

스크롤 압축기 내부에서의 열전달에 대한 연구

장기태[†] · 정상권^{*}

Investigation on Heat Transfer in Scroll Compressor

Kitae Jang, Sangkwon Jeong

Key Words: Scroll Compressor(스크롤 압축기), Scroll Wrap(스크롤 치형), Convection Heat Transfer(대류 열전달), Conduction Heat Transfer(전도 열전달)

Abstract

In the present study, the compression process in scroll compressor was simulated in consideration of flow leakage and heat transfer. Tangential and radial leakages of the refrigerant between the scrolls were considered as nozzle flow. The experiment was first conducted with a scroll compressor for automobile air conditioning system and R134a as a refrigerant. Temperature and pressure were measured at the suction and discharge ports of the compressor to determine the thermodynamic states of the refrigerant flow. Temperature distribution of the scroll with the involute angle was also measured by thermocouples that were installed inside the scroll. Measured temperature distribution was compared with the numerical results. From this result, the thermal effect of mechanical contact was found to be important in heat transfer of the compression process.

기호설명

A : 유동면적 [m^2]

C_d : 유량계수

D_h : 수력직경(=4A/p) [m]

d : 스크롤 사이의 거리 [m]

H : 스크롤 치형의 높이 [m]

h : 비엔탈피 [J/kg]

k : 열전도계수 [W/mK]

m : 질량 [kg]

Nu : Nusselt 수

P : 압력 [Pa]

p : 접수길이 [m]

Pr : Prandtl 수

Q : 전열량 [J]

Re : Reynolds 수

T : 온도 [K]

t : 시간 [s]

V : 체적 [m^3]

v : 비체적 [m^3/kg]

그리스 문자

α : 열확산계수 [m^2/s]

ε : 회전 스크롤의 회전반경 [m]

ρ : 밀도 [kg/m^3]

1. 서론

스크롤 압축기는 냉매의 연속적인 압축과정으로 인한 높은 효율과 저진동, 저소음 등의 장점을 지니고 있어서 많은 분야에서 사용되고 있

[†] KAIST 기계공학과 대학원

E-mail : kitaejang@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3079 FAX : (02)869-8207

* KAIST 기계공학과

다.⁽¹⁾ 특히 스크롤 압축기는 용량 제어 특성이 다른 압축기에 비해서 뛰어나기 때문에, 부하의 변동이 심한 자동차에서도 효율적으로 사용될 수가 있다.⁽²⁾ 최근에는 냉방장치의 수요가 급증하고 있는 추세이기 때문에, 에너지 절약에 대한 필요성이 증가하고 있다. 이를 위해서는 냉방장치 소요 동력의 대부분을 차지하는 압축기의 고효율화가 이루어져야 한다. 또한 오존층 보호와 지구 온난화 방지를 위한 대체냉매의 개발에 많은 관심이 집중되고 있는데, 이를 위해서는 압축기에 대한 적합성의 여부가 고려되어야 한다. 이러한 압축기의 성능향상과 대체냉매와의 적합성을 고려하기 위해서는 압축기 내부에서의 냉매 압축과정에 대한 정확한 이해가 필요하다.^(3,4) 특히 냉방능력의 조절이 필요한 패키지형이나 자동차용 냉방장치에서의 압축기는 넓은 범위의 회전수에 사용된다. 따라서 회전수의 변화가 냉매 압축과정에 미치는 영향에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.⁽⁵⁾ Lee는 중심부가 PMP(Perfect Meshing Profile) 스크롤 형상으로 이루어진 자동차용 스크롤 압축기에 대하여 시뮬레이션에 의한 성능해석을 하였다.⁽²⁾ 이 연구에서는 누설을 노즐 유동으로 가정하여 계산하였으며, 냉매인 R134a의 실제 상태식을 이용하였다. 또한 토출밸브의 거동을 고려하였지만, 냉매와 스크롤간의 열전달 현상은 고려하지 않았다. Sunder는 누설과 열전달을 고려하여 냉매의 열역학적 압축과정을 계산하였다. 이 연구에서는 냉매와 스크롤간의 대류 열전달 뿐만 아니라 스크롤 상호간의 접촉 열전달도 고려하였으며, 실험을 통하여 이 열전달의 존재를 또한 확인하였다.⁽⁶⁾ Kang은 반경방향의 누설에 대하여 준 1차원 가정을 하여 계산하였고, 냉매와 스크롤간의 열전달에 대한 고려에서는 덕트의 곡률을 고려한 열전달계수를 사용하였다. 다만 이 연구에서 스크롤의 온도 분포는 균일하다고 가정하였다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 자동차용 스크롤 압축기를 연구 대상으로 하여 냉매의 압축과정에 대한 해석을 시도하였다. 본 해석 과정에서는 냉매의 누설 및 냉매와 스크롤 사이의 열전달 현상을 모사하였으며, 이를 위하여 압축기의 회전수를 변화시키면서 실험을 수행하였고, 실험 결과와 계산 결과를 비교하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 전체 실험 장치

Fig. 1은 스크롤 압축기 실험을 위한 전체 실험 장치에 대한 개략도이다. 압축기는 자동차용 공조 기기에 사용되는 것으로서 130 cc급 용량의 스크롤 압축기이다.(Mitsubishi, Model : MSC 130 CV). 압축기에 사용되어지는 오일은 PAG계 냉동기유(SUN PAG 56)이며, 냉매는 R134a를 사용하였다. 응축기는 동심 역류형 열교환기로서 냉매의 냉각을 위하여 냉각수를 사용하였으며, 냉각수 유량의 측정과 조절을 위하여 응축기 입구에는 유량계를 설치하였다. 팽창 밸브는 개도의 미세 조절이 가능한 미터링 밸브를 사용하였고, 증발기로서는 팬이 장착된 공랭식의 열교환기를 사용하였다.

Fig. 1에서 표시된 네 지점의 위치에는 각각 압력센서와 온도센서를 설치하여 주파수의 변화에 따른 사이클의 변화를 확인하였다. 특히 1과 2 위치의 센서들은 압축기의 입구와 출구에 설치하여 이들 측정값들이 압축기의 냉매 압축과정 계산에서 입력값으로 사용되어질 수 있도록 하였다.

2.2 고정 스크롤

본 연구에서는 고정 스크롤의 치형에 온도센서들을 설치하여 운전 중인 압축기 내부의 스크롤 치형에서의 온도 분포를 실시간으로 측정하였다. 설치된 온도센서들은 19 개의 열전대(K-type)들로서, 이들은 고정 스크롤의 원판(스크롤 베이스)으로부터 뚫린 구멍으로 삽입되어 스크롤 치형 높이의 중간이 되는 지점에 설치되었다. 이들 열전

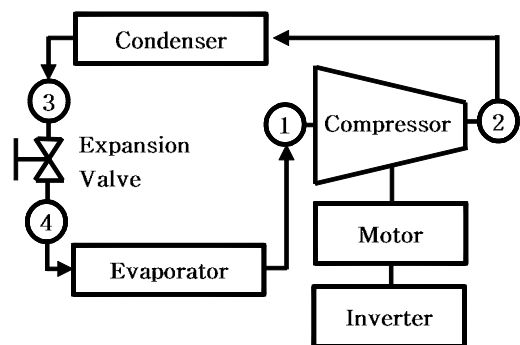


Fig. 1 Schematic diagram of the overall apparatus

대들을 고정시키기 위하여 구멍에는 인듐을 삽입한 후 가열하여 밀봉을 하였다.⁽⁷⁾ Fig. 2는 설치된 온도센서들의 위치를 나타내고 있다.

2.3 실험 방법

고정 스크롤에 열전대들을 설치한 후 고정 스크롤을 압축기 내부에 설치, 조립하였다. 인버터의 주파수는 응축기에서의 냉각수 유량과 팽창밸브의 개도를 일정한 상태로 고정시킨 상태에서 20, 30, 40, 50, 60 Hz로 조절하여 실험을 수행하였다. 본 실험에서 압축기의 구동을 위하여 사용한 모터는 4극 모터로서, 인버터의 설정 주파수의 반에 해당되는 회전수로서 작동된다. 시스템에서의 온도와 압력 측정치, 그리고 고정 스크롤에서의 온도 분포에 대한 값들은 압축기를 구동한 이후 시스템의 네 지점에서의 온도가 시간에 따라 변함이 없는 정상 상태에 도달하는 것을 확인한 후에 측정하였다.

3. 실험결과

실험을 통하여 주파수가 증가할수록 압축기의 토출압력은 증가하며 흡입압력은 감소한다는 사실을 알 수가 있었다. 이는 회전수의 증가에 따라서 냉매의 유량이 증가하여 시스템에서의 고압과 저압의 차이가 증가하기 때문이다. 또한 회전수의 증가에 따라서 토출온도는 흡입온도에 비하여 더욱 크게 증가하였다.

Fig. 3은 고정 스크롤의 온도 분포에 대한 측정

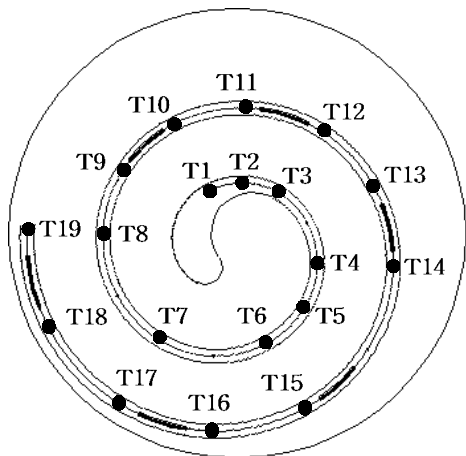


Fig. 2 Installation of the thermocouples on the fixed scroll

결과이다. Fig. 3에서 횡축에 나타낸 각도는 스크롤 치형에 대한 인벌류트 각도로서, 크기가 커질수록 바깥쪽 치형의 위치를 나타낸다. Fig. 3으로부터 고정 스크롤 치형에서의 온도는 회전수가 증가할수록 전반적으로 증가하며, 그 기울기도 더욱 증가한다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 냉매의 토출온도의 증가량이 흡입온도의 증가량보다 더욱 크기 때문이다.⁽⁷⁾ 측정된 온도 분포는 다음의 시뮬레이션 결과와 비교하기 위하여 사용되어졌다.

4. 시뮬레이션

4.1 질량유량

흡입과정 중의 냉매의 흡입, 압축 후의 토출과정, 그리고 누설에 대한 질량유량은 모두 노즐 유동으로 가정하여 다음의 식으로부터 구하였다.

$$\frac{dm}{dt} = C_d \rho_{so} A \sqrt{2(h_u - h_{so})} \quad (1)$$

여기서 하첨자 so 는 노즐 상류에서의 엔트로피와 노즐 하류에서의 압력으로부터 구해는 값들을 나타내며, 본 계산에서는 이상적인 노즐 유동이라고 가정하여 C_d 의 값을 1.0으로 설정하였다.

4.2 온도변화율

스크롤 사이에 형성되는 밀폐체적 내부에서의

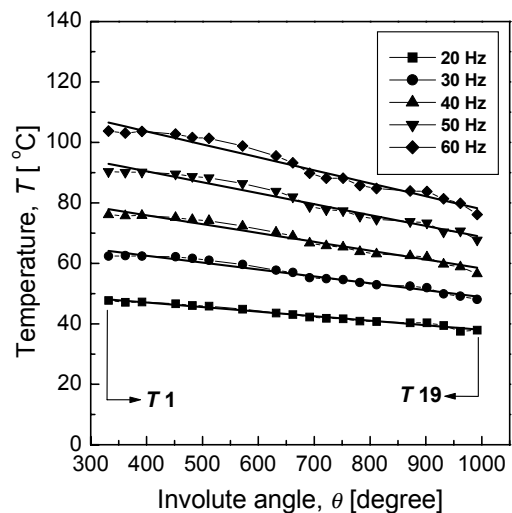


Fig. 3 Temperature distribution in the fixed scroll wrap

냉매의 온도는 균일하다고 가정하였고, 냉매의 온도변화율은 에너지 방정식으로부터 다음과 같이 구하였다.

$$\frac{dT}{dt} = \left\{ \frac{dQ}{dt} + \sum (h_i - h) \frac{dm_i}{dt} - \left(\frac{dV}{dt} - v \frac{dm}{dt} \right) \left[\left(\frac{\partial h}{\partial v} \right)_T - v \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T \right] \right\} / \left\{ m \left[\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_v - v \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \right] \right\} \quad (2)$$

4.3 스크롤 치형의 분할

냉매와 스크롤 치형 요소들간의 열전달을 고려하기 위하여, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 고정 스크롤과 회전 스크롤을 각각 30°의 인벌류트 각도를 갖는 26개의 요소로 분할하였다. 본 연구에서는 이들 요소들 내부에서의 온도 분포는 균일하다고 가정하였다.

4.4 열전달계수

냉매와 스크롤 치형간의 열전달계수는 일반적으로 잘 알려진 다음의 Dittus-Boelter 식을 사용하였다.

$$Nu_{D_h} = 0.023 Re_{D_h}^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

여기서 D_h 는 수력직경으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

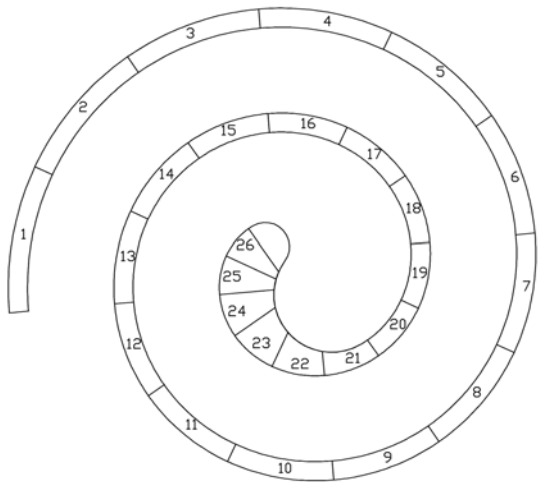


Fig. 4 Differentiated scroll wrap segments

$$D_h = \frac{4A}{p} = \frac{2Hd}{H+d} \quad (4)$$

여기서 d 는 고정 스크롤 치형 요소와 회전 스크롤 치형 요소간의 거리이다.

4.5 계산과정

냉매가 흡입되어서 토출되기까지의 과정에서 냉매의 상태량 변화는 냉매의 질량변화율, 온도 변화율, 밀폐체적의 값들로부터 구하였다. 편미분 방정식의 계산에는 4 계 Runge-Kutta 방법을 사용하였고, R134a의 상태량은 Wilson and Basun⁽⁸⁾의 식들로부터 구하였다. 계산의 수렴조건은, 토출 후 압축기 내부의 토출실 공간으로 유입되는 냉매의 온도와 고정 스크롤과 회전 스크롤의에서 각 요소들의 온도들이 모두 이전 사이클에서의 온도들과 주어진 온도차 범위 내에서 동일해지는 조건으로 설정하였다.

5. 계산결과 및 고찰

누설과 열전달이 냉매의 압축과정에 미치는 영향들을 살펴보기 위하여, 접선 방향 누설, 반경 방향 누설, 냉매와 스크롤 치형 사이의 대류 열전달, 스크롤 치형 내에서 일어나는 치형 요소들 사이의 전도 열전달이 고려된 경우와 고려되지 않은 경우에 대한 계산들을 수행하였다. 누설의 계산에서 접선방향 누설이 통과하는 반경방향 간극과, 반경방향 누설이 통과하는 축방향 간극은 각각 5 μm로서 동일하게 설정하여 계산하였다.

5.1 냉매의 온도변화

Fig. 5는 인버터의 회전수가 40 Hz인 경우에 대하여 회전 스크롤의 회전에 따른 냉매의 온도 변화를 계산한 것이다. 그림에서의 기호는 다음과 같은 가정을 나타낸다.

- [1] : 누설과 열전달이 없는 경우
- [2] : 열전달은 없고, 접선방향 누설만이 존재하는 경우
- [3] : 열전달은 없고, 접선방향 누설과 반경방향 누설이 존재하는 경우
- [4] : 전도 열전달은 없고, 접선방향 누설, 반경방향 누설, 대류 열전달이 존재하는 경우

[5] : 접선방향 누설, 반경방향 누설, 대류 열전달, 전도 열전달이 모두 존재하는 경우

Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 누설과 열전달은 모두 냉매의 온도를 증가시키는 역할을 한다. 여기서 동일한 간극의 누설 중에서, 접선방향 누설보다 반경방향 누설에 의한 냉매 온도의 상승 효과가 더욱 크다는 것을 알 수가 있다. 이는 반경방향 누설에 대한 유동 면적이 접선방향에 대한 유동 면적보다 더욱 크기 때문이다.

5.2 대류 열전달

Fig. 6은 밀폐체적을 둘러싸고 있는 스크롤 치형으로부터 밀폐체적 내부의 냉매로 전달되는 총 전열량을 회전 스크롤의 회전 각도에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 압축과정의 중반부까지는 스크롤 치형으로부터 냉매로 열이 전달되지만 후반부에서는 냉매로부터 스크롤 치형으로 열이 전달되어서 총 전열량이 감소함을 알 수가 있다. 이는 냉매 온도가 압축과정 중 스크롤 치형의 온도보다 높아지기 시작하는 지점이 존재하기 때문이다. 토출되기까지의 전체 압축과정 후에 총 전열량은 양의 값을 가지기 때문에 냉매는 대류 열전달에 의해서 온도가 증가하게 된다.

5.3 전도 열전달

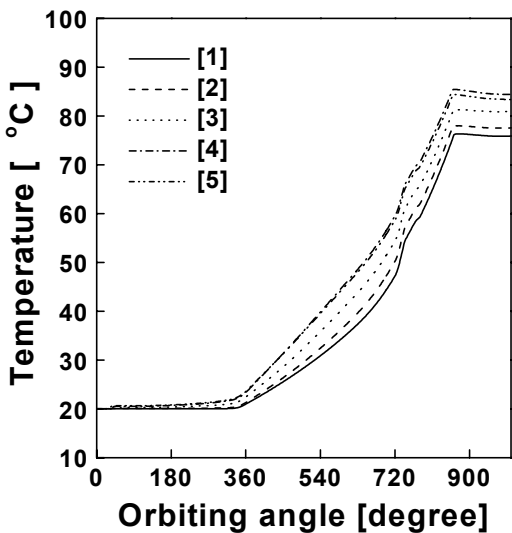


Fig. 5 Temperature of refrigerant with orbiting angle

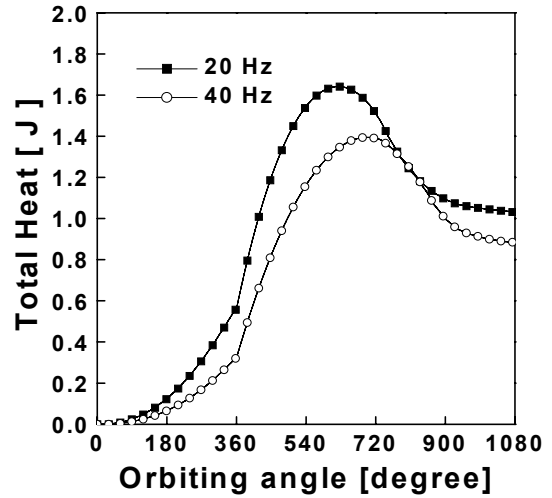


Fig. 6 Total heat transfer from enclosing scroll wrap elements to the refrigerant

Fig. 7은 인버터의 회전수가 20 Hz와 40 Hz일 때, 고정 스크롤의 각 치형 요소들 사이의 전도 열전달률 중 안쪽 치형 요소로부터 전달되는 열전달률의 평균값을 나타낸다. 큰 회전수에 대하여 전도 열전달률이 더욱 크게 나타남을 알 수가 있는데 이는 스크롤 치형에서의 온도 구배가 더욱 크기 때문이다. 또한 일정한 회전수에 대하여, 스크롤 치형의 중반부에서의 전도 열전달률이 다른 부분에서의 값보다도 크게 나타난다. 이는 스크롤 치형 중반부에서의 온도 구배가 다른 부분보다도 더욱 크기 때문이다.

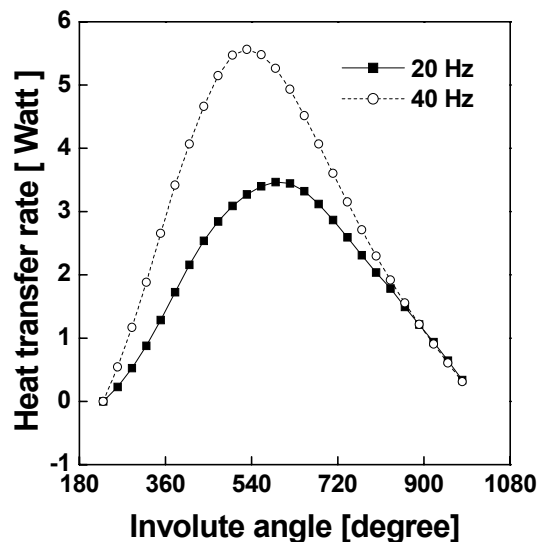


Fig. 7 Conduction heat transfer rate from the inner scroll element

5.4 고정 스크롤 치형에서의 온도 분포

Fig. 8은 인버터의 회전수가 40 Hz일 때, 열전달을 고려한 경우에 계산되는 고정 스크롤 치형에서의 온도 분포와 실험에서 측정된 온도 분포를 비교하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 전도 열전달을 고려한 경우에 전체적인 온도 구배가 감소한다는 사실을 알 수가 있다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 계산된 온도 분포는 측정된 온도 분포와 많은 차이를 나타내고 있다. 측정된 온도가 계산 결과보다도 전반적으로 높게 나타나고 있으며, 측정된 온도 구배는 계산된 결과보다도 작게 나타난다. 계산 결과와 측정 결과가 큰 차이를 보이는 것은 본 연구의 수치 계산에서 고정 스크롤과 회전 스크롤 사이의 접촉 열전달을 고려하지 않았기 때문이다. 따라서 스크롤 내부에서의 냉매 압축과정을 고려할 때 스크롤 사이의 접촉 열전달에 의한 영향이 중요할 것으로 예상되며, 더욱 발전된 모델로써 본 연구를 보완해야 된다고 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 스크롤 압축기 내에서의 냉매 압축과정에 대한 시뮬레이션을 통하여 누설의 영

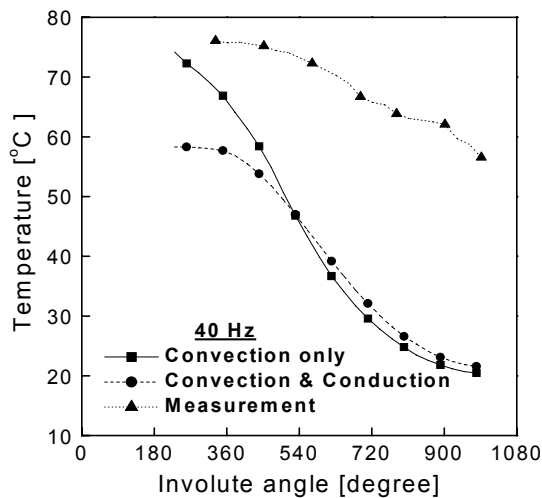


Fig. 8 Temperature distribution in the fixed scroll for the inverter frequency of 40 Hz

향과 열전달의 영향을 확인할 수가 있었다. 또한 실험 결과와의 비교로부터 냉매 압축과정에 대한 시뮬레이션에서 스크롤간의 접촉 열전달이 스크롤 치형의 온도 분포에 중요한 요소가 될 수 있다는 예측을 할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Etemad, S. and Nieter, J., 1989, Design optimization of the scroll compressor, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 12, pp. 146~150.
- (2) Lee, G. H., 1998, Performance analysis and simulation of automobile air conditioning system using scroll compressor, *Ph.D. thesis, Seoul National University, Korea*.
- (3) Caillat, D. L., Ni, S. and Daniels, M., 1988, A computer model for scroll compressors, *Proc. of Compressor Engineering at Purdue*, pp. 47~55.
- (4) Kang, T., 1996, The performance of a scroll compressor considering quasi 1-D leakage modeling and heat transfer effect, *MS thesis, Hanyang University, Korea*.
- (5) Suejufi, K., Shiibayshi, M., Minakata, F. and Tojo, K., 1988, Deformation analysis of scroll members in hermetic scroll compressors for air conditioners, *Compressor Engineering at Purdue*, pp. 583~590.
- (6) Sunder, S., 1996, Thermodynamic and heat transfer modeling of a scroll pump, *Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.*
- (7) Jang, K. and Jeong, S., 2001, Investigation on the Heat Transfer Effect to Compression Process of Scroll Compressor, *Proceedings of the SAREK 2001 Winter Annual Conference*, pp. 726~731.
- (8) Wilson, D. P. and Basu, R. S., 1988, Thermodynamics properties of a new stratospherically safe working fluid-R134a, *ASHRAE Transaction*, Vol. 94, Part 2, pp. 2095~2118.