

# 알루미늄 차체 경량화를 위한 형상최적설계기법의 적용에 대한 고찰

## A study on shape optimization technique applied to weight-reduction design 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. 주어진 하중조건하에서 최적의 형상을 설계하는 방법을 찾는 것은 이제 알루미늄 차체의 사용이 보편화되어가는 시점에 매우 중요한 일이 된 것이다. 본 논문에서는 형상최적설계란 도구를 사용하여 압출재 형상을 설계하는 방법에 대한 가능성을 살펴보고자 한다. 몇 개의 간단한 예제를 통하여 가능성을 점검하였고, 분석을 통하여 몇가지 결론에 도달하였다.

### 1. 서론

차량의 경량화는 철도분야에서 항상 중요한 화두로 주목받고 있는 주제이다. 차량의 경량화가 가져다 주는 LCC 절감, 차량 성능의 향상, 안전성 향상 등의 긍정적 효과들은 수없이 나열될 수 있으나, 부정적인 효과는 찾아보기가 힘들다. 차량의 경량화의 출발점은 차체의 경량화이며, 차체의 경량화로 인한 연계효과로 주행장치, 전기장치, 제동장치 등의 경량화로 이어지게 된다. 따라서, 국내에서도 차체의 경량화를 위해 알루미늄 차체의 도입이 성공적으로 이루어졌다. 공기반과 제에서 출발한 알루미늄 차체의 개발은, 표준전동차 개발, G7 고속전철 개발차량 등의 연구사업에서 한층 발전되었고, 최근 광주 및 대전지하철에서 알루미늄 차량의 도입이 진행되고 있다.

알루미늄 차체는 경량화 뿐만 아니라, 제작공정의 단순화도 큰 장점이라 할 수 있다. 아래 그림 1은 알루미늄 차체의 단면의 예를 보여준다. 단면은 10 여개 이상의 대형 압출재를 용접하여 완성된다. 그림에서 보는 바와 같이 종이 박스의 단면과 같은 형상의 중공 압출재의 구조이다. 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.

\* 한국철도기술연구원, 정회원

하지만, 이러한 형상이나 모양이 과연 최적의 모양이라고 볼 수 있는지는 의문점이 남게 된다. 오늘날, CAE의 범용적 사용으로 인해 산업의 전반적인 분야에서 많은 이익을 창출하는 시대를 살고 있다. 그 중 구조물 최적설계라는 분야도 산업에서의 적용이 최근 활발하게 이루어지고 있다. 구조 최적설계는 경량화에 있어서 매우 매력적인 도구로 각광받고 있지만, 아직까지 철도분야에 본격적으로 적용되고 있지 못하거나 막 시작하는 단계라 할 수 있다. 본 논문에서는 그림 1에 보인 것과 같은 알루미늄 차체의 형상[1]을 구조 최적설계라는 도구를 이용하여 현재 설계를 최적화하는 가능성에 대한 고찰을 시도하였다.

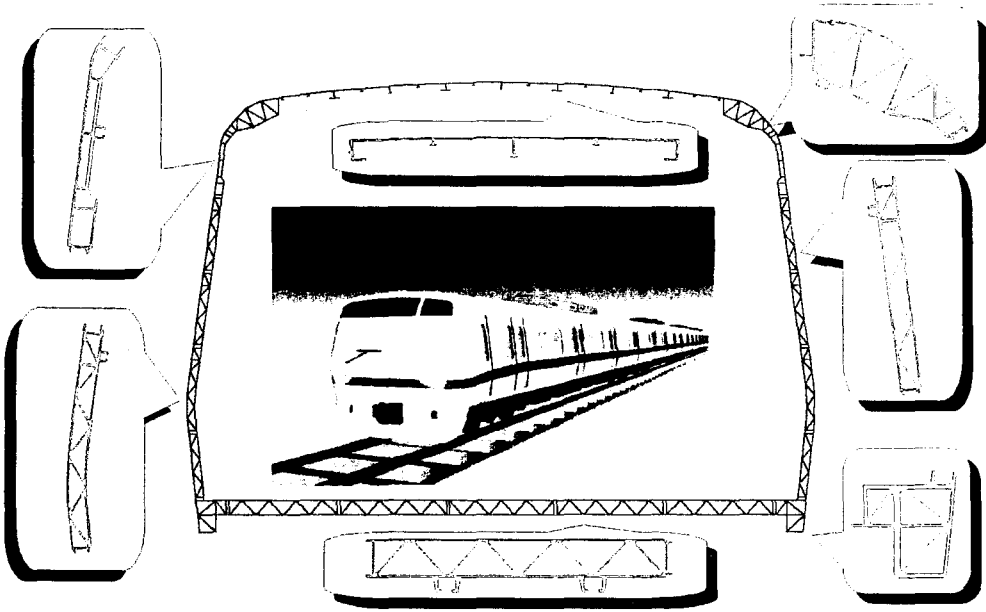


그림 1. 알루미늄 차체의 단면 형상

구조 최적설계는 크게, 토폴로지(Topology), 형상, 치수 최적화로 구분되어 질 수 있다[2]. 혹은 크게 개념설계 단계인 토폴로지 최적화와 상세설계 단계인 형상 및 치수 최적화로 나눌 수도 있다. 본 논문에서는 압출재의 형상을 최적화하는 방법으로 형상 및 치수 최적화 기법을 적용하여 그 가능성에 대한 고찰을 시도하고자 한다.

## 2. 문제정의

본 논문의 주요관점은 형상최적화설계기법이 알루미늄 압출재 형상설계에 잘 적용될지의 가능성에 대한 고찰이다. 목적달성을 위해서는 전체 차체 단면을 한꺼번에 논할 필요는 없다. 따라서, 언더 프레임 중앙에 사용되는 압출재 하나에 한정하여 가능성만 점검하고자 한다.

## 2.1 설계대상 모델

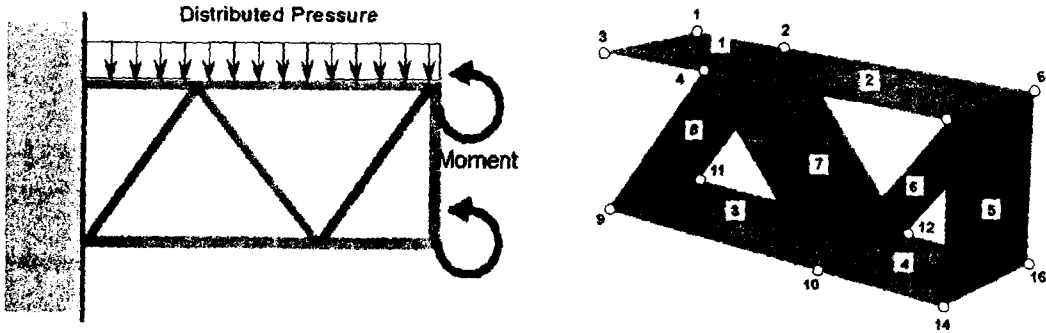


그림 2 언더프레임 압출재의 1/2 모델

고찰의 대상이 되는 압출재를 대칭관계를 고려하여 그림 2와 같이 단순하게 모델링하였다.

### 2.2 경계조건과 하중조건

그림 2에서 보여지는 것과 같이 절점 1, 3, 9, 11을 완전고정시켰다. 모델 전체적으로 z 축방향의 변위는 발생하지 않는 것으로 하였다. 하중조건은 아래 표와 같이 하였다.

	위치	크기	비고
균일분포하중	1, 2번 요소	$-0.005 \text{ kg}_f / \text{mm}^2$	
집중하중	6, 8, 14, 16번 절점	$5000 \text{ kg}_f \cdot \text{mm}$ (+z축방향)	

### 2.4 해석결과

각 요소는 두께 2.8mm의 plate로 하였으며 재질은 알루미늄 A6005A로 하였다[3]. 해석결과로 그림 3에 응력분포와 변형된 형태를 보였다.  $17.10 \text{ kg}_f / \text{mm}^2$ 의 최대응력이 4번요소에서 발생하였으며, 0.075mm의 최대변위가 절점 14, 16번에서 +y 축방향으로 발생하였다.

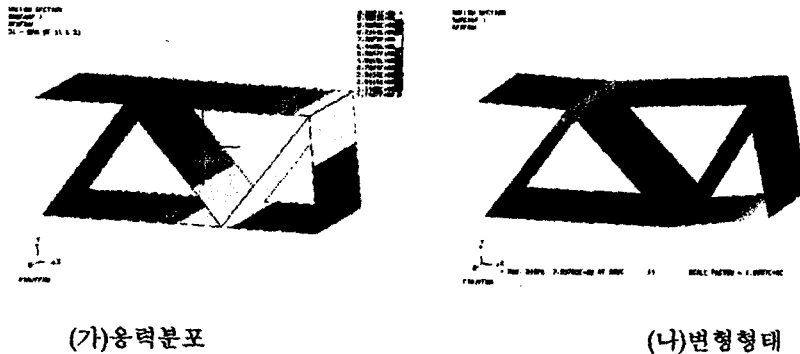


그림 3. 압출재 해석 결과

### 3. 형상과 치수의 동시 설계

위와 같은 해석모델에 대해 형상 및 치수 설계 최적화를 수행하였다. 해석용 프로그램으로는 상용프로그램인 GENESIS[4]를 사용하였다. 목적함수는 전체모델의 중량으로 하였고, 제한조건은 모든 요소의 Von-Mises 응력과 모든 절점의 변위를 취급하였다. 최대변위는 2장에서 나온 해석 결과치를 그대로 사용하였다. 이는 설계대상의 초기치와 같은 강성을 유지하는 최적해를 구하겠다는 목적이다. 응력 제한조건은 최대 von-Mises 응력이  $10 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  이하가 되도록 하였다. 이와 같은 강성과 강도조건하에서 중량을 최소화하는 문제로 만들었다.

#### 3.1 설계변수

각 부재인 Element 1~8번의 두께를 각기 다른 치수설계변수로 선정하였다. 이때 치수의 설계가능폭을 의도적으로 크게 0.1~5.0 mm까지 하였다. 형상의 설계를 위해 각 절점의 좌표값을 설계변수로 잡았으며, 표 1에 설계변수를 나타내었다.

표 1. 설계변수 리스트

변수번호	설명	비고
1	plate의 두께를 각각 치수설계변수로	변수 8개
2	절점 9, 10, 11, 12, 14, 16의 y좌표 변화를 링크(link)하여 압출재의 세로 폭의 크기를 설계변수화	변수 1개
3	절점 2, 4의 x방향 좌표값	변수 1개
4	절점 10, 12의 x방향 좌표값	변수 1개
5	절점 10, 12의 y방향 좌표값	변수 1개
6	절점 14, 16의 y방향 좌표값	변수 1개

#### 3.2 설계결과

총 19회의 측차과정(iteration)을 거쳐 최적해에 수렴하였다. 우선, 표 2에 각 요소의 두께로 설정된 치수설계변수의 결과를 보였다.

표 2. 치수설계변수의 최적해

요소번호	1	2	3	4	5	6	7	8
초기치	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
결과치	1.15	0.786	1.088	1.08	3.62	0.139	0.100	0.144

단위 : mm

최적설계상태의 그림과 중량 및 강도의 개선사항을 그림 4와 표 3에 나타내었다.

표 3. 형상/치수 설계의 중량 및 강도 개선

	초기치	결과치	비고
중량	4.125	1.061	3.88 배 감소
최대응력 ( $kg_f/mm^2$ )	17.10 (4번 요소)	9.98 (4번 요소)	71% 감소

HELLON SECTION  
SUBCASE 1  
GENERAL  
31 - MAX OF 11 & 21

8.1871E+00  
7.6294E+00  
7.1517E+00  
6.6741E+00  
6.1964E+00  
5.7187E+00  
5.2410E+00  
4.7633E+00  
4.2856E+00  
3.8079E+00  
3.3302E+00  
3.3302E+00 0



그림 4. 형상/치수 설계의 최적해 결과

### 3.2 설계고찰

주어진 하중 하에서 형상 및 치수 변경이 급격하게 진행되었음을 알 수 있다. 압출재의 세로 폭은 80에서 50mm 이하로 변하였다. 중량이나 용력값은 크게 개선되었다. 하지만, 치수변수에서 보는 바와 같이 내부격자들의 치수가 너무 작아져서 실제 제작은 거의 불가능할 것으로 보인다.

## 4. 형상 설계

위의 예제의 결과는 실제 적용하기에 두께가 너무 작아서 불가능하고 실질적으로는 2.5 mm 정도가 최소라고 보는 것이 기술적으로 타당하다고 본다. 이 장에서는 두께를 모두 2.8mm 로 고정했을 때 형상만 설계한다면 어떤 최적해를 구할 수 있나 살펴보았다.

### 4.1 설계변수

표 1의 설계변수 리스트에서 설계변수 1을 제외한 형상만을 설계변수로 선택하였다.

## 4.2 설계결과

표 4. 형상 설계의 중량 및 강도 개선

	초기치	결과치	비고
중량	4.125	3.483	15.57% 감소
최대응력 ( $kg_f/mm^2$ )	17.10 (4번 요소)	9.98 (5번 요소)	71% 감소

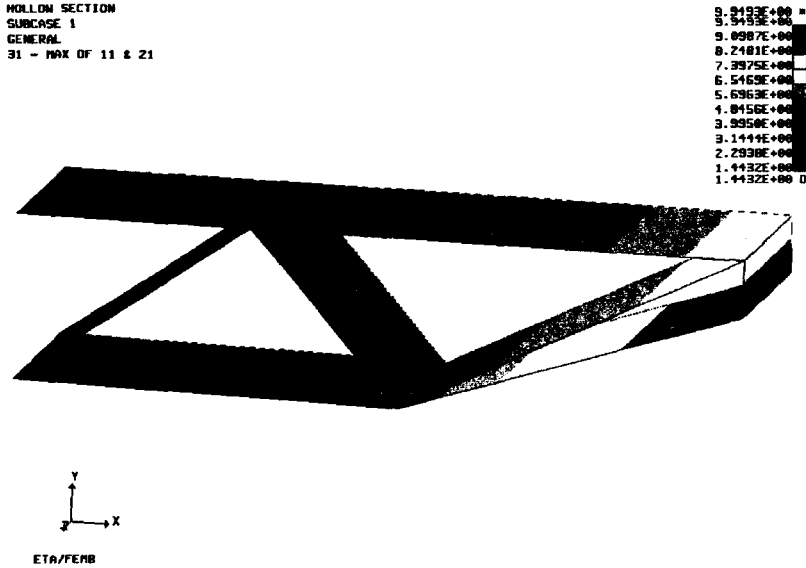


그림 5. 형상설계의 최적해 결과

두께를 고정하고 형상을 변화시킬 때도 상당한 설계 개선이 이루어지는 것을 보인다. 압출재의 세로폭이 80에서 45mm이하로 급격하게 줄어 들었다. 하지만, 강성은 거의 변화가 없고, 응력이 약 75%감소되는 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 똑같은 재료의 양을 사용하더라도 얼마나 효율적으로 재료를 분포(distribution)시키느냐에 따라 구조의 성능은 크게 달라진다는 예를 보인다고 하겠다.

## 5. 토폴로지 설계에의 응용가능성

경량화 설계에서는 압출재의 형상뿐만 아니라, 초기개념설계 단계인 토폴로지(topology)결정에도 관심을 가지지 않을 수 없다. 즉, 압출재의 상판과 하판사이에 격자모양의 개수를 몇 개로 하는 것이 적절한지는 중요한 문제이다. 이럴 때 최적 형상설계기법을 이용하여 이것을 결정할 수 있을지 가능성을 검토해보았다.

5.1 문제정의

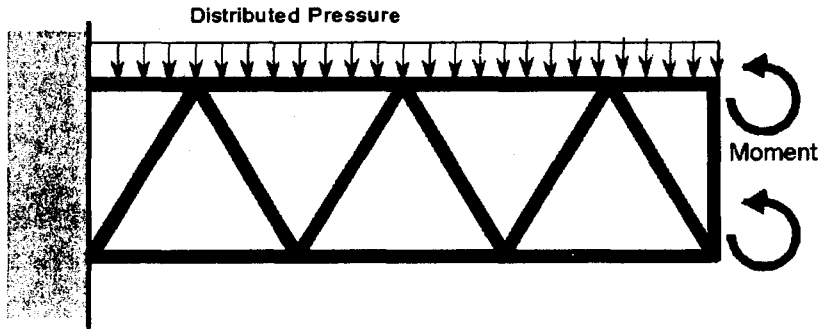


그림 6. 격자 수 결정 문제의 모델

그림 5와 같은 초기형상을 생각할 수 있다. 하중조건과 경계조건은 그림 2에서 보인 예제와 동일하게 하였고, 세로폭을 80에서 60mm로 낮춤으로써 180 × 60의 상대적으로 길이가 긴 부재가 되도록 하였다. 설계변수는 각 부재의 두께와 각 절점의 x 방향 절점좌표값으로 하였다.

5.2 설계결과

총 18번의 측차를 거쳐 최적해에 수렴한 것으로 나타났다. 그림 7에 결과를 보였다.

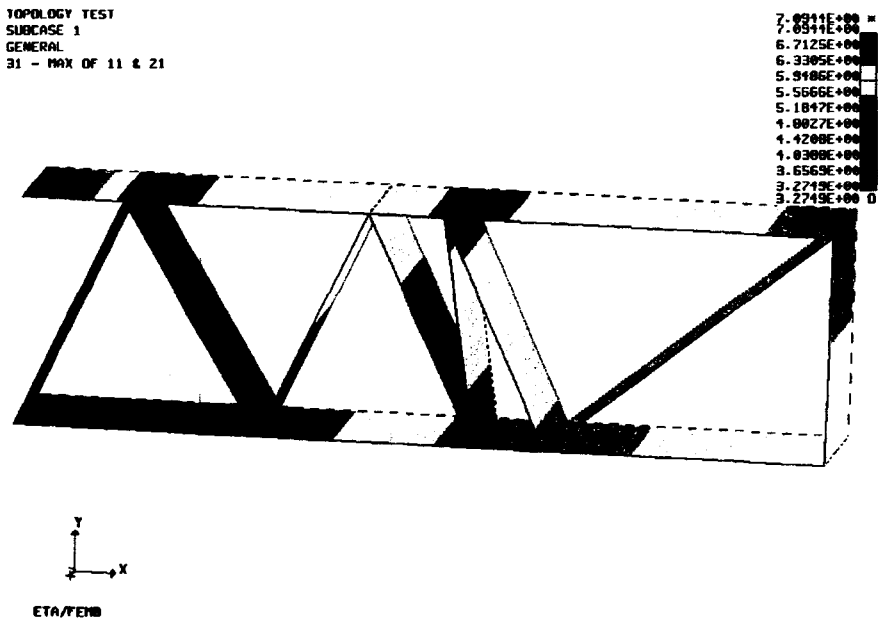


그림 7. 격자 수 결정 문제의 최적해

그림에서 보는 바와 같이 일부 격자들이 서로 간격이 좁아지면서 모이는 것이 보인다. 두께를 설계변수로 설정한 결과, 이들 부재의 두께는 매우 작은 값으로 나타나므로 이들 부재들은 하나로 합쳐지는 것이 타당하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 이 문제에서의 격자 수는 어느정도가 적당하다는 것을 판단하는 자료로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

## 6. 결론

이제까지의 고찰을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 현재의 압출재 모양은 어떤 특정한 하중상태에 최적인 모양이라기 보다는 일반적인 하중상태에서도 강성을 충분히 가질 수 있도록 격자구조의 모양을 갖추고 있다. 특정하게 주어진 하중상태에서는 현재의 압출재 형상보다 더 최적의 모양이 존재할 수 있다.
- 주어진 하중상태에 따라, 즉 부재가 쓰이는 위치에 따라 그 형태가 더 개선될 여지는 많으며 형상최적설계기법을 적용하면, 설계개선의 가능성이 매우 많다.
- 몇가지 예제에서는 최적설계기법을 통하여 거의 동일한 강성으로도 중량감소와 강도증가를 동시에 많이 개선할 수 있었다.
- 압출재 내부격자의 두께는 대부분의 최적화 결과로부터 판단한다면, 제작가능한 범위내에서는 최대한 작게 제작하는 것이 최적해에 접근하는 결과를 준다.
- 가능성을 점점하는 차원에서의 예제들은 성공적으로 설계개선이 이루어졌으나, 향후 실제 차량설계에 적용하기 위해서는 다수의 기술적 방법들이 연구되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. "표준전동차개발을 위한 구조체 강도해석", 권태수 외 3인, 한국철도학회 1998년도추계학술대회는문집 pp. 455~, 1998.11, 한국철도학회
2. "유한요소법과 최적구조설계 CAE", 송영준 외 2인, 1999, 성안당
3. "철도차량 구조용 알루미늄 압출형재 및 차체 구조 개발에 관한 연구", 1996.6, 통상산업부
4. "GENESIS Reference manual", 2000, VR & D
5. "전동차 표준사양 연구보고서 (분야: 차체 및 설비)", 1998, 건설교통부