

소재변경에 따른 차량용 스크롤압축기의 열변형 해석

Thermal Deformation Analysis of a Scroll Compressor for Automobile according to the Change of Materials

이형욱* · 이근안** · 김정배***†

Lee Hyoungwook*, Lee Geunan** and Kim Jeongbae***†

(Submit date : 2014. 10. 16., Judgment date : 2014. 10. 20., Publication decide date : 2014. 12. 25.)

Abstract : An inverter scroll compressor is used for the air conditioning in cars. Scrolls would be changed from the aluminum material to the magnesium material in order to satisfy the light weight trends of cars. The material changing influences on the scroll dimensions particularly the gap between two scrolls. Since the larger gap declines the performance of the compression, the gap between wraps of scrolls or the gap between wraps of scrolls to the plate of the opposite scroll is regarded as an important design variable.

This paper is focused on the effects of the thermal stress due to the materials changing. The temperature difference between the inlet and the outlet is about 60 degrees and the highest operating temperature in the compressor is less than 110 degrees. The level of thermal stresses in the magnesium scroll is less than the result from aluminum one. The trend of the deformation is revealed that the normal directional deformation is 2 times larger than the in-plane directional deformation. Therefore the gap between the top of the wrap to the plate of the opposite scroll become more important than the other gaps. The orbiting scroll deforms larger than the fixed scroll by the thermal stresses. The deformation of the magnesium scroll is about 10% larger than that of the aluminum scroll. This value is similar to the ratio of the coefficients of thermal expansion of two materials. At the initial design stage, the results give many useful guides to engineers to propose gaps between parts.

Key Words : 스크롤압축기(Scroll compressor), 열변형 해석(Thermal deformation analysis), 유한요소해석(Finite element analysis), 스크롤 깃(Scroll wrap)

***† 김정배(교신저자) : 한국교통대 에너지시스템공학과
E-mail : jeongbae_kim@ut.ac.kr, Tel : 043-841-5282
*이형욱 : 한국교통대 에너지시스템공학과
**이근안 : 한국생산기술연구원

***† Kim Jeongbae(corresponding author) : Department. of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation
E-mail : jeongbae_kim@ut.ac.kr, Tel : 043-841-5282
*Lee Hyoungwook : Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation
**Lee Geunan : Korea Institute of Industrial Technology

1. 서 론

하이브리드 자동차가 도입되면서 자동차의 공조 시스템에는 고효율의 경량 압축기의 개발이 진행되고 있다. 알루미늄 재료가 사용된 기존의 스크롤압축기를 마그네슘 재질로 대체하는 방식의 경량화 방식도 진행 중이다. 차량의 공조시스템에 사용되는 전동식 스크롤압축기에서는 나선형상의 날개를 가진 고정스크롤과 회전스크롤이 맞물려 작동하면서 냉매를 압축한다. 두 스크롤은 날개의 상단과 반대 측 스크롤의 기저 경판면 사이의 간극과 날개와 날개사이에서의 미소한 간극들이 유지되면서 수천 rpm 정도의 속도로 작동한다.¹⁻³⁾ 각 부분의 미소한 간극은 압축기의 압축 효율성에 영향을 준다. 간극이 클 경우 압축의 효율이 떨어져 압축기의 성능이 저하되며, 간극이 너무 작을 경우 서로 접촉하여 파손의 위험이 생기게 된다.

소재의 대체 과정에서는 부품을 생산하는 공정도 중요하지만 재질 변경에 따른 설계과정에서 고려를 해야 할 부분도 존재한다. 대표적으로는 부품의 공차 및 조립간극과 같은 치수설계가 해당된다. 압축기에서는 냉매가 압축에 따라 온도가 상승하게 되는데 냉매의 흡입부와 토출부의 온도차는 60℃ 정도이며 약 100℃ 정도에서 작동하기 때문에 열전달과 그에 의한 열팽창변형도 발생한다. 즉, 형상을 설계할 때, 열팽창의 효과도 고려하여 간극을 설계하여야 한다. 따라서 예비설계 시 대체된 소재와 기존 소재간의 열변형의 차이를 예측하는 것이 중요하다. 기본적으로는 열팽창 계수에 의한 영향이 있을 것으로 예상할 수 있으나 복잡한 형상과 온도의 변화로 인하여 보다 정확한 인자를 추정하는 것은 어렵다.

스크롤압축기에 대한 성능해석 및 동역학적

해석에 대한 연구는 많이 수행되었지만²⁻⁶⁾, 변형적 측면을 다룬 연구는 많지 않다. 이것은 전동식 스크롤압축기의 열팽창 효과는 해석적으로 예측하기 어려운 문제이기 때문이다. 압축기 내에 있는 냉매, 윤활유 등이 기상과 액상으로 섞여있고, 온도의 변화에 따른 물성치도 변동성이 있으며, 동적으로 작동하고 있는 압축기로 인하여 유체역학적 및 열전달적 측면에서 온도의 분포 및 변형의 정도를 예측하는 것은 상당히 어렵다고 할 수 있다. 따라서 스크롤압축기의 경우 열변형 해석을 수행하여 변형과 응력을 예측한 경우는 많지 않다⁷⁻⁹⁾. C. Lin⁷⁾은 스크롤압축기의 주요 부분에 열전대를 설치한 실험을 통하여 정상상태로 가정된 스크롤압축기의 온도분포를 측정하였고, 이를 통하여 열변형 해석을 수행하였다. Lee 등⁹⁾은 C. Lin의 온도측정 결과를 응용하여 알루미늄 소재의 전동식 스크롤압축기의 열변형 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 전동식 스크롤압축기의 소재의 변경을 위한 설계과정에서 소재의 물성치의 변화에 따른 형상치수 설계의 영향을 분석하고자 한다. 해석적 기법으로는 정상상태로 가정한 압축기의 온도분포를 C. Lin의 문헌에 따라 유사하게 부과하고, 각 스크롤에 대한 열전달 해석을 수행한다. 이후 주어진 온도에 대하여 열변형 해석을 수행하여 결과를 비교하도록 하였다. 온도가 가장 높은 토출부 주위를 중심으로 변형을 측정하였다.

2. 해석기법 및 경계조건부과

본 연구에서는 스크롤압축기의 성능해석이 목적이 아니라 소재변경에 따른 형상변화를 검토하는 것이 주된 목적이기 때문에, 스크롤

압축기의 구동상태에 대하여 동역학적 해석 및 유동해석을 수행하지 않고, 스크롤의 열전달 해석과 열변형 및 응력 해석을 수행하도록 한다. 소재변경에 따른 형상 및 응력해석을 위해서는 C. Lin과 같이 스크롤압축기에서의 부위별 온도를 측정해야하나, 이러한 작업은 쉽지 않은 작업이고, 절대적인 응력의 수준과 변위량을 검토하는 것 보다는 두 소재간의 변화에 따른 경향성을 분석하는 것이 목적이기 때문에 온도분포는 기존의 문헌을 이용하여 위치에 따라 상사하도록 하였다. 두 개의 스크롤 압축기 모델의 주요 치수를 표 1에 도시하였다. 주요 치수들이 크게 차이가 나지 않기 때문에 온도 분포를 참고문헌의 값으로 근사하도록 하였다.

Table 1. Comparisons of main dimensions of scrolls

Dimension	Reference (C. Lin ⁷⁾ [mm]	This Study [mm]
Outer radius of base plank	92.0~96.0	87.0~102.0
Thickness of base plank	7.0~8.0	7.5~10.0
Height of scroll wrap	25.0	20.3
Thickness of scroll wrap	2.6	2.7~3.9
Pitch of scrolls	12.96	13.0

그림 1은 C. Lin의 논문⁷⁾에서 스크롤압축기의 온도를 측정한 위치를 도시한 그림이다. 그림 2에 그림 1에서 위치한 지점에서의 온도를 본 모델의 위치에 맞추어 도시한 후, 온도를 표시하였다. 온도경계조건은 토출부에서 흡입구까지의 스크롤 경판면, 기타 스크롤 경판면, 스크롤 것의 높이의 중간위치와 프레임위치 등 4개 부분으로 구분하였고, 고정스크롤과 선회스크롤은 참고문헌에서와 같이 서로 대칭적으로 부과하였다.

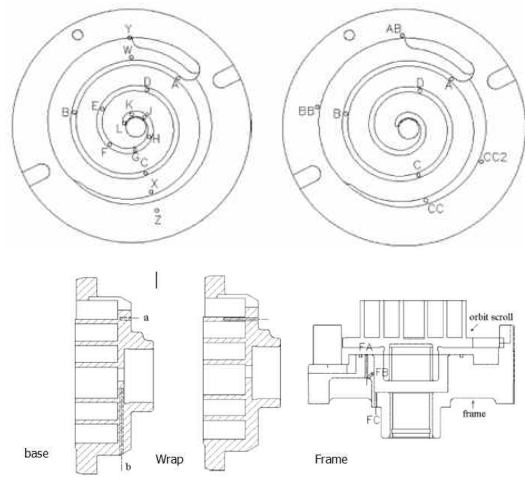
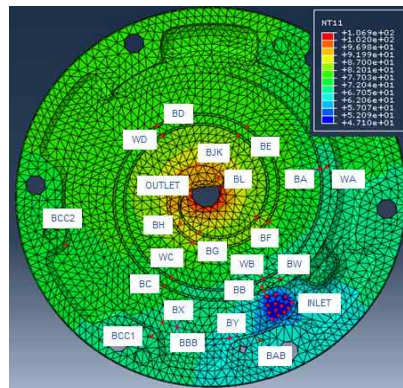
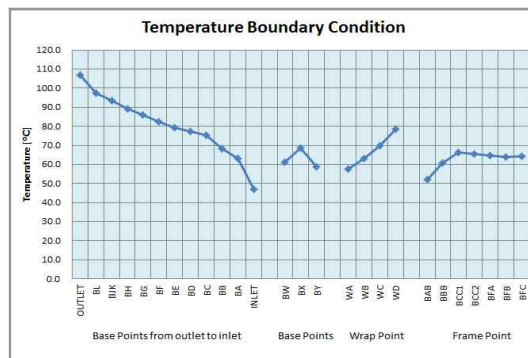


Fig. 1 Designated measuring points for temperatures of the scroll compressor at the reference (7)



(a) Temperature imposing points



(b) Temperature distributions

Fig. 2 Temperature boundary conditions of scrolls

초기 스크롤에 사용된 알루미늄 소재와 재료가 변경된 후의 마그네슘 재료의 기계적 및 열적 물성치¹⁰⁾는 표 2에 도시하였다.

본 연구에서 사용된 마그네슘 스크롤은 공정상 압출소재를 이용하여 소성가공으로 제작될 예정이어서 기초적인 압출재 마그네슘을 기준으로 사용하였다. 두 재료의 비강성은 거의 동일하지만 밀도가 마그네슘이 작기 때문에 부품 경량화를 예상할 수 있다.

Table 2. Mechanical and thermal material properties of the Aluminum and Magnesium of this study

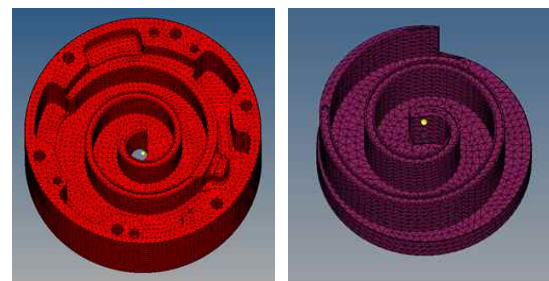
Material Properties	Al6011T4	Mg Extruded	Ratio (Mg/Al, %)
Density [kg/mm ³]	2.7E-6	1.74E-6	-35.6%
Conductivity [W/m K]	154.0	159.0	+3.2%
CTE [($\mu\text{m}/\text{m})/^{\circ}\text{C}$]	23.6	26.1	+10.6%
Specific Heat [J/kg $^{\circ}\text{C}$]	896.0	1025.0	+14.4%
Young's Modulus [MPa]	68,900	44,000	-36.1%
Poisson's Ratio	0.33	0.35	+6.1%

열전달계수는 3.2% 정도 마그네슘이 더 크나 본 연구에서는 정상상태를 고려할 예정이므로 결과에 크게 영향을 주지는 않는다고 할 수 있다. 열팽창 계수는 변경예정인 마그네슘 소재가 약 10.6%가 크기 때문에 해석상에서 공차 및 간극에 큰 영향을 줄 것으로 예상할 수 있다.

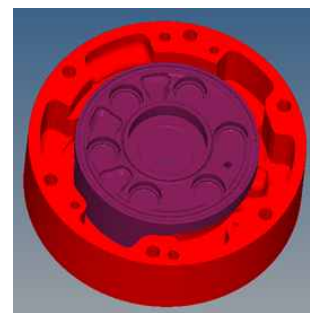
본 해석에서는 열변형을 해석하기 위하여 순차적 열전달-열응력 해석기법을 사용하였다. 이것은 스크롤은 변형에 의하여 열이 발생하는 것이 아니기 때문에 열해석 결과와 응력 해석 결과가 독립적이라 가정할 수 있고, 단지 온도의 변화가 응력을 발생시키기 때문이다. 열전달해석은 과도해석(Transient analysis)

으로 온도의 증분이 0.01도 내에서 변화하면 수렴된 조건으로 판단하였다. 응력해석은 대변위를 고려할 수 있도록 비선형 해석을 포함하였고, 두 스크롤 간의 접촉해석도 포함하도록 하였다. 열전달 해석을 통하여 도출된 온도 분포를 열팽창 응력해석의 입력으로 사용하도록 하였다. 해석 프로그램은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS/ Standard를 이용하였다.

본 해석에 사용될 스크롤압축기의 유한요소 모델을 그림 3에 도시하였다. 열전달 해석을 위해서는 3차원의 10절점 요소로 삼각뿔 형(Tetrahedron)의 2차 요소를 사용하여 정확성을 높이도록 하였다. 열응력해석 또한 3차원 10절점 요소로 2차 요소를 사용하여 굽힘 변형에서의 응력의 정확도를 높일 수 있도록 하였다. 고정스크롤은 6만개의 요소, 선회스크롤은 약 2만개의 요소를 사용하여 모델링 하였다.



(a) fixed scroll (b) orbiting scroll



(c) assembled geometry

Fig. 3 Finite element models for the scroll compressor

3. 해석결과 및 토의

그림 4에 각 소재에 대한 열전달 해석결과를 도시하였다.

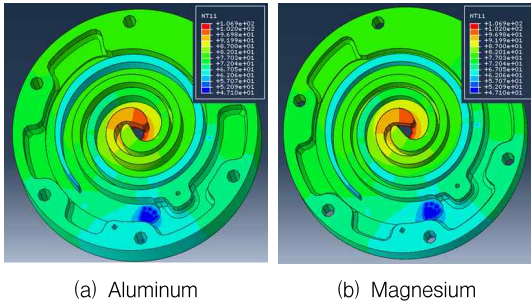


Fig. 4 Results of the heat transfer analysis according to the aluminum and the magnesium materials

흡입구에서 토출부로 갈수록 스크롤을 따라 온도가 증가되는 것을 알 수 있다. 소재간의 비교에서는 최종적으로 정상상태에 도달하도록 하였기 때문에 온도분포는 거의 동일하게 나타난다. 여기서 구한 온도분포를 다음단계의 열팽창해석에서 사용한다.

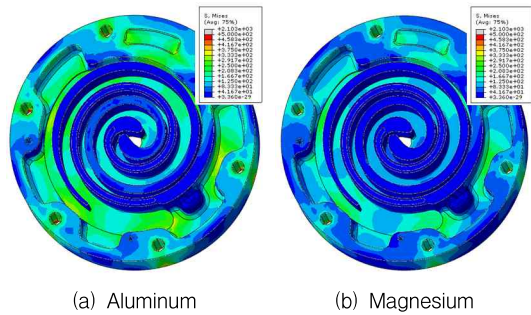


Fig. 5 Results of the thermal deformation analysis

그림 5에 각 소재에 대한 열변형 해석결과를 도시하였다. 경판부 등에서 마그네슘 소재를 사용한 스크롤의 응력이 알루미늄 소재의 경우보다 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수

있고, 고정스크롤의 경우 볼트로 체결된 부위가 가장 응력이 높게 나타난다. 스크롤의 토출부에서 가장 큰 응력값은 알루미늄 소재의 경우 340.7MPa, 마그네슘 소재의 경우 245.9MPa이다. 응력값은 변형의 정도와 탄성계수의 조합으로 만들어지게 된다. 응력의 비율은 1.386으로 38.6% 증가한다.

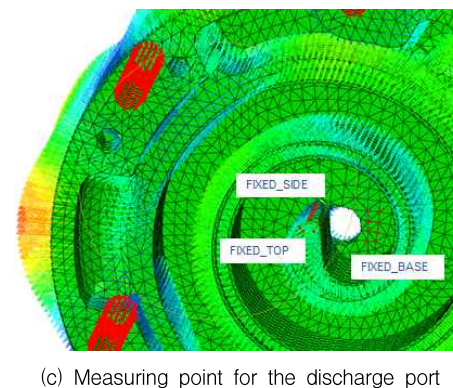
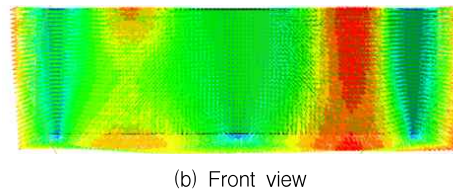
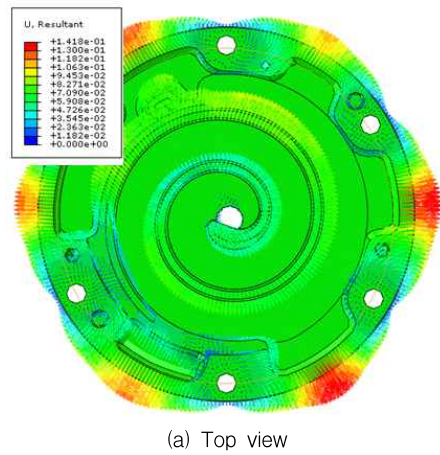


Fig. 6 Displacement vectors of results of the fixed scroll for magnesium material

스크롤의 변형에 의한 변위이동의 경향을 알아보기 위하여 고정스크롤에 변위벡터를 표시하여 그림 6에 도시하였다. 위에서 본 그림에서는 볼트체결부를 주위로 반경방향으로 프레임이 늘어나는 것을 알 수 있다. 스크롤 깃은 방사선을 따라서 반경의 바깥쪽으로 늘어나는 것을 알 수 있다. 앞에서 본 그림 6의 (b)의 경우 고정단을 제외하고 팽창하는 방향으로 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 최대 변위는 볼트 체결부 사이에 위치한 영역으로 약 0.14mm의 이동이 발생한다.

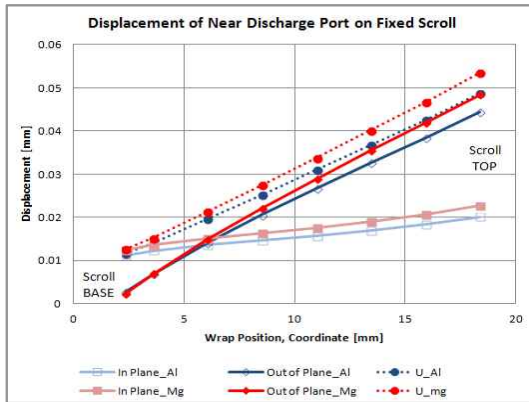
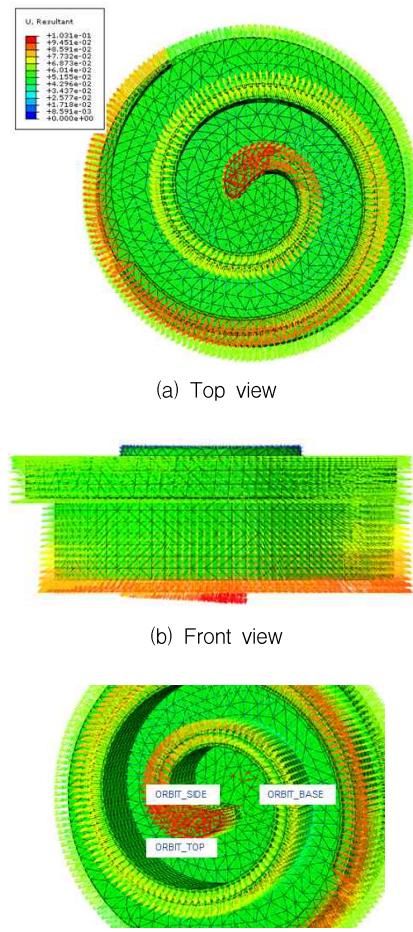


Fig. 7 Displacement of the wrap side on the fixed scroll

스크롤 부위의 변위는 보다 정밀한 검토를 위하여 온도차가 가장 큰 토출부를 중심으로 측정점을 설정하였다. 그림 6의 (c)에서와 같이 고정스크롤의 경관면의 8점, 깃의 상단 5점, 깃의 옆면을 따라 높이방향으로 8점을 설정하여 변위의 양과 소재간의 차이를 분석하였다. 깃의 옆면의 변위를 깃의 높이에 따라 알루미늄과 마그네슘 소재를 비교하여 그림 7에 도시하였다. 스크롤 깃의 평면에서의 이동은 사각형으로 표시되어 고정면을 기준으로 높이가 높아질수록 변위는 커지는 것을 알 수 있다. 하지만 평면에서의 이동보다는 면외방향

의 이동 즉, 선회스크롤 쪽 경관으로의 이동이 더 큰 것을 그림에서 확인할 수 있다. 깃의 높이 방향에 따른 면외방향의 이동(48.4 μ m)이 면내방향의 이동(22.7 μ m)보다 약 2배 더 많이 이동하는 것을 볼 수 있어 열팽창의 효과는 두 스크롤 간의 수직간극에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 전반적으로는 마그네슘 소재의 경우가 알루미늄 소재보다 변위가 더 큰 것을 확인할 수 있어, 열팽창 계수가 더 큰 소재로의 변경은 설계 시 간극설정에 더 많은 영향을 주게 된다.



(a) Top view
(b) Front view
(c) Measuring point for opposites of the discharge port
Fig. 8 Displacement vectors of results of the orbit scroll for magnesium material

선회스크롤의 경우도 그림 8에 변위를 벡터로 표시하여 마그네슘 소재에 대한 해석결과를 도시하였다. 평면에서는 스크롤의 중심부에서 변위가 크고 정면에서 확인하면 스크롤 상단부에서의 변화가 수직방향으로 크게 나타나고 있다. 선회스크롤에서도 동일한 부위에 대하여 그림 8의 (c)와 같이 상단부, 경관부, 깃의 옆면에 절점을 설정하였다.

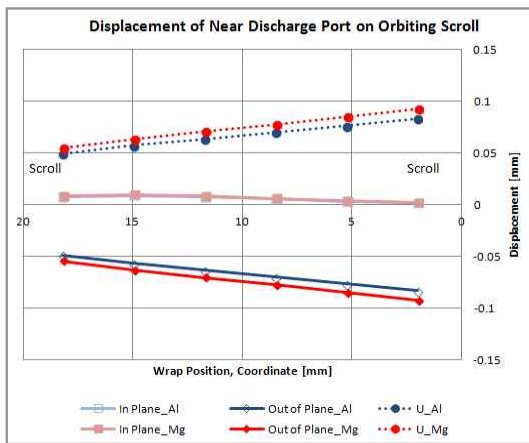


Fig. 9 Displacement of the wrap side on the orbiting scroll

그림 9에 스크롤 깃의 옆면의 변형정도를 스크롤 깃의 높이에 따라서 정리하였다. 그래프의 좌측이 선회스크롤 깃의 하단부이고, 우측이 상단부이다. 스크롤의 상단의 변형이 하단보다는 변형이 크고, 전체적으로 고정스크롤보다는 변형이 큰 것을 알 수 있다. 면외방향의 변형은 최대 99.8 μm 로 고정스크롤에서 최대 면외변형인 48.4 μm 의 두 배 정도가 되는 것을 알 수 있다. 면내방향의 변형의 상대적으로 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

앞선 결과에 따라 면외방향 즉, 수직방향의 변위가 더 크고 중요하게 나타나기 때문에, 표 3에는 그림 6과 그림 8의 (c)있는 측정점의 면외방향의 변위를 알루미늄과 마그네슘 소재의

경우에 대하여 각각 비교하여 요약하였다. 표에서 fixed는 고정스크롤을 orbiting은 선회스크롤을 의미한다. 마그네슘 소재의 경우, 고정스크롤의 상단부의 최대변위는 46.5 μm , 경관부의 변위는 -3.7 μm 이므로 Fixed : top-base의 변위는 50.1 μm 로 정리할 수 있다. 측정점인 상단, 하단, 옆면의 세 측정점 모두 마그네슘 소재의 변형이 더 크며 고정스크롤의 경관부의 이동을 제외하면 두 소재간의 변위 비율은 약 110%로 마그네슘이 더 크게 나타난다. 이 비율은 표 2에 있는 두 소재의 열팽창 계수의 비인 110.6%와 유사하며, 밀접한 관계가 있을 것으로 예상할 수 있다.

Table 3. Comparisons of the height directional displacement of two materials at designated points

Designated points	Al (A) [μm]	Mg (B) [μm]	Diff. (B-A) [μm]	Ratio (B/A)
fixed_top	42.6	46.5	3.8	109.0%
fixed_base	-2.7	-3.7	1.0	137.5%
orbiting_top	-91.5	-101.5	9.9	110.9%
orbiting_base	-40.8	-45.2	4.4	110.9%
fixed_side (max)	44.3	48.4	4.1	109.1%
orbiting_side (max)	-90.0	-99.8	9.8	110.9%
Fixed : top-base	45.3	50.1	4.8	110.7%
Orbiting : base-top	50.7	56.3	5.5	110.8%

4. 결 론

차량용 스크롤압축기의 경량화를 위하여 알루미늄 소재를 마그네슘 소재로 대체하는 과정에서 열변형의 영향을 파악하기 위하여 유한요소해석을 수행하고, 소재 차이에 의한 주요 간극의 변화를 비교하였다. 본 연구에 사용

된 압축기는 흡입구와 토출구의 온도차이가 약 60℃이고, 약 100℃의 온도에서 구동하며, 이를 감안한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 열응력은 마그네슘 재질이 더 낮게 나타난다. 이것은 마그네슘 재질의 강성이 상대적으로 낮기 때문이다. 토출부에서의 열응력은 알루미늄 소재의 경우 340.7 MPa, 마그네슘 소재의 경우 245.9 MPa로 약 38.6%의 증가를 보인다.
- (2) 변형은 가장 변형이 큰 곳을 기준으로 마그네슘 재질의 스크롤의 변형이 알루미늄 재질보다 약 10% 정도 더 크게 나타난다. 변형의 양상은 스크롤의 수직 축 방향의 변형이 평면 방향보다 약 2배 더 크게 일어나며, 선회스크롤의 변형이 더 크다.
- (3) 온도변화에 의한 열팽창의 효과는 소재간의 열팽창계수의 비율을 고려하여, 초기설계 시 간극설계의 기준으로 잡을 수 있을 것이다.

후 기

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

Reference

1. Kim, H. J., Technologies of Scroll Compressors, Journal of Fluid Machinery, Vol. 4, No. 3, pp. 96-105, 2001.
2. Lee, G. H, Scroll Compressors for Air Conditioning, Journal of Fluid Machinery, Vol. 1., No. 1, pp. 121-128, 1998.
3. Lee, K. S., Lee, K., Lee, H., 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.
4. Lee, G. H. and Yoo, J. Y., Performance Analysis of Scroll Compressor for Automobile Air Conditioning System, KSME Spring Conference, pp. 60-65, 1998.
5. Hong, S. W. and Rew, H. S., Performance Improvement of a Scroll Compressor by Heat Transfer Analysis, Journal of Fluid Machinery, Vol. 3, No. 4, pp. 22-29, 2000.
6. Kim, H., Park, I, Son, I, Jung, S and Lim, K., Optimization Design of refrigerant flow by CFD Analysis and test in discharge system of scroll compressor, KSAE Conference, pp. 576-581, 2011
7. Lin, C., Chang, Y., Liang, K. and Hung, C., Temperature and thermal deformation analysis on scrolls of scroll compressor, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 1724-1739, 2005.
8. Koo, In-Hwe and Park, Jin-Moo, A Study on the Leakage Analysis of Scroll Compressor with Thermal Deformation Considered, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 24, No. 10, pp. 2428-2437, 2000.
9. Lee, H. W., Kim, J., Lee, G, Lee, J. S. and Lee, Y. S., Coupled Thermal-Stress Analysis of Scrolls in Automotive Scroll Compressor, Journal of Institute of Convergence Technology (Korea National University of Transportation), Vol. 2, No. 1, pp. 38-42, 2012.
10. www.matweb.com.