

철도 차량 전두부 충돌 피해 저감을 위한 Protective shell frame의 위상 최적화에 관한 연구

The study on Topology Optimization for Crashworthiness enhancement in Protective shell frame of Rolling Stock leading-cab

김현준* 김세훈* 정현승** 권태수** 서명원***

Kim, Hyun-Jun, Kim, Se-Hoon, Jung, Hyun-Seung, Kwon, Tae-Su Suh, Myung-Won

ABSTRACT

The leading-cab (high energy absorption area) of rolling stock directly is impacted on the frontal crash unlike other cabs. Thus, leading-cab has a structurally complex shape to solve getting concentrated loads. However, in order to enhance structural performance and to achieve the weight reduction of cab, changing the sizes and adjusting the distance of members do not take an effective result. Therefore, in design phase, to find the material arrangement which helps structural capacity be better should be done. This research applies the topology optimization to concept design of protective shell frame on strategy of crush energy absorption with considering pressure and vertical loads acting on the principal part of leading-cab. In this research, topology optimization method focuses on structural design, and which yields optimal material arrangement under given loads and boundary conditions using density method which has the density of material as design variables. Finally, this research presents optimal material arrangement and structure of protective shell frame on given loads with applying topology optimization.

1. 서 론

차체의 전두부는 중앙부와 달리 하중이 직접 가해지는 부위를 구조적인 형상이 복잡할 뿐 아니라 응력의 집중도 많이 발생한다.(1) 따라서, 일정한 부재 배치를 가정하고 단순히 치수만을 변경하거나, 혹은 부재 배치의 간격을 조절하는 방법 등으로는 구조적 성능을 향상 시키면서 차체의 경량화를 달성하기 어렵다. 이러한 방법 보다는 개념설계 단계에서 가장 구조적 성능이 우수한 부재 배치를 찾아내는 것이 중요하다.(2) 이러한 위상 최적설계 기법은 지난 몇 십년동안 다양한 형태로 빠르게 발전하고 있고, 최근에는 제품 설계 프로세스에 융합되어 제품의 성능 향상에 크게 기여하고 있다.(3) 구조물의 최적설계 기법은 크게 치수 최적설계, 형상 최적설계, 위상 최적설계 등의 세 가지 기법으로 구분된다. 치수 및 형상 최적설계는 구조물의 연결구조(위상)는 고정시키고, 부재의 치수를 변경하거나 형상을 변경하는 기법인데 반해 위상 최적설계는 주어진 하중 및 경계조건에 대한 최적의 재료 배치를 찾는 것으로 주로 초기 개념 설계에 많이 사용된다.

초기의 위상 최적설계 기법이 주어진 하중 및 경계조건에서 가장 강한 연결 구조를 찾는 강성 설계

* 성균관대학교 기계공학부 대학원, 비회원

E-mail : skku99@skku.edu

TEL : (031)290-7487 FAX : (031)290-5889

** 한국철도기술연구원 차량성능연구팀, 정회원

*** 성균관대학교 기계공학부, 비회원

에 주로 활용되었지만, 최근에는 재료설계(Material design), 순응 메카니즘 설계(Compliant mechanism design) 등으로 그 적용 범위가 확장되고 있는 추세이고, 비선형구조물에 대한 위상 최적설계(4)와 신뢰성 기반 위상 최적설계(5) 등에 대한 연구도 진행되고 있다.

본 연구에서는 차체의 Protective shell frame의 개념 설계에 에너지 흡수 전략에 따라 객차 주요부에 작용하는 압축 및 수직하중을 고려하여 위상 최적설계 기법을 적용하였다. 위상 최적 기법은 구조 설계에 초점을 두고 있으며, 부재의 밀도를 설계변수로 하여 밀도법을 통해 주어진 하중 및 경계조건에 대한 최적의 부재 배치를 찾는다. 최종적으로 주어진 하중 상태에 따라 차체의 Protective shell frame의 최적의 주요 부재 배치 및 구조를 제시한다.

2. 밀도법

밀도법은 Mlejnek(6)에 의해 제안된 방법이다. 밀도법은 균질화법에서 사용되는 재료 물성치가 밀도의 지수함수 관계로 표현되는 것을 보고, 재료를 가상의 등방성 재료로 가정하여 밀도(ρ)와 탄성계수(E)와의 관계를 다음 식과 같이 간단한 지수함수로 가정한다.

$$E = \rho^p E_0 \quad (1)$$

여기서 E_0 는 재료의 실제 탄성계수이다. 이러한 재료 모델은 SIMP (Simple Isotropic Microstructure with Penalization)라고도 불린다. 그림 1은 지수 p 의 값이 커질수록 위상 최적설계 결과는 중간값 보다는 0과 1의 밀도값을 갖게 되는 경향을 띤다. 일반적으로 위상 최적설계에서 지수 p 는 2에서 4사이의 값이 사용된다.

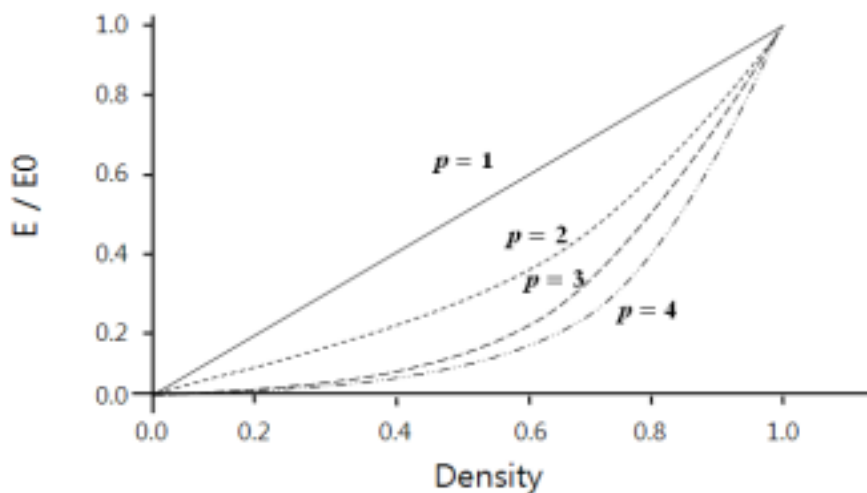


그림 1 지수 p 에 따른 SIMP 모델

3. 적용 대상

본 연구에서의 적용 대상은 그림 2와 같이 철도 차량의 Protect shell frame이다. Protect shell frame은 에너지 흡수부로서 철도 차량의 정면 충돌 시 운전자를 보호할 수 있는 공간으로 Drive panel

과 결합되어 최종적으로 충격을 흡수할 수 있는 구조로 되어 있다. 그림 3은 철도 차량의 정면 충돌 시 초기 모델에서 충돌 후를 나타낸 그림이다. 1차 충돌 시 연결기 1차 충격 흡수가 일어나고, 2차 충돌 시 연결기 2차 충격 흡수 (Collapsible Tube) 후 연결기가 탈락된다. 최종적으로 허니컴이 충격 흡수가 되고, 드라이버 패널 충격흡수부재 충격흡수 및 이동이 일어난다.



그림 2 Protect shell Frame

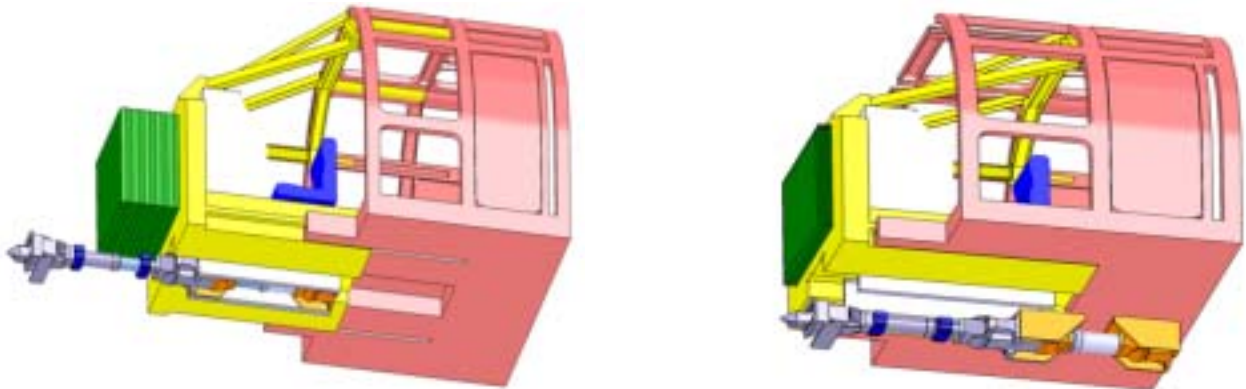


그림 3 철도 차량 전두부 충돌 전, 후

4. 최적설계 문제 정식화

그림 3과 같은 탄성체 구조물에 대한 강성 설계 위상 최적화 문제와 같이 본 연구의 위상 최적화는 다음과 같은 컴플라이언스 최소화 문제로 표현된다.

$$\begin{aligned} \min C &= \int_{\Omega} b_i z_i d\Omega + \int_{\Gamma_t} T_i z_i d\Gamma \\ \text{subject to } &= \int_{\Omega} \rho d\Omega \leq V \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, C 는 컴플라이언스, b_i 는 몸체력, T_i 는 경계하중, z_i 는 변위장, Ω 는 구조물 영역, V 는 허용 체적, ρ 는 재료 밀도를 나타낸다.

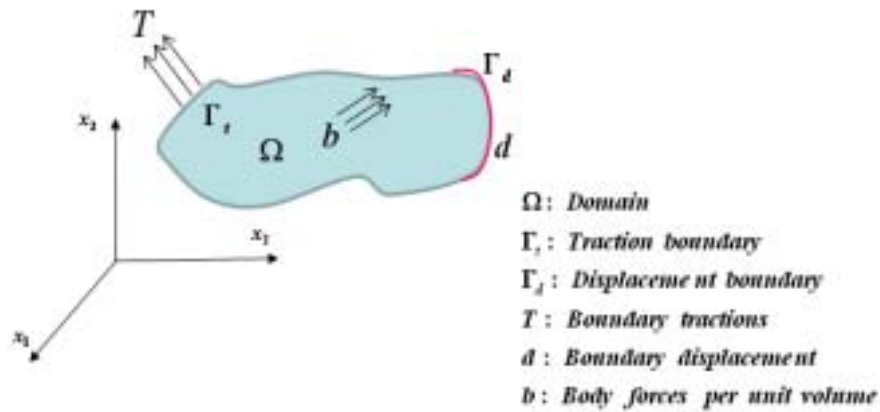


그림 4 탄성체 구조물

5. Protect shell frame의 위상 최적화

철도 차량 전두부의 Protect shell frame를 위상 최적설계 하기 위한 설계영역은 Protect shell frame의 Door 부위를 제외한 전체 모델이다. 그림 5와 같이 모델은 모두 셀 요소로 모델링하고, 설계영역은 비설계영역보다 세밀한 유한 요소망을 사용하였다.

위상 최적설계를 위해 고려된 하중 조건은 객차의 에너지 흡수 전략에 따라 객차 주요부에 작용하는 하중을 참조하였다. 본 연구에서 고려된 하중의 종류, 크기는 표 1과 같고 하중의 위치는 4개의 에너지 흡수부의 분포하중으로 작용한다. 경계 조건으로는 대차 연결부와 언더 프레임과 연결되는 부분으로 총 12개이다.

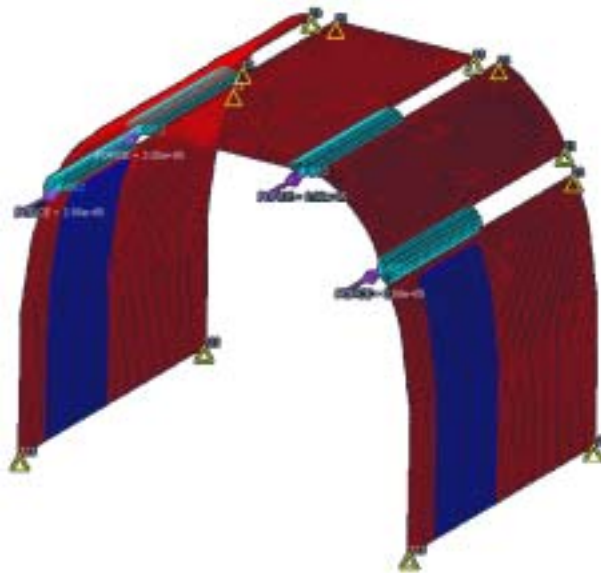


그림 5 하중 및 경계조건

표 1 에너지 흡수 전략에 따른 하중의 종류와 크기

하중의 종류	하중 크기
Cantrail 압축	400 kN
Windows sill 압축	400 kN

차체 전두부의 Protect shell frame의 위상 최적설계는 전체 하중이 동시에 작용하는 경우에 대하여 수행 하였다. 표 2는 재료의 물성치 이며, 그림 6은 그림 5의 하중 및 경계조건에 대한 변형을 나타내는 그림이다. 크게 변형이 발생하는 부분은 에너지 흡수부인 Protect shell frame의 상단과 양측 부분이며, 상단에 최대 변형률 13.9 mm이 발생하였다. 그림 7은 전체 하중 조건에서 40% 이하의 재료를 사용하여 위상 최적설계를 한 결과를 보여주는 것으로 파란색 부분은 재료가 분포되지 않는 영역이고, 빨간색으로 갈수록 재료 분포의 밀도가 높아짐을 의미한다. 압축하중이 가해지는 상단과 양측 부분에 가장 많은 재료가 분포되어 있음을 확인할 수 있다.

표 2 재료 물성치

탄성계수 (E)	포아송 비 (ν)
210 GPa	0.3

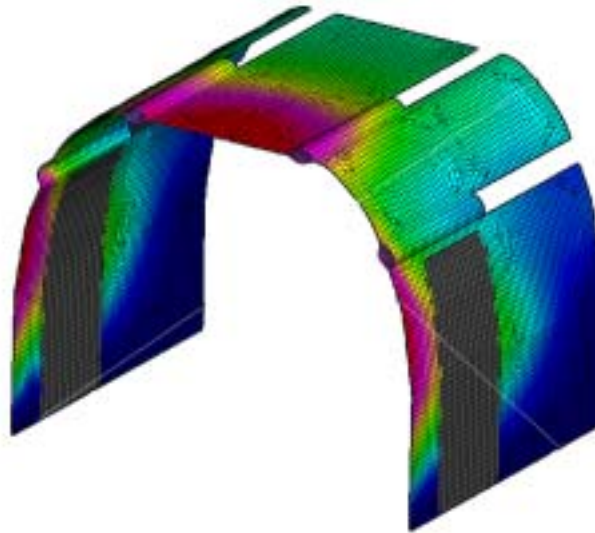


그림 6 변형 분포

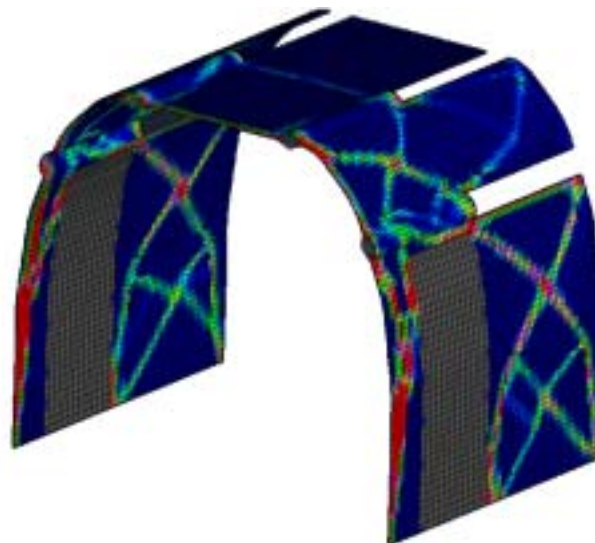


그림 7 위상최적설계 결과: 전체 하중, 40% 감소

6. 결 론

경량화와 고강성을 동시에 만족하는 구조물을 만들기 위한 위상 최적설계의 방법론을 제시하였다. 위상 최적화는 구조물의 초기의 개념 설계 단계에서 작용 하중 조건, 설계 목적과 설계 영역만을 가지고 최적의 위상을 얻을 수 있으므로 초기 설계 단계에서 매우 유용한 기법이다.

본 연구에서는 철도 차량 전두부의 Protect shell frame에 대해 개념 설계에 에너지 흡수 전략에 따라 객차 주요부에 작용하는 압축 및 수직하중을 고려하여 위상 최적설계 기법을 도입하였다. 하중에 의해 변형이 발생하는 부분은 에너지 흡수부인 Protect shell frame의 상단과 양측 부분이며, 상단에 최대 변형률 13.9 *mm*이 발생하였다. 부재의 밀도를 설계변수로 하여 밀도법을 통해 주어진 하중 및 경계조건에서 40% 이하의 재료를 사용하여 위상 최적설계를 수행하여 최적의 부재 배치를 제시하였다.

향후 연구로써 Protect shell frame의 언더 프레임을 고려하여, 전체 적인 Protect shell frame의 최적 구조 배치를 찾고자 한다.

참고문헌

1. 양도철, (2005년), “철도차량 Virtual Engineering 기술 개발“ 한국철도기술연구원 연구보고서
2. R. Ansola, J. Canales, J.A. Tarrago and J. Rasmussen(2002), “On simultaneous shape and material layout optimization of shell structures”, Struct Multidisc Optim, Vol. 24, pp.175-184.
3. 김병수, 서명원(1999), “최적조건법에 의한 위상최적화 연구”, 한국자동차공학회, 제7권, 제8호, pp.242-232.
4. S. Cho and H-S. Jung(2003), "Design sensitivity analysis and topology optimization of displacement-loaded non-linear structures", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 192, pp.2539-2553.
5. H-S. Jung and S. Cho(2004), "Reliability-based topology optimization of geometrically nonlinear structures with loading and material uncertainties", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 43, pp.311-331.
6. H.P. Mlejnek(1992), "Some explorations in the genesis of structures",Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Topology Design of Structures, June 20-26, Sesimbra, Portugal.