

순차적 반응표면법을 이용한 상용 트럭 아마추어 코어 경량화 설계

이현택¹ · 김호경² · 박상준³ · 정영구⁴ · 홍석무^{5, #}

Light Weight Design of the Commercial Truck Armature Core using the Sequential Response Surface Method

H. T. Lee, H. G. Kim, S. J. Park, Y. G. Jung, S. M. Hong

(Received December 21, 2022 / Revised January 5, 2023 / Accepted January 5, 2023)

Abstract

The armature core is a part responsible for the skeleton of the steering wheel. Currently, in the case of commercial trucks, the main parts of the parts are manufactured separately and then the product is produced through welding. In the case of this production method, quality and cost problems of the welded parts occur, and an integrated armature core made of magnesium alloy is used in passenger vehicles. However, in the case of commercial trucks, there is no application case and research is insufficient. Therefore, this study aims to develop an all-in-one armature core that simultaneously applies a magnesium alloy material and a die casting method to reduce the weight and improve the quality of the existing steel armature core. The product was modeled based on the shape of a commercial product, and finite element analysis (FEA) was performed through Ls-dyna, a general-purpose analysis program. Through digital image correlation (DIC) and uniaxial tensile test, the accurate physical properties of the material were obtained and applied to the analysis. A total of four types of compression were applied by changing the angle and ground contact area of the product according to the actual reliability test conditions. analysis was carried out. As a result of FEA, it was confirmed that damage occurred in the spoke area, and spoke thickness (t_{spoke}), base thickness (t_{base}), and rim and spoke connection (R) were designated as design variables, and the total weight and maximum equivalent stress occurring in the armature core We specify an objective function that simultaneously minimizes . A prediction function was derived using the sequential response surface method to identify design variables that minimized the objective function, and it was confirmed that it was improved by 22%.

Keywords: Steering Wheel, Armature Core, Magnesium Alloy, Digital Image Correlation, Finite Element Analysis

1. 서 론

조향 장치는 차량 주행에 있어 가장 중요한 부품이다. 또한, 차량 사고 발생 시, 운전자와 가장

먼저 접촉하기 때문에 적절한 변형과 에너지를 흡수하여 운전자에게 가해지는 충격을 줄이는 설계가 매우 중요하다. 그 중 아마추어 코어는 스티어링 휠의 뼈대를 담당하는 부품으로, 스티어링 휠의 성능에 있어 가장 큰 영향을 미치는 부품이다. 아마추어 코어는 Fig. 1과 같고 중앙부 다른 주요 부품과 연결되는 베이스(base), 아마추어 코어의 외곽 형상으로 전체적인 틀을 잡아주는 림(rim), 베이스와 림을 연결해주는 스포크(spoke) 및 조향 컬럼과 연결되는 허브(hub)로 나눌 수 있다.

1. 공주대학교 미래융합공학과, 석사과정
2. 주식회사 케이디 기술연구소, 이사
3. 주식회사 케이디 기술연구소, 차장
4. ㈜공감공학, 대표이사
5. 공주대학교 미래자동차공학과, 교수

Corresponding Author: Department of Future Automotive Engineering
Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr
ORCID: 0000-0001-5569-6285;

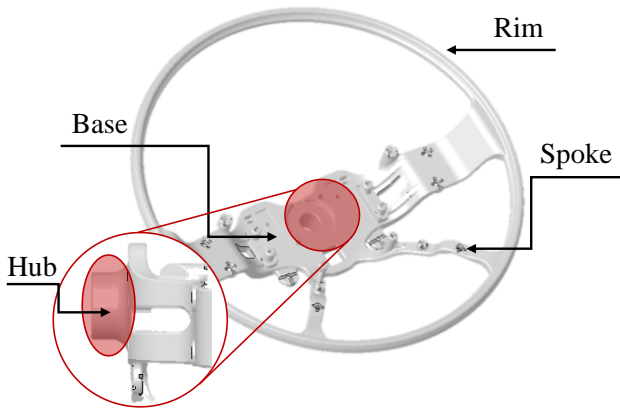


Fig. 1 Armature core

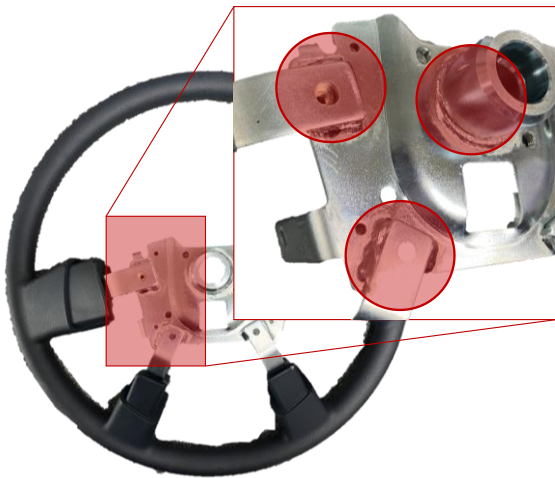


Fig. 2 Commercial truck steering wheel

기존 사양의 상용 트럭의 경우 Fig. 2와 같이 주요 부품을 따로 제작하여 용접하는 방식으로 스티어링 휠을 생산하고 있다. 하지만, 용접을 사용할 경우 진동 감쇠 능력이 부족하고 비용이 증가할 뿐 아니라 해당 부위의 품질 검사가 쉽지 않다. 때문에 이를 극복하기 위해 용접부를 최소화하려 노력하고 있다[1~2]. 이러한 문제를 극복하고자 승용 차량의 경우 마그네슘 합금 소재를 적용한 일체형 아마추어 코어를 사용 중이다. 마그네슘 합금은 철의 1/5, 알루미늄의 2/3 수준의 밀도를 가지고 있는 가장 가벼운 경금속으로 에너지 흡수성 및 NVH(noise, vibration and harshness) 성능이 뛰어나다. 또한, 다이캐스팅(die casting) 공법을 통해 복잡한 형상을 제작할 수 있다는 장점이 있다[3]. 현재 자동차 산업에서는 강성을 유지하며 무게를 절감하는 경량화 연구에 초점을 맞추고 있으며[4~5], 이 가운데 마그네슘

합금은 기존 소재를 대체할 새로운 소재로 각광받고 있고, 많은 부품에 적용되고 있다[6~7]. 하지만 아직까지 상용 트럭 아마추어 코어에 적용된 사례가 없으며, 연구 또한, 미흡하다. 때문에 본 연구에서는 경량화 및 품질 개선을 위해 마그네슘 합금과 다이 캐스팅 공법을 동시에 적용한 일체형 아마추어 코어 개발을 목적으로 한다. 또한, Table 1에 실제 신뢰성 검사 기준을 나타냈으며, 일체형 아마추어 코어에 맞게 목록을 수정하여 유한요소해석(finite element analysis, FEA)을 진행하였고, 이 결과를 바탕으로 설계 변수를 지정하였으며, 반응표면법을 이용하여 예측 모델을 도출하여 지정한 목적 함수가 최소가 되는 설계 변수 값을 도출하였다. 이를 통해 개발 기간 불필요하게 사용되는 비용을 절감하고자 한다.

Table 1 Test specification

Test list	Inspection criteria
Impact drop	1. There should be no damage when a 10kg weight dropped vertically from the weak part of the RIM and the SPOKE-RIM WELDING part from 1.5m.
Static bending	1. When a load of 40kgf is applied, the permanent deformation must be within 1mm. 2. When a load of 100kgf is applied, it will not be destroyed.
Static torsional	1. When a load of 24kgf is applied, the deformation amount must be less than 6mm and the permanent deformation amount must be less than 0.7mm. 2. When a load of 100kgf is applied, it will not be destroyed.
Compressive stiffness	1. When a load of 100kgf is applied, the deformation amount must be less than 5.8mm and the permanent deformation amount must be less than 1.3mm. 2. When a load of 200kgf is applied, it will not be destroyed.
30-degree slope load	1. When a load of 200kgf is applied, it will not be destroyed.

2. 본 론

2.1 기계적 성질

마그네슘 합금의 밀도는 1.74 g/cm^3 으로 Fig.3와 같이 철의 1/5, 경량화 소재로 알려진 알루미늄의 2/3 수준이다[8]. 또한, 마그네슘 합금은 금속 소재 중에서도 비강도, 비강성, 주조성, 진동감쇠능력 등 기계적 특성이 우수하여 자동차 산업뿐만 아니라 항공기, 조선, 철도, 스포츠 용품 등 다양한 산업에서 활용되고 있다[9]. AM50은 마그네슘 합금 소재로 경량화 및 에너지 흡수 성능이 뛰어나다. 하지만, 소재의 정확한 물성을 확인할 수 없다. 해석 결과의 정확도를 높이기 위해 기계적 물성을 구하는 것이 필수적이다. 하여, DIC기법을 활용하여 정확한 물성을 확보하였다[10]. 실제 제품에서 직접 시편을 추출할 수 없어, 별도 시편을 제작하여 시험을 진행하였다. 시편은 KS B 0801에 따라 제작하였으며, 인장 시편의 자세한 치수를 Fig.4 (a)에 도시하였다. 인장 시험을 통하여 추출한 물성을 적용함으로써, 유한요소 해석 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다.

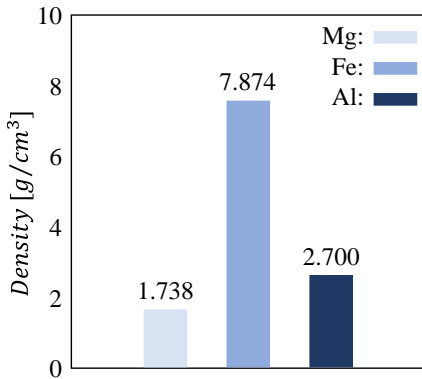


Fig. 3 (a) Specifications of tensile test specimens

2.1.1 DIC (Digital Image Correlation)

DIC기법은 시편에 불규칙한 패턴을 생성하여, 변형 전/후 이미지를 비교하고 시편의 전체 영역을 계산하는 기법이다. 기존 시편에 두 점을 표시하여 연신계를 이용한 변형률 측정법에 비해 변형 방향 별 변형률, 국부 변형률 등의 세부 내용을 얻을 수 있다. 또한, 실시간 촬영으로 변형 경로, 네킹(necking) 발생지점이 확인 가능하며, 파단 직전의 변형률 예측이 가능하다.

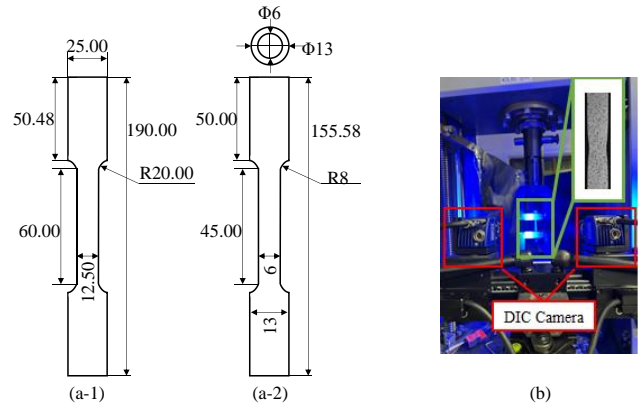


Fig. 4 Specimen drawing and tensile test setting
(a-1) Flat type and (a-2) Round type
(b) Tensile test and DIC setting

2.1.2 인장 시험

마그네슘 합금 AM50의 항복강도(yield strength), 최대 인장강도(ultimate Tensile Strength, UTS) 및 연신율(elongation) 등의 기계적 특성을 확인하기 위해 Fig.4 (a)에 도시한 시편을 사용하여 단축인장시험을 진행했다. 인장시험은 5mm/min의 속도로 진행하였고, 인장시험과 동시에 DIC 기법을 이용하여 실시간으로 변형률을 측정했다. Fig.4 (b)와 같이 시험 전 준비를 하여 인장 시험을 진행하였다. 또한, 시험 setting 정보를 Table 2에 나타냈다. 또한, 이를 통해 AM50의 정확한 물성을 확보하였고, 유한요소해석에 적용하여 해석을 진행하였다. Table 3에 인장시험을 통해 획득한 기계적 특성을 나타냈다. 항복강도는 σ_y , 연신율은 EL , 최대 인장 강도는 σ_{UTS} 로 나타냈다.

Table 2 Test information

Equipment	Shimadzu(50kN)
Test (Speed)	Uniaxial Tensile (5mm/min)
Material	AM50
DIC Sensor	GOM ARAMIS 6M (1Hz)

Table 3 Mechanical properties

σ_y [MPa]	139.0
EL [-]	0.1362
σ_{UTS} [MPa]	231.7

2.2.1 모델링 및 해석 조건

범용 모델링 프로그램을 사용하여 실제 사용 트럭 아마추어 코어를 모사해 모델링하였다. 기존 제품과 동일하게 4-spoke 형상으로 모델링을 하였고, Fig. 5에 유한요소해석에 사용한 모델을 도시하였다. 앞서 진행한 인장 시험을 통해 얻은 마그네슘 합금 소재를 적용했다.

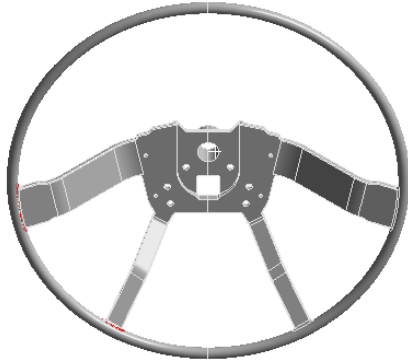


Fig. 5 Analysis applied armature core model

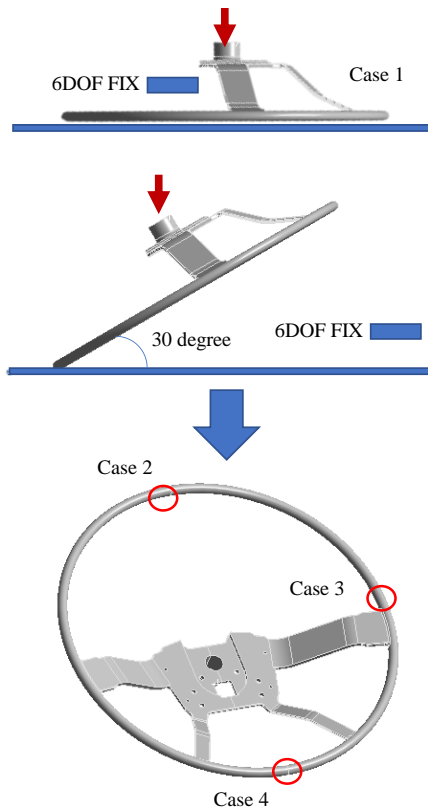


Fig. 6 Boundary conditions (Case 1~4)

2.2.2 유한요소해석

본 연구에서는 범용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS 2021 R1 을 사용하여 해석을 진행했다. 실제 신뢰성 검사 항목 중 형상과 소재를 고려하여 총 4 가지 해석을 진행하였다. 이때, 경계조건은 Fig. 6 와 같이 설정하였다. Case 1 은 아마추어 코어의 전면부가 모두 평면에 닿아 있는 경우를 가정하고 해석을 진행하였고, Case 2~4 는 각 12, 3, 6 시 방향만 평면에 닿았다고 가정하여 해석을 진행하였다. 또한, 모든 Case 에서 동일하게 평면과 수직인 방향으로 허브에 하중을 부여하였다. 하중의 크기는 2000N 으로 지정하였고, 제품의 파손 여부에 대해 판단하였다. Mesh 의 크기 및 요소, 노드 수는 Table 4 에 나타났다.

Table 4 Mesh setting

Sizing	Method	Nodes	Elements
6mm	Tetrahedrons	40391	20939

2.2.3 FEA 결과

앞서 진행한 압축해석을 통해 각 해석에서 등가 응력을 도출했다. 이에 대한 결과를 Fig.7 에 도시하였고, 각 Case 별로 218.87, 231.22, 146.24, 266.36MPa 의 최대 등가 응력이 발생함을 확인했다. 대부분의 FEA 결과에서 하중을 부여한 허브 주변에서 최대 등가 응력이 발생하였지만, Case 4 에서는 기존 용접 부였던 스포크와 림의 연결 부위에서 최대 인장 강도 (σ_{UTS}) 이상의 최대 등가 응력이 발생하였고, 2000N 하중에서 파손이 없어야 하는 검사 기준에

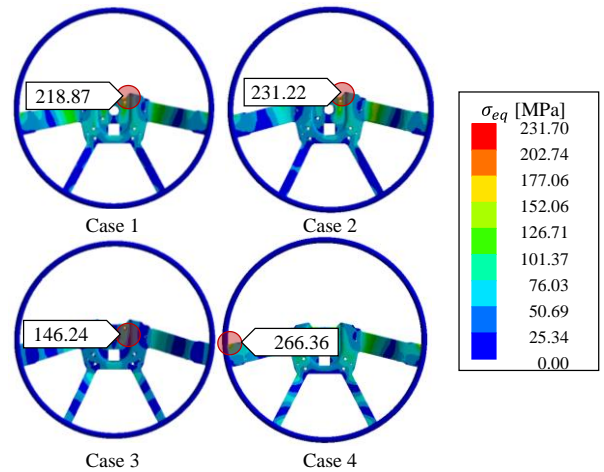


Fig. 7 Analysis result (Case 1~4)

불합하였다. 때문에 Case 4와 같은 경계 조건을 설정하여 아마추어 코어를 재설계하고 스포크와 림의 연결 부위에 발생하는 집중 응력을 분산시키고자 한다.

3. 결과

3.1 실험계획법

실험계획법(design of Experiments, DOE)이란 최소한의 실험을 수행하여, 원하는 목적 함수를 갖는 최적의 설계 변수를 도출하는 최적 설계의 방법 중 하나다. 실험계획법은 요인배치법(factorial design), 반응표면법(response surface method, RSM) 및 다구찌법(taguchi method)으로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 반응표면법을 통해 최적의 설계 변수 값을 도출하였다.

3.1.1 민감도 분석

민감도 분석(sensitivity analysis)이란 각 설계 변수가 목적 함수에 미치는 영향 확인하는 방법으로 각 설계 변수의 영향도는 수치적으로 표면 가능하며, 이를 파레토 차트(pareto chart)로 나타낼 수 있다[11]. 반응표면법을 진행하기전 본 연구에서는 앞서 진행한 FEA 결과를 바탕으로 베이스 두께(t_{base}, X_1), 스포크 두께(t_{spoke}, X_2) 및 림과 스포크의 연결부(R, X_3)를 설계 변수로 지정하였으며, 최종 제품 생산 시, 타제품과 체결에 방해가 되지 않게 하기 위해 각 설계 변수의 범위를 지정하였다. 각 설계 변수를 Fig. 8에 도시하였다. 앞서 진행한 유한요소해석 결과를 바탕으로 최대 응력이 발생한 Case 4와 동일한 구속 조건을 부여하였다. 또한, 아마추어 코어에 발생하는 최대 등가 응력(maximum σ_{eq})과 전체 무게(total mass)를 목적 함수로 설정하여 각 설계 변수가 목적 함수에 미치는 영향을 파악했다. 이때, 두 목적 함수를 동시에 최소화할 수 있는 설계 변수 값을 도출하기 위해 두 목적 함수를 정규화(normalization)하여 나타냈으며, 정규화 방법은 식 (1)과 같다. 이를 통해 얻은 정규화된 최대 등가 응력(normalized maximum σ_{eq}, Y_1), 정규화된 전체 무게(normalized total mass, Y_2) 및 두 결과의 평균(Y_3)을 새로운 목적 함수로 지정하였다. 3가지 요소 2수준으로 총 8번의 유한요소해석 결과를 통해 민감도 분석을 진행하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타냈다. 또한, 민감도 분석을

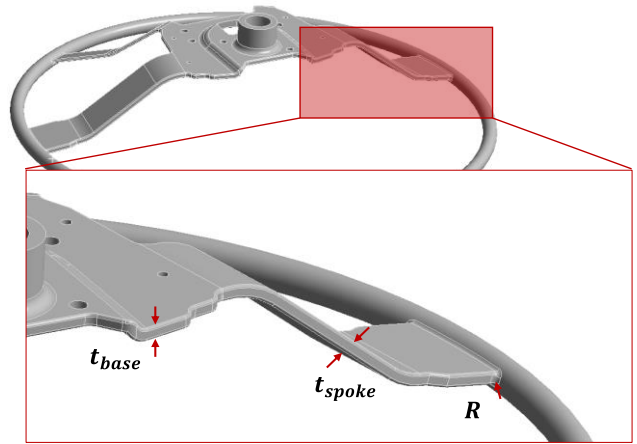


Fig. 8 Design variables

Table 5 Results of FEA

No.	X_1	X_2	X_3	Y(FEA)
1	5	5	2	0.94
2	7	5	2	0.79
3	5	7	2	0.94
4	7	7	2	0.93
5	5	5	4	0.86
6	7	5	4	0.73
7	5	7	4	0.79
8	7	7	4	0.79

$$H = Y_{Max}, L = Y_{Min}$$

$$Y_{normal} = \frac{Y-L}{H-L} (0 < Y_{normal} < 1) \quad (1)$$

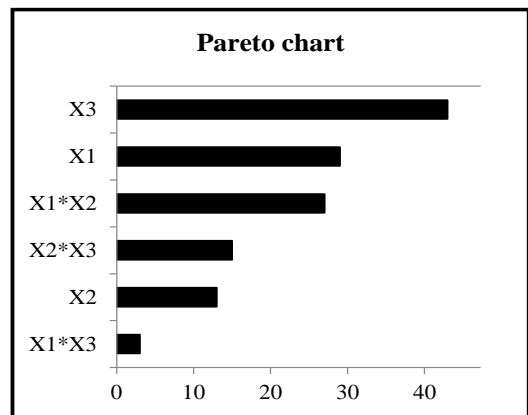


Fig. 9 Pareto chart

통해 얻은 파레토 차트를 Fig. 9 에 나타냈으며, 각 설계 변수의 교호작용을 포함하여 민감도 분석을 진행했다. 그 결과 X_3 이 43%로 목적 함수에 가장 민감하게 영향을 끼치는 것을 확인하였고, X_1 , X_1 와 X_2 의 교호작용 순으로 목적 함수에 대해 민감하게 반응함을 확인했다.

3.1.2 1차 반응표면법

반응표면법이란, 각 설계 변수가 변함에 따라 교호 작용으로 인해 목적 함수에 영향을 주고 있을 때, 설계 변수의 변화가 이루고 있는 반응표면을 예측 함수로 추정하는 통계적 분석 방법이다[12]. 일반적으로 반응표면법은 설계 변수와 목적 함수의 관계가 2 차 곡선 형태를 나타낼 때 사용하며, 중심합성법과 박스-베켄법(Box-Behken)이 있다. 일반적으로 중심합성법이 주로 사용되고 있다. 중심합성법의 경우 1 차항과 2 차항의 추정이 효율적이고 요인배치 실험 후 추가적인 시험을 진행하여, 반응표면을 분석하고 이를 통해 최적 설계 변수를 도출한다. 일반적으로 교호작용이 포함된 예측 함수는 식(2)와 같고 선형 함수인 1 차항 함수와 다르게 비선형 곡선 형태를 갖고 있어, 오차를 최소화할 수 있다. Y 는 예측한 목적 함수, X 는 설계 변수, b 는 회귀 계수, b_0 은 Y 절편을 나타낸다.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

본 연구에서는 앞서 진행한 민감도 분석을 통해 설정한 설계 변수 선정에 대한 타당성을 확인하였고, 이를 통해 반응표면법을 진행했다. Full factorial 로 유한요소해석을 실시하였고, 식 (3)에 반응표면법을 해석을 통해 얻은 예측 함수를 도시했다. 반응표면법을 통해 얻은 예측 함수의 타당성을 확인하고자 조정된 결정계수(adjusted coefficient of determination, R_{adj}^2)를 사용했다[13]. 조정된 결정계수는 1에서 0까지의 수로 표현이 되며, 1에 가까워질수록 예측 함수의 결과가 유효함을 뜻한다. 본 연구에서 도출한 예측 함수의 조정된 결정계수는 $R_{adj}^2 = 0.98$ 이며, 해당 함수의 유효성을 검증했다.

$$Y = 2.040879 - 0.24682X_1 - 0.12641X_2 + 0.038434X_3 - 0.00014X_1^2 - 0.00014X_2^2 - 0.00014X_3^2 + 0.03375X_1X_2 + 0.00375X_1X_3 - 0.01875X_2X_3 \quad (3)$$

식 (3)을 통해 각 설계 변수의 범위 내 최소화 해를 찾으면 $X_1 = 7, X_2 = 5, X_3 = 4$ 으로 기존 모델과 비교한 결과를 Table 6에 나타냈다. 기존 대비 21% 개선됨을 확인했지만, 반응표면법을 통해 도출한 설계 변수 값이 모두 범위의 경계에 있기 때문에 국부 최소해에 근접할 가능성이 있다[14]. 그러므로 앞서 진행한 결과를 바탕으로 범위를 수정하여 다시 반응표면법을 진행했다.

Table 6 Results of 1st RSM

	X_1	X_2	X_3	Y(FEA)	Y(RSM)
Origin	5	5	2	0.94	0.94
1 st RSM	7	5	4	0.74	0.73

3.1.3 2차 반응표면법

앞서 반응표면법으로 도출한 설계 변수의 범위를 조정하여 다시 한번 반응표면법을 진행했다. 이를 통해 식(4)와 같은 식을 도출했다. 또한, 해당 예측 함수의 조정된 결정계수는 $R_{adj}^2 = 0.97$ 로 유효성을 검증했다. 해당 식을 통해 얻은 설계 변수의 최소화해는 $X_1 = 6.51, X_2 = 5.23, X_3 = 3.76$ 와 같으며, Fig. 9에 해당 결과를 도시하였고, 1차 반응표면법의 결과와 비교하여 Table 7에 나타냈다. 목적 함수의 차이가 미세하긴 하지만, 1차 반응표면법과 달리 최소화해가 범위 내의 값으로 정해지므로 국부 최소화해를 도출했다고 판단했다. 이로 인해 기존 대비 22% 개선됨을 확인했다.

$$Y = 1.7863 - 0.318725X_1 + 0.291068X_2 - 0.428343X_3 + 0.128015X_1^2 + 0.128015X_2^2 + 0.128015X_3^2 - 0.223393X_1X_2 - 0.044241X_1X_3 - 0.047414X_2X_3 \quad (4)$$

4. 결론

본 연구에서는 마그네슘 합금과 다이 캐스팅을 동시에 적용한 일체형 경량화 아마추어 코어의 강성 확보를 위해, 스포크 두께(t_{spoke} , X_1), 베이스 두께(t_{base} , X_2), 림과 스포크 연결부(R , X_3)를 설계 변수로 지정하였고, 전체 무게와 최대 등가 응력을 동시에 최소화시키는 목적 함수를 지정했다. 1차 반응

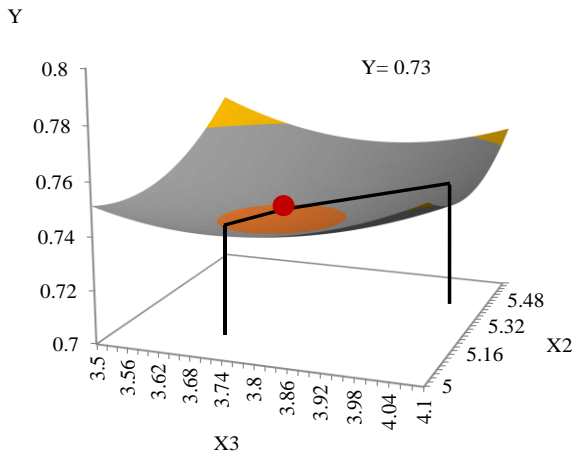


Fig. 9 3D graph of RSM

Table 7 Results of 2nd RSM

	X_1	X_2	X_3	Y(FEA)	Y(RSM)
Origin	5	5	2	0.94	0.94
1 st RSM	7	5	4	0.74	0.73
2 nd RSM	6.51	5.23	3.76	0.73	0.73

표면법을 통해 예측 함수를 도출하여 각 설계 변수 $X_1 = 7, X_2 = 5, X_3 = 4$ 일 때, 20% 개선됨을 확인하였고, 2차 반응표면법을 실시했다. 이를 통해 $X_1 = 6.51, X_2 = 5.23, X_3 = 3.76$ 일 때, 약 22% 개선됨을 확인했다.

후 기

본 과제(결과물)는 2022 년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역 혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-004)

REFERENCES

[1] J. Y. Kim, H. K. Kim, 2019, Fatigue Strength of Adhesive Bonded Self-Piercing Riveted Joints of Dissimilar Metals Sheets, J. Kor. Soc. for Urban Railway, Vol. 7, No. 2, pp. 289~295.
<https://doi.org/10.24284/JKOSUR.2019.6.7.2.289>

[2] K. G. Jung, D. O. Kim, E. Y. Jung, S. Y. Park, J. H. Yoon, 2015, Development of Brake Shoe Using Friction Welding Method without Projection Welding Process,

KSAE 2015 Annual Spring Conference, Kor. Soc. Auto. Eng. (eds. K. G. Jung, D. O. Kim, E. Y. Jung, S. Y. Park, J. H. Yoon), KSAS, Korea, Seoul, p. 930.

[3] S. K. Kim, C. W. Jang, J. H. Lee, C. H. Jung, Y. G. Seo, C. G. Kang, 2006, A Study on the Die-casting Process of AM50 Magnesium Alloy, Kor. J. Mater. Res. Vol. 16, No. 8, pp. 519~523.
<https://doi.org/10.3740/mrsk.2006.16.8.516>

[4] Jia Zhou, Feng Wang, Xinming Wan, 2015, Optimal Design and Experimental Investigations of Aluminum Sheet for Lightweight of Car Hood, J. Mater. Today, Vol. 2, Issue. 10, Part. A, pp. 587~592.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.10.093>

[5] D. H. Han, S. G. Ha, 2019, Development of Lightweight Composite Sub-frame in Automotive Chassis Parts Considering Structure & NVH Performance, COMPOS RES, Vol. 32, No. 1, pp. 21~28.
<https://doi.org/10.7234/composres.2019.32.1.021>

[6] D. H. Jang, 2011, Process Development for Automotive Hybrid Hood using Magnesium Alloy AZ31B Sheet, Trans. Mater. Process. Vol. 20, No. 2, pp. 160~166.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2011.20.2.160>

[7] C. W. Park, H. Y. Kim, 2012, Analysis of Tube Extrusion Process Conditions Using Mg Alloy for Automotive Parts, KSME-A, Vol. 36, No. 12, pp. 1675~1682.
<http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.12.1675>

[8] M. C. Kang, Y. S. Keun, 2003, The Trends and Prospects of Magnesium Alloys Consumption for Automotive Parts in Europe, KSAE, pp. 1569~1576.

[9] D. H. Park, Y. H. Tak, S. H. Um, J. J. Yun, C. W. Lee, 2013, Car Body Forming Technology using Magnesium Alloy Sheet, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf, pp. 239~240.

[10] O. H. Kwon, J. W. Kang, 2014, An Estimation of Deformation for Composites by DIC, The J. of the Kor. Soc. for Power Syst. Eng. Vol. 18, No. 4, pp. 78~84.
<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2014.18.4.078>

[11] B. J. Gu, S. M. Hong, 2019, Numerical Approach to Optimize Piercing Punch and Die Shape in Hub Clutch Product, KAIS, Vol. 20, No. 9, pp 517~524.
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.9.517>

[12] Wei-Xin Ren, Hua-Bing Chen, 2010, Finite element model updating in structural dynamics by using the

- response surface method, Eng. Struct., Vol. 32, Issue. 8, pp 2455~2465.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.04.019>
- [13] Masoumeh Siyar, Mostafa Lashkarbolooki, 2022, Evaluation of the interfacial tension of binary surfactant mixtures and crude oil using the response surface method, J. Molecular Liquids, Vol. 366, 120253.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120253>
- [14] T. H. Ryu, J. H. Yoo, 2009, Multi-Objective Geometric Optimal Design of a Linear Induction Motor Using Design of Experiments and the Sequential Response Surface Method, KSME., Vol. 33, No. 8, pp. 726~732.
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2009.33.8.726>