

# 전동식 Scroll Compressor의 Scroll 열변형 해석

이 형 욱<sup>\*1)</sup> · 김 정 배<sup>1)</sup> · 이 근 안<sup>2)</sup> · 이 종 섭<sup>2)</sup> · 이 영 선<sup>3)</sup>

한국교통대학교 에너지시스템공학과<sup>1)</sup> · 한국생산기술연구원 금형성형연구그룹<sup>2)</sup> · 재료연구소 변형제어연구그룹<sup>3)</sup>

## Coupled Thermal-Stress Analysis of Scrolls in Automotive Scroll Compressor

Hyoung-wook Lee<sup>\*1)</sup> · Jeongbae Kim<sup>1)</sup> · Geun-An Lee<sup>2)</sup> · Jong Sup Lee<sup>2)</sup> · Young-Seon Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro Chungju, Chungbuk, 380-702, Korea

<sup>2)</sup>Molding & Forming Technology R&D Group, KITECH, 7-47 Songdo-dong Yeonsu-Gu, Incheon, 406-840, Korea

<sup>3)</sup>Materials Deformation Group, KIMS, 797 Changwondaero, Seongsan-gu, Changwon, Gyeongnam, 642-831, Korea  
(Received 2012. 03. 23. / Accepted 2012. 04. 30.)

**Abstract** : A scroll compressor used in the air conditioning in automobile consists of the fixed scroll and the orbiting scroll. Temperature gradient in the scroll compressor during the operation induces the thermal expansion of two scrolls. Therefore, the gap between scrolls in the initial stage is regarded as an important variable in structural design of the scroll compressor. The coupled thermal-stress analysis was carried out for the scrolls of a scroll compressor. The temperatures of major points of two scrolls in the steady states were referred by the literature of C. Lin. The sequentially coupled thermal-stress analysis is utilized to the heat transfer analysis and the thermal expansion analysis. In the thermal expansion analysis, the contact analysis was considered between the fixed and the orbiting scrolls in order to obtain the penetration distance and the contact pressure between two scrolls. The range of deformation was from 44 to 76 $\mu\text{m}$  according to the height of the scroll. The maximum penetration distance of 60 $\mu\text{m}$  occurred at the top surface of the fixed scroll in the center of the scroll parts.

**Key words** : Automotive Scroll Compressor(전동식 스크롤 압축기), Coupled Thermal-Stress Analysis(열-응력복합해석), Fixed Scroll(고정 스크롤), Orbiting Scroll(회전 스크롤), Contact Pressure(접촉압력)

### Nomenclature

$\epsilon$  : strain, mm/mm

$\alpha$  : coefficient of thermal expansion, ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )/ $^{\circ}\text{C}$

$\theta$  : temperature,  $^{\circ}\text{C}$

### 1. 서 론

차량에 사용되는 전동식 스크롤 압축기는 냉매가 압축되면서 온도가 상승하는데, 문헌에 따르면 냉매의 온도는 초기 입구부에서 47도에서 최종 출구부에

서 107도의 온도로 상승한다. 이는 스크롤 구조물의 온도구배를 가져오며, 온도구배는 스크롤 구조의 열 팽창을 유발한다. 열 팽창된 스크롤은 스크롤간의 충돌을 유발시키며 이는 형상설계의 중요한 요소가 될 수 있다.

스크롤의 소재를 변경하는 과정에서 열 팽창 치수는 중요한 요인이 된다. 현재 사용되는 Al소재와 향후 적용 예정인 Mg소재는 열 변형 특성 중 대표적으로 열전달계수와 열팽창계수가 다르기 때문에, 스크롤 압축기 구동 중에 열팽창을 고려한 공차량의 변화를 가져올 수 있다. 따라서 스크롤 소재 변경 시 열팽창 해석을 통하여 공차를 검증해야 한다. 우선 Al소재를

\*Corresponding author, E-mail: hwlee@ut.ac.kr

사용하고 있는 스크롤 압축기의 스크롤에 대한 열팽창 공차를 검증할 필요가 있다.

유한요소법을 이용한 열팽창 해석은 Sequentially Coupled Thermal-Stress Analysis로 명명되는 열전달 해석과 열팽창해석을 순차적으로 시행하는 방법이 많이 이용된다. 기존의 해석 사례로는 대만 국립교통대학의 C. Lin 등<sup>1)</sup>이 2005년 연구결과에서 스크롤 압축기에 대하여 스크롤의 부위에 따라 위치별 온도를 측정하고, 이 결과를 이용하여 열전달해석을 수행하였다. 열전달해석에서 얻은 온도분포결과와 스크롤 구동 중 챔버 별 압력을 동시에 부과하여 열팽창 및 변형해석을 수행하여 최대 변형량을 계산하였다.

본 연구에서는 C. Lin의 연구결과 중 스크롤 압축기의 온도측정결과를 본 압축기의 스크롤에 유사하게 적용하여 열 변형해석을 수행한다. 알루미늄 합금에 대하여 열 변형해석을 적용하여 변형을 분석하였다. 고정 스크롤과 회전 스크롤간에 접촉해석 처리를 적용하여 접촉해석이 없는 경우에 변형에 따른 침투량을 계산하였고, 접촉해석을 수행하여 접촉압력 및 최대응력, 접촉부위의 변형정도를 분석하도록 하였다.

## 2. 해석조건

고정 스크롤과 회전 스크롤을 유한요소모델링하기 위하여 Hypermesh를 이용하였다. 이때 홀과 단차부위는 Automesh시 너무 많은 요소를 생성시킬 수 있기 때문에 IGES 모델로부터 HyperMesh 프로그램을 이용하여 Surface를 홀 및 단차부위를 일부 수정하였다. 요소 생성을 위한 기준요소 길이를 3mm로 설정하였고, 4절점 Tetra 요소로 모델링하였다. 고정 스크롤은 12,984개의 절점과 47,724개의 요소, 회전 스크롤은 6,366개의 절점과 22,267개의 요소로 분할하여 총 19,350개의 절점과 69,991개의 요소로 모델링하였다. 모델링 결과를 Fig. 1에 도시하였다.

알루미늄합금과 마그네슘합금소재의 물성치는 [www.matweb.com](http://www.matweb.com)<sup>2)</sup>을 참조하였으며, 이중 알루미늄합금은 6011-T4계열의 소재를 사용하였다. 해석에 사용한 물성치를 Table 1에 정리하였다.

온도경계조건은 C. Lin의 연구결과를 참조하여 본 연구에 사용될 스크롤에 적용하였다. 본 연구에 적용된 경계조건의 위치와 고정 스크롤에서의 위치별 적용온도는 Fig. 2와 같다. 기존 연구와 스크롤의 길이가 다르기 때문에 각도별 위치를 환산하여 온도를 부과하였다.

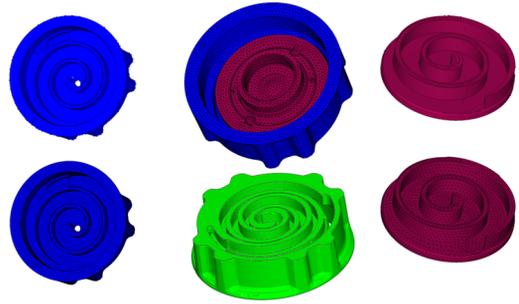


Fig. 1 Finite element modeling results

Table 1 Mechanical and thermal material properties of Aluminum and Magnesium

Material Properties	Al6011T4
Density [kg/mm <sup>3</sup> ]	2.7E-6
Conductivity [W/m K]	154.0
CTE [(μm/m)/°C]	23.6
Specific Heat [J/kg °C]	896.0
Young's Modulus [MPa]	68,900
Poisson's Ratio	0.33

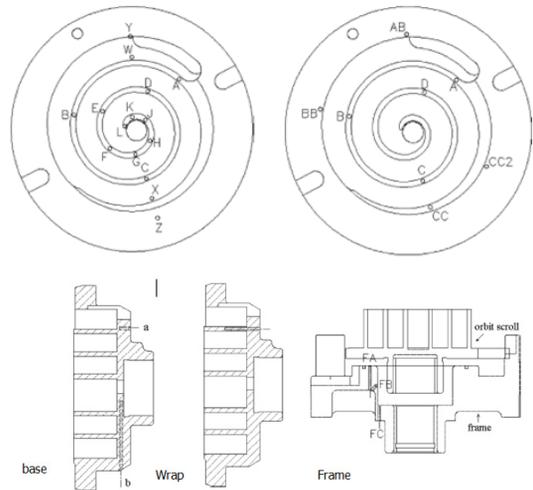


Fig. 2 Temperature measuring points by C. Lin et al. (2005)

냉매 입구부와 출구부는 냉매의 온도를 부과하였고, 스크롤의 베이스부위와 스크롤의 날개부의 높이 1/2되는 지점은 A, B, C, D지점에 추가로 부과하였다. 기타 추가로 부과된 온도에 따른 경계조건을 포함하여 Fig. 3에 도시하였다. 회전 스크롤은 고정 스크롤 날개의 동일한 각도위치에 대하여 상대적으로 동일한

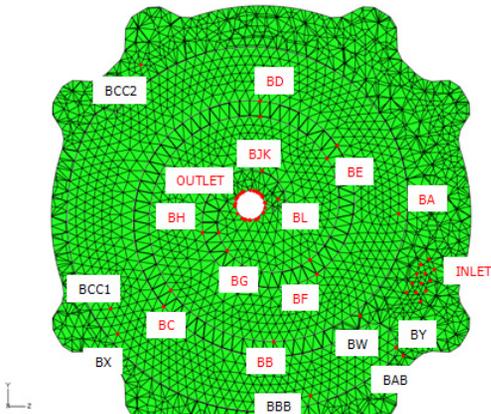
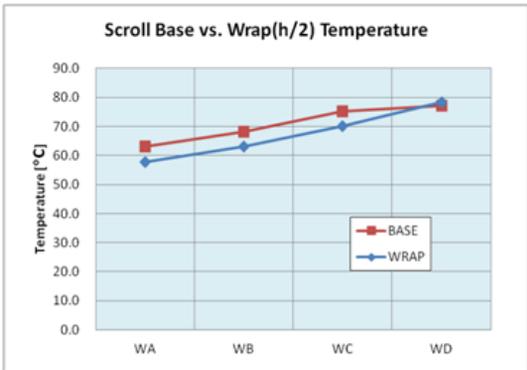
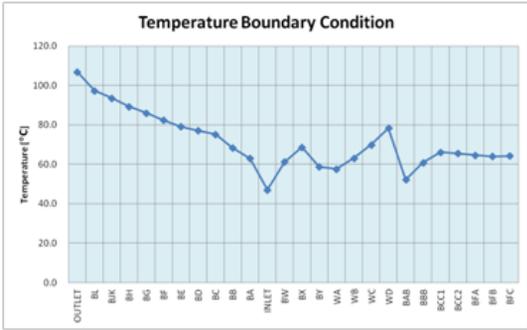


Fig. 3 Temperature boundary condition and related positions

값을 부과하였다.

### 3. 해석결과

응력해석은 비선형 대변위를 수행할 수 있도록 하였고, 열전달 해석에서 계산된 온도분포의 변화를 입력변수로 열팽창해석을 수행하였다. 고정 스크롤과

회전 스크롤 사이에는 변형접촉조건을 부과하여 침투간극과 접촉압력을 계산할 수 있도록 하였다. 첫 단계에서는 접촉해석 없이 열팽창해석을 수행하여 침투간극을 계산할 수 있도록 하였고, 두 번째 단계에서는 접촉쌍을 추가하여 접촉압력 및 최종 형상을 예측할 수 있도록 하였다. 열팽창을 고려한 식은 다음과 같다.

$$\varepsilon^{th} = \alpha(\theta)(\theta - \theta^0) - \alpha(\theta^I)(\theta^I - \theta^0)$$

$\alpha(\theta)$ : coefficient of thermal expansion  
 $\theta$ : Temperature, I: initial, 0: reference (1)

열전달 해석결과를 Fig. 4에 도시하였다. 고정 스크롤과 회전 스크롤, 결합된 구조의 온도분포를 각각 도시하였고, 결합된 구조에서는 절단면을 두어 두 구조의 위치에 따른 온도분포를 파악할 수 있도록 하였다. 최대온도는 106.9도로 출구부의 냉매온도이며, 최저온도는 47.1도로 입구부의 냉매온도이다. 입력된 위치를 기준으로 열전달이 이루어진 것을 확인할 수 있고, 소재에 따른 온도의 분포차이는 부위별로 온도를 부과하였고, 정상상태에 도달하였기 때문에 거의 없는 것을 알 수 있다.

열전달 해석에서는 Transient 해석을 수행하였고, 온도의 증분이 0.01도 이내에서 변화할 경우 정상상태로 판단하도록 하였다. 초기온도를 20도로 부과하였고, 해석결과 알루미늄합금의 경우 223초에서 정상상태에 도달하였다.

최종 응력분포를 MISES 응력으로 도시하여 Fig. 5

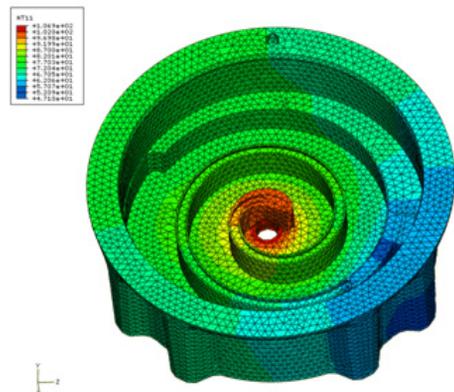


Fig. 4 Temperature distribution from the heat transfer analysis

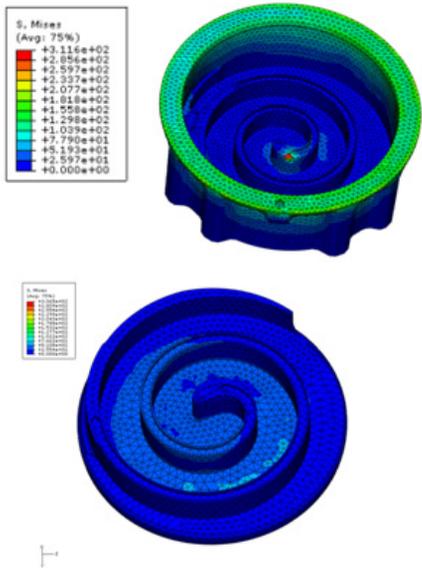


Fig. 5 Distribution of von Mises stress after the thermal expansion analysis

에 도시하였다. 스크롤 내측부에서 응력이 크게 나타나는 데 이것은 두 스크롤 간에 침투가 일어났었고, 접촉해석을 통하여 발생한 접촉압력에 의하여 응력이 집중된 것에 기인한다. 접촉된 부위의 최대 응력은 알

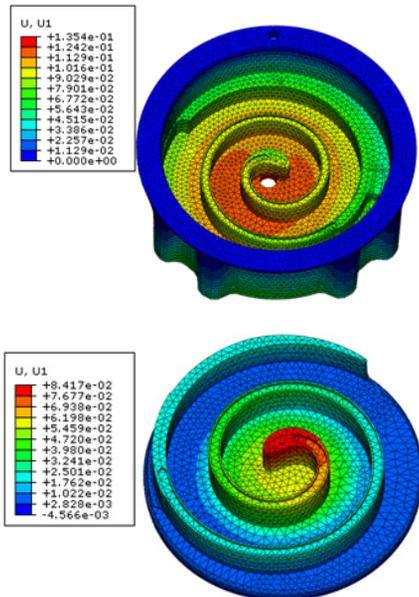


Fig. 6 Distribution of displacement according to the height direction of the scroll warp

루미늄 소재의 경우 311.6MPa이며, 마그네슘 소재의 경우 198.4MPa로 나타나 알루미늄 소재에서의 응력이 마그네슘 소재에서의 응력보다 크게 나타나고 있는데, 이것은 탄성계수의 차이로 나타나는 결과이다. 또한 응력값이 예상보다 크게 나타나고 있는 것은 접촉영역이 선 접촉 상태가 아니라 부분적으로 점 접촉 상태로 나타나있어 변형이 집중된 결과이기도 하다. 보다 정밀한 분석은 접촉간극을 통하여 분석하도록 한다.

스크롤의 변위 중 높이방향의 변위를 분포로 Fig. 6에 도시하였고, 총 변위의 크기 및 방향을 벡터그림으로 도시하였다. 변형해석에서 고정부는 스크롤의 구조물을 고려하여 입력하였다.

회전 스크롤은 스크롤 날개부위의 상부면으로 변형이 이루어지고 있고 스크롤의 반경방향으로 역시 변형이 일어나고 있다. 고정 스크롤은 스크롤의 바닥면 쪽으로 변형과 함께 스크롤의 반경방향으로 변형이 일어난다. 두 스크롤의 변형 방향이 동일하여 접촉면이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에서와 같이 접촉해석을 부과하지 않은 해석에서 접촉간극을 알 수 있는데, ‘Gap Open’값에서 스크롤의 중심부에서 음의 값이 나타나 서로 침투하는

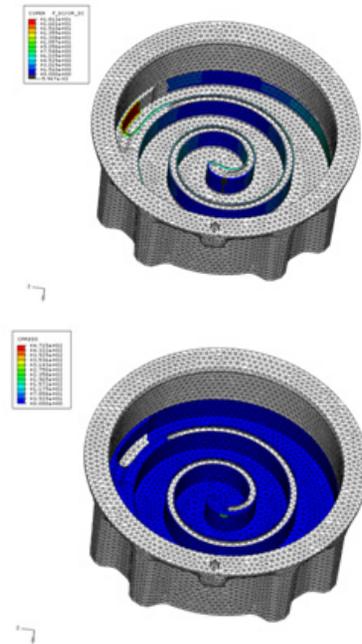


Fig. 7 Distribution of the gap open and the contact pressure

것을 알 수 있다. 고정 스크롤의 스크롤 날개 상단부가 회전 스크롤의 스크롤 날개의 바닥부위와 접촉하는 것을 확인할 수 있다. 침투깊이는 알루미늄 소재의 경우 최대 59.67 $\mu\text{m}$ 이다. 접촉해석을 부과한 경우 접촉압력을 계산할 수 있는데, ‘Contact Pressure’에서 해당부위에서 접촉압력이 발생하는 것을 알 수 있다. 다만 스크롤의 바닥부와 상단부에서는 접촉이 일어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 접촉압력은 471.4MPa로 소재의 강성에 영향을 받는다.

침투량을 분석하기 위하여 고정 스크롤의 바닥면에서 상부면까지의 절점에 대하여 높이 대비 초기 간극과 침투량을 정리하여 Fig. 8에 도시하였다. 4절점을 추적하였고, 높이 10mm되는 지점은 모델링이 동일 선상에 있지 않아 제외하였다. 초기 간극은 16 $\mu\text{m}$ 에서 46 $\mu\text{m}$ 까지 약 30 $\mu\text{m}$  수준이다. 팽창해석서 고정 스크롤은 구조적 경계조건을 고려하면 상부면의 이동 변위보다 바닥면의 변위가 높이방향으로는 크지만 반경방향으로는 상부에서의 변화가 크게 되어, 바닥면에서 침투보다 상부면의 침투가 커지게 된다. 높이 방향으로는 바닥면과 상부면은 침투가 크고 그 사이의 영역에서는 침투량이 작은 것을 알 수 있다.

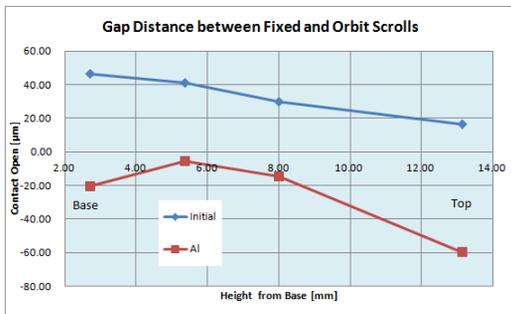


Fig. 8 Gap distance between the fixed and the orbiting scrolls

Table 2 Maximum values of important properties in analysis with respect to the materials

Variables (Maximum value)	Aluminum
Penetration [ $\mu\text{m}$ ]	59.67
Contact pressure [MPa]	471.4
von Mises stress [MPa]	311.6

## 4. 결론

스크롤 압축기의 소재변경에 따른 열전달-열팽창 해석을 수행하였다. 고정 스크롤과 회전 스크롤의 온도분포를 문헌에 따라서 입력하고, 열전달해석을 통하여 얻은 정상상태 도달 시까지의 온도분포를 변형해석의 입력을 이용하였다. 스크롤 간의 접촉해석을 통하여 알루미늄 소재와 마그네슘 소재에 따른 침투량 및 접촉압력, 변위를 분석하였다.

Table 2의 분석결과 표에 요약되어 있듯이 스크롤의 높이방향 위치에 따라 44~76 $\mu\text{m}$ 의 변형이동이 발생하며 최대 침투량은 스크롤 중심부의 고정 스크롤 상부면에서 약 60 $\mu\text{m}$  정도를 나타낸다.

향후 보다 정밀한 분석을 위하여 모델링을 좀 더 세밀하게 할 필요가 있으며, 본 연구에서 대상으로 하는 스크롤 압축기에 대하여 온도측정을 시행하여 입력할 필요가 있다.

## Acknowledgement

본 연구는 산업기술연구회에서 지원하는 협동연구과제의 지원을 받았으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## References

- 1) C. Lin, Y. Chang, K. Liang and C. Hung, “Temperature and thermal deformation analysis on scrolls of scroll compressor”, Applied Thermal Engineering, 25, pp. 1724-1739, 2005.
- 2) www.matweb.com