

## 전동 스크롤압축기의 운전rpm에 따른 냉동사이클의 성능에 대한 실험적 연구

### Experimental Study on the Performance of Refrigeration Cycle for various RPM of Inverter Scroll Compressor

이규선\* · 이근안\*\* · 이형욱\*\*\* · 이영선\*\*\*\* · 김정배\*\*\*†

Lee K. S.\*, Lee K. A.\*\*, Lee H. Y.\*\*\*, Lee Y. S.\*\*\*\*, and Kim Jeongbae\*\*\*†

(Submit date : 2014. 4. 8., Judgment date : 2014. 4. 11., Publication decide date: 2014. 6. 4.)

**Abstract :** An experimental study was performed estimating COP(Coefficient of Performance) of air-conditioning cycle with inverter scroll compressor. All experiments were done for various compressor speeds from 1000~4000 rpm and used the inverter controller called CANDy to change the compressor rpm. The air-conditioning cycle components in the apparatus were used as same with components of YF hybrid car. To estimate the COP, this study measured the temperature and pressure at inlets and outlets of compressor, condenser, and evaporator. And also measured the compressor input power using Powermeter. Through the experiments, the maximum error to estimate COP was shown about  $\pm 6.09\%$  at 3500rpm. This study revealed that the condenser temperature and pressure were increased and the evaporator temperature and pressure were decreased with the increased compressor speed. And also, the COP was decreased with increased compressor speed. Those results can be used the basic and fundamental data to design the air-conditioning cycle with inverter scroll compressor.

**Key Words :** 증기압축냉동사이클(Vapor Compression Refrigeration Cycle), 성능계수(COP), 압축기 회전수(RPM), 스크롤압축기(Scroll Compressor)

\*\*\*† 김정배(교신저자) : 한국교통대 에너지시스템공학과  
E-mail : jeongbae\_kim@ut.ac.kr, Tel : 043-841-5282  
\*이규선 : 한국교통대 대학원  
\*\*이근안 : 한국생산기술연구원  
\*\*\*이형욱 : 한국교통대 에너지시스템공학과  
\*\*\*\*이영선 : 재료연구소

\*\*\*† Kim Jeongbae(corresponding author) : Korea National  
University of Transportation  
E-mail : jeongbae\_kim@ut.ac.kr, Tel : 043-841-5282  
\*Lee K. S. : Korea National University of Transportation  
\*\*Lee K. A. : Korea Institute of Industrial Technology  
\*\*\*Lee H. Y. : Korea National University of Transportation  
\*\*\*\*Lee Y. S. : Korea Institute of Materials Science

## 1. 서 론

최근 자동차에 있어서 환경대응 자동차로서 가솔린엔진과 전기모터를 조합한 하이브리드 자동차에 대한 관심이 증가되고 있다.<sup>1)</sup>

이러한 하이브리드 자동차는 자동차 내부의 공조를 위해 전동식 압축기를 적용하는 증기압축 냉동사이클을 적용하고 있는데, 기존의 엔진 구동 압축기를 적용하는 냉동사이클과 비교하면, 엔진 구동과 관계없이 자유롭게 운전할 수 있어 자동차 실내의 온도와 습도변화가 거의 없이 쾌적한 상태로 유지할 수 있는 장점이 있다.<sup>1)</sup>

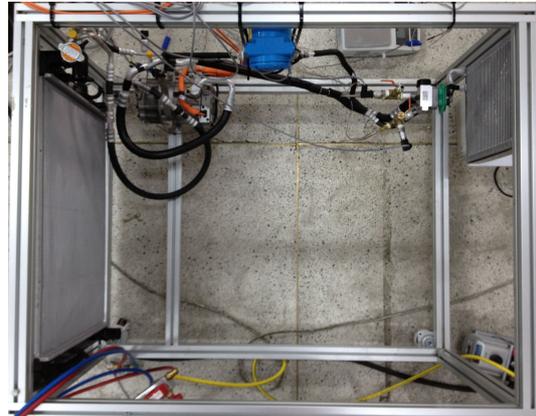
공조를 위해 전동식 압축기 구동에 요구되는 소요동력을 감소시키는 것은 하이브리드 자동차의 상용조건에서 전력이용효율을 극대화하기 위해서도 중요하다.

이렇게 증기압축 냉동사이클에서 가장 중요한 부품 중의 하나인 전동식 스크롤압축기에 대하여 브러시리스 직류전동기와 Sensorless 제어를 적용하기 위한 연구를 수행하거나<sup>2)</sup>, 전동식 스크롤압축기를 적용하면서 25kW의 냉방능력을 가지는 냉방시스템의 성능을 압축기 운전 Hz별로 실험적으로 제시하기도 하였다.<sup>3)</sup>

또한, 본 저자들은 YF 하이브리드 자동차에 응축기 및 증발기 팬을 제외하고는 실제 적용된 냉동사이클 부품을 그대로 활용하여 (다만, 실차에 적용되는 사이클을 이용하므로 열교환기 전열면적 등의 사양에 대한 스펙을 정확하게 제시할 수 없는 점이 있음) R-134a를 작동유체로 하는 증기압축 냉동사이클의 성능(COP, Coefficient of Performance)를 실험적으로 평가하기 위한 연구를 수행하였다.<sup>4)</sup>

이를 토대로 본 연구에서는 전동식 스크롤 압축기를 적용하는 자동차용 냉동사이클에서 압축기 회전속도(RPM)에 따른 성능(COP)이

어떻게 변화하는지를 실험적으로 규명하고자 하였다.



(a) Total cycle photo



(b) Compressor



(c) Condenser



(d) Expansion valve



(e) Evaporator

Fig. 1 Experimental Apparatus and cycle components

## 2. 실험 개요 및 방법

### 2.1 실험 장치

압축기 운전 RPM별로 실험을 통해 냉동사이클의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 제작하였다.

Fig. 1의 실험장치는 실제 하이브리드 자동차에 사용되는 부품을 구매하여 조립·제작

된 것으로, 일반적인 냉동사이클에 적용되는 Accumulator와 Dryer 등이 없는 압축기, 응축기, 팽창밸브 및 증발기로만 구성되어 있다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 P-h 선도를 가지는 증기압축 냉동사이클의 COP를 식(1)을 이용하여 평가하였고, 팽창장치에서의 과정(C-D)를 등엔탈피 과정으로 고려하여 증발기 입구의 상태를 결정하였다.

전동식 스크롤압축기는 인버터 방식이므로 별도의 고전압 DC 파워서플라이(280V<sub>DC</sub>)로 전력을 공급하고, 동시에 전압과 전류를 이용하여 소비전력을 측정하였다. 전동식압축기 인버터 제어와 운전rpm 제어는 전용 제어기인 CANDY를 이용하여 회전속도(rpm) 별로 실험을 수행하였다.

$$COP = \frac{Q_{eva}}{W_{comp}} = \frac{h_A - h_D}{h_B - h_A} = \frac{h_A - h_C}{h_B - h_A} \quad (1)$$

여기서, h는 엔탈피(kJ/kg)이며,  $Q_{eva}$ 는 증발기 열전달량(kJ/kg, 질량유량당 냉동능력)이며,  $W_{comp}$ 는 압축기 소요동력(kJ/kg)이다.

식(1)을 이용하여 COP를 평가하기 위해 필요한 사이클의 A(P<sub>4</sub>, T<sub>8</sub>), B(T<sub>2</sub>, P<sub>1</sub>), C(T<sub>4</sub>, P<sub>2</sub>) 지점에서의 온도와 압력을 측정하였고, 주위온도(T<sub>1</sub>) 등의 사이클 운전 특성 분석을 위한 위치들의 온도와 압력을 Fig. 3과 같이 측정하였다. 온도 측정은 교정식을 가진 OMEGA사의 4선식 RTD 열전대를 다시 항온조를 이용하여 재교정하여 이용하였고, 압력 센서는 KELLER사의 PA-21Y (-1.0~30.0bar)를 이용하였으며 모든 측정은 Data Acquisition 장비인 HP-34970A를 이용하였다.

냉동사이클의 냉매는 R-134a이며 냉매 봉입량은 550g, 전동식 스크롤압축기의 냉동기 오일은 POE 계열로 봉입량은 160g이다.

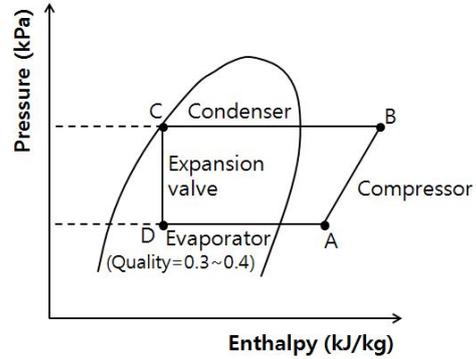


Fig. 2 Pressure-enthalpy(P-h) diagram of Standard Vapor compression refrigeration cycle

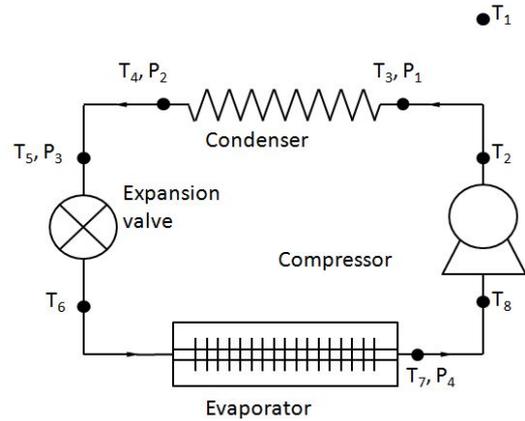


Fig. 3 Schematics of refrigeration cycle test rig

## 2.2 실험 방법

모든 실험은 실제 차량의 운전상태가 대기 노출 상태이므로, 항온항습 챔버가 아닌 실험실의 대기조건에서, 가급적 거의 실내온도가 유사한 범위 내에 있도록 유지하기 위하여 상온 조건 근처에 도달하였을 때 실시하였다.

실험은 먼저 사이클의 온도와 압력이 충분히 안정되면, CANDY를 이용하여 정해진 압축기의 운전 rpm으로 설정한다. 압축기 회전속도(운전rpm)은 기준으로 설정된 3000rpm을 중심으로 1000rpm부터 실험이 가능한 4000rpm까지 500rpm씩 증가시키며 실험을 수행하였

다. 압축기의 회전수를 변경하여 성능을 평가할 때 열교환기들의 팬은 자동차에 실제 적용하는 팬으로 일정한 풍량 조건으로 수행하였다.

데이터 획득 장치를 이용하여 모니터에 표시되는 시간에 따른 각 위치에서의 온도와 압력의 변화를 관찰하면서, 모든 사이클의 온도와 압력이 정상상태에 도달한 것을 확인될 때까지 측정결과를 저장하게 된다. 이러한 정상상태 운전 시간은 최소한 5분 이상 지속됨을 확보된 이후에 실험을 종료하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

주위온도를 일정하게 제어할 수 없는 대기 상태에서 실험을 수행하였으나, 실제 rpm별로 정상상태에 도달하는 시간과 5분 정도의 정상상태 유지시간을 포함하는 측정결과에 의하면 정상상태 운전시간 동안 평균 주위온도는 전체 rpm에 대하여 약  $19.1 \pm 1.0^\circ\text{C}$  이었다. 또한, 실험을 진행하는 시간동안(전체 실험 조건 모두 최대 실험 시간은 1600초인 약 27분 정도임) 주위온도의 표준편차는 약  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  이 내이었다.

본 연구의 실험 범위에서 기준이 되는 3000 rpm에서 측정된 실험결과를 Fig. 4(a)에는 시간에 따른 온도변화를, (b)에는 압력의 변화를 보여주고 있다.

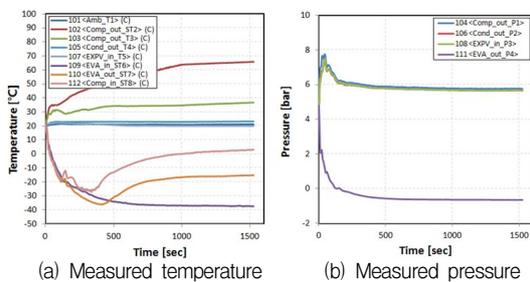


Fig. 4 Measured property results with time for 3000rpm

측정결과의 처리는 데이터 레코더에서 얻어진 결과를 먼저 시간에 따른 그래프 형태(Fig. 4)로 나타내고, 그래프에서 정상상태 구간을 확인하였다. 정상상태 운전구간을 선정하여 온도와 압력 측정값들로부터 사이클 각 위치에서의 상태량 평균값을 계산하였다. 획득한 정상상태에서의 평균 온도와 압력으로부터 R-134a의 물성치 계산 프로그램을 이용하여 엔탈피를 계산하고, 이를 이용하여 식(1)로 COP를 평가하였다.

각 위치에서의 측정 평균 압력과 평가된 엔탈피는 Fig. 5와 같이 P-h 선도로 나타낼 수 있다.

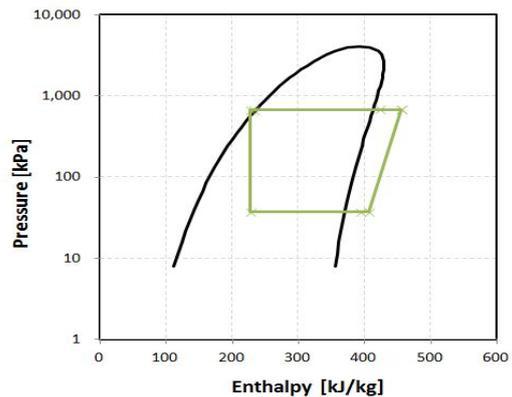


Fig. 5 P-h diagram acquiring from the measured data for 3000rpm

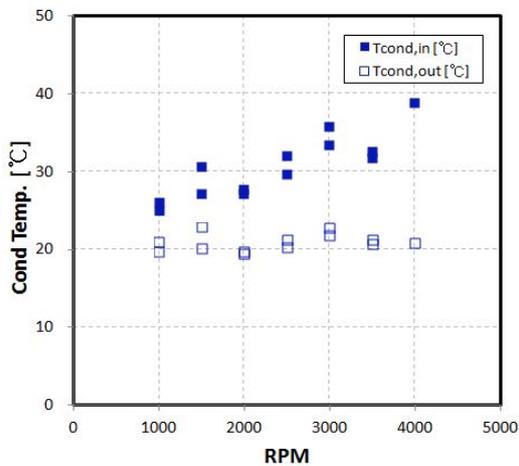
위에서 설명한 과정으로 평가된 각 운전 rpm에서의 COP 결과에 의하면, 전체 rpm 실험 조건 중 3500rpm에서 최대의 평가오차를 나타내었고, 그 수준은  $\pm 6.09\%$ 이었다. (Table 1. 참조)

Table 1. COPs for various compressor rpm

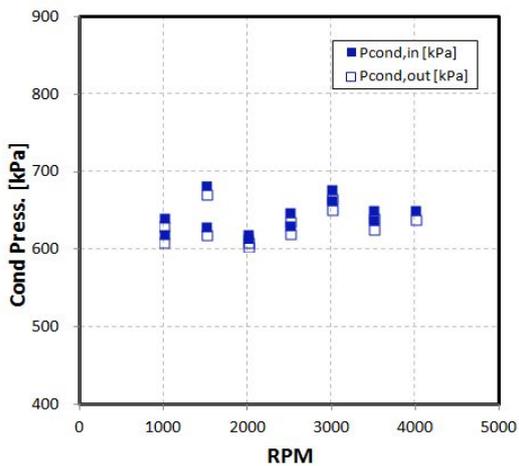
운전 rpm	1000	1500	2000	2500	3000	3500
1회	10.60	5.67	5.70	4.38	3.38	3.82
2회	10.42	5.79	5.74	4.18	3.37	4.05

Fig. 6과 7은 운전 rpm에 따른 응축기와 증발기의 입구와 출구에서의 온도와 압력 측정 결과를 보여주고 있다.

대체적으로 압축기 회전속도가 증가할수록 응축기 온도와 압력이 증가하였다. 운전 rpm이 증가함에 따라 응축기 입구온도는 압축기 출구 과열도의 증가로 인하여 증가하지만, 응축기 출구온도는 포화액체 혹은 낮은 과냉도로 거의 일정한 것으로 나타났다.



(a) Temperature



(b) Pressure

Fig. 6 Measured results of condenser for various compressor speed

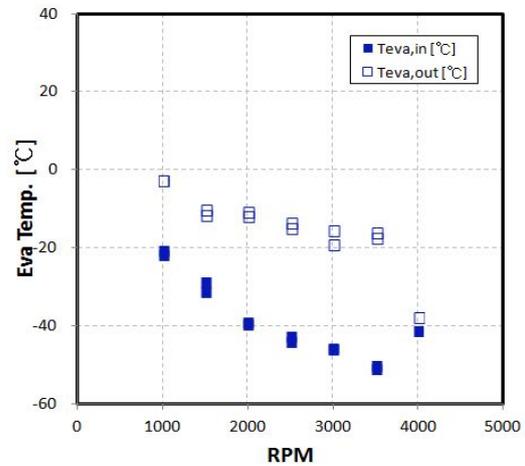


Fig. 7 Measured results of evaporator for various compressor speed

증발기 입구와 출구온도는 Fig. 7에서와 같이 압축기 운전 rpm이 증가함에 따라 대체적으로 감소하는 특성을 나타내었다. 다만, 증발기 입구온도가 출구온도에 비하여 압축기 운전 rpm이 증가함에 따라 크게 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 운전 rpm에 따른 압축기 입출구에서의 온도와 압력 측정결과를 보여주고 있다. 압축기 입구의 과열도는 12.7°C에서 19.5°C로 증가하고, 응축기 출구의 과냉도 역시 5.3°C에서 11.7°C로 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 8(c)와 같이 압축기 운전 rpm이 증가하면 압축기 입구의 압력은 감소하고 출구의 압력이 증가하여 압축비가 증가하고, 압축기 입구에서 냉매의 비체적 역시 증가하였다. 이러한 조건에서 단일 압축과정의 질량유량은 감소하게 되지만, 스크롤 압축기의 운전 rpm의 증가로 인하여 총 토출되는 질량유량은 증가하게 되므로, 실제로 측정된 압축기의 소요동력은 Fig. 8(d)와 같이 증가하는 측정 결과를 나타내었다.

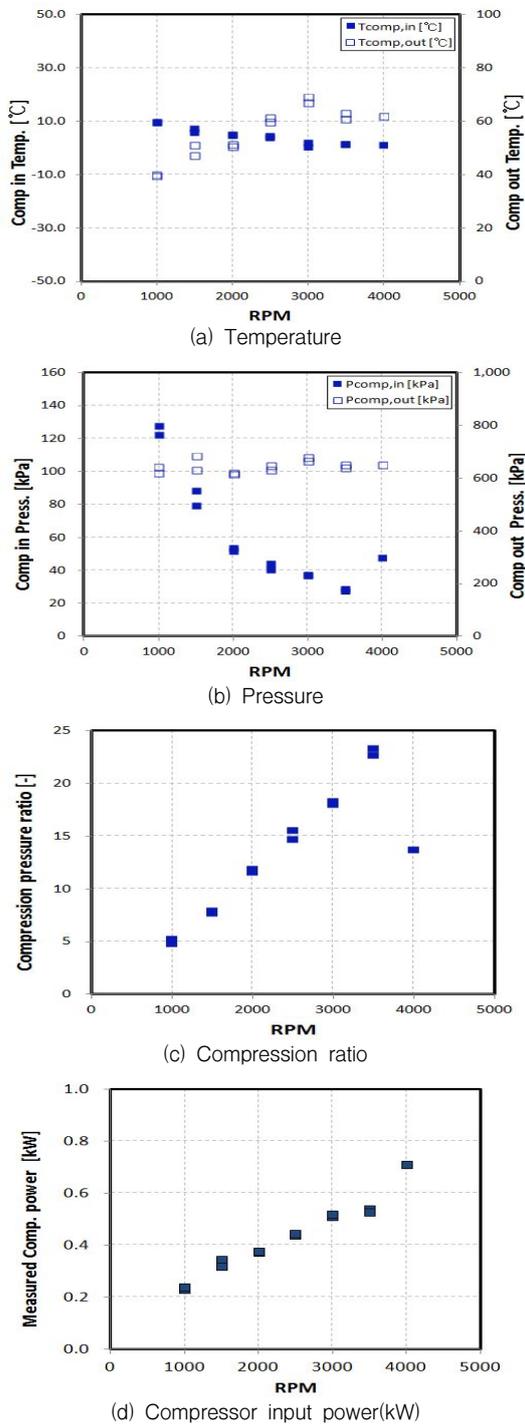


Fig. 8 Measured results of compressor running characteristics for various compressor speed

Fig. 9에서와 같이 압축기 운전 rpm이 증가할수록 사이클의 성적계수(COP)는 감소함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 증발기 입출구에서의 엔탈피 차인 냉동능력은 rpm 증가에 따라 감소하였고, 반대로 rpm 증가에 따라 압축기 소요동력이 증가하여 나타난 것으로 판단된다.

일반적으로 냉동사이클의 성능은 평가된 COP와 측정된 압축기 소요동력을 응축온도와 증발온도와 관계식으로 제시한다. 또는, 증기압축 냉동사이클의 핵심부품인 압축기의 압축비를 이용하여 표현하기도 한다.

이와 유사한 방법으로 본 연구에서도 압축기의 압축비와 COP 및 압축기 소요동력의 관계를 분석하였으나 명확하게 제시되지 않았다.

그러나, Fig. 10과 같이 x축을 평균 응축온도와 평균 증발온도의 비로 무차원화 하면 보다 명확한 경향성을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 평균 응축온도와 증발온도의 비로서 전동식 압축기를 적용하는 냉동사이클의 성능이 평가 가능하며, 설계시 기준 변수로 활용 가능할 것으로 판단된다.

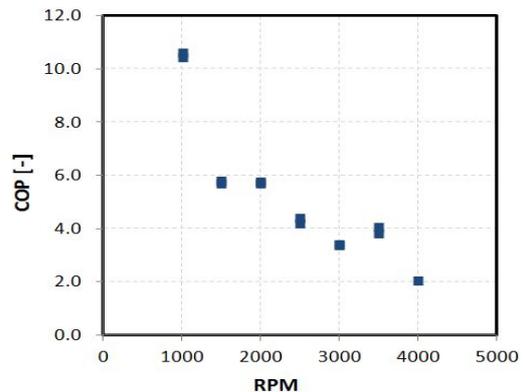


Fig. 9 Estimated COPs with various compressor speed

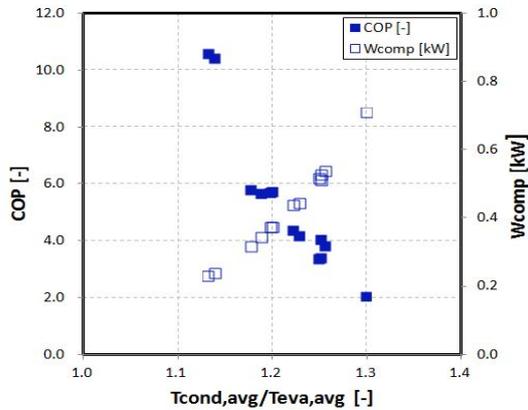


Fig. 10 Relationships between COP and compressor input power and averaged heat exchanger temperature

#### 4. 결 론

본 연구에서는 압축기 회전 속도(rpm)에 대한 자동차용 냉동사이클의 성능평가 특성을 실험적으로 수행하였다. 실제 자동차에서 사용하는 부품을 그대로 이용하여 성능평가 장치를 설계 및 제작하였으며, 압축기 제어장치(CANDy)를 구비하여 1000rpm부터 500 rpm 단위로 4000rpm까지 증가시키며 실험을 수행하였다. 압축기 운전 rpm에 따른 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) COP를 기준으로 하여 모든 rpm 조건 중 3500rpm에서 최대의 평가오차를 나타내었고, 그 수준은  $\pm 6.09\%$ 이었다.
- (2) 압축기 운전 rpm의 증가에 따라 응축온도가 증가하고 증발온도는 감소하므로 평가되어진 성능계수(COP)는 감소하는 경향을 나타내었다.
- (3) 평균 응축온도와 평균 증발온도의 비에 따라 COP와 압축기 소요동력을 정리하면, 일반적인 냉동사이클의 성능을 표현하는 방법과 유사한 경향성을 가짐을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 미래창조과학부/산업기술연구회 융합 연구사업의 지원으로 수행되었음  
(과제번호 B551179-11-02-00).

#### Reference

1. Yoon, J., Hiroyuki, H., Air Conditioning System for Hybrid Vehicle, SAREK Journal, 2008, Vol. 83, No. 964, pp. 50-53.
2. Hong, S.Y., Han, M.S., Park, S.J., Research of 2.5KW Electric Scroll Compressor Using PMSM, Proceedings of Power Electronics Annual Conference, 2012.07, pp. 600-603.
3. Lee, M.Y., Cho, C.W., Lee, H.S., Lim, T.K., Jeon, H.B., Won, J.P., Performance Characteristics of the Roof Mounted Electrical Air Conditioning System using Scroll Compressor, Proceedings of KSME Annual Fall Conference, 2011, pp. 1630-1635.
4. Lee, K.S., Lee, K.Y., Lee, J.S., Lee, Y.S., Kim, J., A Study on COP of Air-Conditioning Cycle in EV, Proceedings of KSES Spring Conference, 2012, pp. 80-85.