

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노 입자를 적용한 증기 압축 냉동 사이클의 성능

김정배<sup>†</sup> · 이규선\* · 이근안\*\*

한국교통대학교, \*한국교통대학교 석사과정, \*\*한국생산기술연구원

(2015년 7월 1일 접수, 2015년 10월 5일 수정, 2015년 10월 8일 채택)

### An Experimental Study on Performance of Vapor Compression Refrigeration Cycle with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particle

Jeongbae Kim, Kyu-Sun Lee\*, Geunan Lee\*\*

Korea National University of Transportation

\*Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation

\*\*Korea Institute of Industrial Technology

(Received 1 July 2015, Revised 5 October 2015, Accepted 8 October 2015)

#### 요 약

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노입자의 농도별로 전동식 압축기의 회전속도(rpm)의 변화에 따른 자동차용 증기압축 냉동사이클의 COP를 실험적으로 평가하고 나노입자를 적용하지 않은 기준 사이클의 COP와 비교하였다. 이를 위해 실제 하이브리드 자동차에서 쓰는 사이클 부품들을 이용하고 향온형습 챔버를 이용하지 않는 방식으로 장치를 설계 및 제작하였다. 별도의 전동식 인버터 압축기의 제어장치를 활용하여 1000rpm부터 500rpm 간격으로 4000rpm까지와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노입자를 질량비 기준으로 농도 0.05%, 0.1%, 0.2%와 0.5%의 범위에 대하여 실험을 수행하였다. 이를 통해 기준 사이클과 비교하면 기준 사이클의 일반적인 운전조건인 약 3000rpm에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체를 적용하는 사이클의 COP는 질량 농도비 0.05%에서는 15.4% 정도, 농도비 0.1%, 0.2% 및 0.5%에서는 각각 9.4%, 13% 및 9.6%가 증가함을 알 수 있었다.

**주요어** : 증기압축 냉동사이클, 나노입자, 성능계수, 압축기 회전수, 압축기 소요동력

**Abstract** - An experimental study was performed estimating COP(Coefficient of Performance) of air-conditioning cycle using inverter scroll compressor with and without Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano particle. 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 ±6.09% at 3500rpm. The COP of refrigeration cycle with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particle was similar with that of the base cycle without nano-particle between 1000~3000 rpm of the compressor speed. But, This study showed that the COP of the cycle with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> over 3000 rpm of the compressor speed was higher than that of the base cycle due to the higher heat transfer rate increased in the evaporator from the higher oil flow rate inside the cycle as well known. Those results can be used the basic and fundamental data to design the air-conditioning cycle using inverter scroll compressor with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano particle.

**Key words** : Vapor Compression Refrigeration Cycle, Nano-particle, COP, RPM, Compressor power input

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.

Energy System Engineering Dept., 50 Daehak-ro, Chungju-si,  
Chungbuk  
Tel : +82-43-841-5282 E-mail address : jeongbae\_kim@ut.ac.kr

## 1. 서론

최근 환경문제와 유가상승으로 인하여 하이브리드, 클린디젤 및 전기 자동차가 기존 자동차의 대안으로 생산되고 있다. 이러한 방식 중에서 가솔린 엔진과 전기 모터를 조합한 하이브리드 자동차에 대한 기술적 관심과 그 연구 결과들이 매우 증가하고 있다.<sup>1)</sup>

하이브리드 자동차는 차내의 공조를 위해 기존 자동차와 동일한 방식의 증기압축 냉동사이클을 적용하고 있다. 그러나, 엔진의 동작 특성에 연계되지 않는 자유로운 운전과 제어가 가능하도록 기존의 엔지 구동 압축기 대신 전동식 압축기를 적용하고 있다. 이를 통해 차내의 온도와 습도를 독립적인 운전 알고리즘으로 제어할 수 있는 매우 중요한 장점이 있다.<sup>1)</sup>

이러한 전동식 압축기를 적용하여 증기압축 사이클을 구동하는데 요구되는 소요동력을 감소시키는 것은 하이브리드 자동차의 상용조건에서 전력이용 효율을 극대화하기 위해서도 매우 중요하다.

이렇게 증기압축 냉동사이클에서 가장 중요한 부품 중의 하나인 전동식 스크롤 압축기에 대하여 브러시리스 직류 전동기와 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 전동식 스크롤압축기의 운전 rpm(회전수)에 따라 실험적으로 평가하고 분석하기 위한 연구를 수행하였다.<sup>4)</sup>

이러한 기초연구를 기반으로 본 연구에서는 상용 나노입자를 적용하여 전동식 스크롤 압축기를 가진 자동차용 냉동사이클의 성능(COP)을 측정하고, 그 결과를 기존(Base) 사이클과의 성능 비교를 수행하고자 참고 문헌 4와 동일한 성능평가 장치를 이용하였다. 나노입자를 적용한 다양한 연구에서 가장 널리 적용되고 있는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> 및 CuO 중에서 분산성 평가에서 가장 적합한 것으로 선정된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노입자<sup>5)</sup>를 적용하고 R-134a를 작동유체로 하는 증기압축 냉동사이클의 성능을 나노유체 오일량 기준 질량비(농도)와 압축기 rpm 변화

에 따른 냉동 사이클 성능 평가 실험을 수행하였다.

## 2. 실험개요 및 방법

### 2.1 실험장치

압축기 운전 RPM별로 실험을 통해 냉동사이클의 성능을 평가하기 위하여 참고문헌 4에서 적용한 실험 장치를 동일하게 이용하였다.

실험 장치는 실제 YF 하이브리드 자동차에 사용되는 부품을 구매하여 조립·제작된 것으로, 일반적인 증기압축 냉동사이클에 적용하는 Accumulator와 Dryer 등이 없는 압축기, 응축기, 팽창밸브 및 증발기로만 구성되어 있다.

본 연구에서는 Fig. 1과 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 정속형이 아닌 가변속의 인버터 방식이므로 별도의 고전압 DC 파워서플라이로 280V<sub>DC</sub>의 직류 전압을 공급하고, 동시에 투입되는 전압과 전류를 측정하는 Powermeter를 이용하여 소비전력을 측정하였다. 전동식 압축기의 운전 rpm 제어는 전용 제어기인 CANDY 장비를 이용하였다.

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

여기서, h는 엔탈피(kJ/kg)이며,  $Q_{eva}$ 는 증발기의 열 전달량(kJ/kg, 질량유량당 냉동능력)이며,  $W_{comp}$ 는 압

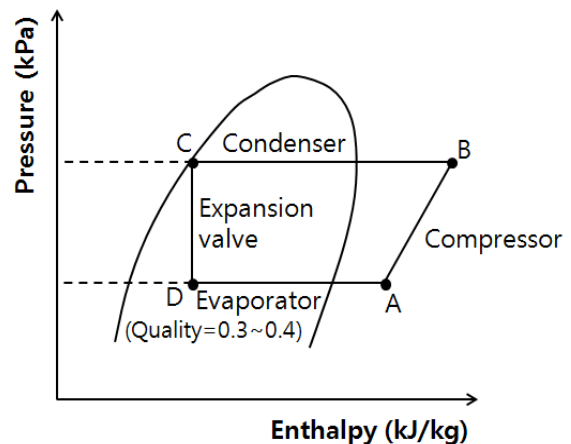


Fig. 1. Pressure-enthalpy diagram of Standard Vapor Compression Refrigeration Cycle

축기 소요동력(kJ/kg)이다.

식(1)을 이용하여 COP를 평가하기 위해 필요한 A ( $P_4, T_8$ ), B( $T_2, P_1$ ), C( $T_4, P_2$ ) 지점에서의 온도와 압력을 측정하였고, 주위온도( $T_1$ ) 등을 포함한 추가적인 운전 특성분석을 위한 온도는 Fig. 2와 같이 측정하였다.

온도 측정은 교정식을 가진 OMEGA사의 4선식 RTD 열전대를 항온조를 이용하여 재교정하여 이용하였고, 압력센서는 Keller사의 PA-21Y(-1.0~30.0bar)를 이용하였다.

온도와 압력의 측정은 Data Acquisition 장비인 HP-34970A를 이용하였다.

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

나노입자는 상용제품인 Sigma-Aldrich사의 13nm 크기의  $Al_2O_3$ (번호:718475)를 이용하였다. 나노유체의 제조는 추가 오일량에 나노입자량을 실험을 위한 질량 농도비에 맞게 혼합하고 2시간의 소니케이터를 이용하여 소닉(Sonic)을 한 후 증발기 출구와 압축기 입구를 연결하는 배관 부에 주사기(Syringe)를 이용하여

주입하였다.

다음 Table. 1은 각 농도별 투입된 나노입자량을 보여주고 있다.

나노 입자량은 초기 봉입 오일량과 이전의 추가 오일량을 기준으로 실험에 적용된 질량비 농도 0.05%-0.5%에 맞게 결정하였다.

### 2.2 실험방법

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 CANDY를 이용하여 스크롤압축기의 운전 rpm을 설정하고 운전하여, 냉동사이클의 온도와 압력이 정상상태에 도달하면 약 5분 정도 데이터를 확보하였다.

압축기 rpm은 기준으로 설정된 3000rpm(실제 조건에서 일반 운전 조건)을 중심으로 1000rpm부터 실험이 가능한 4000rpm까지 500rpm씩 증가시키며 실험을 수행하였다.

압축기의 회전수를 변경하여 성능을 평가할 때 열교환기들의 팬은 일정한 풍량 조건으로 고정하였다.

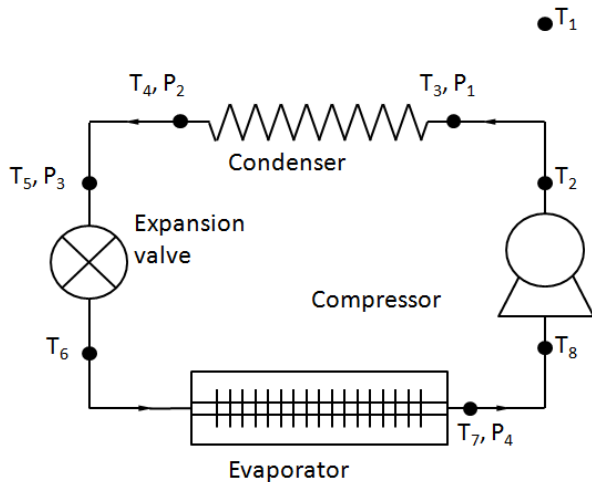


Fig. 2. Schematics of refrigeration cycle test rig

Table. 1. The concentration of  $Al_2O_3$  nano-particle

오일량 [g]	추가오일량 [g]	나노입자량 [g]	농도 [%]
160	3	0.082	0.05
163	3	0.166	0.10
166	5	0.342	0.20
171	12	0.915	0.50

### 3. 실험결과 및 고찰

모든 실험 조건에서 COP 평가결과에 의하면 최대 평가오차는  $\pm 6.09\%$  수준이었다.

운전 rpm별로 기준 사이클과  $Al_2O_3$  나노 입자 적용 사이클의 성능 측정을 수행하였고, Fig. 3과 Fig. 4에  $Al_2O_3$  0.05%에서의 COP를 일반적인 냉동사이클의 성능을 표시하는 방법과 동일하게 x축은 평균 응축온도와 평균 증발온도의 비( $T^* = T_{cond,avg} / T_{eva,avg}$ )로 무차원화하여 y축은 COP와  $W_{comp}$ 에 대해서 나타내었다.

기준 사이클과 0.05%의  $Al_2O_3$  나노입자 사이클 모두  $T^*$ 가 증가할수록 COP는 감소하였고,  $W_{comp}$ 는 증가하는 특성을 나타내고 있다.

$Al_2O_3$  나노입자의 농도별로  $T^*$ 에 대한 COP 와  $W_{comp}$ 의 특성을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. COP는 농도에 따른 차이를 확인할 수 없었으며, 마찬가지로 압축기 소요동력도 농도별로 유사한 경향을 나타내었다.

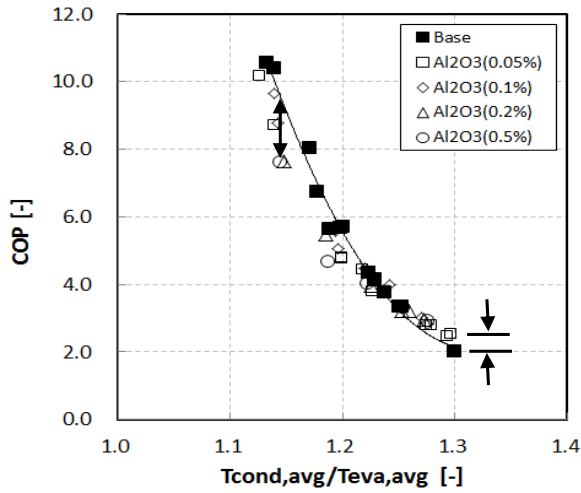


Fig. 3. Relationship between COP and the average heat exchanger temperature scale

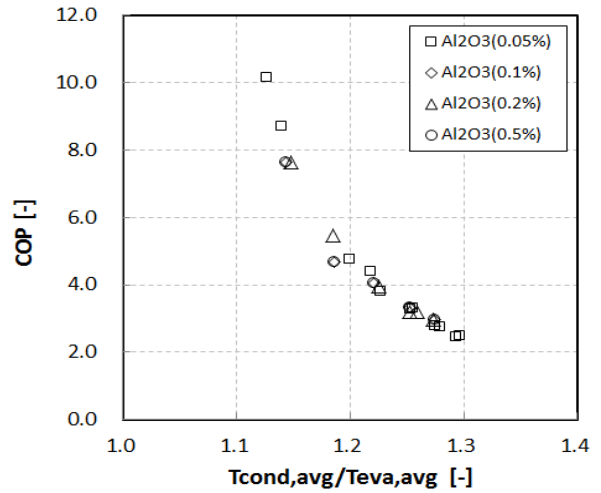


Fig. 5. Relationship between COP and the T\* for various nano-particle concentration

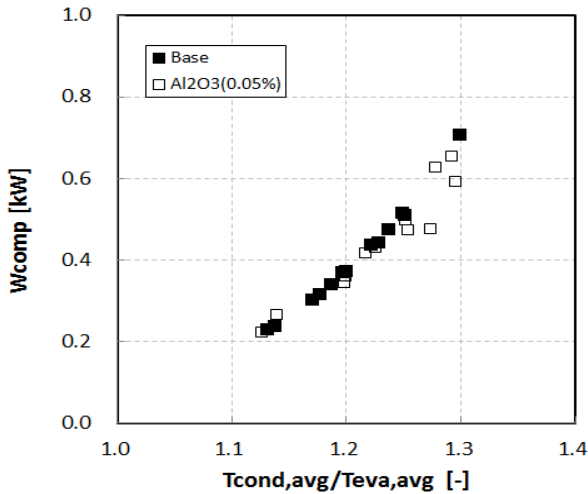


Fig. 4. Relationship between  $W_{comp}$  and the average heat exchanger temperature scale

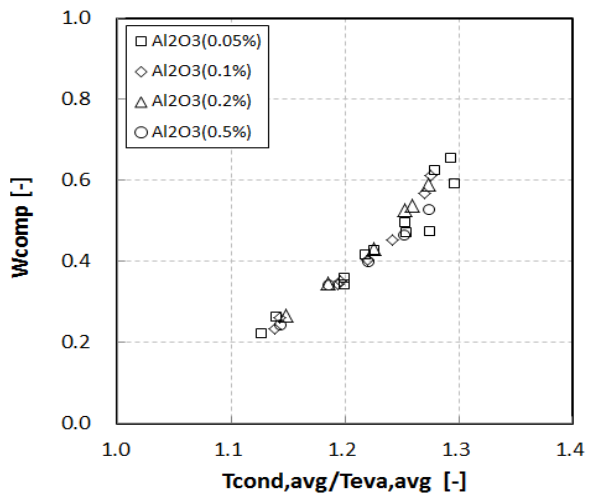


Fig. 6. Relationship between  $W_{comp}$  and the T\* for various nano-particle concentration

Fig. 7과 Fig. 8은 모든 농도의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노입자 적용 사이클의 COP와  $W_{comp}$ 를 기준 사이클의 성능과 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 7의 왼편과 오른편에 표시한 화살표와 같이 낮은 T\*에서는 기준 사이클의 COP가 상대적으로 높고, 높은 T\*에서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노입자 적용 사이클의 COP가 높은 것으로 나타나고 있다. 이러한 경향은 T\*가 1.25(기준 사이클 3000rpm) ~1.30(기준 사이클 4000rpm) 사이에서 기준 사이클과 나노입자 적용 사이클의 COP가 차이가 있음을 알 수 있다.

명확한 특성을 분석하기 위해, Fig. 7에서 T\*가 1.2 ~1.3 까지의 구간을 확대한 Fig. 9에서와 같이 실선은

Table 2. COP evaluation between the base cycle and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cycle

농도 (%)	T* (Tcond,avg/Teva,avg)	Base COP	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> COP	증가율 (%)
0.05	1.2741	2.559	2.805	15.4
0.1	1.2698	2.659	3.004	9.4
0.2	1.2594	2.939	3.214	13.0
0.5	1.2740	2.562	2.955	9.6

기준 사이클 COP의 추세선을, 점선은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.05%에서의 COP 추세선으로 나타내었다. 1.25의 T\* 보다 높

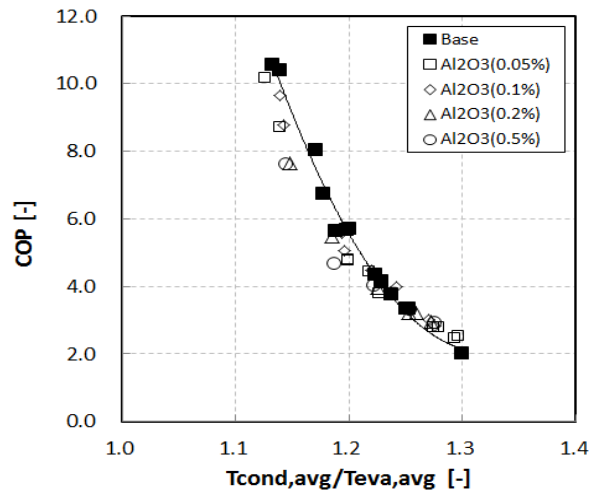


Fig. 7. COP characteristics between the base and the cycle with  $Al_2O_3$

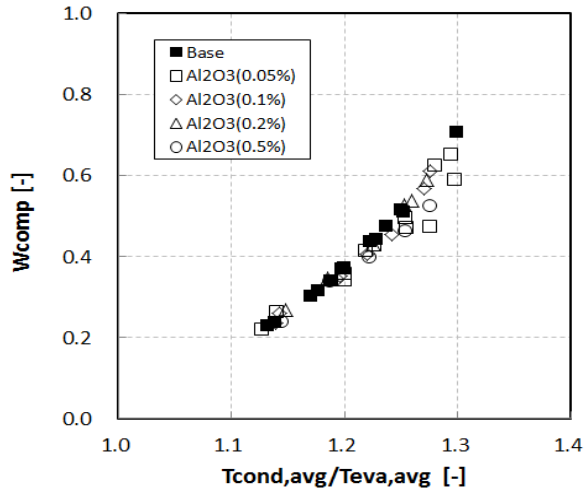


Fig. 8.  $W_{comp}$  characteristics between the base and the cycle with  $Al_2O_3$

은 값에서 농도에 상관없이  $Al_2O_3$  나노입자 사이클의 COP가 더 크다는 사실을 명확하게 확인할 수 있다.

COP 증가의 정량적인 분석을 위하여, Fig. 9에 표시한 기준 사이클의 추세선으로부터 각 농도별  $T^*$ 의 3000rpm에서의 값에 해당하는 기준 base COP를 계산하고 이를 농도별 COP와 비교하여 Table. 2에 나타내었다. 0.05% 농도에서는 기준 사이클에 비하여 15.4%가 증가하였고, 0.1%, 0.2% 및 0.5%에서는 각각 9.4%, 13% 및 9.6%가 증가함을 알 수 있었다.

나노입자를 적용한 전동식 압축기를 적용한 냉동사이클의 COP 증가는 고 rpm이라고 할 수 있는 기준 조건인 3000rpm 이상에서 오일의 사이클 내부 순환

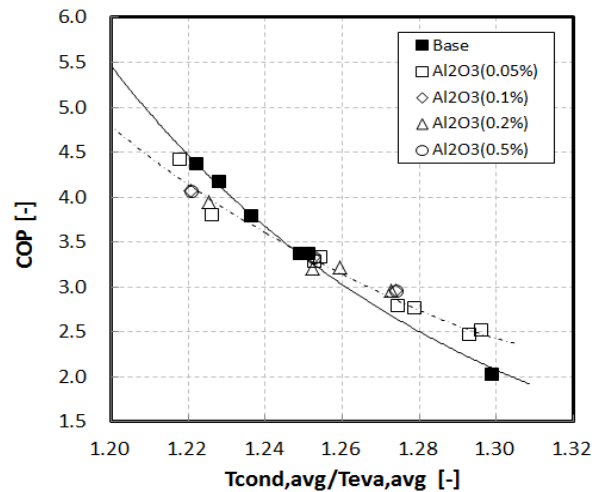


Fig. 9. COP characteristics enlarged for 1.20 to 1.30 of  $T^*$  ( $T^* \approx 1.25$  for 3000rpm in base cycle) 량이 증가하게 되고, 따라서 오일과 같이 사이클 내부를 유동하게 되는 나노입자에 의한 열교환기(특히, 증발기)에서의 열전달량 증가의 효과인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 나노입자를 적용한 열교환기의 열전달 특성을 정리한 논문<sup>6)</sup>에서 결과와 일치한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는  $Al_2O_3$  나노입자의 농도별로 전동식 압축기의 회전속도(rpm)의 변화에 따른 자동차용 증기압축 냉동사이클의 성능 평가를 실험적으로 수행하였다.

실제 자동차에서 쓰는 부품을 그대로 이용하고 항온항습 챔버를 이용하지 않는 방식으로 장치를 설계 및 제작하였다.

압축기 제어장치를 통하여 1000rpm부터 500rpm을 늘려가며 4000rpm까지와  $Al_2O_3$  나노입자를 질량비 기준으로 농도 0.05%, 0.1%, 0.2%와 0.5%를 선정하여 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 기준 사이클과 비교하면 기준 사이클의 일반적인 운전조건인 약 3000rpm에서  $Al_2O_3$  나노유체를 적용하는 사이클의 COP는 질량 농도비 0.05%에서는 15.4% 정도, 농도비 0.1%, 0.2% 및 0.5%에서는 각각 9.4%, 13% 및 9.6%가 증가함을 알 수 있었다.
- (2) 평균 응축온도와 평균 증발온도의 비가 증가할 때 모든 rpm별, 농도별로 COP는 감소하고  $W_{comp}$

- 이 증가하는 경향을 나타내었다.
- (3) 각 실험결과를 rpm 별, 농도별로 T\*를 이용하여 T\*와 COP와 압축기 소요동력의 관계를 나타내면, 일반적인 증기압축 냉동사이클의 성능을 표현하는 방법과 거의 동일한 운전특성과 경향성을 가짐을 알 수 있었다.

frigerants and Lubricating Oils in Refrigeration Systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 310-323, (2011).

## 후 기

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

## References

1. Yoon, J. and Hiroyuki, H., Air Conditioning System for Hybrid Vehicle, SAREK Journal, Vol. 83, pp. 50-53, (2008).
2. Hong, S.Y., Han, M.S., and Park, S.J., Research of 2.5KW Electric Scroll Compressor Using PMSM, Proceedings of Power Electronics Annual Conference, pp. 600-603, (2012).
3. Lee, M.Y., Cho, C.W., Lee, H.S., Lim, T.K., Jeon, H.B., and Won, J.P., Performance Characteristics of the Roof Mounted Electrical Air Conditioning System using Scroll Compressor, Proceedings of KSME Annual Fall Conference, pp. 1630-1635, (2011).
4. Lee, K.S., Lee, K.A., Lee, H.Y., Lee, Y.S., and Kim, J., Experimental Study on the Performance of Refrigeration Cycle for various RPM of Inverter Scroll Compressor, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 34, No. 3, pp. 42-48, (2014).
5. Lee, K.S., Lee, K.A., Lee, J.S., Lee, H.Y., Park, S.J., Lee, Y.S., Kim, S., Jang, S.P., and Kim, J., Experimental Study on Dispersion and Thermal Properties of Nanofluids based on POE Oil, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 3, pp. 170-177, (2012).
6. Saidur, R., Kazi, S.N., Hossain, M.S., Rahman, M.M., and Mohammed, H.A., A Review on the Performance of Nanoparticles Suspended with Re-