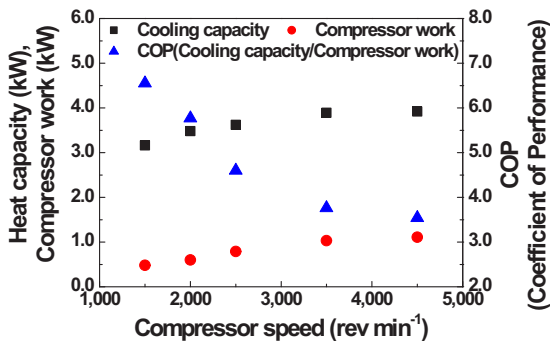


Fig. 4. Hybrid A/C system performance characteristics with scroll type electric compressor with variation of compressor speed

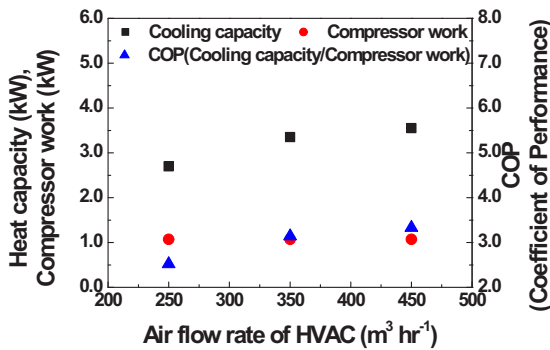


Fig. 5. Hybrid A/C system performance characteristics with scroll type electric compressor with variation of air flow rate

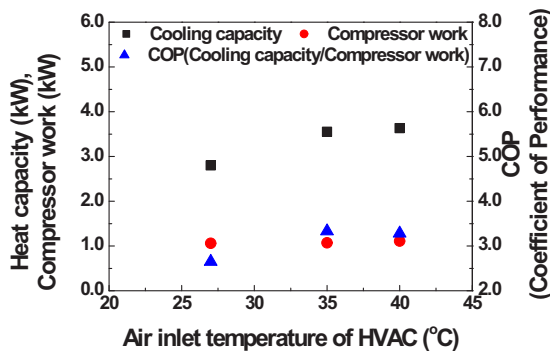


Fig. 6. Hybrid A/C system performance characteristics with scroll type electric compressor with variation of air inlet temperature

압축기를 적용하였을 때, 최대 회전수 조건에서 약 4.0 kW 냉방성능과 3.5정도의 COP를 보여주고 있다. 로터리 타입 전동식 압축기를 사용하였을 때 보다, 약 20%

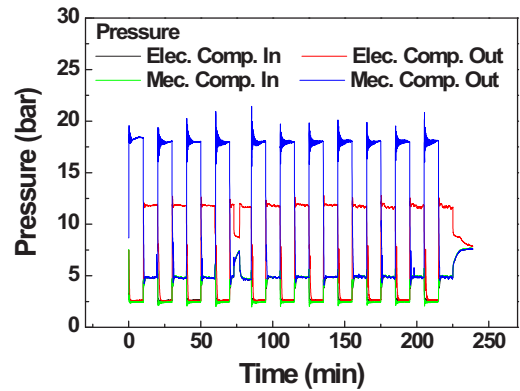


Fig. 7. Hybrid A/C system operating characteristics at compressor with high speed mode for each compressor

정도의 성능 향상을 보여주고 있다.

Fig. 5은 전동식 압축기가 최대 회전수일 때, 실내 측 공기 풍량을 변화시켰을 때의 시스템 성능 특성을 분석하였다. 최소 풍량인 $250 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$ 대비 최대 풍량일 때, 약 30%정도 성능 향상이 되는 것을 볼 수 있었고, 압축기 소모동력은 동일 회전수에서 진행되었기 때문에, 큰 변화가 없어서, 시스템 효율은 냉방성능의 비율과 동일하게 상승하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 내기온도 변화에 대한 영향을 알아보기 위하여, 최대 회전수의 전동식 압축기 조건에서의 내기 조건을 변화시켜서, 시스템의 성능 특성을 알아보았다. 최대부하인 45.0°C 조건일 때, 냉방성능은 최소부하인 27.0°C 조건 대비 약 30%정도 냉방성능이 높아지는 것을 알 수 있었고, 비례하여서, 시스템 효율도 상승하였다.

전동식 압축기가 최대 회전수일 경우에는 4.0 kW의 성능을 보이고 있기 때문에, 기계식 압축기를 돌리지 않고도 본 연구에 사용된 전동식 압축기를 적용하여서, 냉방 부하를 대응할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 압축기 운전 모드 변화에 대한 영향

전동식 압축기를 적용하였을 경우, 외기부하에 따라 냉방부하 대응이 가능하다는 분석 결과를 바탕으로, 운전자의 판단에 따라서, 선택적으로 운전이 되는 경우를 모사하기 위하여, 전동식과 기계식을 번갈아서 운전을 하였을 때의 시스템 특성을 분석하였다. 평가의 경우, 냉방부하가 많이 요구되는 조건에서 기계식과 전동식 모두 고속으로 움직일 경우를 분석하기 위하여, 각 압축기

의 운전시간을 10 min 정도로 하여서, 평가를 진행하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 평가 시 응축기 측의 공기 조건은 35.0 °C, 3.0 m s⁻¹이고, 증발기 측의 공기 조건은 27.0 °C, 50.0%RH, 450 m³ hr⁻¹이었다. 고속모드에서는 전동식 압축기 3,300 RPM, 기계식 압축기는 3,000 RPM을 적용하였다. 평가 결과를 보게 되면, 전동식 압축기는 고압 12.0 bar 수준이고, 기계식 압축기는 고압 18.2 bar 수준이고, 압축기 운전 모드가 변경되었을 경우, 고압이 갑자기 높아지는 경우가 발생하였다가, 안정화가 되는 것을 볼 수 있는데, 이러한 원인은 운전 모드 변경 시, 운전 중에 압축기 토출압이 상대적으로 높아져서, 기동부하가 높아졌기 때문으로 판단되고 있다. 고압에 대한 내구성에 대한 부분이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 상용차 운전환경에 따른 연비향상을 위하여서, 선택적 운전이 가능한 하이브리드 냉방시스템을 적용하고자 하였다. 이를 위해 기존 기계식 압축기에 전동식 압축기를 추가로 적용하였을 때의 성능 특성을 연구하였고, 압축기 운전 모드 변화에 따른 시스템의 운전 특성을 분석하였다. 그 결과 아래와 같다.

- 1) 기계식 압축기를 사용하였을 경우, 6.0 kW 수준의 냉방성능을 확보할 수 있었고, 시스템 효율은 2.0 이하의 결과를 보이고 있었다.
- 2) 스크롤 타입 전동식 압축기(18.0 cc/rev)를 사용하였을 경우, 최대 4.0 kW의 냉방성능을 보이고 있었다.
- 3) 전동식 압축기를 사용하였을 경우, 4.0 kW정도의 냉방성능을 보이고 있어서, 전동식 압축기 단독으로 사용하여서, 실내 측 냉방을 만족할 수 있기 때문에, 압축기 운전 모드 변화에 대한 시스템 운전 특성을 분석하였을 때, 기동 시 서지 압력이 발생하는 것을 볼 수 있기 때문에, 서지 압력에 대한 대응이 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 하이브리드 시스템의 경우, 기계식 압축기가 고속으로 회전되는 상황에서 속효성을 확보하고, 유지를 위하여서, 전동식 압축기를 사용하게 되면, 연비측면에서 유리할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] H. S. Lee, J. P. Won, C. W. Cho, T. K. Lim, H. B. Jeon, M. S. Han, J. G. Kim, Y. C. Kim, "Experimental study on performance characteristics of the hybrid cooling system with rotary type electric controlled compressor in a commercial vehicle", *KSAE annual conference(KSAE17-S0372)*, pp. 858-863, 2017.
- [2] K. W. Han, S. G. Kim, C. H. Lee, M. H. Choi, Y. G. Jung, Y. C. Lim, "Commercial vehicle anti-start air conditioner compressor system using a power conversion unit", *Journal of the korean institute of illuminating and electrical installation engineers*, pp. 96-108, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2015.29.6.096>
- [3] K. W. Han, S. G. Kim, Y. G. Jung, Y. C. Lim, "Development of the anti-start air conditioner compressor resonant DC/DC converter for commercial vehicle", *The transactions of korean institute of power electronics*, Vol 19, No. 6, pp. 557-563, 2014. DOI : <https://dx.doi.org/10.1155/2013/282313>
- [4] K. W. Han, S. G. Kim, C. H. Lee, M. H. Choi, Y. G. Jung, Y. C. Lim, H. H. Cho, "Development of the anti-start air conditioner system power conversion unit for commercial vehicle", *Power electronics annual conference*, pp. 139-140, 2015.
- [5] H. S. Lee, J. P. Won, C. W. Cho, T. K. Lim, H. B. Jeon, M. S. Han, J. I. Kim, Y. C. Kim "Experimental study on performance characteristics of the hybrid cooling system with rotary type electric controlled compressor in a commercial vehicle", *KSAE annual conference*, pp. 858-863, 2017.
- [6] I. Y. Park, J. B. Won, H. B. Goh, K. S. Lim, "Optimum control of A/C system for hybrid car by electric compressor", *KSAE annual conference*, pp. 2155-2159, 2011.
- [7] H. S. Lee, M. Y. Lee, "Cooling performance characteristics on mobile air conditioning system for hybrid electric vehicles", *Advances in Mechanical Engineering* DOI : <https://dx.doi.org/10.1155/2013/282313>

이 호 성(Ho-Seong Lee)

[정회원]



- 2006년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학석사)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 자동차부품연구원 선임연구원

<관심분야>

자동차 냉각시스템 해석 및 평가, 자동차 열관리

전 한 별(Han-Byeol Jeon)

[정회원]



- 2015년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2011년 1월 ~ 현재 : 자동차부품 연구원 연구원

<관심분야>

자동차 냉각시스템 해석 및 평가, 자동차 열관리

김 정 일(Jung-Il Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 충북대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 ~ 2003년 : CMSTech. Co. CAE팀장
- 2003년 ~ 2005년 : ECIM Co. Ltd. CFD팀장
- 2005년 ~ 현재 : CEDIC Co. Ltd. 자동차 CAE팀장

<관심분야>

자동차 및 항공기 열관리 분야 해석

이 무 연(Moo-Yeon Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 2월 ~ 2012년 8월 : 자동차부품 연구원 선임연구원
- 2012년 9월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 열/물질전달, 연료전지, 나노유체