

## 자기부상차량 차체의 알루미늄 압출재 최적 설계

박상우, 오개희, 강면규  
동양강철

### An Optimal Design of Aluminum Extrusion Profile for Magnetic Levitation Car Body

Sang Woo Park, Kae Hee Oh, Myeon Gyu Kang  
DongYang-Gangchul

**Abstract** - 철도차량의 경량화를 위해서 오늘날 알루미늄 압출재의 사용이 증가하고 있는 추세이며, 이를 통한 차체 제작이 일반화 되고 있다. 경량화에 대한 요구는 더욱더 가속화되고 있으며, 특히 자기부상열차의 경우 환경규제 및 에너지 효율성 증대의 측면에서 경량화가 더욱 절실히 요구되고 있다. 그러나, 알루미늄 압출의 특성상 폭 대비 두께에 대한 제약이 따르므로 추가 경량화를 위해서는 알루미늄 압출재의 구조적인 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 중공형 알루미늄 압출재의 내부 Rib 형상에 따른 굽힘 특성을 비교함으로써 알루미늄 압출재의 경량화를 이루고자 하였다.

#### 1. 서 론

최근들어 환경규제 강화 및 화석연료 고갈로 인해 선진 각국을 중심으로 대체 에너지 개발이 활발히 진행되고 있으며, 자동차 등 수송기계 분야에서 에너지 효율성 증대 및 에너지 절약을 위한 다양한 방안들이 기획, 개발되고 있는 실정이다. 특히 철도차량 분야는 국가 기반사업의 일부로서 매우 중요한 위치를 차지하고 있으며, 철도 선진국인 독일, 일본 등을 중심으로 에너지 효율성 및 절약의 관점에서 철도차량 차체 경량화를 위한 연구가 활발히 연구되어지고 있다. 특히 자기부상열차 분야에서 저출력 및 경량 부상, 추진장치 적용으로 에너지 저감 정책과 함께 자기부상열차의 상업화를 통해 양산 적용을 마친 상태이다. 그간 국내에서는 자기부상열차 부상, 추진장치 등에 대한 연구는 활발하게 진행되어 왔으나, 차체 경량화에 대한 연구는 미비하여 본격적인 상용화 단계에 이르지 못하고 있는 실정으로 자기부상열차 상업화를 위해서는 차체 경량화에 대한 연구는 반드시 이루어져야 할 중요 기술 중의 하나이다.

알루미늄은 강의 경량화 측면에서는 유리하지만, 소재 자체가 갖는 강성이 부족하여 처짐이나, 좌굴등의 구조적 문제점이 발생할 수 있다. 근래에는 이러한 알루미늄의 구조적인 문제점을 보완하기 위하여 질량에 비해 높은 강성과 강도를 갖는 샌드위치 구조의 압출재를 사용하고 있다.

본 논문에서는 도시형 자기부상열차 유사차량에 사용된 압출재를 상용 유한요소 프로그램인 Ansys Workbench를 사용하여 분석하고 압출재 Rib 구조의 변경 및 해석을 통해 알루미늄 압출재의 최적 단면 형상을 제시하고자 하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 정하중 해석

철도차량의 차체 경량화는 차량의 제작, 유지보수 및 운행상 측면에서 많은 이점이 있으므로, 이를 위해 차체 중량을 최소화하며 동시에 적정강성을 갖는 최적의 설계가 수행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서 사용된 도시형 자기부상열차 유사차량의 Under Frame용 알루미늄 압출재는 대차부와의 연결부가 있는 삼각형 Rib 형상을 갖는 샌드위치 구조로 되어있으며, 전체 폭은 558mm, 높이는 92mm이며 길이는 13,400mm이다. 그러나 효과적인 해석을 위하여 대차부와의 연결부를 제외한 길이 1000mm의 압출재로 한정하여 모델링을 수행하였다. 또한 굽힘 특성을 파악하기 위하여 Fig.1과 같은 모델형상을 이용하여 양단고정 상태에서 50,000N의 분포하중을 받는 상황을 가정하였다.

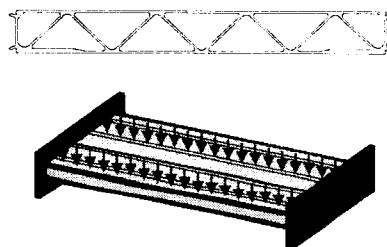


Fig. 1 유한요소 모델링

##### 2.2 정하중 해석 결과

도시형 자기부상열차 유사차량의 Under Frame용 알루미늄 압출재의 굽힘 특성에 대한 결과는 다음과 같다. Fig.2는 기준 모델로 설정된 알루미늄 압출재의 정하중 해석 결과로서 양단고정 상태에서 50,000N의 분포하중에 대한 알루미늄 압출재의 최대 처짐량 및 최대 유효 응력을 나타내고 있다.

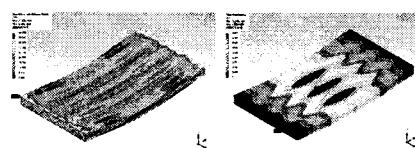


Fig.2 최대유효응력 및 최대 처짐량

Fig.2에서 나타난 바와 같이 50,000N의 분포하중이 주어졌을 때 압출재 표면에 균일한 응력분포를 나타내고, 변

형량도 거의 없음을 보이고 있다. 이는 정하중 해석결과 내부 Rib의 형상과 두께가 최적임을 보여주는 것으로, 이때 최대 처짐량은 0.82mm이며 최대유효응력은 56MPa을 나타내고 있다.

### 2.3 알루미늄 압출재 단면 형상 최적화

#### 2.3.1 중공형 압출재 Rib 형상의 최적화

도시형 자기부상열차 유사차량의 단면은 Fig.3과 같이 Under Frame, Side Frame, Roof Frame, End Frame으로 구성되어 있으며, 중공을 이루는 내부 Rib의 형상은 삼각형 형태를 이루는 것으로 동일하다. 이에 유사한 단면적을 갖는 상태에서 내부 Rib 형상의 변화에 따른 알루미늄 압출재의 최대유효응력 및 최대 처짐량의 변화에 대해 관찰하였다.

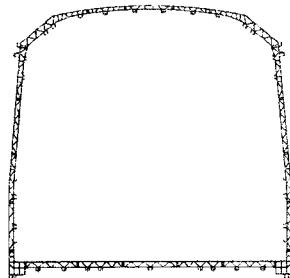


Fig 3 도시형 자기부상열차 유사차량의 단면 형상

중공형 알루미늄 압출재의 내부 Rib형상 변화에 따른 최대유효응력 및 최대 처짐량의 변화를 알아보기 위해 Fig.4,5와 같이 사다리꼴 및 팔각형 형상의 Rib 구조를 채택하여 설계 및 해석을 수행하였으며, 채택된 형상은 산자부 중기거점 차량의 압출재와 동일한 높이 및 폭을 유지하였으며, 또한 유사한 중량을 갖도록 하여 동일 조건에서 해석을 수행하였다.



그림 4 사다리꼴 Rib<sup>(1)</sup>



그림 5 팔각형 Rib<sup>(2)</sup>

도시형 자기부상열차 유사차량의 알루미늄 압출재와 동일한 조건으로 굽힘 해석을 실시한 결과를 Fig 6, Fig 7에 나타내었다.

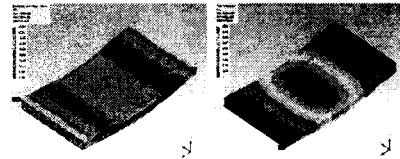


Fig 6 사다리꼴 Rib 형상의 최대유효응력 및 최대 처짐량

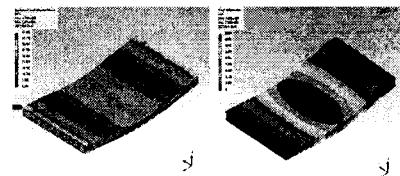


Fig 7 팔각형 Rib 형상의 최대유효응력 및 최대 처짐량

사다리꼴 Rib 형상의 압출재의 해석 결과 최대 처짐량 0.62mm, 최대 유효응력 46Mpa으로 나타났으며 팔각형 Rib 형상의 압출재에서는 최대 처짐량 0.57mm, 최대 유효응력 45Mpa로 나타났다. 즉 삼각 Rib을 갖는 압출형재의 최대 처짐량을 1로 가정했을 때 사다리꼴 Rib은 75%, 팔각형 Rib은 66% 정도의 처짐량을 나타내고 있으며, 이를 통해 상기와 같은 수준의 경량화가 가능하다는 것을 알 수 있었다.

#### 2.4 도시형 자기부상열차 유사차량의 정적 강도 해석

도시형 자기부상열차 유사차량의 정적강도 해석을 수행하였다.

시험 방법 및 정적강도에 대한 평가는 도시철도 차량의 성능시험에 관한 기준의 구조체의 정적하중시험(3-리)와 철도의 정하중 시험 규정의 (JIS E 7105 철도차량 구체의 하중시험방법)에 의거하여 실시하였다.

아래 표1은 산자부 중기거점 차량의 제원이며, 차체 하중 조건은 앞서 설명한 JIS E 7105의 규정에 의거하였다.

표 1 차량 제원

구분	제원
차량 형태	동력차
길이 [mm]	13,400
폭 [mm]	2,850
높이 [mm]	2,580
대차중심간 거리	7,240
대차의 질량 [kg]	9,000

또한 차체 강도기준은 아래 표2와 같다

표 2 설계 강도 기준

구조 특성	기계적 성질	설계 기준
차체 강도	허용 용력	압출재 $12.4 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$ 이하
		용접부 $8.7 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$ 이하
차체 강성	U/F solebar	5.3mm이하(대차중심간거리/1000)
	처짐량	고유진동수 대차의 고유진동수 이상

\* AL6005 재질은 알루미늄 압출재의 허용용력 이상이고 이 값은 KRRI에 의해 (Korea Railroad Research Institute) 권장된다.

Fig 8과 Fig 9는 수직, 수평 압축시험의 경계조건에 대한 개략도이다.

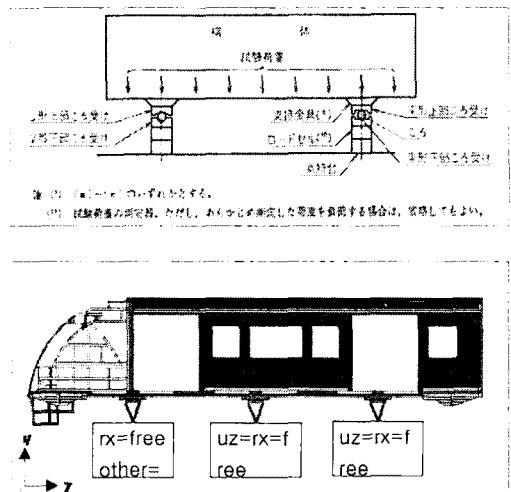


그림 8 수직 하중 시험의 개략도

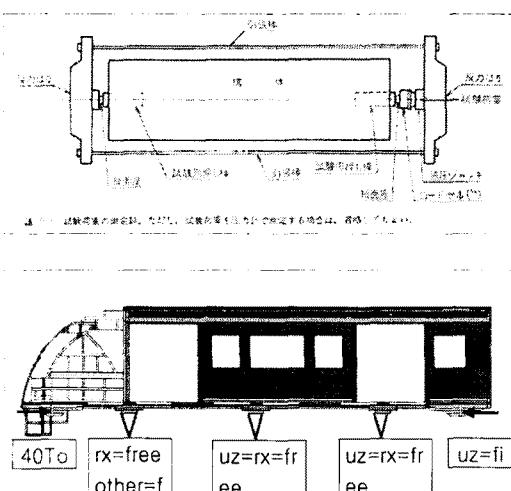


그림 9. 수평 압축 하중 시험의 개략도

각 부분별 3차원 형상 모델링 파일을 이용하여 동력차량의 조립모델을 생성하고, 각 연결부의 위치공차를 확

인하였다. 또한 메쉬간의 연속성을 고려하여 대차부와 전두부의 자유 곡면부분을 분류하였으며 이에 따라 모델링의 우선순위를 정의하였다. 메쉬의 크기는 25mm로 생성하였다.

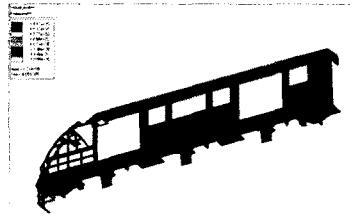


그림 10. 수직 하중 조건에서의 변위

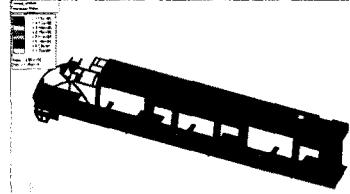


그림 11. 수직 하중 조건에서의 용력분포

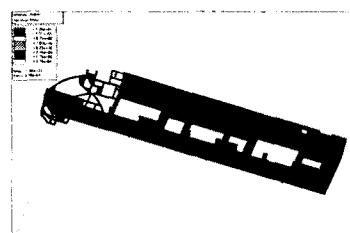


그림 12. 압축 하중 조건에서의 용력분포

표 3. 도시형 자기부상열차 유사차량의 해석 결과

하중 조건	동력차(MC)	
	결과	변형 발생 지점
수직 하중	최대변위 : 5.21	언더프레임
	최대용력 : 4.82	bolster 주변부
수평 압축 하중	최대용력 : 12.2	언더프레임

수직하중과 수평압축하중 하에서의 도시형 자기부상열차 유사차량의 차체 정적강도 해석 결과는 표 3과 같다. 해석 결과에 근거할 때 해당 차체는 설계기준을 만족한다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 자기부상열차 차량의 경량화를 위해 도시형 자기부상열차 유사차량에 적용된 알루미늄 압출재를 대상으로 내부 Rib형상에 따른 굽힘 해석을 실시함으로써 알루미늄 압출재의 최적화 설계안을 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을

수 있었다.

(1) 동일한 중량 및 두께 하에서 알루미늄 압출 재의 내부 Rib 형상의 변경을 통해 굽힘 특성을 향상 시킬 수 있었다. 굽힘 특성은 삼각형 Rib < 사다리꼴 Rib < 팔각형 Rib 순으로 나타났으며, 이를 통해 알루미늄 압출 재의 경량화가 가능함을 알 수 있었다. 즉, 최대 처짐량 비교를 통해 최대 33%의 추가 경량화가 가능할 것으로 사료된다.

(2) 유한요소 모델링과 해석을 통하여 최대유효응력 및 최대처짐 변화량, 그리고 경량화율을 확인한 결과 사다리꼴과 팔각형 Rib을 갖는 압출 재의 특성이 우수함을 알 수 있었으나, 팔각형 Rib을 갖는 압출 재의 경우 중공을 갖는 부위가 사다리꼴 Rib을 갖는 압출 재에 비해 많으므로 압출금형 제작의 용이성 측면에서 사다리꼴 Rib을 갖는 압출 재를 사용하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

(3) 알루미늄 압출 재를 적용한 철도차량의 차체에 있어 두께의 최소화를 통한 차체의 경량화 뿐만 아니라 샌드위치 구조에서의 내부 Rib 형상 또한 경량화에 중요한 변수로 작용함을 알 수 있었다.

(4) 압출 재의 추가경량화를 위해 알루미늄 중공형 압출 재의 내부 Rib 형상에 따른 정적 강도 해석을 수행을 통한 고찰이 추가적으로 필요하며, 또한 알루미늄 중공형 압출 재의 최적의 압출 가능 두께에 대한 고찰이 추가로 이루어져야 할 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 허승진, “철도차량 알루미늄 압출 재의 충격에너지 흡수 특성”, 한국철도학회 학술발표대회 논문집, 155~162, 1999.11