

알루미늄 구조체의 치수 최적화에 관한 연구

A study on the optimization for size design of EMU aluminium bodyshell

홍재성 *
Hong, Jaisung

이호용 **
Lee, Hoyong

김원경 ***
Kim, Wonkyong

최성규 ****
Choi, Sungkyou

Abstract

The standardization urban transit project has been started by government and the Korean standard electrical railcar has been designed. The bodyshell of standard railcar is made of aluminium alloy. In the present paper, the design of its bodyshell is evaluated in the viewpoint of strength analysis. The loading condition is based on the 'Test Methods of Static Load for Body Structure of Electrical Multiple Unit', standard specification. The bodyshell of Korean standard EMU consist of longitudinal extrusion members which are double-skin structure type. For the purpose of security and lightening we decided the section of the aluminium carbody through the size optimization in this paper. Hereafter this paper will contribute to the shape optimization

1. 서 론

건설교통부의 주관하에 '표준전동차'라 불리는 전동차를 개발중이며[1] 알루미늄으로 제작된 전동차에 대해 강도해석을 하였다.[2] 알루미늄으로 제작하는 이유는 여러 가지 있지만 가장 중요한 요인으로 경량화라고 할 수 있다. 초기에는 SSD(Sheet-Stringer Design)형식에서 AED(All Extrusion Design)형식으로 설계되었고 더욱더 경량화되어 가고 있는 추세이다. AED 모델의 단면부재 최적화에 대한 연구가 진행되고 있으나 단면 부재들이 조립된 상태에서의 최적화 연구가 아직 미흡하다. 이 논문에서는 안전성 및 경량화를 목적으로 치수최적화에 관한 연구하였고, 전체 구조물에 대한 각 부재의 영향을 검토하였다. 향후, 알루미늄 구조체의 단면을 결정하는데 폭 넓은 적용이 가능하리라 사료되며, 형상최적화를 설계하는데 활용될 것이다.

* 한국철도기술연구원 주임연구원 정회원
** 한국철도기술연구원 주임연구원 정회원
*** 한국철도기술연구원 책임연구원 정회원
****한국철도기술연구원 수석연구원 정회원

2. 초기 구조체의 강도해석

단면형상은 그림1에서 보여진다. 특징은 슬라부분이 슬라이딩&플러그 방식을 도입하기 위해서 수정되었고 켄트레일의 형상은 실내설비의 취부를 원활히 하기 위해서 수정되었다. 수정에 의한 초기 안전성 강도평가를 한다.

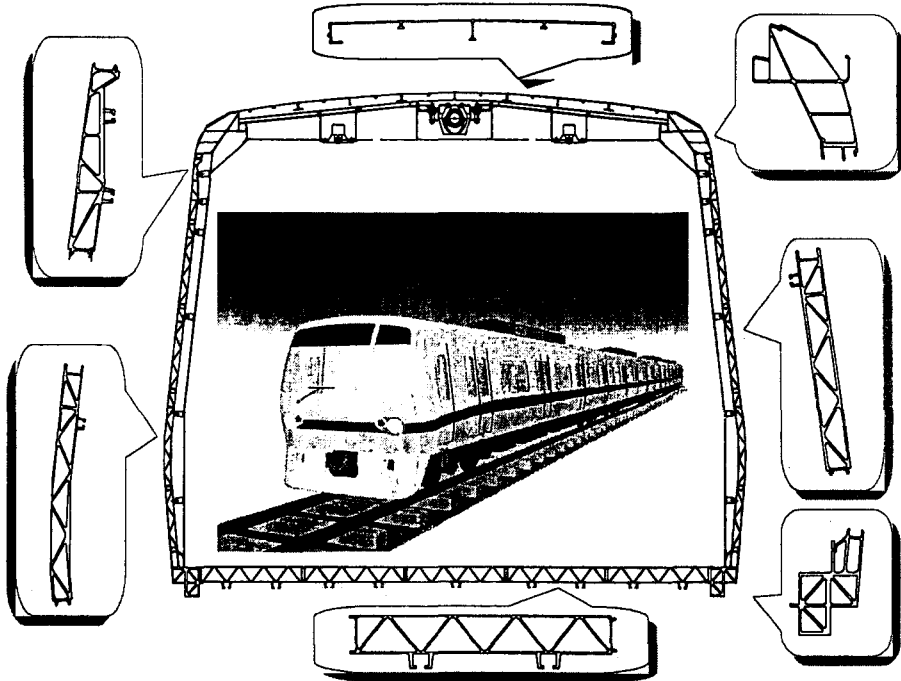


그림 1 표준전동차 단면도

2.1 물성치 및 하중조건

구조체의 재질은 A6005A이며 Table1과 같은 물성치를 가진다. 하중조건은 도시철도차량하중시험방법[3]에 근거하여 강도평가를 하며 최적설계의 하중조건은 수직하중에 대해서 고려하고 Table2를 근거로 강도평가를 한다.

Table 1. 사용재질의 물성치

| 재질 | 인장강도 (kgf/mm ²) | 항복강도 (kgf/mm ²) | 탄성계수 (kgf/mm ²) | 포아송비 | 밀도 (kgf · s ² /mm ⁴) | 비고 |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------------------------------------|----|
| A6005A | 26.5 | 21.9 | 7.3×10^3 | 0.33 | 2.857×10^{-10} | |

모재에서는 항복강도 21.9 kgf/mm²와 인장강도의 70% 인 18.6 kgf/mm²중에서 작은 값인 18.6 kgf/mm²를 기준값으로 하였고, 여기에 안전율 1.5를 적용한 12.4 kgf/mm²를 허용응력으로 하며 용접부의 허용응력은 모재의 70%인 8.7 kgf/mm²이다. 이 값은 DVS 1608에 의한 모재와 미그(MIG) 용접부의 설계 허용응력값도 일치하는 값이다. 강성 및 고유진동수의 판정기준은 도시철도차량 표준사양과 동일하게 하였다. 정리하면 Table2와 같다.

Table 2. 안전성 판정기준

| 구 분 | 판정기준 | | 비 고 |
|---------|------------|---------------------|--------------------------|
| 강 도 | 정하중 | 모재부 | 12.4 kgf/mm ² |
| | | 용접부 | 8.7 kgf/mm ² |
| 강 성 | 슬바의 최대처짐 | 볼스터간 거리의 1/1,000 이하 | |
| 굽힘고유진동수 | 10.0 Hz 이상 | | |

2.2 모델링 및 경계조건

초기 모델을 그림1에서 보여지는 설계를 대상으로 구조체의 해석모델을 완성하였다. 수직하중만을 고려하여 최적설계를 수행하기 때문에 1/4car만을 모델링 하였다. MSC/Nastran에서 제공하는 9664개의 셸(Shell)요소와 6674개의 질점을 사용하였다.

1/4car에 대한 경계조건은 그림2에서와 같이 구속하고 공기스프링이 고정되어지는 차체볼스타 부분을 고정하였다.

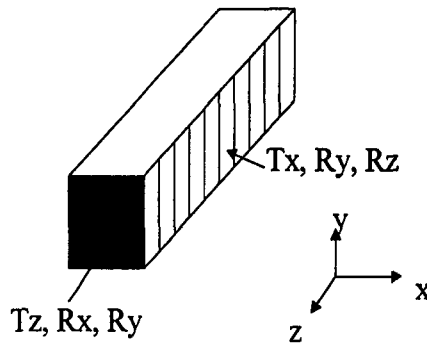


그림2. 1/4car의 경계조건

2.3 초기해석 결과 및 고찰

그림3에서 보는 것과 같이 최대 응력집중부는 출입문 코너와 창문 코너부위에서 응력이 집중되는 현상이 발생한다. 그러나 최대응력부의 결과는 안전성 평가기준을 만족한다. 최대응력값은 7.66 kg/mm²이며 이 값을 초기 해석결과로 활용한다. 용접부의 8.7kg/mm²보다 11.85%정도 더 안전한 결과를 얻었다.

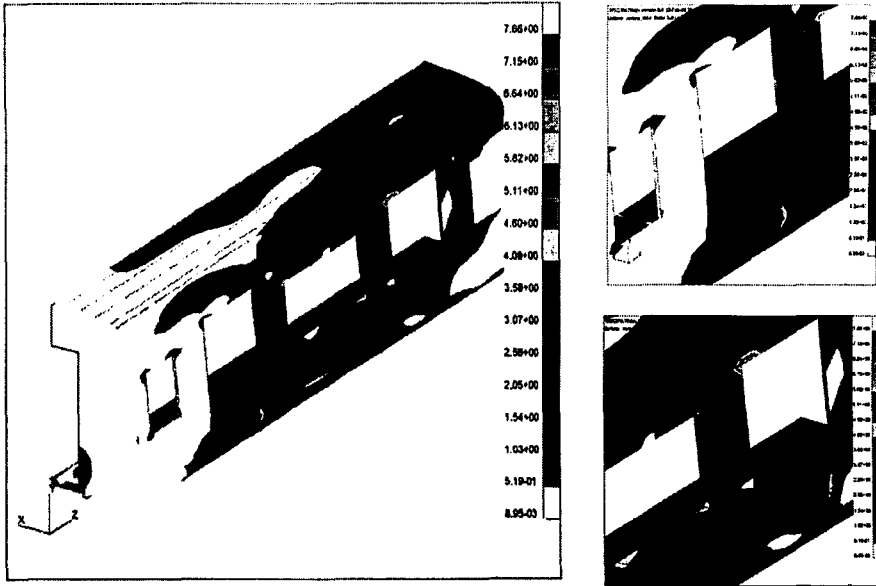


그림 3 초기 강도해석

3. 최적설계

설계의 목적은 주어진 여러 가지 설계구속 조건하에서 가장 최적의 성능을 갖도록 설계하는 것이다. 최적의 제품을 만들어 내기 위해 초기 설계된 설계사양에 따라 시작품을 만들어 보고 여러 가지 시험을 거쳐 요구되는 성능이 만족할 때까지 설계한다. 설계과정에서 설계를 어떻게하면 더 나은 설계를 할 수 있는나를 결정하는 것이 엔지니어의 능력이라 해도 과언이 아니다. 결국 본 연구에서는 이러한 최적설계의 기초가 되는 가이드를 제시하고자 한다.

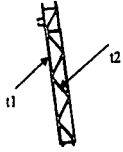
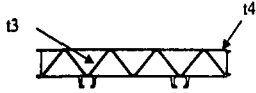
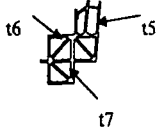
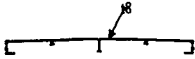

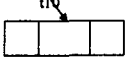
본 연구에서는 최적설계의 문제를 해결하기 위해 가장 기본적인 세 가지 입력데이터가 필요하다.

- 1) 설계변수 - 설계가 변경하는 설계 데이터 변수 : 각 단면구조물의 두께
- 2) 목적함수 - 최적화시 목표가되는 함수 : 무게
- 4) 구속조건 - 최적화시 설계사양을 결정하는 설계 성능 목표 값들 : 최대응력

3.1 설계변수 및 구속조건 설정

설계변수는 사이드프레임, 언더프레임, 솔바, 루프, 켄트레일 등으로 하중조건에 가장 영향을 받는 부재로 선정하였다. 부재별로 다시 두께 값을 설계변수로 선정하였으며 길이 방향의 두께는 링크시켰다. Table3에서 두께의 초기값 및 설계변수 범위를 제시하였다. 구속조건은 모든 element에서 최대응력 값은 $8.7\text{kg}/\text{mm}^2$ 를 갖도록 하였다.

Table3. 설계변수와 형상

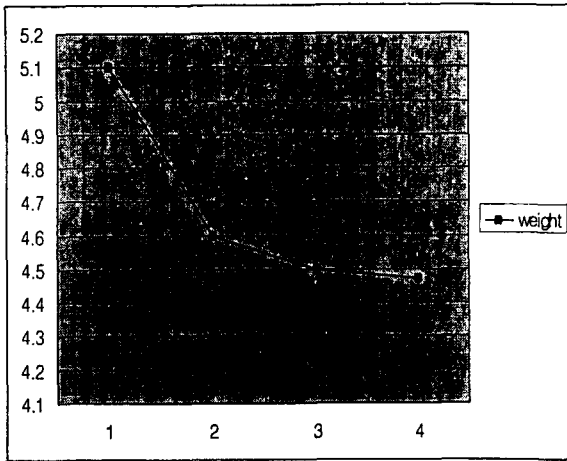
| 설계변수 | 형상 | 초기값(mm) | 설계변수 범위 | 비고 |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------------|----|
| 사이드프레임 |  | t1 = 3 | $1 \leq t1 \leq 3$ | |
| | | t2 = 3 | $1 \leq t2 \leq 3$ | |
| 언더프레임 |  | t3 = 2.5 | $1.5 \leq t3 \leq 2.5$ | |
| | | t4 = 2.8 | $1.5 \leq t4 \leq 2.8$ | |
| 솔바 |  | t5 = 5 | $1 \leq t5 \leq 5$ | |
| | | t6 = 7 | $1 \leq t6 \leq 7$ | |
| | | t7 = 10 | $1 \leq t7 \leq 10$ | |
| 루프 |  | t8 = 2.8 | $1 \leq t8 \leq 2.8$ | |
| 켄트레이 |  | t9 = 3 | $1 \leq t9 \leq 3$ | |
| 차체볼스타 |  | t10 = 15 | $1 \leq t10 \leq 15$ | |

3.2 최적해석 결과

그림 4는 목적함수의 함수이며 최적설계후 두께의 결과 값이다.

이 결과에서 보는 것처럼 두께의 변화가 다양하게 흐르고 있다. 초기설계의 강도가 안전하여 구속조건을 $8.7\text{kg}/\text{mm}^2$ 로 선정하여 초기 값보다 작은 설계값을 가진다. 최적설계후 최대 응력집중의 출입문 코너에서 $8.54\text{kg}/\text{mm}^2$ 결과를 얻었다.

설계변수의 흐름을 파악하면 대체로 최적화에 근접하게 설계되었으나 과도하게 설계된 부분도 있었다. 언더프레임과 루프는 초기 설계값보다 줄어드는 경향이 있으며 언더프레임의 경우는 과도하게 설계되었다. 실제로 최대 구속조건인 최대응력 값을 $7.7\text{kg}/\text{mm}^2$ 으로 하고 설계변수의 값은 Table3과 같이 선정하고 최적설계 해석을 한 결과도 비슷한 경향을 나타낸다.



| 설계변수 | 결과 값(mm) | 비 고 |
|--------|-----------|-----|
| 사이드프레임 | t1 = 3 | - |
| | t2 = 3 | - |
| 언더프레임 | t3 = 1.5 | ↓ |
| | t4 = 1.5 | ↓ |
| 슬 바 | t5 = 4.67 | ↓ |
| | t6 = 7 | - |
| | t7 = 10 | - |
| 루 프 | t8 = 2.5 | ↓ |
| 켄트레일 | t9 = 3 | - |
| 차체볼스타 | t10 = 15 | - |

그림 4 최적설계 결과

4. 결과 및 향후과제

최적설계 결과 언더프레임이 과도하게 설계되었고 설계변경을 검토해야 한다. 그렇지만 압출소재로 이루어진 단면부재들은 여러 가지 제한 조건들을 고려해야 한다. 우선, 압출소재는 두께의 제한을 받기 때문에 2.5mm이하는 생산하기 어렵기 때문에 2.5mm이하의 최적설계 값은 의미가 없다. 결국 형상의 높이 즉 80.5mm를 낮출 필요가 있으며 낮추어진 높이는 소음차단재 등을 설치하는데 많은 도움이 된다. 우선 언더프레임이 과도하게 설계되었고 두께에 제한을 받는다면 형상최적화를 실시해야 한다. 본 연구에서는 각 두께별 영향을 파악하는데 그쳤지만 향후, 언더프레임 및 각 부재별 형상을 최적화해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] “전동차 표준사양 연구보고서 (분야 : 차체 및 설비)”, 1997.12, 건설교통부
- [2] 권태수, 이호용, 이관섭, 최성규(1998년), “표준전동차 개발을 위한 구조체의 강도해석”, 한국철도 공학회
- [3] “도시철도차량 표준사양”, 1998, 건설교통부