

휴대용 냉동기 적용을 위한 소형 냉동컴프레서 개발 및 기본 성능에 관한 연구

장 준 영[†], 김 영 준, 남 연 우
영신기전공업(주)

Development of a Compact Refrigeration Compressor and the Study of Basic Performance for Portable Refrigerator

Jun Young Jang[†], Young Jun Kim, Yeon Woo Nam

Young Shin Component Co., LTD., 29-210, Bonli-li, Nongong-eub, Dalsung-gun, Daegu 711-855, Korea

(Received December 16, 2011; revision received February 8, 2012)

ABSTRACT: This paper discusses the applicability of a compact rolling piston refrigeration compressor to portable refrigerators. The capacity of this compressor is 1 cc. Using a 12 V BLDC motor, the compressor is driven from 2500 rpm to 6000 rpm. The height of the compression module and motor is approximately 56 mm, and their weight is approximately 374 g. We confirmed the effective operation of the compressor components by evaluating their compression and cooling performance.

Key words: Portable(휴대용), Refrigerator(냉동기), Rolling piston(롤링피스톤), Refrigeration(냉동), Compressor(컴프레서), BLDC motor(BLDC 모터)

1. 서 론

현대사회는 생활환경에서의 점차 편리하고 안락함을 추구하고 있으며 이에 따라 생활에 쾌적한 냉난방 시스템과 각종 냉동기를 널리 보급시켰다. 지금까지의 냉난방 시스템과 냉동기가 가정용이나 상업용 등으로 사용되면서 고정되어 한정된 공간이나 실내와 같은 장소에서는 편리하게 사용되고 있으며 이를 벗어난 실외나 야외에서의 적용은 어려운 면이 있어 휴대용이나 이동이 가능한 냉동기의 요구가 이어지고 있다.

냉동시스템에는 여러 가지 방법이 있으나 휴대용 냉동시스템에 적합한 방법은 크게 두 가지 방법으로

열전소자 냉각방법과 증기압축식 냉동방법이 알려져 있다. 열전소자 냉각방법은 전자냉각 방식으로 펠티어 효과를 이용하여 냉각시키는 기술로써 컴프레서 방식과 비교하여 냉매순환을 위한 구동부분이 없어 진동이 거의 없고 소음도 작으며 냉동시스템에 필요한 많은 설비가 없어 소형화와 휴대용방식으로 적용하는데 있어 장점으로 작용하며 고정밀급의 냉각 제어도 가능하다.⁽¹⁾ 하지만 열전소자의 경우 냉각과 동시에 발열이 일어나므로 방출되는 열량에 따라 냉각면의 효율이 결정되는 구조로 되어 있어 외부온도(특히 주위온도가 높거나 여름철)가 높으면 방출할 수 있는 열기에 한계가 있어 냉각이 어려워지고 냉각효율이 낮은 단점을 가지고 있다.

이에 반해 냉매를 압축하여 증발의 원리를 이용한 방식인 냉매압축 냉동시스템은 열효율(에너지효율)이 높고 에너지 소비가 적어 냉장고를 비롯하여 에어컨 등 각종 냉동·냉각시스템에 널리 이용되고

[†] Corresponding author

Tel.: +82-53-614-8841; fax: +82-53-614-8842

E-mail address: jjy@kmu.ac.kr

있으나 휴대용 냉동시스템에 적용하기에는 냉동시스템 전체의 무게나 부피측면에서 한계가 있다.

휴대용이나 이동이 가능한 냉동시스템이 적용되기 위해서는 소형 및 경량의 냉동시스템이 개발되어야 하며 그중 가장 먼저 해결되어야 할 부분이 컴프레서이다. 컴프레서는 냉동사이클 에너지 소비의 대부분을 차지하고 기계적 메커니즘과 전기적 메커니즘이 복합작용하고 있어 소형화에 어려움이 많다. 현재 상용화되고 있는 소용량 컴프레서들도 부피가 크고(1500 cm³ 이상) 무게가 무거워(5 kg 이상) 휴대용 냉동시스템 적용에 무리가 있다.

컴프레서의 단순한 크기 축소만으로는 컴프레서의 소형화는 이루어지지 않으며 내부 구성품의 조합과 적정 구동모터의 적용, 부품가공정도(clearance)에 따라 컴프레서의 성능이 좌우된다. 가정용이나 상업용 컴프레서에 적용된 AC 모터는 효율이 낮고 크기와 중량에서 좋지 못하다. 특히 휴대용에 주로 사용되는 배터리는 용량에 한계가 있기 때문에 컴프레서의 고효율화는 핵심과제이다.^(2,3)

휴대용에 적용하기 위한 컴프레서는 구동모터가 배터리나 차량전원 등의 DC 전원으로 작동되어야 한다. AC 모터를 사용할 경우에는 인버터와 같은 변환장치를 사용하여야 하기에 효율이 떨어진다. 본 연구에서는 휴대용 냉동시스템에 적용을 목표로 소형 냉동컴프레서를 설계·제작하여 압축성과 냉동 성능을 확인함으로써 휴대용 냉동시스템으로의 적용가능성을 확인하고자 한다.

2. 소형 냉동컴프레서 설계 및 제작

본 연구의 소형 컴프레서 압축방식은 롤링피스톤 방식으로 설계하였다. 롤링피스톤 방식은 가정용의 에어컨에 주로 적용되는 방식이며⁽⁴⁾ 구조가 간단하여 소형에 적합하다.

본 연구에서의 롤링피스톤 컴프레서는 압축메커니즘을 발생하는 압축부, 구동동력을 생성하는 모터부, 그리고 케이스인 shell부로 구성된다. 압축부의 형상과 구조는 현재 상용화되어지고 있는 에어컨용 컴프레서의 구조와 기존 발표된 관련 연구자료들^(5,6)을 토대로 하여 개발사양에 적합하도록 구성품 전체의 형태와 크기, 사양을 변경하여 적용하였다. 또한 컴프레서 구조가 소형화 및 경량화 됨에 따라 쉽게 발생하는 진동과 소음을 우선 고려대상으로 설계에 반영하였다.

Table 1 Compressor specification

| | |
|-------------------------|---------------|
| Compressor displacement | 1 cc/rev |
| Cylinder height | 11.4 mm |
| Cylinder inner diameter | 23.5 mm |
| Roller outer diameter | 20.9 mm |
| Motor | Brushless DC |
| Rated voltage | 12 Vdc |
| Voltage range | 8~18 V |
| Max current | 12 A(12 Vdc) |
| Max torque | 0.041 kg · m |
| Compressor Speed | 2500~6000 RPM |
| Compressor diameter | 79 mm |
| Compressor height | 85 mm |
| Suction port size | PT 1/4 |
| Discharge port size | PT 1/8 |
| Refrigerant | R-134a |
| Oil type | POE 68H |
| Oil quantity | 35 g |

Table 1에 설계된 소형 롤링피스톤 컴프레서의 사양을 나타내었다. 압축부의 용량 및 형상은 실린더 높이와 내경, 롤러의 외경에 의해 결정된다.

본 소형 컴프레서의 용량은 1 cc이며 압축부 구동원으로 BLDC 모터를 적용하였다. BLDC 모터의 장점은 DC 전원으로 구동된다는 점도 있지만 컴프레서 회전속도를 변화함으로써 냉동용량을 변화시킬 수 있다는 것이 AC 모터타입의 컴프레서와 가장 큰 차이점이다. 롤링피스톤 컴프레서에서는 회전자가 고정자 내측에 편심축과 결합되어진 내전형으로 설계되어 있다. 마그네틱은 로터 중심부에 위치하며 링타입(ring-type)의 형상으로 극수는 10극이며 마그네틱의 재질은 Nd-bonded 자석으로 제작되었다.

BLDC 모터 제어기는 롤링피스톤 컴프레서의 소형화와 냉동오일과 냉매로 인한 센스의 오염 때문에 센스리스 방식으로 설계되어 있으며 가변저항을 통해 회전수 조절이 가능하다.

모터부에는 BLDC 모터에 3상의 전기적 신호를 연결하는 컨넥터와 전선이 내장되어 있으며 편심축과 롤러의 회전에 의한 진동발생을 저감하기 위해 무게추(balance weight)를 설치하였다. 무게추는 황동판을 이용하여 두께(1.6, 2, 3 mm)를 달리 하여 제작하여 진동의 영향이 작은 2 mm를 설치하였다.

케이스인 shell은 초기개발 단계이고 압축부와 모

터부의 조립을 편리하게 하기 위해 스틸재질을 사용하여 볼트로 체결되는 반밀폐형타입으로 설계되었으며 상중하부의 3단의 파트로 분리된다.

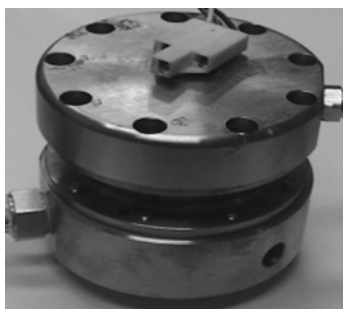
shell에는 전기적 신호를 공급받는 단자핀, 흡입관, 토출관이 부착되어 있다. 단자핀은 케이스와 절연될 수 있는 글라스 대 금속봉인(Glass to metal sealing)으로 만들어진 시중품을 구매하여 용접하여 사용하였으며 흡입구와 토출구는 피팅 커넥터를 적용하여 배관을 쉽게 결합할 수 있도록 하였다. shell 내부는 압축된 냉매가스로 가득 채워지는 고압 shell 방식이다. 그리고 냉동시스템을 거쳐 다시 흡입되는 냉매가스는 바로 실린더 내부로 유입되므로 차가운 냉매가스가 온도의 변화를 받지 않으므로 체적효율의 감소없이 적용할 수 있는 구조로 설계되어 있다. 그러나 고압 shell 방식으로 인해 shell 내부의 모터와 냉동컴프레서 전체에 방열에는 불리한 점이 있다.

압축된 냉매가스의 누설에 대비하여 사용최고압인 22 bar에서의 누설시험과 사용최고압의 1.5배인 33bar에서의 내압시험을 거쳐 사용하였다.

Fig. 1(a)는 소형 롤링피스톤 컴프레서의 압축부와 모터부를 결합한 모습으로 높이가 약 56 mm이며 무게는 약 374 g으로 경량화되어 있다. Fig. 1(b)



(a) Compressing and motor module



(b) Shell

Fig. 1 Compact refrigeration compressor.

는 3단 shell을 결합한 모습으로 시험용으로 제작된 shell부는 스틸소재로 제작되어 무겁지만 프레스판금 또는 경량화소재로 만든다면 충분히 경량화된 컴프레서를 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 시험장치 및 방법

3.1 압축성능시험

모터부와 압축부를 shell에 장착하여 롤링피스톤 컴프레서를 구동시켰을때 압축성능을 확인하고자 토출구에 압력센서를 장착하여 컴프레서 회전속도를 3000, 4500, 6000 rpm으로 회전하면서 토출압력을 25 bar까지 압축을 시키면서 압력상승속도와 압력별 소비전류를 확인하였다.

압력상승속도는 압축부의 베인과 베인슬롯, 실린더와 롤러간의 공차가 작을수록 압력상승속도가 빨라지며 또한 컴프레서의 소비전력과 표면 마모마찰에 영향을 끼치므로⁽⁷⁾ 본 연구에서는 각 부분의 간극을 5 μm이내로 설계하였으며 이를 만족하는 구성품을 대상으로 시험에 적용하였다.

Fig. 2는 압축성능 시험장치도를 나타낸 것이다. 시험장치로는 압력센서(sensys, 압전형타입)와 데이터 측정장치(Data Acquisition system), 전원공급기(DAP-3010)를 사용하였다. 데이터 측정장치는 하드웨어와 소프트웨어로 구성되며 하드웨어는 NI사(National Instrument Co., USA)의 SCXI-1000을 사용하였으며 소프트웨어는 NI사의 LabVIEW프로그램을 사용하였다. 데이터 측정장치는 압력센서의 출력 전압신호와 전원공급기에서 공급되는 전류의 출력신호를 2 Hz의 속도로 저장한다. 시험에 대한 정확도를 높이기 위해 반복시험을 거쳐 결과를 나타내었다.

토출되는 압력의 맥동영향을 줄이기 위해 컴프레

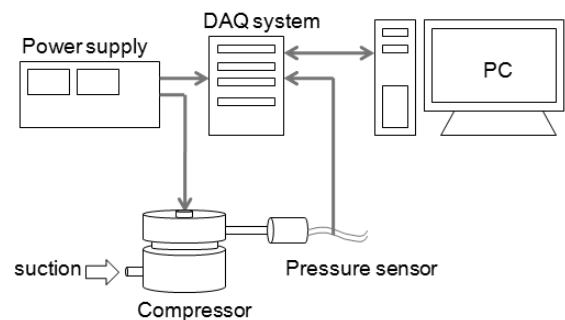


Fig. 2 Schematic diagram of compressing test.

서 토출구와 압력센서사이의 설치된 배관이 reservoir 역할을 하여 데이터에 영향을 미칠 맥동은 발생하지 않았다.

컴프레서는 일정시간 가동후 안정화 상태를 거친 후 진행하였으며 시험 후에는 적량의 오일을 주입하고 교체하였다. 작동매체는 대기중의 공기(대기상태의 압력과 20℃ 기준 편차 ±1℃ 이내 조건)를 사용하였다.

3.2 냉동성능시험

개발된 컴프레서의 냉동성능을 확인하기 위해 컴프레서를 다양한 조건영역에서 운전할 수 있는 시험장치를 통해 응축온도와 증발온도 조건을 변화시키면서 각 부분의 온도와 압력, 전력 등 컴프레서의 성능을 측정하였다.

Fig. 3과 같이 냉동성능 시험장치에는 냉동시스템 사이클 방식으로 적용되어 있다. 컴프레서와 열을 방출하는 응축기, 압력조절을 위한 팽창밸브와 증발기가 설치되어 있다. 응축기는 항온순환수조(CW-05G)의 열원을 공급받아 판형 열교환기를 통해 방열열량을 일정하게 조절한다. 팽창밸브는 니들밸브와 메터링 밸브를 사용하여 미세하게 증발압력을 조절할 수 있다.

알루미늄으로 제작된 증발기에는 간접가열방식의 히팅블럭과 히터를 설치하여 차가운 냉매가 흡열과정을 거친 후 순환되도록 하였으며 과열도를 2~7℃ 범위내로 조절하였다. 컴프레서의 소비전력은 전원공급기를 통해 측정하였으며 컴프레서와 응축기 사이에는 R-134a용 질량유량계가 설치되어 있어 냉매유량을 측정하고 컴프레서 흡입부와 토출부에 압력센서(keller, PA-33X)를 설치하여 응축압력과 증

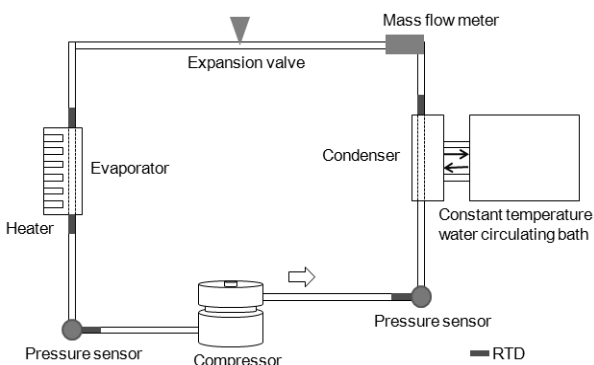


Fig. 3 Schematic diagram of cooling capacity test.

발압력을 측정하였다. 온도센서는 배관내부에 RTD (PT100Ω) 센서를 통해 컴프레서 입·출구, 응축기 출구, 증발기 입·출구에서의 냉매온도를 측정한다. Fig. 3의 냉동시스템에 적용된 전체 연결배관은 외부 영향을 줄이기 위해 발포고무 보온재로 단열처리 하였다.

증발열량은 냉매의 유량측정에 의한 증발열량과 증발기에 설치된 히터의 소비전력량을 비교하여 확인하였다. 컴프레서의 회전속도를 3000 rpm으로 설정하고 응축온도 40℃ 조건(과냉도는 약 5℃ 기준)에서 증발온도 5, 10, 15, 20℃에서 수행하였다.

4. 시험결과

Fig. 4는 컴프레서회전속도에 대한 압축성능 시험 결과이다. 시간변화에 따라 압력상승기울기가 거의 선형으로 나타나고 있으며 이는 압축부와 모터부의 구성품이 정상적으로 작동된다고 판단된다. 비정상적인 상태에서는 실린더 내부의 롤러와 베인간의 내부누설(역류)이 일어날 경우 최고압력에 도달하지 못하거나 압력상승기울기가 낮아지거나 또는 심한 요동(fluctuation)이 일어난다. 또한 압력상승에 따라 모터부에 가해지는 부하도 증가하게 되므로 회전속도나 전류를 변화시킬 수 있어 압력상승기울기가 변하게 된다.

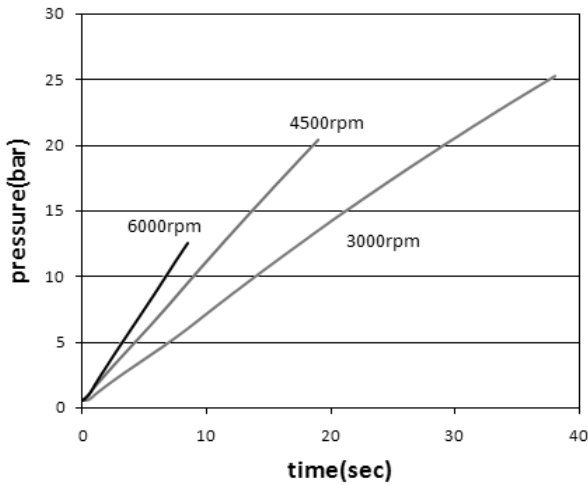
3000 rpm에서는 시험조건인 최대압력 25 bar까지 최고압력이 도달하였으나 4500 rpm과 6000 rpm에서는 압력이 상승함에 따라 공급전류가 모터제어기의 최대설계치인 12 A에 근접하고 이에 안전장치인 모터제어기내의 회로전류차단으로 인해 컴프레서 구동이 정지된다.

Fig. 4(b)에서 압력이 상승함에 따라 전류도 증가함을 볼 수 있다.

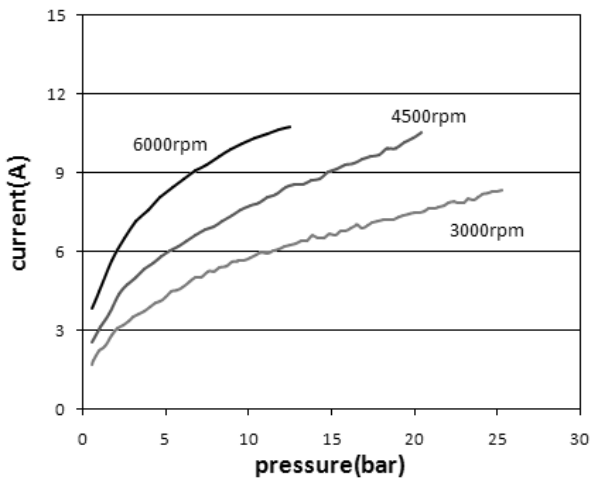
Table 2는 응축온도 40℃, 증발온도 5, 10, 15, 20℃에 대하여 컴프레서의 전력, 증발열량, 히터소비전력과 성능계수(COP)와 체적효율, 이론적인 압축기 일량을 계산하여 나타내었다.

냉매의 질량유량을 통해 계산된 증발열량과 히터의 소비전력은 큰 차이가 없으므로 냉동사이클이 안정적으로 구성되고 있다고 판단된다. Table에는 성능계수(COP)와 체적효율, 이론적인 압축기 일량을 계산하여 나타내었다.

Fig. 5는 Table 2의 데이터로 증발온도와 성능계수(COP), 증발열량, 컴프레서 소비전력, 압축기 효율, 체적효율과의 관계를 나타낸 것이다. 증발온도에 따



(a) Pressure vs. time



(b) Current vs. pressure

Fig. 4 Compressing performance.

라 그래프의 왼쪽 축은 증발열량과 컴프레서 소비전력을 나타내었으며 오른쪽 축은 성능계수(COP), 압축기 효율, 체적효율을 나타내었다.

증발온도 증가에 따라 증발열량이 선형적으로 증가하고 있으며 컴프레서 전력은 거의 변화가 없음을 볼 수 있다. 이에 따라 COP는 증가하고 있다. 또한 체적효율이 증가하고 있다.

컴프레서 소비전력과 증발열량을 열전소자의 효율과 비교할 경우, 높은 효율을 얻음으로써 컴프레서의 내구성과 신뢰성을 확보한다면 휴대용 냉동기로 충분히 적용가능하다고 판단된다.

5. 결 론

휴대용 냉동시스템에 적용을 목표로 소형 냉동컴

Table 2 Cooling performance data

| Case | #1 | #2 | #3 | #4 |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Evaporating temp.($^{\circ}\text{C}$) | 4.75 | 10.29 | 14.63 | 19.89 |
| Evaporator outlet temp.($^{\circ}\text{C}$) | 12 | 16.4 | 19.6 | 22.6 |
| Condensing temp.($^{\circ}\text{C}$) | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Condenser outlet temp.($^{\circ}\text{C}$) | 36.6 | 36.7 | 36.8 | 36.7 |
| Mass flow(g/s) | 0.706 | 0.832 | 1.031 | 1.185 |
| Compressor power(W) | 48.5 | 49.4 | 45.2 | 47.4 |
| Cooling capacity(W) | 110.6 | 132.1 | 165 | 190.6 |
| Heater(W) | 112.4 | 135.5 | 171.1 | 198 |
| COP | 2.28 | 2.67 | 3.65 | 4.02 |
| Volumetric efficiency(%) | 65 | 67 | 75 | 79 |
| Theoretical work of ompressor(W) | 16.4 | 15.8 | 16.4 | 14.4 |

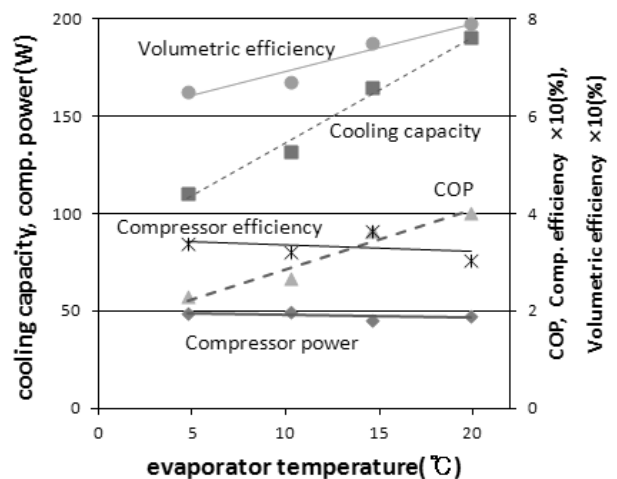


Fig. 5 Compressor performance.

프레서를 설계·제작하여 압축성능과 냉동성능을 확인함으로써 휴대용 냉동시스템으로의 적용가능성을 확인하고자 본 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 구조가 간단하여 소형에 적합한 롤링피스톤 방식으로 컴프레서를 설계하고 제작하였다. 용량은 1 cc이며 DC 12 V로 구동된다. BLDC 모터가 내장되어 컴프레서의 회전속도를 2500 rpm부터 6000 rpm까지 변화시킬 수 있다.

(2) 제작된 롤링피스톤 컴프레서의 압축부와 모터부의 무게는 약 374 g으로 shell부를 프레스판금 또는 경량화 소재로 만든다면 더욱더 경량화 될 수 있음을 확인하였다.

(3) 압축성능 시험을 통해 압축부와 모터부의 구성품이 정상적으로 작동됨을 확인하였고 냉동성능시험을 통해 증발온도 증가에 따라 증발열량과 COP가 증가됨을 확인하였다. 또한 컴프레서 소비전력과 증발열량을 열전소자의 효율과 비교할 경우, 높은 효율을 얻음으로써 컴프레서의 내구성과 신뢰성을 확보한다면 휴대용 냉동기로 충분히 적용가능하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 중소기업청 ‘중소기업기술개발사업’으로 수행되었습니다. 냉동성능시험에 도움을 주신 한국생산기술연구원 전동순연구원과 문지현 연구원께 감사드립니다.

참고문헌

1. Yoo, S. Y., Hong, C. P., and Shim, W. S., 2004, A Study on Performance of Thermoelectric Module and Thermoelectric Cooling System, Korean Journal of Air-Condition and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 62-69.
2. Soh, S. G., Kim, S. K., Lee, S. K., and Park, Y. S., 1998, Rotary compressor using a brushless DC motor, Summer Annual Conference, pp. 1114-1119.
3. Sim, Y. H., Youn, Y., and Park, Y. C., 2005, A Study on Efficiency Enhancement in a Reciprocating Compressor for a Domestic Refrigerator, Korean Journal of Air-Condition and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 418-426.
4. Yang, D. J., Chung, J. T., Park, J. M., and Hwang, S. W., 2001, Effects of the Heat Transfer on the Performance Characteristics of Rolling Piston Type Rotary Compressors for Air Conditioner, Korean Journal of Air-Condition and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 8, pp. 763-770.
5. Chae, H. M., Kim, C. N., and Park, S. K., 2008, A Numerical Analysis with the FSI Mode on the Characteristics of Flow Field and Discharge Valve Motion in a Rotary Compressor, Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 112-120.
6. Ahn, B. H. and Kim, Y. S., 1999, A Study on Noise Reduction of Rotary Compressor, Journal of Korean Society for Power System Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 60-69.
7. Oh, S. D., Cho, S. O., and Lee, Y. Z., 2004, Friction and Wear of the Vane/Roller Surfaces Depending on Several Sliding Condition for Rotary Compressor, Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 20, No. 6, pp. 337-342.