

알루미늄 차체의 압출재 형상결정을 위한 토폴로지 최적화기법의 적용에 대한 고찰

A study on topology optimization technique applied to extrusion shape determination of aluminium vehicle structures

권태수 *
Kwon, Taesoo

ABSTRACT

오늘날 차량의 경량화를 위해서 알루미늄 차체를 사용하는 것은 필수적인 결정처럼 되어버렸다. 차체에 사용되는 알루미늄 압출재의 형상은 아주 다양하게 제작이 가능하다. 그러나, 다양한 형상이 가능한 만큼 설계 엔지니어에게는 결정하기 어려운 문제가 되어버린다. 이제 알루미늄 차체의 사용이 보편화되어가는 시점에 차체의 개념설계 단계에서 압출재형상의 토폴로지를 결정하는 조직적인 방법이 제시될 시기가 되었다. 본 논문에서는 토폴로지 최적화란 기법을 이용하여 알루미늄 차체의 형상을 결정하는 조직적인 방법에 대한 가능성을 검토하고자 한다. 간단한 예제에서 주어진 하중조건하에서의 압출재의 토폴로지 최적화를 시도하여 몇가지 결론을 이끌어 내었다.

1. 서론

알루미늄 차체는 경량화의 용이성과 더불어 제작공정을 단순화시킬 수 있는 장점으로 인해 전 세계적으로 사용이 보편화되어 가고 있다. 국내에서도 차체의 경량화를 위해 알루미늄 차체 도입이 성공적으로 이루어졌다. 공기반과제에서 출발한 알루미늄 차체의 개발은, 표준전동차 개발, G7 고속전철 개발차량 등의 연구사업에서 한층 발전되었고, 최근 광주 및 대전지하철에서 알루미늄 차량의 도입이 진행되고 있다.

구조물 최적설계기법은 구조를 이루는 물질을 효율적으로 재분배(redistribution)함으로써 더욱 고 성능의 구조물을 만들 수 있다는 점과 더불어 개념설계단계부터 설계 엔지니어의 판단에 나침반과 같은 길잡이 역할을 할 수 있다는 장점이 있다. 구조 최적설계는 크게, 토폴로지(Topology), 형상, 치수 최적화로 구분되어 질 수 있다[1]. 혹은 크게 개념설계 단계인 토폴로지 최적화와 상세설계 단계인 형상 및 치수 최적화로 나눌 수도 있다. 본 논문에서는 차체단면의 형상을 개념설계 하는 방법으로 토폴로지 최적화 기법을 적용하여 그 가능성에 대한 고찰을 시도하고자 한다.

아래 그림 1은 알루미늄 차체의 단면의 예[2]를 보여준다. 단면은 10 여개 이상의 대형 압출재를 용접하여 완성된다. 그림에서 보는 바와 같이 종이 박스의 단면과 같은 형상의 중공 압출재의 구조이다.

* 한국철도기술연구원, 정회원

언더프레임(Under frame)과 사이드프레임(Side frame)의 격자모양은 상당히 규칙적으로 잘 배열된 형태를 보여준다. 이러한 배열이나 형상은 설계 엔지니어의 직관에 의해 설계되어 잘 정돈된 모습으로 판단된다. 하지만, 이러한 형상이나 모양이 과연 최적의 모양이라고 볼 수 있는지는 의문점이 남게 된다.

본 논문에서는 현재 격자 구조형상의 대형압출재의 모양을 강성의 극대화 관점에서 최적성에 대한 검토를 하고 압출재의 최적형상을 설계하기 위한 기법에 대한 가능성을 고찰하고자 한다. 또한, 향후 압출부재의 일종인 슬바(Sole bar)나 캔트레일(Cant rail)등의 최적모양의 설계에 활용할 가능성을 검토할 수 있다.

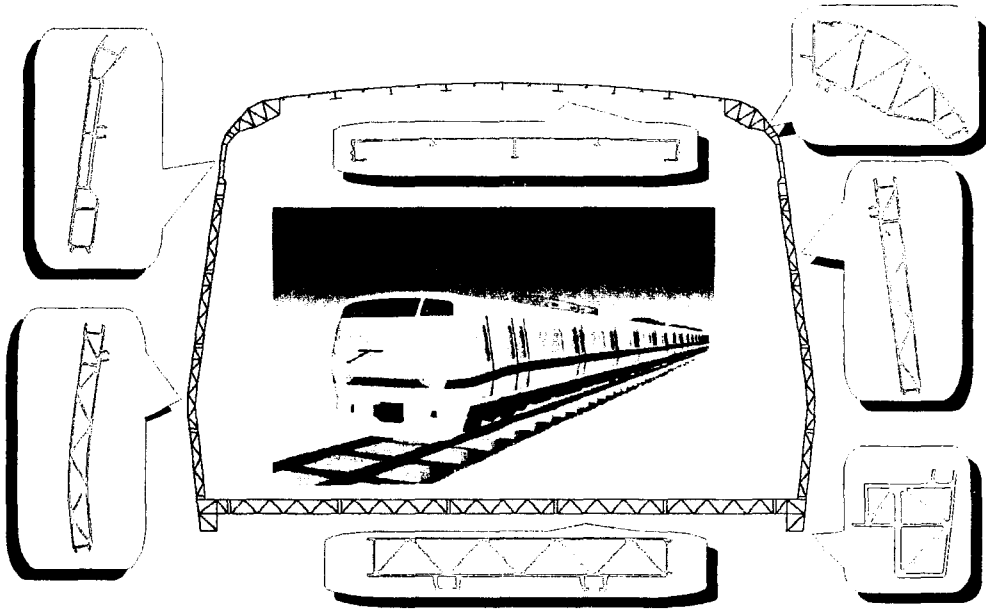


그림 1. 알루미늄 차체의 단면 형상

2. 위상 최적화

2.1 개요

구조물의 최적화 방법은 크게 치수 최적화, 형상최적화 및 위상최적화의 세가지로 나눌 수 있다. 이 중 위상최적화는 주어진 설계영역에서 최적의 위상(topology)을 구해내는 것으로서, 치수 최적화나 형상최적화와는 달리 설계공간이 상당히 큰 특징을 갖는다. 다시말해서 형상에 대한 제한이 매우 적다. 이러한 특징으로 인해 위상최적화는 초기 개념설계나 보강 설계 등에 유용하게 이용될 수 있다[2]. 특히, 지금까지 연구가 많이 되었고 상당한 성과를 보이는 형상 최적화 방법과 연계하여 통합된 구조 최적화 과정을 구축할 수 있다[3].

토폴로지 최적설계는 일반적으로 개념설계단계에서 설계 엔지니어에게 유용한 정보를 제공한다. 이러한 토폴로지 설계가 끝난 후에 치수 및 형상 최적화로 최적해를 더욱 정교하게 구하는 과정에 들어가게 된다. 치수 및 형상 최적화를 위해서는 토폴로지 최적화로부터 불필요한 요소들을 제거하고 유한요소 모델을 새로이 완성한다. 여기서, 토폴로지 최적화에서 얻어진 설계가 최적에 근접해 있기 때문에 형상/치수 최적화에 소요되는 계산량은 그다지 크지 않게 된다.

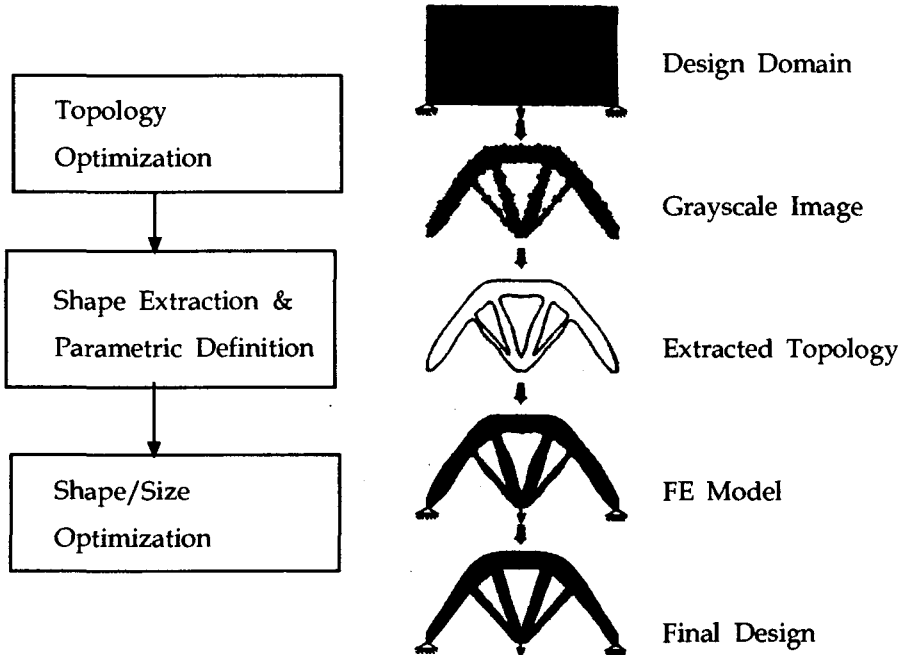


그림 2. 통합된 구조 최적화 과정

토폴로지 최적화는 주어진 공간영역내에서 물질의 이상적인 분포형태를 결정하는 데에 사용된다. 대량의 유한요소들로 형성된 재질 덩어리로부터 불필요한 유한요소들을 제거하는 과정으로 쉽게 비유될 수 있다[4]. 토폴로지 최적설계는 주로 경량이면서 강성을 최대화하는 목적에 적합하다.

2.2 정식화(formulation)

형상최적화 문제를 상태방정식(state equation)과 설계 제한조건을 만족시키고 목적함수를 최소화하는 밀도분포(density distribution)를 찾아내는 밀도 분포 최적화 문제로 완화 시킬수 있다. 목적함수와 설계제한조건은 여러 가지가 있을 수도 있으나 본 논문에서는 주어진 양의 재료를 이용하여 평균 컴플라이언스(mean compliance)를 최소화하는 형상을 찾고자 한다. 아래와 같은 최적화 문제로 정의가 가능하다.

find $\rho(x)$ *such that*



$$\begin{aligned} \text{Minimize } L &= \int_{\Omega} (f \cdot u) d\Omega + \int_{\Gamma_T} (t \cdot u) d\Gamma \\ \text{subject to } W &= \int_{\Omega} \rho d\Omega \leq W^* \\ \rho_{\min} &\leq \rho(x) \leq \rho_{\max} \end{aligned} \quad (\text{식 1})$$

여기서 u 는 운동학적 가용변위장(kinematically admissible displacement field), f 는 체적력(body force), t 는 경계에서의 하중(traction force)이고 W 는 전체영역 질량, W^* 는 부피의 상한, L 은 평균 컴플라이언스이다. 또한, ρ_{\min} , ρ_{\max} 는 밀도에 대한 조건으로써 일반적으로 ρ_{\min} 는 영이 아닌 작은 값을 사용하고, ρ_{\max} 는 1.0으로 정한다.

토폴로지 최적화 방법은 Homogenization method(혹은 Microstructure Method)과 같은 방법을 많이 사용하였다. 이 방법은 유한요소 모델안에 각각 설계된 요소의 비교적 미세한 구조물 parameter (hole의 크기 혹은 방향)를 찾는 방법이다. 현재는 설계변수를 줄이기 위해서 밀도와 재료특성사이의 관계를 임의로 가정하여 사용하는 방법이 많이 이용되고 있다.

본 논문에서는 density based approach를 사용하였다. 이 방법은 설계변수와 재료상수사이에서 새로운 관계를 설정함으로써 가능하다. 즉, 각 유한요소의 Young's modulus 와 밀도를 설계변수로 하는 것이다. 이 관계를 설정하는 다양한 방법들이 있으나, 여기에서는 많이 사용되는 power rule에 의한 방법을 기술한다.

$$\begin{aligned} E(X) &= E_0 b + E_0(1-b)X^a \\ \rho(X) &= \rho_0 X \\ t_{\min} &\leq X \leq 1.0 \end{aligned} \quad (\text{식 2})$$

여기서, $E(X)$ 는 Young's modulus, E_0 는 초기 Young's modulus, $\rho(X)$ 는 밀도, ρ_0 는 초기 밀도, t_{\min} 는 설계변수의 최소값, a , b 는 사용자가 정하는 상수이다.

이러한 식은 상당히 축적된 경험에 많이 의존하고 있다. 이론적으로 설계변수는 0.0과 1.0 사이에 존재하는데, 설계변수 X 가 1.0이라면 해당되는 유한요소는 존재할 필요가 있다는 것이고, 설계변수 X 가 0이라면 해당되는 유한요소는 없어도 된다는 것이므로 전체 모델에서 제거될 수 있다. 수치적인 계산문제로 인해 b 나 t_{\min} 가 0이 되어서는 안된다. 이유는 해석 시스템의 강성행렬의 singularity를 피하기 위해서이다.

3. 문제 정의

본 논문의 주요관점은 토폴로지 최적설계기법이 알루미늄 압출재 형상설계에 잘 적용될지의 가능성에 대한 고찰이다. 목적달성을 위해서는 전체 차체 단면을 한꺼번에 논할 필요없이 그림 1에 보였던 언더 프레임 중앙에 사용되는 압출재 하나에 한정하여 가능성만 점검할 수 있다. 고찰의 대상이 되는 압출재를 대칭관계를 고려하여 그림 3와 같이 단순하게 모델링하였다.

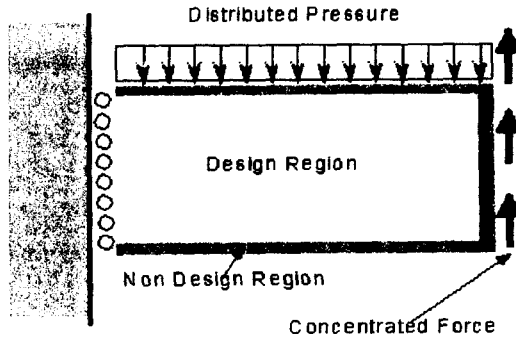


그림 3. 위상 최적화 문제 정의

3.1 경계조건과 하중조건

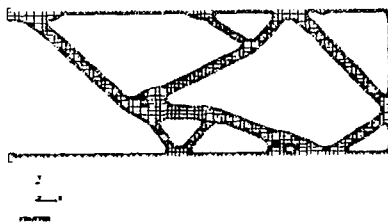
그림 2에서와 같이 언더프레임 압출재가 받을 수 있는 분포하중과 집중하중을 가정하여 분포하중을 주었으며, 경계조건은 대칭성(Symmetry)을 이용하였다. 또한, 전체영역을 설계영역과 비설계영역으로 나누었다. 이는 비설계영역은 압출재끼리의 용접이 가능하도록 상판과 하판을 유지하기 위함이다. 설계영역은 세로 40 x 가로 200 의 유한요소 모델로 세분하였다.

3.2 설계문제정의

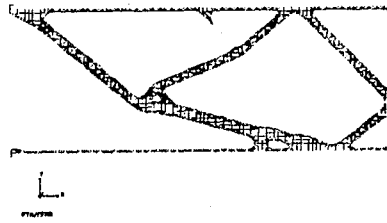
목적함수는 Strain Energy를 최소화하는 것으로 하여 강성을 크게 하는 것으로 하였다. 제한조건은 식(1)에서 설명된 바와 같은 개념이며 전체영역에 재질이 골고루 분포될 때를 질량비율(mass fraction) 100%로 할 때, 질량비율 제한조건을 15%~5%까지 변화하면서 최적의 토폴로지의 변화를 고찰하였다.

4. 단일 하중조건 문제

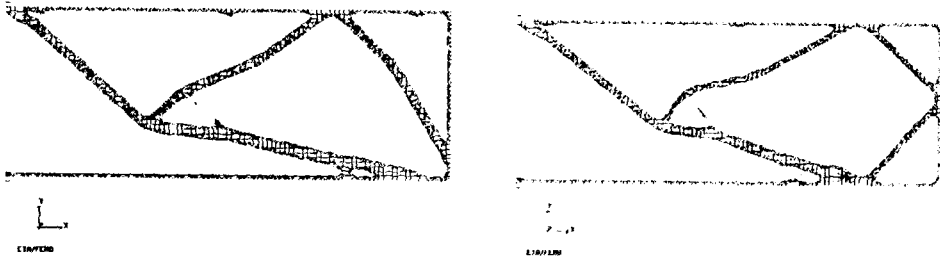
위와 같이 정의된 예제를 구조최적화 상용프로그램인 GENESIS[5]를 사용하여 설계를 수행하였다. 그림 4에 mass fraction을 변화시켜가면서 구한 최적해의 결과를 보였다.



(가) mass fraction 0.15



(나) mass fraction 0.1



(다) mass fraction 0.09

(라) mass fraction 0.07

그림 4. 단일하중조건하의 토폴로지 최적해 결과

mass fraction을 변화시켜 가면서 최적해를 구해보면 mass fraction이 변함에 따라 조금씩 다른 토폴로지를 보여주는 경우도 발생하지만, 전체적으로는 일관성 있는 토폴로지를 보여주면서 판의 두께만 달라지는 것으로 정리할 수 있다. 현재 문제에서는 그림 3에 보인 토폴로지가 최적해임을 알 수 있었다. 하지만, 위의 그림을 통해 최적해를 살펴 볼 때 현재의 보통 압출재의 모양과 다소 차이가 발생함을 알 수 있다. 이러한 현상은 현재 제작하고 있는 격자구조의 압출재의 모양은 특정한 하중상태에서의 최적에 맞추어진 것이 아니라, 일반적인 하중상태에서도 일정 이상의 강성을 유지하기 위한 모양이므로 그림 4의 결과와 다른 것이라고 판단되었다. 따라서, 이러한 현상에 대해서 좀 더 깊이 있는 분석을 위하여 하중조건을 추가하여 다중 하중조건에 대한 최적의 토폴로지를 고찰할 필요성이 대두되었다.

5. 다중 하중조건 문제

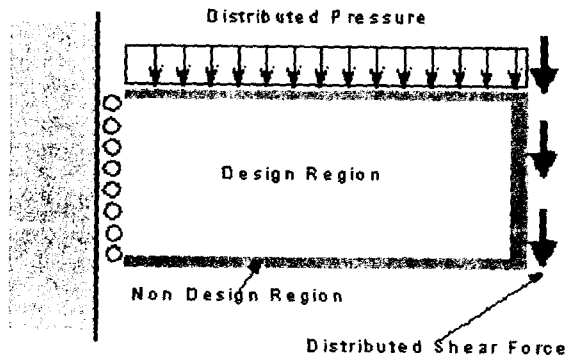
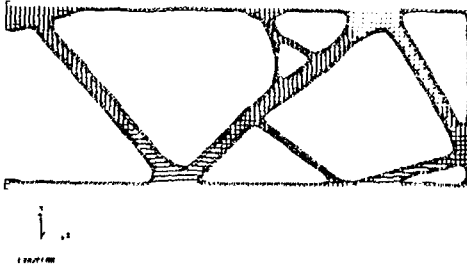
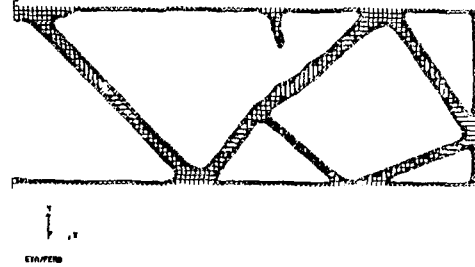


그림 5. 추가된 하중조건

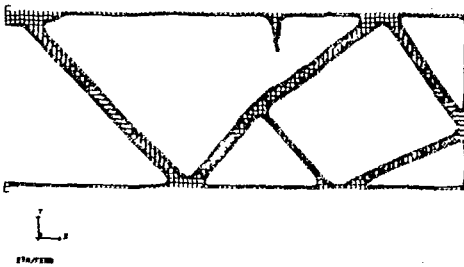
그림 2와 같은 하중조건에 그림 5와 같은 하중조건을 추가하여 두 하중조건을 동시에 고려하여 토폴로지 최적화를 수행하였다. 이때 각각의 하중조건에서 얻어지는 목적함수를 1:1의 가중치 (weighting)로 고려하여 다중하중조건의 목적함수로 하였다. 아래 그림 6에 그 결과를 보였다.



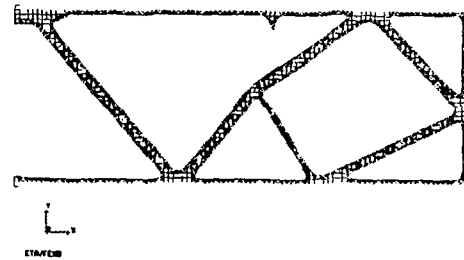
(가) mass fraction 0.15



(나) mass fraction 0.12



(다) mass fraction 0.1



(라) mass fraction 0.09

그림 6. 이중 하중조건상태에서의 토폴로지 최적해

이러한 문제에 대해서도 일관성이 확인되는 토폴로지를 그림 6과 같이 구할 수 있었다. 이 그림을 통해서, 다중 하중조건에서는 격자구조모양의 압출재가 적합한 모양임을 알 수 있다. 이것은 현재의 압출재의 토폴로지와 일치하는 면이 있다. 하지만, 집중하중이 작용하는 부분은 현재의 일반 압출재의 토폴로지와 일치하지 않는 점도 있다. 이것의 원인은 간단하게 결론을 내릴 수 없는 부분이고, 향후 계속적인 연구로 이에 대한 분석을 하고자 한다.

6. 결론

이제까지의 고찰을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 격자구조가 강성의 극대화 측면에서 바람직한 설계방향으로 보이나 예제들을 통해 보면 격자가 반드시 많아야 좋다고 볼 수 없다.
- 현재의 일반적인 압출재의 형상은 여러 가지 하중조건에서 범용적으로 쓰이기에 적합하다. 다중하중조건에서는 일반적인 압출재의 형상을 얻을 수 있을 것으로 예측된다.
- 위상 최적화 기법을 통하여서는 특별한 하중조건에 알맞은 압출재형상을 설계할 때 도움을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- 특히 솔바나 켄트레일처럼 강성을 증가시키시 위한 형상이 직관적으로 떠 오르지 않을 때 개념설계단계로 유용하게 활용되리라 본다.
- 가능성을 점검하는 차원에서의 예제들을 다루었지만, 향후 실제차량설계의 개념설계, 특히 솔바나 켄트레일처럼 강성을 요하는 부재들의 설계에서 유용한 도구로 활용될 것으로 판단된다.

향후, 솔바와 켄트레일의 토폴로지 최적화에 대한 연구가 진행될 것이다.

참고문헌

1. "유한요소법과 최적구조설계 CAE", 송영준 외 2인, 1999, 성안당
2. "표준전동차개발을 위한 구조체 강도해석", 권태수 외 3인, 한국철도학회 1998년도추계학술대회 논문집 pp. 455~, 1998.11, 한국철도학회
3. J. Siens et al, Reliable Structural Optimization with error estimation, adaptivity and robust sensitivity analysis, Comput. Struct. V. 64, No 1-4, pp. 31-63, 1997
4. Leiva, J.P. et al, Modern Structural Optimization Concepts Applied to Topology Optimization, Proceedings of the 40th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conferences. St. Louis, MO, April 12-15, 1999, pp 1589-1596
5. "GENESIS Reference manual", 2000, VR & D
6. "전동차 표준사양 연구보고서 (분야: 차체 및 설비)", 1998, 건설교통부
7. "철도차량 구조용 알루미늄 압출형재 및 차체 구조 개발에 관한 연구", 1996.6, 통상산업부