

유한요소 해석에 의한 전동차 대차 프레임의 구조 취약부 해석

Structural Weak Area Analysis of an Electric Car Bogie Frame by Finite Element Analysis

구병춘*, 황원주**, 최성규*, 오일근*

Goo, Byeong-Choon, Whang, Won-Joo, Choi, Sung-Kyu, Oh, Il-Geun

ABSTRACT

we studied the structural weak areas of an electric car bogie frame by finite element analysis. The bogie frame under consideration is a part of the standard electric car with aluminium car body. Vertical, torsional, lateral and longitudinal loadings were applied. Numerical results were compared with the experimental results. The two results are in a good agreement.

1. 서론

철도차량의 안전은 인명과 재산에 직접적으로 관련되어 있기 때문에 그 중요성이 널리 인식되어 왔으며, 최근에는 열차의 고속화를 위한 차체 경량설계의 필요성이 증가되고 있다. 우리나라에서도 1980년대 이후로 차량의 경량화를 계속 추진하고 있다. 특히 재질에 있어서 강에서 스테인레스, 스테인레스에서 알루미늄 합금과 같은 가벼운 재질로 변화하고 있는 추세에 있다 [1, 2]. 최근에는 알루미늄 합금이 적절한 강도를 가질 뿐만 아니라 가볍기 때문에 차세대 철도차량의 재질로서 각광받고 있다. 알루미늄 압출재는 일정한 크기로 압출되어 용접을 통하여 구조물로 제작되어 사용된다.

본 연구에서 대상으로 하는 전동차 모델은 현재 국내에서 운행 중인 전동차로서 전차선을 통해 DC 전원을 공급받는 통근형 직류전동차이다. 길이 17,500 mm, 폭 2,750 mm, 지붕높이 (레일상면 기준) 3,600 mm로서, 중형 전동차에 해당하는 차량이다. 이러한 알루미늄 전동차 차체에 대해 유한요소 모델링을 하고 구조강도해석을 수행하여 취약부위에 대한 응력값을 검토하고 실험결과와 비교평가를 하였다.

2. 차체 유한요소 해석

2.1 모델링

알루미늄 차체의 전체에 대한 유한요소모델을 완성하였다. 모델링에는 상용 유한요소 프로그램인 NISAII/DISPLAYIII을 사용하였으며, 본 프로그램에서 제공하는 셸 요소 (Shell element)와 절점(node)을 사용하였다. 모델링에는 34,290개의 절점과 55,900개의 요소가 사용되었다. Fig. 1은 차체에 대한 유한요소 모델이다.

* 한국철도기술연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 학연과정 박사과정, 학생회원



Fig. 1. Finite element model of the car body

A 6005 A 합금은 우수한 압축성과 인장력에 의한 적절한 강도로 인해 최근 절도차량에 적용되고 있는 재료이다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 건물차 차체의 적절한 알루미늄 합금 A 6005 A의 기계적 성질은 DIN 17481[3] 특약규격에 의하면 Table 1 같다.

Table 1. Mechanical properties (DIN 17481)

재질	인장강도 (kg/cm ²)	항복강도 (kg/cm ²)	탄성계수	포아송비	밀도 (kg/cm ³)
A 6005 A	26.5	21.9	7.3×10^4	0.33	2.857×10^{-3}

실제 강도가 기준으로는 모재에서는 항복강도 21.9 kg/cm²와 인장강도가 70 MPa인 18.6 kg/cm² 중에서 작은 값인 18.6 kg/cm²를 기준으로 하였고, 여기에 안전율 1.5를 적용한 12.4 kg/cm²를 허용응력으로 하며, 용접부의 허용응력은 모재의 70 MPa인 8.7 kg/cm²로 하였다. 여기서, 알루미늄 합금의 강도기준은 Table 2와 같으나 안전을 위해 항복강도와 인장강도의 70 MPa를 기준으로 안전율 1.5를 고려한 것이다. 강도판정기준을 Table 2에 나타내었다[3].

Table 2. Reference values for the strength evaluation

해석종류	평가항목	평가기준	
		모재부	12.4 kg/cm ²
수직/압축하중	강도	용접부	8.7 kg/cm ²
	재질량	대차간 중심 길이의 1/1000 이하	
비틀림 하중	강도	모재부	8.7 kg/cm ²
		용접부	4.9 kg/cm ²

JIS E 7105[4](절도차량 구조체 하중시험 방법)에 근거하여 수직, 압축, 비틀림 각각의 하중조건에 대해서 구조해석을 수행하였으며, Table 3은 각각의 경우에 대한 적용하중 값을 보여 준다.

Table 3. Applied loading values in analyses (JIS E 7105)

Case	수직하중(ton)	비고
수직하중	47.6	(공차중량+승객하중+대차중량)×용하중계수 = 차체중량
압축하중	50 (압축) 14.6 (인장)	(공차중량-대차중량)+압축하중
비틀림 하중	4 tonm	

2.2 해석 결과

수직, 압축, 비틀림 하중에 대해 해석을 수행하고 결과를 정리하면 Table 4와 같다. 수직하중의 경우 최대응력은 등가응력으로 9.65 kg/mm²이 나왔으며, 그 위치는 두번째 출입문의 상부에서 발생하였고, 다음은 첫번째 출입문의 하부에서 4.9 kg/mm²의 응력이 발생하였다. 이는 허용응력 12.4 kg/mm² 이내에 해당한다. 압축하중의 경우 최대응력은 센터실의 끝단에서 5.7 kg/mm²이 나왔으며 이는 허용응력 이내에 들어있다. 비틀림하중의 경우 첫번째 출입문의 하단 모서리 부위에서 1.7 kg/mm²의 응력이 발생하였으며 이 또한 허용응력 8.7 kg/mm² 이내에 들어 있다. 이상으로 본 전동차는 강도상 안전한 것으로 판단된다.

Table 4. Analysis results

CASE	Criteria	최대응력 (kg/mm ²)	허용치 (kg/mm ²)	발생부위
수직하중	최대응력	10.07	12.4	두번째 출입문 상부 모서리
	치밀량	8	13.8	중심부
압축하중	최대응력	5.7	12.4	센터실 끝단
비틀림하중	최대응력	1.74	8.7	두번째 출입문 상부 모서리

수직하중 해석결과를 Fig. 2, 3에, 압축하중 해석결과를 Fig. 4에, 비틀림하중 해석결과를 Fig. 5에 나타내었다.

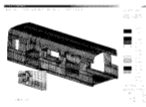


Fig. 2. von-Mises stress for the vertical loading



Fig. 3. Deflection for the vertical loading

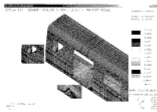


Fig. 4. von-Mises stress for the compressive loading

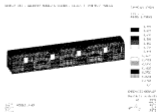


Fig. 5. von-Mises stress for the torsional loading

3. 실험결과와 비교

3.1 차체 수직하중 시험

차체에 작용하는 수직 하중은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{수직하중} &= [\text{공차중량} + \text{승객하중} - \text{대차중량}] \times \text{동하중계수} - \text{차체프레임 중량} \\ &= [31.3 + 24 - 10.42] \times 1.2 - 6.3 = 47.6 \text{ 톤} \end{aligned}$$

여기서, 차체중량은 실측 중량을 이용하여 수정한 후 수직하중을 최종 결정한다.

시험 차체의 지지 및 하중 부하방법은 "성능시험 3. 마. 구조체의 지지 방법 및 시험하중의 부하 방법"에 [5] 따라 차체의 에어 스프링 위치에 vertical support로 지지되며, 하중은 유압 실린더에 의해 차체 언더프레임 상면에 등분포 하중으로 부하한다.

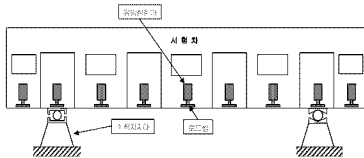


Fig. 7. Test method under the vertical loading

3.2 차체 압축하중 시험

차체 언더프레임 상면에 등분포로 수직하중을 부과한 후, 차체 한 쪽 키플러 중심 위치를 압축봉으로 고정된 상태에서 반대 쪽 키플러 중심위치에서 유압장비를 이용하여 압축하중을 부가한다.

- ① 수직하중 : 14.6 톤
- ② 압축하중 : 50 톤

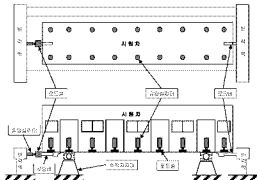


Fig. 8. Test method under the compressive loading

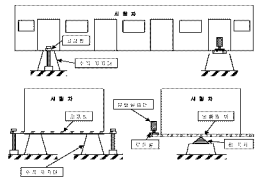


Fig. 9. Test method under the torsional loading

3.3 비틀림 하중 시험

차체의 왼쪽 볼스터는 수직지지대에 의해 지지되며, 반대쪽에는 차체의 rolling 이 가능하도록 볼스터 중앙에 비틀림 프레임을 넣어 지지한 후 지지점 부근에 하중을 부가하였다.

3.4 3점 지지하중 시험

차체는 볼스터 사이의 4 개소의 리프팅 페드 위치에서 수직 지지대로 지지되며 4개소 중의 1개소는 유압실린더 또는 상하 이동식 지그에 의해 지지된 후 유압실린더를 사용하여 언더프레임 상면에 18.1 톤의 수직하중을 가한 후 1 개소의 수직 지지대를 강하시켜 3점 지지 상태를 유지하였다.

Table 5는 시험하중조건을 정리하여 나타낸 표이며 Fig. 7-1은 각 시험방법에 대해서 나타내고 있다 [4-6].

Table 5. Loading conditions

Case	하중크기 (ton)	하중작용방법
수직하중	47.6	언더프레임 상면에 부하
압축하중	50 (압축) 14.6 (인장)	압축하중 커넥터 포켓에 부하
비틀림하중	4 ton·m	지지점 부근에 부하
3점 지지	14.6	언더프레임 상면에 부하

각 하중조건에서 최대응력이 발생하는 부위의 게이지 위치와 변위를 Fig. 11-13에 나타내었다. Fig. 3.2.40은 수직하중 시 최대응력이 발생하는 2번째 출입문 부위의 게이지 부착위치와 번호를 나타내고 있으며, Fig. 11은 압축하중시 최대응력이 발생하는 센터 실 부근의 게이지 부착위치와 번호를 나타내고 있다. Fig. 12는 비틀림 하중 시 최대응력이 발생하는 부위의 게이지 위치를 나타낸 것이다.

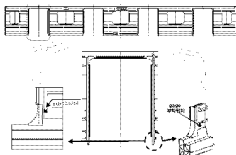


Fig. 11. Positions of the gauges No. 62, 63 and 64

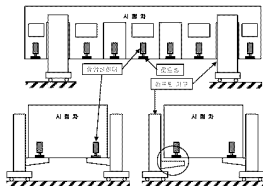


Fig. 10. Test method using the 3 point supports

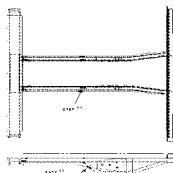


Fig. 12. Position of the gauges No. 77 and 78

이상과 같은 방법으로 전동차의 구조해석과 시험을 수행하고 서로 비교하였다. Table 6에 각각의 하중조건에 대해 발생한 응력값의 해석값과 시험값을 비교하여 나타내었다. 수직하중의 경우 해석값과 시험값의 오차가 1~12% 정도였으며, 압축하중의 경우 6.8%, 비틀림하중의 경우 약 9% 정도이다.

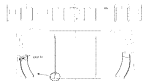


Fig. 13. Position of the gauge No. 30

Table 6. Comparison between experimental and numerical stresses

CASE	Gage No.	측정치(kg/mm ²)	해석치(kg/mm ²)	오차
수직하중	40, 42	-2.85	-2.79	2.1%
	49	3.02	2.944	2.5%
	19	3.32	3.5	5%
	21	-3.77	-4.1	8%
	25	2.88	3.1	7%
	30	-6.18	-7.1	12%
	7	5.05	5.1	0.9%
압축하중	14	4.75	4.64	2.3%
	40, 42	-1.093	-1.08	1.3%
	49	0.638	0.6459	1.2%
	30	-1.56	-1.425	8.6%
	21	-1.50	-1.38	8%
비틀림하중	77	-4.05	-4.62	6.8%
	19	-1.28	-1.43	10%
	30	1.74	1.6	8%

4. 결론

알루미늄 전동차 차체의 취약부를 평가하기 위해 구조해석을 수행하였다. 결론은 다음과 같다.

- (1) 알루미늄에 대하여 쉘 요소와 솔리드 요소로 모델링을 수행하고 이에 대한 비교를 통하여 쉘 요소를 사용해도 솔리드 요소를 사용한 경우와 유사한 해석결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 실제 운행되고 있는 전동차의 하나인 알루미늄 전동차의 차체에 대해 실물 크기로 모델링을 하고 강도해석을 수행하여 취약부의 위치와 취약부에서의 응력을 시험결과와 상세히 검토하였다. 두 결과의 차이는 10% 이내의 범위도 유한요소 해석으로 상당히 정확히 취약부의 위치와 응력의 크기를 아는 것이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 국가차질연구실사업의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 백남욱 외 (1997) "철도차량용서." 기전연구원
- [2] 권대수 외 (1998) "표준전동차 개발을 위한 구조체의 강도해석," 한국철도과학기술회논문집
- [3] "Wrought aluminum and aluminium extruded sections" (1983) Part1, DIN 1748.
- [4] 軌道車輛構体の荷重試験方法, JIS E 7105
- [5] "도시철도 차량의 성능시험에 관한 기준," (2000) 건설교통부
- [6] 도시철도표준사항," (1998) 건설교통부