



반응표면법을 이용한 상용 수소 전기 대형 트럭 배터리 캐리어 경량화 모델 설계의 제안

황순재^a, 오민성^b, 설우철^c, 유문규^c, 정영구^d, 홍석무^{b,e,*}**Design of a Lightweight Model for the Battery Carrier of a Commercial Large Electric Truck Using the Response Surface Method**Soon Jae Hwang^a, Min Seong Oh^b, Ou Chul Sul^c, Mun Gyu Yoo^c, Young Gu Chung^d, Seok moo Hong^{b,e,*}^a Department of Future Convergence Engineering, Kongju National University^b Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University^c Wonhyo Co.^d Gonggam Gonghak Co. Ltd.^e Institute of Green Car Technology**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	28	August	2023
Revised	3	October	2023
Accepted	6	October	2023

Keywords:

Design variable
Equivalent stress
Finite element analysis
Battery carrier
Weight reduction

ABSTRACT

This study optimized the shape of the battery carrier to reduce weight in response to the increasing battery capacity required for commercial hydrogen electric heavy trucks. The Response Surface Method (RSM) was utilized to optimize the frame design while maintaining the same stress level as the conventional frame model. An optimal design was realized by substitute the material of battery frame from steel to aluminum and in addition reinforcing it with glass fiber sheet molding compounds (GF-SMC). Four design variables were identified to adjust the frame thickness to reduce the frame weight. The objective function was set as minimizing the weight of the battery carrier while maintaining stress levels equivalent to the conventional frame model using steel. The predicting accuracy from RSM shows a good result as 98%. Consequently, the proposed model achieved a weight reduction of 29.7% compared to the conventional model at the same stress level.

1. 서론

최근 탄소 배출 규제에 대응하기 위하여 기존 내연기관 차를 대체하기 위한 친환경차의 보급이 확대되고 있으며, 국내외 주요 기관은 자동차 시장에서 친환경 차량의 점유율이 점차 높아질 것으로 보고 있다. 이에 따라 많은 기업과 정부는 수소전기차 기술 발전을 위해 노력하고 있으며, 수소 연료전지와 함께 사용되는 배터리 관련 기술들 또한 크게 주목받고 있다^[1,2]. 수소 전기 차량의 성능 증가로 인해 주행거리가 증가하였으며, 주행거리의 증가는

필요로 하는 배터리 용량의 증가를 야기하였다. 이에 따라 배터리 셀을 고정하는 부품인 배터리 캐리어에 가해지는 하중 또한 높아지고 있으며, 높아진 하중을 견디기 위해 배터리 캐리어의 소재 변경 및 두께 증가 등의 개선을 진행하였다, 하지만 너무 과도한 개선은 오히려 중량을 증가시키는 역효과를 발생시킨다^[3]. 선행 연구에서 Lee 등은 배터리 캐리어를 탄소섬유 복합 소재로 변경하여 중량 감소 및 안정성 증가를 연구하였으며^[4], Kim 등은 각 생산 단계 별로 내구 및 환경온도 등에 대한 성능 검증 및 평가를 통하여 원가와 양산성이 고려된 보완설계 모델의 개발 방향성을

* Corresponding author. Tel.: +82-41-521-9268

E-mail address: smhong@kongju.ac.kr (Seok moo Hong).

제시하였다^[5]. 앞선 연구 들에서는 상용되고 있는 제품 형상을 변형 없이 소재 변경 및 측정만을 진행하여 배터리 캐리어의 개선 방향성을 제시하였지만 형상의 변형과 복합 적용을 통해 더 개선할 여지가 있다고 예측하였다. 따라서, 본 연구에서는 반응표면법을 이용한 배터리 캐리어의 경량화 및 개선 전 모델의 응력수준을 만족하는 최적설계안을 제안하였다. 최적설계 시, 기존 steel 재질로 이루어진 배터리 캐리어의 배터리 프레임에서 발생하는 최대 응력을 기준으로 개선 시 동일한 파트에서 발생하는 최대 응력 값이 동등 응력 수준이 되는 것을 목적 함수로 설정했다. 또한 단면의 변경 가능한 두께를 설계 변수로 지정하여 개선을 진행하였다. 반응표면법을 통해 앞서 설정한 설계 변수와 목적 함수 간의 수학적 관계식을 도출하고, 이를 통해 경량화와 목표 응력 수치를

만족하는 배터리 캐리어 모델을 설계하였다.

2. 본 론

2.1 해석 조건 및 기계적 물성

해석에 사용할 모델은 ANSYS 내부 3D 모델링 프로그램인 SpaceClaim 2021 R1을 통해 모델링 하였다. 실제 사용되는 배터리 캐리어의 기존 모델은 여러 프레임이 볼트로 체결 되어있는 형상이다. 하지만 본 연구에서는 유한요소해석을 진행할 때 해석의 용이함을 위해 Fig. 2와 같이 체결 볼트 삭제 후 홀을 제거하여 단순화를 진행하였다. 기존 프레임에 체결 되어있던 배터리 모듈의 하중을 나타내기 위해 Fig. 2와 같이 point mass를 적용하였으며, 각각의 point에 230 kg의 중량을 부여하였다. 추가적으로 -y방향으로 중력을 적용했다. 해석 시 배터리 캐리어에 적용하는 물성은 Table 1에 기재하였다. 배터리 프레임은 기존 steel 재질의 모델에서는 SAPH440를 적용하였으며, 경량화를 위해 변경한 aluminum 소재로는 Al6082를 적용하였다.

2.2 배터리 캐리어 소재 변경

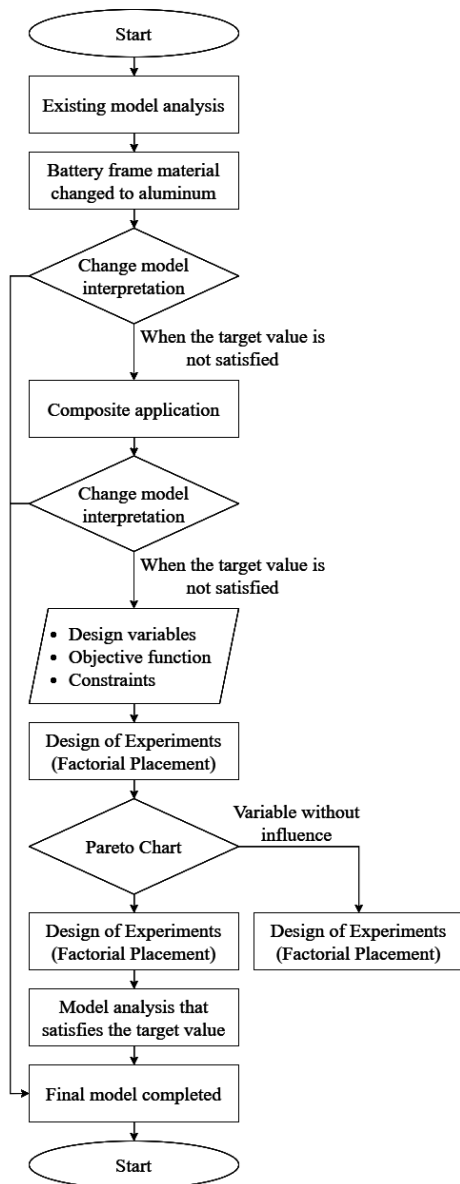


Fig. 1 Battery frame weight reduction improvement flow chart

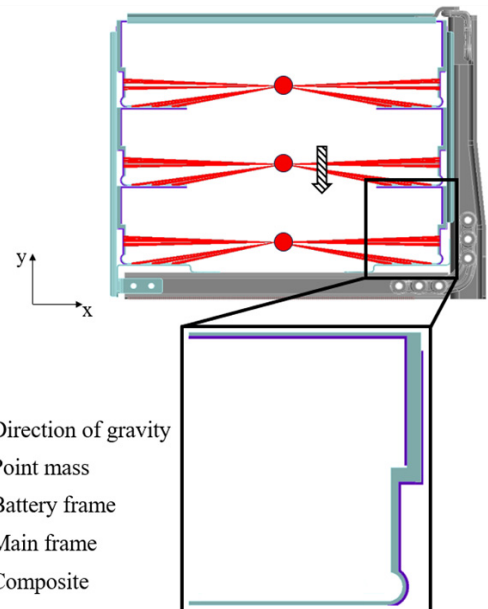


Fig. 2 Battery carrier modeling

Table 1 Mechanical properties

Material properties	SAPH440	SPGH590	Al 6082	GF-SMC
Density [kg/m ³]	7,850	7,850	2,700	1,440
Young's modulus [MPa]	206,800	215,000	70,000	7,790
Poisson's ratio	0.29	0.29	0.33	0.3

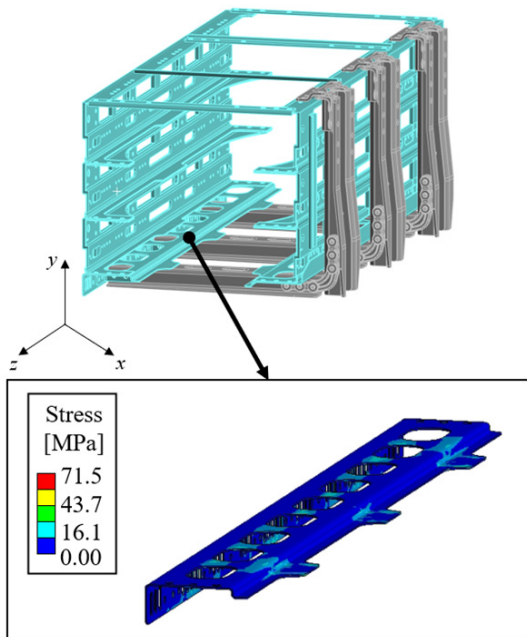


Fig. 3 Battery carrier stress analysis result - material change

Table 2 Battery carrier stress analysis result - material change

Battery frame material	Maximum stress [MPa]	Mass [kg]
Steel	54.9	240.4
Aluminum	71.5	152.3

Table 3 Battery carrier stress analysis result - material change

	Maximum stress [MPa]
Aluminum material application model	55.1
Aluminum material and composite material application model	55.0

본 연구에서는 범용 유한 소프트웨어인 ANSYS 2021 R1을 사용하였다. 복합재를 적용한 배터리 캐리어의 경량화 모델 개발에 앞서, 기존 모듈을 해석적으로 확인하여 비교 값의 기준을 수립하기 위한 해석을 수행하였다. 메인 프레임은 제외한 배터리 프레임에서 발생한 최대 응력 값으로 비교를 진행하였고 기존 steel 재질의 모델의 배터리 프레임에서 최대 54.9 MPa이 발생하였다. 동일한 모델에서 경량화를 위해 steel에서 aluminum으로 소재 변경을 진행한 뒤 유한 요소 해석을 진행하였다. 해석 결과는 Fig. 3과 Table 2에 나타내었다. 하중은 기존 240.4 kg에서 152.3 kg으로 36.7% 경량화가 진행되었지만, 최대 응력은 71.5 MPa이 발생하여 30.2% 증가하였다. 응력 수준의 안전함 기준을 기존 모델의 최대 응력 이하로 지정한 뒤 비교를 진행하였다. 배터리 프레임의 소재를 aluminum으로 변경 시 경량화는 성공하였으나 응력 수준이 기준점에 도달하지 못하였다. 따라서 응력 수준을 기존 응력 수준에 만족하기 위해 복합재를 사용하여 응력 보강을 진행하였다.

Aluminum을 소재로 이루어진 배터리 캐리어 모델에 복합재를

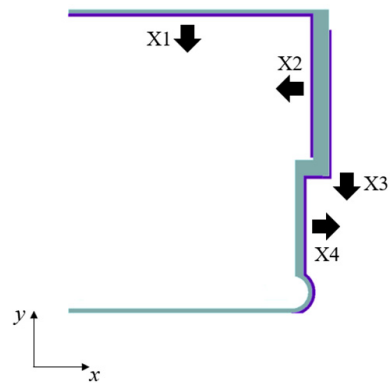


Fig. 4 Design variable - the thickness change direction of the battery frame

Table 4 Objective function and design variable ranges

	Thickness [mm] Design variables	X1, X2, X3, X4
Objective functions	$54.9 \geq F(x) = \text{Equivalent stress [MPa]}$	Y1
Design variables range	Thickness [mm]	$2.8 < X1 < 4.90$
		$2.8 < X2 < 13.9$
		$2.8 < X3 < 16.9$

적용하여 동일한 조건으로 유한요소 해석을 진행하였으며 그 Table 3에 나타내었다. 최대 응력은 앞선 Fig. 3과 동일한 위치에서 55 Mpa이 발생함을 알 수 있었다. 이는 기존 복합재를 적용하지 않은 aluminum 소재 배터리 프레임에 비해 응력이 23.0% 개선된 값이다. 하지만 여전히 steel 소재로 이루어진 배터리 캐리어에서 발생하는 응력 수준에 못 미쳤고 따라서 배터리 프레임의 두께 변경을 통해 추가적인 개선을 진행하였다.

2.3 파라미터 설정

민감도 분석(sensitivity analysis)이란 설정한 설계 변수들의 변화가 목적 함수에 끼치는 영향을 파악하고자 할 때 사용된다^[6]. 설계 변수의 영향도는 수치상으로 표현할 수 있으며 파레토 차트(Pareto chart)로 나타낼 수 있다. 이는 각 변수의 수치가 클수록 목적함수에 끼치는 영향이 크다는 것을 뜻한다^[7]. 기존 steel 재질 배터리 캐리어의 배터리 프레임에서 발생하는 최대 응력과 동일하거나 낮은 수치의 최대 응력을 목적 함수로 응력을 최소화하는 설계변수를 판별하였다. 설계변수는 Fig. 2와 동일한 단면에서 Fig. 4 방향으로 두께 변형이 가능한 요소 4개(X1, 2, 3, 4)를 지정하였다. 이때 설계 변수는 각 설계 변수의 범위에 따라 Table 4와 같이 변형이 가능한 수치만큼 두께를 조절하였다. 설계 변수의 범위는 Fig. 5에 나타내었다. 각 설계 변수가 응력을 변화시키는 정도를 파악하기 위해 4요소 2수준으로 총 16번의 해석을 진행하여 민감도 분석을 시행하였으며 교호작용 또한 포함하여 진행하였다. 이

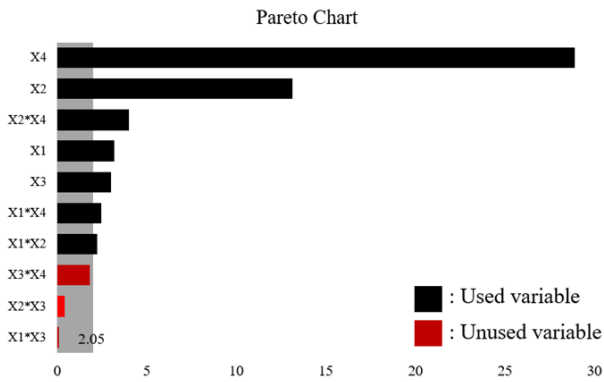


Fig. 5 Sensitivity analysis – Pareto chart

Table 5 Results of FEA

No.	Design Variable = X ₁ , X ₂ , X ₃ , X ₄				Object Y ₁
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
	Al_Th-1 [mm]	Al_Th-2 [mm]	Al_Th-3 [mm]	Al_Th-4 [mm]	Equivalent stress [MPa]
1	2.8	2.8	2.8	2.8	54.955
2	4.9	2.8	2.8	2.8	54.986
3	2.8	13.9	2.8	2.8	54.316
4	4.9	13.9	2.8	2.8	54.375
5	2.8	2.8	16.9	2.8	55.243
6	4.9	2.8	16.9	2.8	55.312
7	2.8	13.9	16.9	2.8	54.664
8	4.9	13.9	16.9	2.8	54.701
9	2.8	2.8	2.8	13.9	56.949
10	4.9	2.8	2.8	13.9	57.652
11	2.8	13.9	2.8	13.9	56.076
12	4.9	13.9	2.8	13.9	56.16
13	2.8	2.8	16.9	13.9	57.015
14	4.9	2.8	16.9	13.9	57.664
15	2.8	13.9	16.9	13.9	56.196
16	4.9	13.9	16.9	13.9	56.276
17	2.8	8.35	9.85	8.35	55.534
18	4.9	8.35	9.85	8.35	55.589
19	3.85	2.8	9.85	8.35	55.862
20	3.85	13.9	9.85	8.35	55.538
21	3.85	8.35	2.8	8.35	55.447
22	3.85	8.35	16.9	8.35	55.716
23	3.85	8.35	9.85	2.8	54.698
24	3.85	8.35	9.85	13.9	56.798
25	3.85	8.35	9.85	8.35	55.468
26	3.85	8.35	9.85	8.35	55.468
27	3.85	8.35	9.85	8.35	55.468
28	3.85	8.35	9.85	8.35	55.468
29	3.85	8.35	9.85	8.35	55.468
30	3.85	8.35	9.85	8.35	55.468
31	3.85	8.35	9.85	8.35	55.468

Table 6 Optimized battery frame thickness

Design variable	X1	X2	X3	X4
Thickness [mm]	2.8	9.6	9.7	5.5

를 통해 얻은 파레토 차트를 Fig. 5에 나타내었다. 분석 결과 설계 변수 X4의 영향이 가장 크게 나타났으며, X1*X3, X2*X3, X3*X4의 변수가 신뢰 구간의 민감도를 만족하지 못함을 확인하였다. 따라서 3종류의 변수만을 제거하고 반응표면법을 진행하였다.

2.4 반응표면법

민감도 분석을 통해 목적함수와 설계 변수들의 함수적인 관련성을 알아내고자 수학적 모형을 가정하는 방법을 회귀 분석 (regression analysis)이라고 한다^[8]. 이러한 회귀 분석을 통해 설정된 설계 변수 범위 내의 목적 함수의 경향을 예측할 수 있다. 반응표면법(response surface method, RSM)은 일반적인 선형 회귀모델보다 더 좋은 반응의 근사치를 만들기 위해 곡선 형태의 회귀모델을 도출해 오차를 줄일 수 있는 회귀분석 방법이다^[9]. 본 연구에서는 앞서 설정한 설계 변수를 각 X1, X2, X3, X4로 나타냈으며 이를 중심합성계획법을 통해 full factorial로 성형해석을 진행했다. 해석 결과를 Table 2에 나타내었으며, 이를 통해 얻은 반응표면법의 회귀 모델 식을 (1)에 나타냈다.

$$Y=54.3138+0.210081(X1)-0.053242(X2)+0.014084(X3)+0.06598(X4)-0.01663(X1*X1)+0.003901(X2*X2)+3.4E-05(X3*X3)+0.005459(X4*X4)-0.012784(X1*X2)+0.014157(X1*X4)-0.004326(X2*X4) \quad (1)$$

결정계수는 98.34%로 회귀식의 일반적인 신뢰성 기준인 97% 이상을 넘었으므로 신뢰도 있는 결과라고 할 수 있다. 결과를 바탕으로 목적함수에 부합하는 설계 변수를 Table 6에 각각 도출하였으며, 앞선 설계 변수를 바탕으로 최적화된 모델을 모델링하였다. 이를 이용해 유한요소해석을 진행하였고 Table 7에 그 결과를 나타내었다. 최적화한 모델의 해석 결과 169.0 kg으로 29.7% 경량화를 만족하면서도 기존 모델 대비 최대응력의 차이가 0.18%로 유사하게 나타났음을 확인하였다. 본 연구를 통해

Table 7 Stress and weight comparison of battery frame materials

Battery carrier materials	Steel	Aluminum	Aluminum + Composite (optimized thickness)
Maximum stress [MPa]	54.9	71.5	55.0
Mass [kg]	240.4	152.3	169.0

기존 모델과 동등한 응력수준에서 경량화까지 진행한 캐리어 모델을 제시하였다.

3. 결론

본 연구에서는 반응표면법을 이용하여 상용 수소 전기 대형 트럭에 사용된 배터리 캐리어의 경량화를 진행하였다. 또한, 기존 steel 재질과 동등한 응력이 나타나도록 보강을 진행하였다. 기존 모델에서 알루미늄과 복합재를 적용하여 경량화에 성공하였으며, 경량화에 따라 부족해지는 응력 수준의 감소는 프레임의 두께 변경을 통해 보강하였다.

1. 재질을 aluminum으로 변경한 결과 36.7% 경량화에는 성공하였으나, 최대 응력이 30.2% 증가하였으므로 응력을 보강하기 위해 복합재를 적용하였다.

2. 각 설계 변수는 X4, X2, X1, X3 순서로 영향도가 높았으며 모두 신뢰 범위를 넘어서는 민감도를 가지기 때문에 변수를 제거하지 않고 반응표면법을 진행하였다.

3. 반응표면법을 통해 결정계수 97.42%를 가지는 두께와 민감도에 관한 방정식을 도출하였다. 이를 통해 최대 응력이 54.5 MPa 이 발생하는 설계 변수값인 X1=2.8 mm, X2=9.6 mm, X3=9.7 mm, X4=5.5 mm를 도출하였다.

4. 최적화된 설계 변수를 배터리 캐리어에 적용하여 동일한 조건으로 유한요소해석을 진행한 결과 29.7% 경량화를 만족하면서도 기존 모델 대비 최대 등가 응력이 0.18% 차이로 유사하게 나타나도록 진행된 것을 확인하였다.

후 기

본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-004).

References

[1] Ministry of Commerce Industry and Energy, 2019, Viewed 8 March 2023, Strategies for the Development of the Future Automobile Industry, <<https://eiec.kdi.re.kr/policy/materialView.do?num=193401&topic=P&pp=20&datecount=&recommend=&pg=1>>.

[2] Ha, S., 2021, Viewed 8 March 2023, Automotive Industry and Policy Changes in the Era of the 4th Industrial Revolution, ETNews <<https://www.etnews.com/20210329000141>>.

[3] Hyundai-kefeco., 2020, Viewed 8 March 2023, Why are Automakers Paying Attention to Vehicle Weight Reduction, <<https://www.hyundai.co.kr/story/CONT0000000000002975>>.

[4] Lee, Y. J., Lee, S. C., 2022, A Study on Electric Vehicle Composite Material Frame Battery Case Using Collision Analysis, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 21:1 15-21, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.01.015>.

[5] Kim, M., Choi, W., Jeong, K., Kim, C., 2023, A Study on Design Process Using CAE of Battery Case, Trans. Korean Soc. Automot. Eng., 31:2 89-97, <https://doi.org/10.7467/KSAE.2023.31.2.89>.

[6] Ku, B. M., Kim, T. H., Park, J. S., 2021, Determination of the Temperature Coefficient of the Constitutive Equation using the Response-Surface Method to Predict the Cutting Force, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 20:10 9-18, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.10.009>.

[7] Lee, H. T., Park, S. H., Choi, B. H., Kim, B. G., Kim, H. S., Hong, S. M., 2023, Light Weight of the Leg Rest Module using the Response Surface Method, J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc., 24:2 568-575, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.2.568>.

[8] Sato-Ilic, M., 2017, Knowledge-based Comparable Predicted Values in Regression Analysis, Procedia Computer Science, 114 216-223, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.063>.

[9] Gu, B. J., Hong, S. H., 2019, Numerical Approach to Optimize Piercing Punch and Die Shape in Hub Clutch Product, J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc., 20:9 517-524, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.9.517>.



Soon Jae Hwang

Master's Program in the Department of Future Convergence Engineering at Kongju National University. His interest is FEA.
E-mail: krsoonjae@naver.com



Min Seong Oh

Undergraduate program of the Future Automobile Engineering Department at Kongju National University. His interest is Optimizing, FEA.
E-mail: mslab13@naver.com



Ou Chul Sul

CEO in the Wonhyo Co.. His interest is Machine.
E-mail: bagussurfer@leikokorea.co.kr



Mun Gyu Yoo

Senior Researcher in the Wonhyo Co.. His interest is Machine.
E-mail: rmkyoo@leikokorea.co.kr



Young Gu Chung

Director of Research Institute in the Gonggam Gonghak Co. Ltd.. His interest is Machine, FEA.
E-mail: young@swstech.co.kr



Seok moo Hong

Professor of Future Automobile Engineering Department at Kongju National University, Institute of Green Car Technology. His interest is Metal Sheet Forming and Forging, FEA, Optimizing.
E-mail: smhong@kongju.ac.kr