

17cc급 자동차용 압축기 핵심부품의 구조 안정성에 관한 수치적 연구

양용군*, 우위팅*, 진진*, 류성기*[#]

*경상대학교 기계공학부

A Numerical Study on the Structural Stability Optimization of the Core Components of a 17cc Automotive Compressor

Yong-Kun Yang*, Yu-Ting Wu*, Zhen Qin*, Sung-Ki Lyu*[#]

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

(Received 11 January 2021; received in revised form 16 January 2021; accepted 30 January 2021)

ABSTRACT

Fuel economy has always been a major issue for the automotive industry due to environmental concerns. In particular, it is known that only 5-20% of the energy generated in a car that mainly uses an internal combustion engine is converted to increase fuel efficiency, many methods have been proposed. Among these methods, weight reduction is most commonly used because it is the simplest and cheapest. Weight is always the main reason for energy consumption, therefore, reducing weight is the best way to increase fuel efficiency while simultaneously saving on material costs. To reduce the weight of a compressor, material substitution is used. However, aluminum (a lighter metal substitute) is more fragile than steel, therefore, structural stability must be verified through testing. In this paper, we performed a 3D analysis to investigate whether aluminum can be used without compromising structural stability. Our investigation included static analysis and thermal analysis. As a result, we found that an aluminum swash plate can be safely applied on a shaft instead of steel; it reduces weight while maintaining stability that is equal to or better than steel.

Key Words : Vehicle Air-condition(차량 에어컨), Compressor(압축기), Numerical Study(수치연구), Finite Element Method(유한요소법), Structural Stability(구조안정성)

1. 서 론

차량 에어컨(Automotive Air-conditioning)은 이제 승용차에 있어서 사치품보다는 필수품으로 되어가고 있다. 특히 여름 또는 일 년 내내 덥고 습한 나

라에서 냉각기능뿐만 아니라 제습 기능도 승차만족도와 안전에 큰 영향을 미치고 있다. 하지만 에어컨시스템을 사용함으로써 비용과 무게가 모두 늘어난다. 또한, 진동소음과 온실가스 배출도 발생하므로 이것을 줄이는 것도 항상 자동차산업에서 큰 과제이다.^[1-4] 따라서 에어컨시스템의 효율성 증대와 성능평가가 모두 중요하게 여겨지고 있다. 내연기관 엔진을 주로 사용하는 자동차에서 발생하는 에

Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

너지 중 5~20%가 동력으로 사용되고 나머지는 기타 부품간의 마찰 등으로 소모되는 것으로 알려져 있다. 그중 압축기는 엔진동력의 20%가량 소모하며 차량에서 최대 5~6 kW전력을 끌어올릴수 있어 연비에 영향을 주고 있다는 것을 알고 있다.^[5-6]

압축기는 엔진 구동력을 회전운동으로부터 왕복운동으로 변환시켜 에어컨 속의 냉매를 압축시켜 반영구적인 냉각활동을 도와주고 있다. 사판식 압축기는 현재 광범위하게 사용중인 압축기중의 하나이다. 피스톤의 왕복운동은 회전축의 축과 평행하므로 축 피스톤 압축기라고도 한다. 고정용량과 가변용량 두 가지 종류가 있지만 본 논문에서는 고정용량에 대해서만 논의할 예정이다. 고정용량 압축기는 대체로 사판식으로 되어있고 그 구조도는 Fig. 1과 같다. 주요부품은 주축(Shaft), 사판(Swash Plate), 피스톤(Piston) 및 실린더(Cylinder)이다. 이중 주축과 사판은 steel 구조이고 피스톤과 실린더는 알루미늄이다. 연비를 높이기 위해 무게를 당연히 줄여야 한다. 재질을 바꾸는 것이 제일 효과적인 방법이다. 하지만 통상적으로 재질이 가벼우면 가벼울수록 강성이나 내구성 측면에서 효과가 떨어지는 것은 당연한 일이다. 하지만 실제 사용조건을 만족하는 전제하에 바꿀 수가 있다면 충분히 고민해볼 필요가 있다고 생각한다.

본 논문에서는 실제 부품에 대한 시험을 진행하기에 앞서 3D 해석을 통해 정적분석과 열분석한 결과를 작성해보았다. 그 결과는 대체로 만족스러웠고 이러한 부품으로 압축기를 제작하여 성능, 내구시험을 진행할 예정이다.

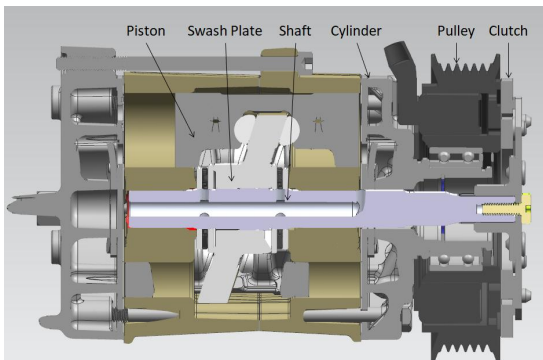


Fig. 1 Sectional view of swash plate compressor

2. 3D 모델링

이번 해석에서 사용하게 될 3D 모델링은 양산중인 모델을 기반으로 제작된 것이며 shaft, swash plate, piston, shoe만 포함된다. 그 형상은 각각 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4와 같다. 개개의 부품이 받는 하중을 시뮬레이션하는 것보다 실제 운행과정에서의 데이터를 수집하기 위해서는 조립된 상태에서의 해석이 중요하다. 따라서 부품을 실제제품과 같이 조립하였다. 최종으로 해석중에 사용하게 될 3D 모델링은 Fig. 5와 같다.



Fig. 2 3D modeling of shaft

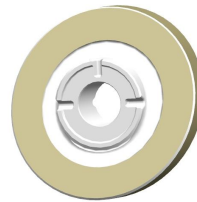


Fig. 3 3D modeling of swash plate

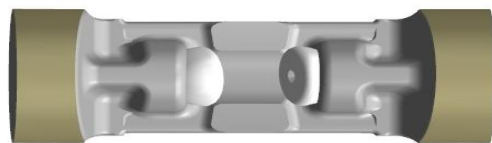


Fig. 4 3D modeling of piston and shoes

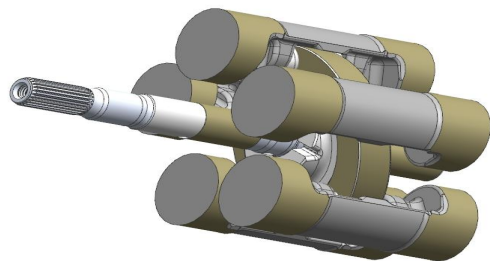


Fig. 5 3D modeling of assembly

Table 1 Chemical composition of steel

Type	Chemical composition				
	C	Si	Mn	P	S
S45C	0.42-0.48	0.15-0.35	0.6-0.9	0.03max	0.035max

Table 2 Chemical composition of aluminum

Type	Chemical composition				
	Cu	Si	Mg	Zn	Fe
ADC12	1.5-3.5	9.6-12	0.3max	1.0max	1.3max

Table 3 Mechanical properties of steel

Type	Chemical composition			
	Yield point kgf/mm ²	Tensile strength kgf/mm ²	Elongation %	Hardness HB
S45C	50 min	70 min	17 min	201~269

Table 4 Mechanical properties of aluminum

Type	Chemical composition			
	Yield point kgf/mm ²	Tensile strength kgf/mm ²	Elongation %	Fail strength kgf/mm ²
ADC12	19 min	30 min	2 max	18 min

Table 5 Material of 3D modeling samples

Samples	Shaft	Swash plate	Piston	Shoes
M1	S45C	S45C	S45C	S45C
M2	S45C	ADC12	S45C	S45C



Fig. 6 Mesh of 3D modeling

B: Static Structural
Static Structural
Time: 1. s

- A** Displacement
- B** Pressure: 1.5 MPa
- C** Pressure 2: 1. MPa
- D** Pressure 3: 1.25 MPa
- E** Fixed Support

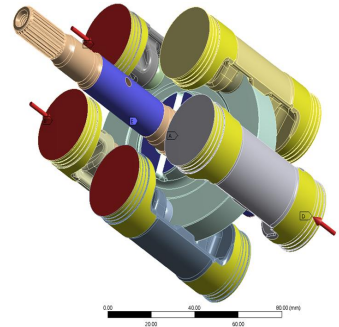


Fig. 7 Boundary conditions of modeling analysis

주로 사용하고 있는 재질은 S45C이고 주로 주축과 사판에서 많이 사용하고 있다. 그리고 이번에 사용하게 될 알루미늄 재질은 ADC12이다. 주축은 엔진의 동력을 이어주는 역할이므로 알루미늄으로 교체하기에는 절단과손이 생길 수도 있기 때문에 어렵다고 판단하여 우선 사판 제작용으로 사용할 예정이다. 따라서 조합은 스틸 주축과 알루미늄 사판이다. 본 연구에서 사용할 예정인 ADC12 재질의 화학성분은 Table 1과 Table 2와 같다. 기계적성질은 Table 3과 Table 4와 같다. Table 3, 4에서 알 수 있듯이 항복점, 인장강도, 연신을 면에서 모두 S45C가 우수하다. 다만 압축기의 사판에서 받는 응력 기준으로 과도한 것도 부정할 수 없다. 따라서 무게를 줄여 연비효율을 높이면서 절단과손이 일어나지 않는 재질로 변경시키기 위해 우선 3D 해석을 진행하였다. 두 종류 3D 모델링은 Table 5와 같은 재질로 진행하였다.

3. 해석결과 및 고찰

해석은 크게 정적해석과 열 해석을 진행하였다. 정적해석은 회전시 주축을 통해 피스톤에 전달된 최대압력을 바탕으로 각 부위별 변형, 응력, 탄성변형과 안전율에 대한 해석이 포함되어 있고 열해석은 압축기 설계시 가운데 온도조건을 바탕으로 열전달 및 열변형에 대해 해석하였다. 해석결과는 아래 문장에서 자세하게 설명하였다. 알루미늄 재질로 교체한 부품의 안전율과 열변형은 모두 안전한 치수를 나타냈고 그 결과는 만족스러웠다.

3.1 정적해석

H사 압축기 시험조건을 바탕으로 가해진 압력 및 고정포인트를 정하였다. 3D modeling의 mesh와 경계조건을 Fig. 6, Fig. 7에 나타냈다. A 포인트인 노란색 부분은 상하로 움직이면서 냉매를 압축시키는 역할을 하고 있다. B, C, D 포인트는 각각 압력이 가해지는 부분인데 동시에 같은 압력을 받는 것이 아니라 돌아가면서 압력을 받기 때문에 특정된 시점에서는 하나의 피스톤이 제일 강한 압력을 받게 되고 나머지는 비교적 적은 압력을 받게 된다. 이번 해석에서 최고압력을 1.5 MPa로 정하였고 두 번째, 세번째를 각각 1.25, 1.0 MPa로 정하였다.

또한, 주축은 실린더와 클러치에 의해 고정되어 있으므로 E 포인트를 fix 포인트로 지정하였다. 스틸 주축과 사판의 변형량은 Fig. 8에서 확인할 수 있으며 최대 변형량은 0.004 mm로 나타났다. 응력은 Fig. 9에서 확인할 수 있으며 Shoe와 맞닿는 부분과 주축결합부에서 가장 많은 응력을 받고 있다. 특히 shoe와 맞닿는 부분은 최대 38 MPa를 받고 있어 변형에 대한 우려가 있다. 따라서 그다음으로 탄성변형을 살펴보았다. Fig. 10을 살펴보면 다행히 탄성변형은 0.0003 mm이고 거의 무시할 수 있는 수준이다. 안전율은 Fig. 11에서 알 수 있듯이 최소 5.8이상으로 일반 설계기준 2보다 훨씬 높게 나타났다. 다만 단순히 높다고 좋은 것이 아니다. 과잉 설계의 우려가 있으며 steel 자체의 강성은 좋으나 무겁기에 자동차 연비효율에는 그다지 좋은 편은 아니기 때문이다.

그다음으로는 알루미늄 사판과 steel 주축의 조합으로 해석을 진행하였다. 최대 변형량은 Fig. 12에서 확인할 수 있고 0.006 mm로 나타났다. 응력은 Fig. 13에서 확인할 수 있다. Shoe와 맞닿는 부분과 주축결합부에서 가장 많은 응력을 받고 있다. 특히 shoe와 맞닿는 부분은 최대 38 MPa를 받고 있어 변형에 대한 우려가 있다. 따라서 그다음으로 탄성 변형을 살펴보았다. Fig. 14를 살펴보면 다행히 탄성 변형은 0.0006 mm이고 거의 무시할 수 있는 수준이다. 마지막은 안전율이다. Fig. 15에서 알 수 있듯이 안전율 또한 최소 7이상으로 일반 설계기준 2보다 훨씬 높게 나타났다. 그리고 오히려 steel 사판보다 안전율은 더 높은 것으로 나타났다.

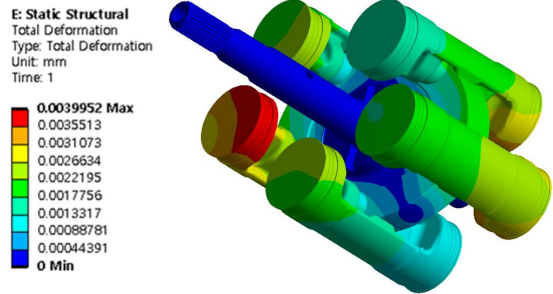


Fig. 8 Deformation of steel shaft and swash plate

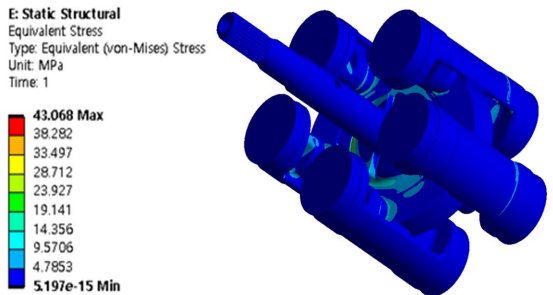


Fig. 9 Stress of steel shaft and swash plate

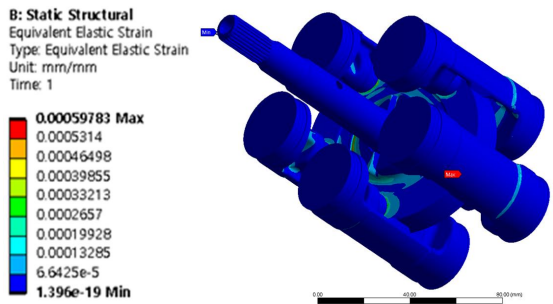


Fig. 10 Elastic strain of steel shaft and swash plate

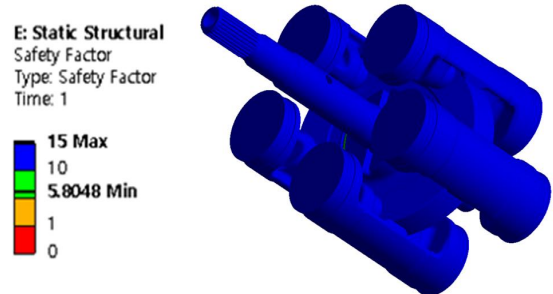


Fig. 11 Safety factor of steel shaft and swash plate

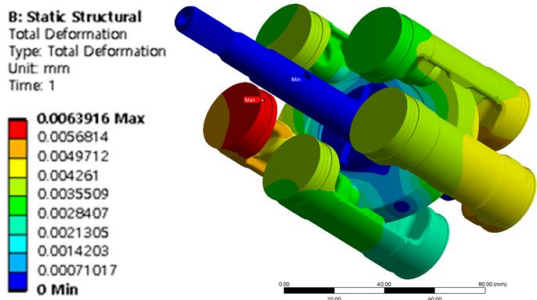


Fig. 12 Deformation of steel shaft and aluminum swash plate

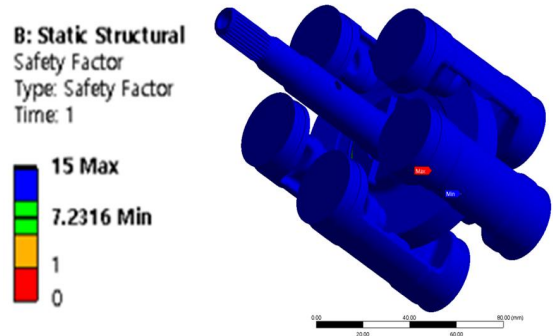


Fig. 15 Safety factor of steel shaft and aluminum swash plate

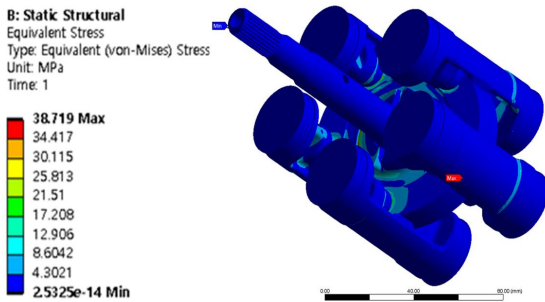


Fig. 13 Stress of steel shaft and aluminum swash plate

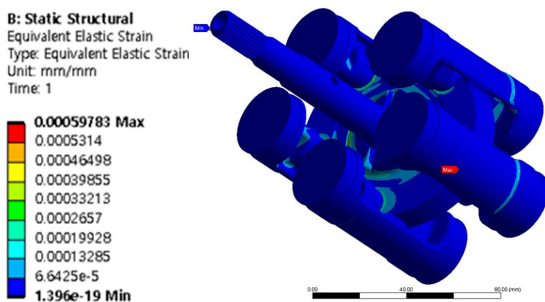


Fig. 14 Elastic strain of steel shaft and aluminum swash plate

3.2 열해석

일반 압축기운행조건에서 120°C가 최고치이다. 해당 온도를 넘어가면 압축기 및 공조시스템에 치명적인 충격을 줄 수 있으므로 본 논문에서는 120°C까지만 해석하였다.

따라서 경계조건은 Fig. 16과 같이 정하였다. 또한, 압축기시험에서 주변온도를 22°C로 정하는 것이 일반적이다.

열해석에서는 주로 온도분포와 열변형을 비교해 보았다. 우선 스틸 주축과 사판의 온도분포는 Fig. 17과 같다. 대략 111~120°C에서 분포되어있고 역시 회전축인 주축에서 높은 온도를 나타내고 있다. 이외에도 압축시에 힘을 받는 피스톤 끝단 코너부분의 온도가 최고치였다. 이는 압축시에 대부분의 일을 하는 부위이고 일이 고열로 전환되기 때문이다.

스틸 주축과 사판의 열변형을 Fig. 18에 나타냈다. 최대 열변형은 0.32 mm이고 최소 열변형은 0~0.03 mm로 나타났다. 최대변형된 부위는 역시 피스톤의 끝단부에서 나타났다. 이 부위는 압축시키는 기체와 직접 맞닿기 때문에 압력으로 인하여 변형이 일어날 수밖에 없다. 하지만 피스톤 총길이 70 mm 이상인 상황에서 최대변형량 0.32는 허용할 수 있는 범위이다.

스틸 주축과 알루미늄 사판의 온도분포와 열변형량을 Fig. 19과 Fig. 20에 나타냈다. 온도는 115~120°C에서 분포되어있고 피스톤 전반에도 온도가 상승한 것을 알 수 있다. 이는 알루미늄 소재의 열전도도가 스틸에 비하여 5배 정도이므로 온도의 변화가 큰 것으로 보인다. 다만 열변형으로 보았을 때 최대치는 0.17 mm이고 최소는 0~0.02 mm로 나타났다. 스틸구조의 절반가량수준이므로 이또한 허용범위내에 있다. 참고로 최대 변형부위는 스틸 사판과 똑같이 피스톤 끝단부에서 나타났다.

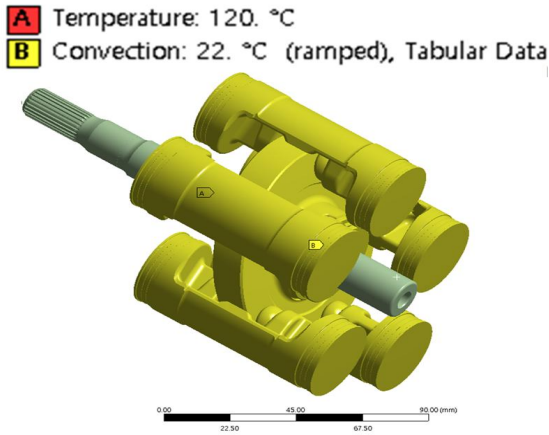


Fig. 16 Boundary conditions of thermal analysis

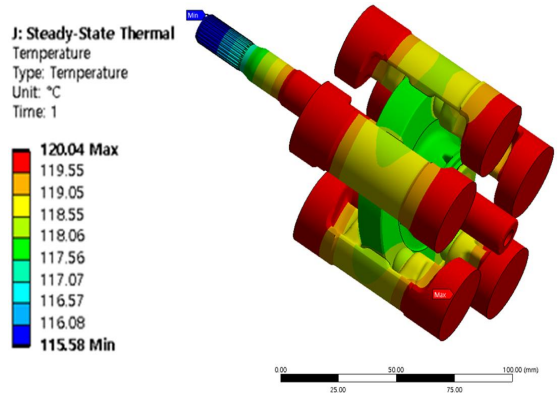


Fig. 19 Temperature of steel shaft and aluminum swash plate

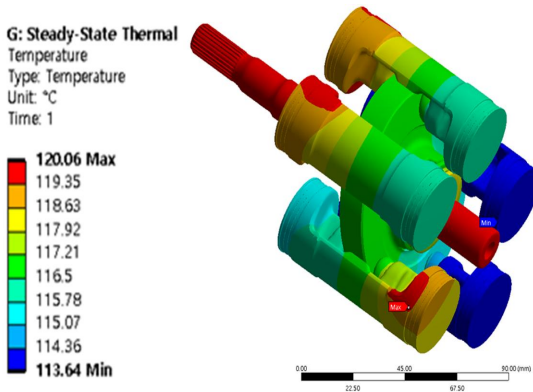


Fig. 17 Temperature of steel shaft and swash plate

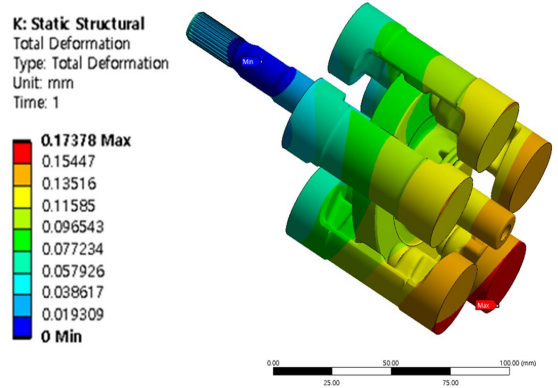


Fig. 20 Thermal deformation of steel shaft and aluminum swash plate

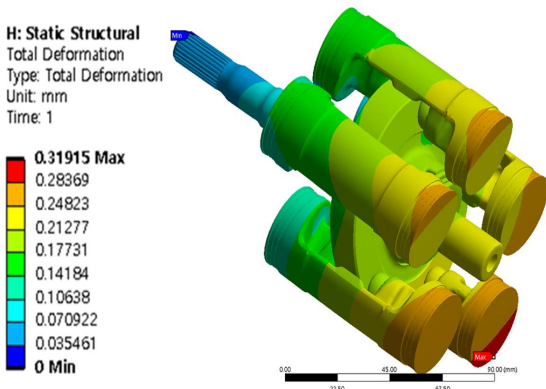


Fig. 18 Thermal deformation of steel shaft and swash plate

Table 6 Comparison of static analysis

Samples	Deformation (mm)	Stress (MPa)	Elastic strain (mm)	Safety factor
SA1	0.004	38	0.0003	5.8
SA2	0.006	38	0.0006	7

Table 7 Comparison of thermal analysis

Samples	Temperature min (°C)	Thermal deformation (mm)
SA1	113	0.32
SA2	115	0.17

4. 결 론

본 논문에서는 압축기의 무게를 감소시켜 연비효율을 향상시키기 위하여 스틸구조의 사판을 알루미늄으로 변경해보았다. 또한, 이러한 변경이 실제 응용하였을 때 가능한지에 대하여 3D 모델링을 통한 구조해석을 진행하였다. 주로 정적분석과 열분석을 통해 비교하였다. 결과적으로는 두 재질은 큰 차이가 없었고 무게는 절반이상 줄임으로써 결론은 다음과 같이 만족스러웠다.

1. 정적분석 결과 SA1은 스틸 주축+스틸 사판의 조합이고 SA2는 스틸 주축+알루미늄 사판의 조합이다. 변형량, 응력, 탄성변형, 안전율 등에서 거의 비슷하게 나타났다. 특히 안전율은 1.2이상 더 높아 사용하기에는 큰 문제가 없어 보인다.
2. 열분석 결과 온도분포는 최소 113℃와 115℃이고 열변형량은 0.32와 0.17로써 SA2는 SA1의 절반 수준이다. 무게도 줄었으며 열분석 결과도 좋게 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 선도연구센터 기초연구사업(과제번호: NRF-2019R1A5A808320112)의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

1. Qin, Z., Wu, Y. T., Eizad, A., Lee, K. H. and Lyu, S. K., "Design and evaluation of two-stage planetary gearbox for special-purpose industrial machinery", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, No. 12, pp. 5943-5950, 2019.
2. Qin, Z., Wu, Y. T. and Lyu, S. K., "A Review of Recent Advances in Design Optimization of Gearbox", Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 19, No. 11, pp. 1753-1762, 2018.
3. Qin, Z., Zhang, Q., Wu, Y.T., Eizad, A. and Lyu, S. K., "Experimentally Validated Geometry Modification Simulation for Improving Noise Performance of CVT Gearbox for Vehicles", Int. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 20, No. 11, pp. 1969-1977, 2019.
4. Qin, Z., Son, H. I. and Lyu, S. K., "Design of anti-vibration mounting for 140A class alternator for vehicles", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 32, No. 11, pp. 5233-5239, 2018.
5. Bishop, I. N., "Effect of design Variables on Friction and Economy", SAE transactions, Vol. 73, pp. 812, 1964.
6. Heywood, John. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, New York : McGraw-Hill, pp. 712-745, 1988.