

위상 최적화 기법을 이용한 충격하중에 대한 차량 탑재형 전력변환장치의 마운트 경량화 설계

고 동 신¹ · 이 현 경¹ · 허 덕 재^{1*}

¹고등기술연구원 산연협력센터

Using Topology Optimization, Light Weight Design of Vehicle Mounted Voltage Converter for Impact Loading

Dong-Shin Ko¹, Hyun-Kyung Lee¹ and Deog-Jae Hur^{1*}

¹R&D Center for Research & Business Cooperation, Institute for Advanced Engineering, Yongin, 17180, Korea

Abstract

In this study, it is describe to an optimization analysis process for the weight reduction of the voltage converter in the electric vehicle charging systems. The optimization design is a technique that finds the optimal material distribution under a given material quantity constraint by combining the design sensitivity with the material properties and the mathematical optimization. Among the topology optimization, a lightweight design is performed by a solid isotropic material with penalization with simple formula and well-convergence. The lightweight design consists of three steps. As a first step, a finite element model for the basic design of the on-board voltage converter was constructed and static analysis was performed on the load. In the second step, the optimum shape is obtained for the lightweight by performing the topology optimization using the solid isotropic material with penalization applying the stiffness coefficient of the isotropic material to the static analysis result. As a final step, impact analysis was performed by applying a half-sinusoidal pulse shape impact load which satisfies the impact test standard of the vehicle-mounted part with respect to the optimum shape. In the topology optimization, the design domain was defined as the mounting bracket area, and the design technology was finally achieved by optimizing the mounting bracket to achieve a weight reduction of 20% over the basic design.

Keywords : voltage converter, topology optimization, weight reduction, mounting brackets

1. 서 론

최근 선진국들을 중심으로 전기자동차 시장 활성화를 위해 충전 인프라와 관련된 연구가 활발하게 추진되고 있다. 특히 탑재형 전력변환장치(voltage converter)의 연구방향은 저전압 변환 및 충전성능의 고성능화와 경량화 등으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 따라서 탑재형 전력변환장치의 고성능 및 경량화를 위한 소재 및 디자인의 선정은 매우 중요한 요소가 되고 있다. 전력변환장치의 막대한 경량화는 주행 중 발생하는 외력에 강도 및 내구성을 약화시킬 수 있으므로 설계 프로세스의 초기 단계에서 최적의 경량화 설계를 예측할 수 있는 최적화

방법을 활용한 설계가 필요하다. 형상 최적화 문제는 크게 치수 최적화(size optimization), 형상 최적화(shape optimization), 위상 최적화(topology optimization)의 3가지로 분류할 수 있다. 치수 최적화는 정해진 형상에 대해서 공학적 설계 변수인 단면적, 형상의 두께, 관성 모멘트 등을 이용하여 이들의 치수를 변화시키면서 반복적인 FEA(finite element analysis)를 통해 최적의 치수를 얻는 방법이다. 형상 최적화는 구조물의 연속적인 경계면의 형상을 변수로 하여 최적화하는 기법이다. 치수 및 형상 최적화는 형상을 변화시키지 못하고, 자유도가 한정적인 단점을 지니며, 구조물의 초기 위상이 결정되고 난 이후에 최적화 과정의 수행이 가능하며, 구조물의 위

* Corresponding author:

Tel: +82-2-330-7436; E-mail: djhur@iae.re.kr
Received October 16 2018; Revised October 25 2018;
Accepted October 26 2018

©2018 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

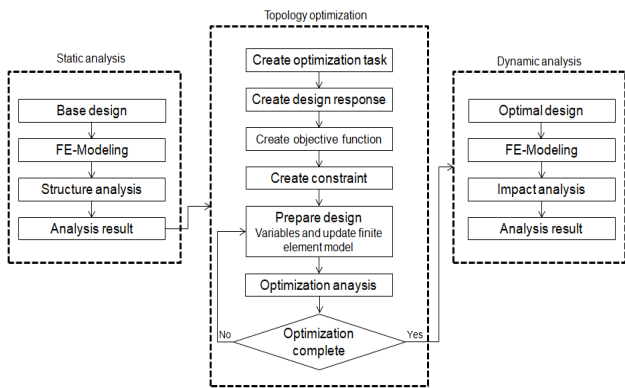


Fig. 1 Process for weight reduction optimal design of voltage converter

상이 고정된 것으로 가정을 해 최적화된 형상이 초기 형상에 많은 제한을 받게 된다. 반면, 위상 최적화는 재료 물성치에 대한 설계민감도와 수학적 최적화를 결합하여 주어진 재료량 제한 조건 하에 최적의 재료분포를 찾는 설계기법으로 위상의 고정화, 자유도가 묶이는 문제 등을 해결할 수 있는 최적화 알고리즘이다 (Cha *et al.*, 2013).

본 논문에서는 전기자동차 탑재형 전력변환장치의 기본 형상 설계에 대해 정적해석을 수행하고 등방성 재료의 강성계수를 이용한 SIMP(solid isotropic material with penalization)의 위상 최적화방법으로 최적화를 수행하고 위상 최적화에 의해 제시된 마운팅 브래킷 형상은 충격특성 해석으로 동적 구조 강성에 대한 타당성을 검증하였다.

탑재형 전력변환장치의 경량화 설계를 위한 최적화는 Fig. 1의 프로세스에 의해 수행하였다.

2. 위상 최적화 기본 이론

2.1 위상 최적설계

위상 최적화 설계는 구조 최적설계 방법으로 설계조건을 만족시키면서 목적함수를 달성할 수 있도록 구조물을 구성하는 각 요소의 연결성을 최적화하는 방법이다. 위상 최적설계는 형상 최적화 과정에서 발생하는 위상이 고정되는 문제를 해결할 수 있고, 자유도가 더 자유로워지는 장점이 있다(Bendsoe *et al.*, 1988). 위상 최적화 기법에는 직교이방성(ortho-tropic) 재료의 강성계수를 이용한 균질화법(homogenization method)과 등방성 물질의 강성계수를 이용한 밀도법(SIMP method)이 주로 이용되고 있다(Robin, 2016).

균질화법은 미소 구조물 안의 특성들이 균질화되어 있고 중간 밀도들을 해석하고 미세 구조물의 응력을 결정하는데 타당한 방법을 제공하지만, 각각의 유한요소의 재료상수를 계산

하는데 상당한 노력이 필요하며 미세구조물의 치수와 방향을 모델화하기 위해 많은 설계변수들이 필요하다. SIMP법은 0과 1사이의 밀도 분포를 갖는 요소들에 대한 문제를 해결하기 위하여 제안되었으며, 각 설계 요소의 밀도계수 값의 변화에 따른 설계 민감도를 계산해서 0 또는 1로 수렴할 수 있도록 하였다. 이 때 중간값의 밀도를 가지는 요소 개수를 줄이고 수렴성을 높이기 위하여 페널티 함수(penalty function)를 사용한다. 페널티 함수는 밀도계수 값이 0과 1의 중간상태는 실제 존재하지 않는 상태이지만 가상의 물질상태로 약한 연결성을 가지게 하여 연속성을 함수화시키는 방법이다. 따라서 수렴성과 계산과정의 수월성으로 SIMP법이 많이 사용된다 (Bendsoe *et al.*, 2003).

2.2 밀도법(SIMP method)

밀도법은 연속체 문제를 유한개의 요소로 분할하여 구조물의 컴플라이언스를 최소화하기 위한 설계로부터 시작하여 점차 그 적용영역을 확대해 가고 있다(Suzuki *et al.*, 1991).

밀도법의 설계변수는 가상의 단위 요소 밀도 ρ_e 이며, 구조물의 설계영역의 부피는 단위 요소 체적 V_e 와 해당 요소 밀도 ρ_e 의 곱으로 표현된다.

$$V = \sum_{e=1}^N V_e \rho_e \tag{1}$$

여기서, 요소 밀도 ρ_e 는 수치적 문제를 피하기 위하여 범위가 $0 \leq \rho_e \leq 1$ 로 주어진다.

각 요소에서의 탄성 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$E_e = \rho_e^p E_e^0 \tag{2}$$

여기서, E_e^0 는 구조물의 탄성계수이며, p 는 페널티 계수(penalty factor)이다. 페널티 계수 p 는 0에서 1사이의 값을 갖는 재료 밀도 값들에 대하여 페널티 효과를 주어 재료 밀도 값을 0 또는 1의 값으로 나타낼 수 있게 한다.

본 논문의 탑재형 전력변환장치의 마운팅 브래킷 최적화 문제는 컴플라이언스 및 체적 최소화 문제이며 다음과 같이 정의된다.

$$\text{minimize} : c(\rho_e) = \{F\}^T \{u\} \tag{3}$$

$$\text{s.t.} : [K] \{u\} = \{F\} \tag{4}$$

$$\sum_{e=1}^N V_e \rho_e \leq \bar{V}_s \tag{5}$$

$$K = \sum_{e=1}^N \rho_e^p K_e \quad (6)$$

여기서, K 는 전체 강성 행렬을 나타내며, 각 요소의 강성 행렬 K_e 과 요소 밀도의 지수 승의 곱으로 표현된다. \bar{V}_s 는 최적화 목표인 최대 체적분율(volume fraction)을 나타낸다.

3. 정적 구조해석

3.1 탑재형 전력변환장치 기본설계

전기자동차는 외부 전원으로 교류(AC) 전원을 공급받아서 탑재형 충전 시스템(on-board charger; OBC)를 이용하여 직류(DC)전원을 이용하는 주 배터리를 충전한다. 자동차에 장착된 전자 부품들은 일반적으로 저전압(12V)을 사용하므로 전기 자동차의 주 배터리로부터 공급받은 고전압을 저전압으로 변환하기 위하여 전력변환장치가 사용된다.

탑재형 전력변환장치의 기본설계는 Fig. 2와 같이 상부케이스, 하우징, 마운팅 브래킷, 내부 회로소자로 등으로 구성하여 설계하였다. 탑재형 전력변환장치의 상부케이스와 하우징은 내부 회로 소자를 외부 충격 및 수분, 먼지로부터 보호하고 내부 발열 회로소자의 열 방출을 위한 냉매가 지나는 유로를 포함한 구조로 방열 역할을 한다. 탑재형 전력변환장치의 하우징 내부에는 PFC(power factor correction) 모듈, PCB 모듈 및 다이오드 소자로 이루어져 있으며, PFC 모듈은 입력부의 교류(AC) 전원을 직류(DC) 전원으로 변환하는 역할을 한다. PCB 모듈은 작동을 위한 스위칭부 제어와 전원 출력을 위한 출력부분으로 구성되었다. 다이오드 소자들은 정류작용을 하거나 전류 및 전압을 조절하는 스위칭부의 역할을 하는 발열 부품들이다.

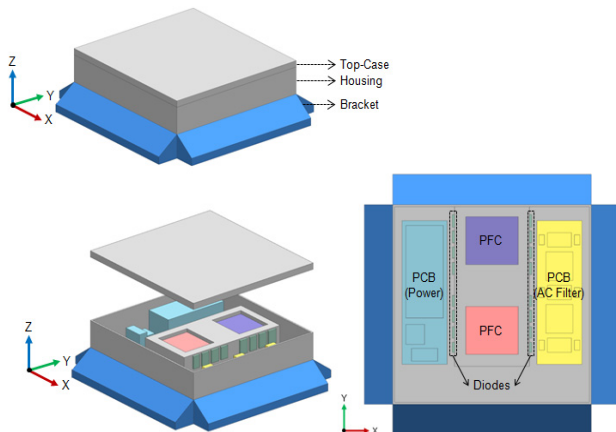


Fig. 2 Geometry of voltage converter

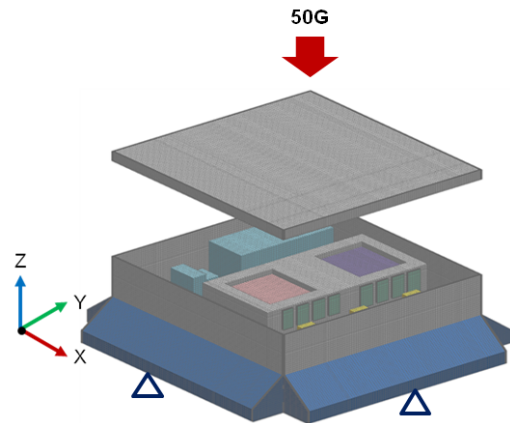


Fig. 3 Finite element and boundary conditions of voltage converter

Table 1 Material properties of voltage converter

	Al6061	Steel	Polypropylene
Density (kg/mm ³)	2.71×10 ⁻⁶	7.80×10 ⁻⁶	1.20×10 ⁻⁶
Elastic modulus (GPa)	69.00	209.00	2.00
Poisson's ratio	0.33	0.28	0.40
Yield strength (MPa)	241.00	550.00	31.00
Part	Top case Housing Bracket	PFC module PCB module	Diodes

3.2 유한요소모델

탑재형 전력변환장치 해석모델은 Fig. 3에 나타난 것과 같으며, 노드 개수는 547,669개, 요소 개수는 491,007개로 육면체 요소(hexahedron element)를 사용하여 구성하였다. 해석모델의 각 구성요소 재질특성은 Table 1과 같으며, 경량화와 열전달특성이 요구되는 상부 케이스 및 하우징, 마운팅 브래킷은 알루미늄 재질을 사용하였으며, 질량 효과만 고려하는 내부 회로 소자는 플라스틱 및 스틸(내부 다이오드 소자는 플라스틱 물성을 사용하였고, PFC 및 PCB 모듈은 스틸) 물성을 사용하여 기본 설계모델의 질량 11.3kg와 일치하도록 하였다. 위상 최적화를 위한 해석모델의 경계조건은 차량에 부착되는 마운팅 브래킷의 하부면을 고정하였으며, 하중조건은 50G의 체적하중(body force)을 반영하였다.

3.3 정적 구조해석

위상 최적화를 위한 탑재형 전력변환장치의 정적 구조해석은 ABAQUS의 static 모듈을 활용하였으며, 결과는 Fig. 4와 같이 50G의 체적하중에 대해 질량분포가 가장 큰 PFC모듈을

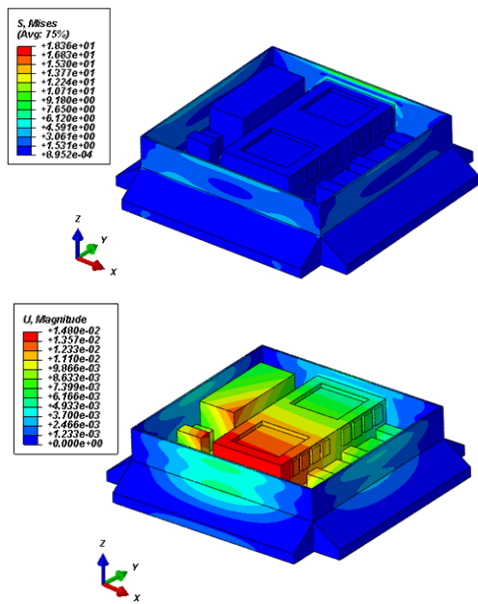


Fig. 4 Result of static analysis

지지하는 하우징 바닥부분과 마운팅 브래킷 고정부분에서 약 18.4MPa의 최대응력이 나타났다. 최대변형은 가장 큰 질량을 갖는 PFC 모듈 위치의 하우징 바닥면에서 약 0.015 mm의 수직방향 변형이 발생하는 것으로 나타났다.

정적해석 결과로부터 경량화가 가능한 설계영역은 상부케이스, 하우징, 마운팅 브래킷으로 예측할 수 있으나, 상부 케이스 및 하우징은 회로소자의 수분, 먼지 등으로부터 보호하는 역할로 설계영역으로 정의하는 것은 무리가 있다. 따라서 위상 최적화를 위한 설계영역은 마운팅 브래킷 영역으로 제한할 필요가 있다.

4. 위상 최적화해석

탑재형 전력변환장치의 위상 최적화의 목적함수는 컴플라이언스(compliance)의 최소화 즉, 강성(stiffness)이 최대가 되는 것으로 설계변수는 마운팅 브래킷 형상밀도로 정의하였다. 구속조건은 전체 체적의 최대 75%까지 사용하도록 체적분율(volume fraction)을 정의하였다. 그리고 Fig. 5와 같이 형상 밀도변화가 가능한 설계영역(design domain)과 형상 밀도변화가 불가능한 비설계영역(non-design domain)을 정의하여 위상 최적화의 형상제한조건을 정의하였다.

위상 최적화해석은 상용프로그램인 ABAQUS의 Tosca 모듈을 활용(dassult system, 2011)하였으며, 위상 최적화해석 결과는 Fig. 6과 같이 나타났다.

마운팅 브래킷의 위상 최적화결과는 정적해석 결과로부터 최대응력 21.7MPa로 기본설계 최대응력 대비 3.3MPa정도 상승하는 것으로 나타났으며, 수직방향의 변형은 0.018mm로 기본설계와 거의 유사한 구조적 특성값을 나타냈다. 형상밀도는

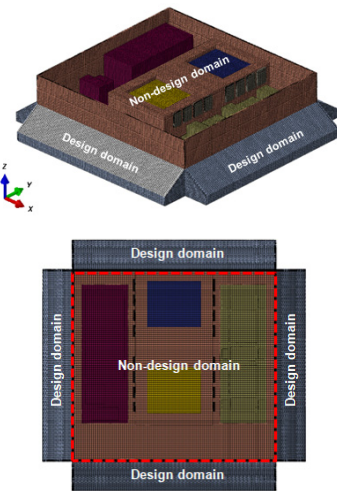


Fig. 5 Design domains of voltage converter

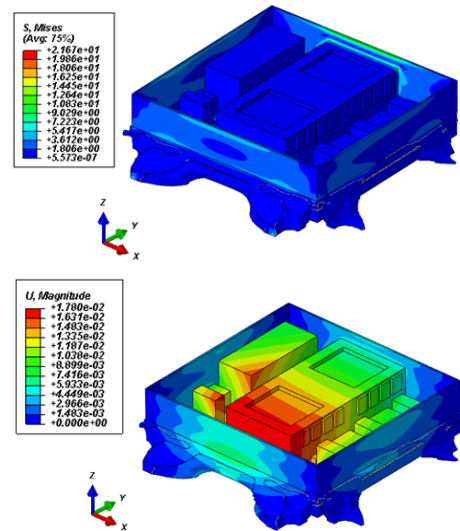


Fig. 6 Result of topology optimization

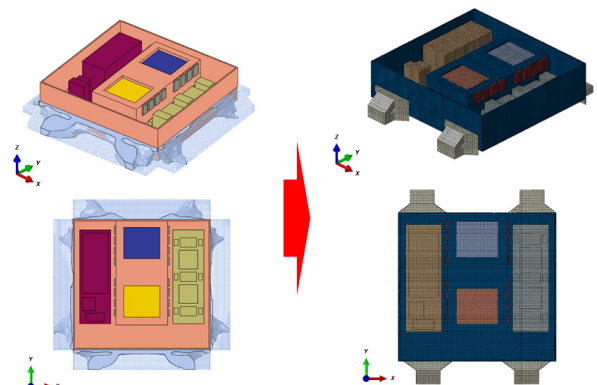


Fig. 7 Weight reduction design model of voltage converter

최대응력부분을 기준으로 집중되었으며, 응력이 낮은 부분에서는 형상밀도가 낮아져 Fig. 6과 같이 근사적인 마운팅 브래킷 형상을 예측하였다. 그리고 최적화에 의한 형상 질량은 8.7kg

으로 기본설계질량(11.3kg)대비 2.6kg(23%)의 질량 감소효과가 있는 것으로 분석되었다.

따라서 최적의 경량화 설계는 위상 최적화해석에 의해 제시된 근사적 형상 모델을 제작 공정을 고려하여 제작이 가능한 설계모델로 재구성할 필요가 있다. 설계모델은 근사적 형상 모델의 형상밀도에 의해 y축 방향의 마운팅 브래킷만 채택하여 Fig. 7과 같이 최종적으로 9.0kg 탑재형 전력변환장치의 경량화 설계를 얻을 수 있다.

5. 최적 형상의 충격해석

위상 최적화를 통해 제시된 탑재형 전력변환장치 최적 형상은 차량 탑재 부품 충격시험 기준(KS C IEC 60068-2-27)을 만족해야 한다. 차량 탑재 부품 충격시험 기준에 의하면 충격하중은 Fig. 8과 같이 충격가속도 50G, 지속시간 6ms, 반정현파의 펄스형태로 인가된다. 충격해석은 기본설계 및 최적형상에 대한 비교를 수행하였으며, 마운트 브래킷에 충격시험 기준의 충격하중을 반정현파 형태의 펄스로 인가하여 해석을 수행하였다.

기본설계의 충격해석 결과는 Fig. 9와 같이 하우징 부분에서 21.3MPa의 최대응력이 나타났으며, 최적 형상의 충격해석 결과는 Fig. 10과 같이 동일한 위치에서 37.2MPa의 최대응력이 나타났다. 마운팅 브래킷 최적 형상설계의 구조특성은 기본설계 대비 15.9MPa의 최대응력 차이로 적용재료의 강도 수준(항복강도 241MPa)을 고려하였을 때 경량화로 인한 구조적 안정성의 영향은 없는 것으로 분석되었다. 따라서 위상 최적화를 통해 제시한 전력변환장치의 최적 형상설계는 차량 탑재 부품 충격시험 규격 강도는 충분히 확보하는 것으로 예측되었다.

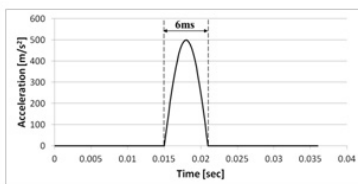
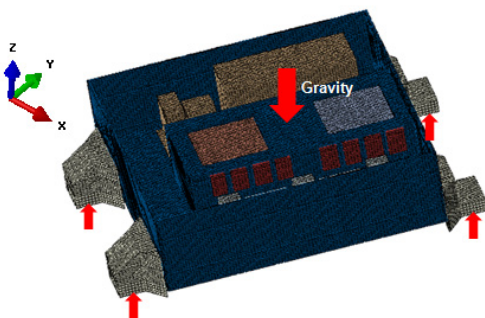


Fig. 8 Boundary & loading conditions of impact test simulation

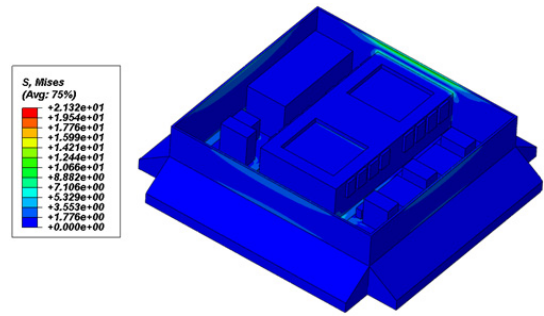


Fig. 9 Result of impact test simulation for the base model

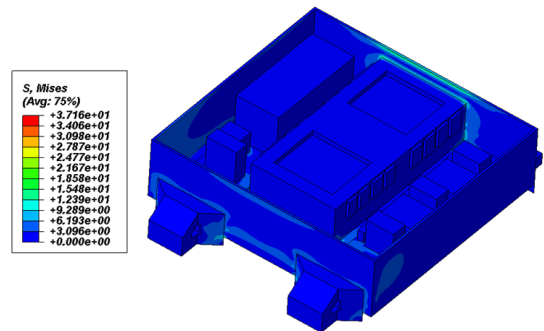


Fig. 10 Result of impact test simulation for the optimized model

6. 결 론

전기자동차 탑재형 전력변환장치의 경량화 설계를 위한 위상 최적화 결과를 요약하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 탑재형 전력변환장치의 경량화 설계는 해석방법으로 정적해석을 통한 인자의 선정, 위상 최적화수행, 제작 공정을 고려한 상세설계, 최종적으로 충격하중에 대한 해석을 수행하고 절차를 제시하였다.
- (2) 탑재형 전력변환장치는 밀도법에 의한 위상 최적화로 기본 설계 대비 20%의 경량화가 가능한 것으로 분석되었다.
- (3) 본 논문의 위상 최적화는 차량 탑재 부품 충격시험 기준(KS C IEC 60068-2-27)을 만족하는 탑재형 전력변환장치의 경량화 설계를 확보하였다.
- (4) 본 논문에서 제시하는 위상 최적화과정은 반복 재현성을 가지고 있어 향후 자동차 탑재형 부품 설계 및 마운팅 방법에 다양한 활용성이 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2017년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원사업에 의한 연구임('10077362').

References

Bendsoe, M.P., Kikuchi, N. (1988) Generating Optimal Topologies in Structural Design using Homogenization Method, *Comput. Method. Appl. Mech. & Eng.*, 71, pp.197~224.

Bendsoe, M.P., Sigmund, O. (2003) Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications, *Springer Berlin Heidelberg, New York*, p.370.

Cha, S.H., Lee, S.W., Cho, S.H. (2013) Experimental Validation of Topology Design Optimization, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26(4), pp.241~246.

Dassult System (2011), Topology and Shape Optimization with Abaqus, Abaqus user's manual.

Robin, L. (2016) Methodology for Topology and Shape Optimization : Application to a Rear Lower Control Arm, Master's Thesis in Applied Mechanics, Chalmers university of Technology.

Suzuki, K., Kikuchi, N. (1991) A Homogenized Method for Shape and Topology Optimization, *Comput. Method. Appl. Mech. & Eng.*, 93(3), pp.291~318.

요 지

본 연구는 전기자동차 충전시스템에서 전력변환장치의 경량화를 위한 최적화 분석프로세스에 대한 내용을 서술하였다. 최적화 설계는 재료 물성치에 대한 설계민감도와 수학적 최적화를 결합하여 주어진 재료량 제한조건 하에 최적의 재료분포를 찾는 설계기법으로 위상의 고정화, 자유도가 묶이는 문제 등을 해결할 수 있는 위상 최적화방법을 사용하였으며, 위상 최적화 방법 중 비교적 수식화가 간단하고 수렴성이 좋은 SIMP법(solid isotropic material with penalization)에 의해 경량화 설계를 수행하였다. 경량화 설계는 3단계의 절차로 구성하였으며, 첫 번째 단계로 전력변환장치의 기본 설계에 대한 유한요소모델을 구성하고, 하중에 대한 정적해석을 수행하였다. 두 번째 단계로 정적해석 결과에 대해 등방성 재료의 강성계수를 적용한 밀도법을 이용하여 위상 최적화를 수행하여 경량화를 위한 최적 형상을 도출하였다. 세 번째 단계로 최적 형상에 대해 차량 탑재 부품의 충격시험기준에 만족하는 반정현파 펄스형태 충격하중을 인가하여 충격해석을 수행하였다. 위상 최적화단계에서 사용 환경조건으로 설계영역 정의는 마운팅 브래킷 영역으로 제한하였으며, 마운팅 브래킷의 설계 최적화를 통해 최종적으로 기본설계대비 20%이상의 경량화가 가능한 설계기술을 확보하였다.

핵심용어 : 전력변환장치, 위상 최적화, 경량화 설계, 마운팅 브래킷