

알루미늄 압출재를 적용한 2층 열차 차체의 기초설계 및 구조강도해석

The Concept Design and Structural Strength Analysis for Double-Deck Train Carbody using Aluminum Extruded Panels

황원주*
Hwang, Won-Ju

김형진**
Kim, Hyeong-Jin

강부영***
Kang, Bu-Byoung

허현무****
Hur, Hyun-Moo

ABSTRACT

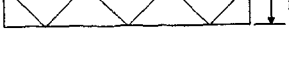
The purpose of this paper is to introduce the concept design and the structural strength of the double-deck rolling stock vehicle. Aluminum is very useful material for the carbody structure due to its characteristic of light weight. Large aluminum extrusion profiles(panels) have lots of merits such as easy production of complicated shapes, reduction of welding and cutting lines, and cutting down the labor cost. AED type is being applied to the standard EMUs and the EMUs Kwangju subway in Korea. Light material recommended the double-deck rolling stock vehicle because the center of gravity of the train is higher and its weight is heavier than those of the normal vehicle. So we applied the technology of the large aluminum extrusion profiles(panels) to the double-deck vehicle. We performed the structural strength analysis and examined its safety.

Keyword : double-deck rolling stock vehicle, aluminum extruded panels, AED(All Extrusion Design)

1. 서론

일본, 프랑스 등 철도 선진국에서는 쾌적하면서도 효율적인 수송량 증강수단인 2층열차를 점차 활용하고 있는 추세이다. 이는 2층열차를 투입하는 것이 선로용량 증대 등 시설물에 투자하여 수송량을 증강시키는 것보다 훨씬 저렴한 투자방법임이 입증되었기 때문이다. 현재 우리나라 수도권 지역을 중심으로 점차 심각해지는 도로교통의 체증과 수도권 전철 구간의 이용객 증가에 따라 역내 및 차내 혼잡이 가중되고 있어 이에 대한 근본적인 해결책이 필요한 상황에 이르렀다. 이러한 배경 가운데 철도의 장점을 최대한 살리고 철도를 더욱 탄력적으로 운용하기 위한 대안의 하나로 2층열차 도입의 기술적 타당성을 검토하게 되었다.

도표 1. 2층열차 차체사양

차체길이	19500 mm	
차체높이	3915 mm	
차체폭	3008 mm	
대차사이간 거리	13800 mm	
h1	1985 mm	
h2	1930 mm	
압출재의 사양		
l	80mm	
h	139mm	

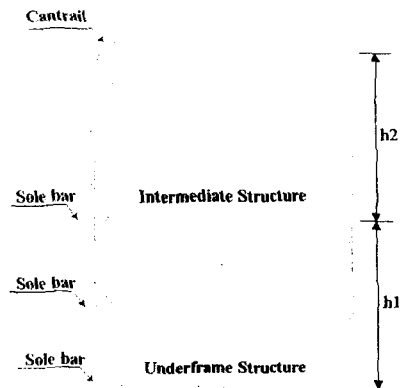


그림 1. 전체적인 프로파일

- * 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 연구원
- ** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 책임연구원
- *** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 주임연구원
- **** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원

2층 열차의 대략적인 사안을 도표1에 정리하였다. 여기서, l 은 평면외관사이의 간격이며, h 는 삼각 바닥폭의 길이이다. 2층열차는 그림 1에서와 같이 일반 단층 차체보다 부피가 크기 때문에 경량화는 필수조건이라 할수 있다. 철도차량의 경량화는 국내외적으로 활발히 연구되어지고 있다. 현재 유럽에서 점차 사용되어지고 있는 알루미늄 압출재가 그 한 예라고 할수 있을 것이다. 알루미늄 압출재는 AED(All Extrusion Design) 방식을 적용하여 강이나 스테인레스 재질을 사용했을때보다 중량을 줄일수 있을 뿐만아니라, 비용절감의 장점까지 갖추게 되었다. 구체중량만을 놓고 보면, Mild Steel 차량(수도권 1호선) 11.24톤이 가장 무겁고 STS차량이 8.85 - 9.76톤으로 중간수준이고 표준전동차 구체가 6.64톤으로 가장 가볍다. 따라서, Mild Steel 차량기준으로 STS차량은 13.2 - 21.3%, 알루미늄 차량은 41%까지 구체중량이 저감되었다고 볼 수 있다. 우리나라에서도 표준전동차와 광주지하철의 경우 알루미늄 압출재로 제작되었다. 2층열차의 경우 증가되는 차량 Dimension 및 내장재, 좌석 및 승객수, 에어컨 등의 중량 등을 충분히 감안하여야 할 것이나 알루미늄 압출재를 사용할 경우 경량화를 이룰 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문은 알루미늄 압출재를 적용한 2층열차 차체를 소개하고 강도해석을 통해 향후 2층열차 구조체에 대한 기초자료로 삼고자 한다.

2. 2층열차 차체의 모델링

2.1 2층열차 차체 기초설계(Concept design)

2층열차의 높이나 폭은 기존의 터널이나 전차선의 높이를 고려하여 설계하였다. 도표 1에 이를 나타내었고, 그림 1은 2층열차의 전체적인 단면 형상이다. 2층열차 차체는 Under frame, Sole Bar, Side frame, Skirt, Cantrail, Roof 구조로 알루미늄 압출재로 이루어져 있다. 2층열차의 압출재의 프로파일은 VAW사의 표준 vaw profile을 참조하였으며, solebar의 형상은 우리나라와 세계 각국에서 설계한 많은 압출재 차량의 프로파일을 참고하여 설계하였다. 모델링을 위해서 3D CAD로 Solidworks를 사용하였으며, 구조해석을 위해서 상용유한요소 해석프로그램인 DISPLAYIII/NISA II를 사용하였다. 본 모델은 대칭을 고려하여 1/2로 모델링하였으며 30706개의 노드와 45070개의 요소가 사용되었다. 그림 2,3은 3D 모델과 유한요소 모델을 나타내고 있다.

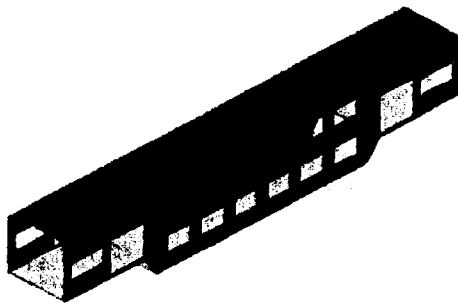


그림 2. 2층열차 차체 3D 모델

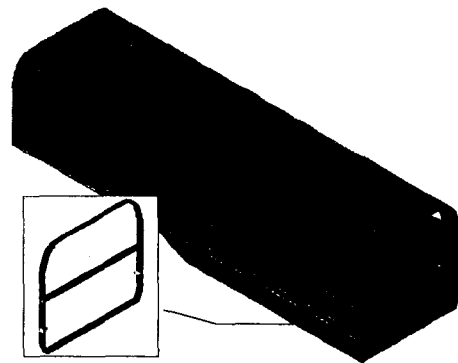


그림 3. 2층열차 차체 유한요소모델(1/2Car)

2.2 알루미늄 합금의 기계적 성질

구조용 재료로 사용되는 알루미늄 합금에는 5000계열과 6000계열, 7000계열 등이 있다. 이 중에서 6000계열에 속하는 6005A는 우수한 압출성과 열처리에 의한 적절한 강도성능으로 인해 유럽지역에서는 철도차량에 가장 일반적으로 적용되는 재질이 되었다. 도표 2는 알루미늄 합금 6005A의 기계적 성질을 나타내고 있다.

도표 2. 알루미늄 6005A의 기계적 성질

항목	탄성계수 (kg/mm ²)	포아송비	항복응력 (kg/mm ²)	연장강도 (kg/mm ²)	밀도 (kg/mm ³)	비고
A6005A	7.3×10^4	0.33	21.9	26.5	2.7998×10^6	

실제 강도 및 강성기준에 적용하기 위하여 모재에서는 항복강도와 인장강도의 70%인 것중에 작은 값인 18.6을 기준값으로 하였고, 여기에 안전율 1.5를 적용한 12.4를 허용응력으로 하고 용접부의 허용응력은 모재의 70%인 8.7으로 하였다. 도표 3은 이를 정리한 것이다.

2.3 경계조건 및 하중조건

2.3.1 경계조건

대칭인 것을 고려하여 1/2만 모델링하였다. 하중 경계조건은 대차와 차체가 닿는 에어백부분을 고정하고, 경계부분에는 그림 4와 같이 대칭경계조건을 사용하였다.

도표 3. 강도 및 고유진동수 판정기준

해석종류	평가항목	평가기준	
		모재부	12.4 kg/mm ²
수직/압축하중	강도	용접부	8.7 kg/mm ²
		변위	차체길이의 1/1000이하
비틀림 하중	강도	모재부	8.7 kg/mm ²
		용접부	4.9 kg/mm ²
	변위	차체길이의 1/1000이하	

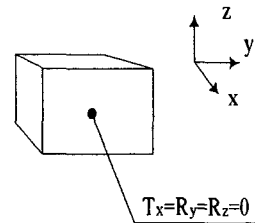


그림 4. 경계조건(대칭경계조건)

2.3.2 하중조건

구조강도해석을 위해 구체와 대차의 하중값과 2층열차에 탑승할 인원수를 결정하여야 한다. 구체의 하중은 위에서 언급하였으며, 대차와 탑승승객에 상당하는 중량은 도표 5에 정리하였다. 탑승승객중량을 결정하기 위해서는 탑승형태, 의자의 배치 및 피치와 폭등이 고려되어

도표 4. 2층열차 탑승인원수

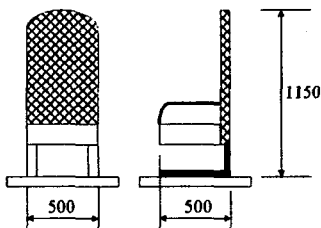


그림 5. 의자의 폭과 높이

	탑승형태	각종별 탑승인원		총탑승인원	비고	
Case1	1,2층 모두좌석	1층	좌석	63명	159명	1층 - 63석 2층 - 48석
			입석	29명		
		2층	좌석	48명		
			입석	19명		
Case2	1층 입석가능 2층좌석	1층	좌석	51	197명	
			입석	79		
		2층	좌석	48		
			입석	19		
Case3	1,2층 모두입석	1층	좌석	51	213명	
			입석	79		
		2층	좌석	30		
			입석	53		

야 할 것이다. 의자의 피치와 폭은 최소한의 안락함을 느낄 정도로 정하였으며 도표 4에 나타난 것처럼 3가지 경우에 대하여 고려하여 제시하였다. 이를 근거하여 의자의 배치와 승객 수를 정하고 승객하중을 계산하였으며 강도해석시에는 Case 2의 경우에 대하여 고려하였다. 그림 5는 의자의 폭과 높이를 나타내고 있으며, 도표 4는 3가지 경우에 대한 탑승인원수를 고려한 것이다. 도표 6은 각 해석시 적용된 하중값들을 나타내고 있다. 여기서 승객하중은 Case 2의 경우 1명당 62kg(전동차표준사양을 근거)으로 했을 때 1층은 8.06톤, 2층은 4.154이다. 강도해석을 위해서 전동차표준사양에 따라 1층에는 30톤을, 2층에는 12.4톤의 하중을 주었다.

도표 5. 하중해석시 적용된 값

	중량(ton)	비고
구체	7.6 (표준전동차 6.64)	
대차	13.6	
부속기기	20.2	
공차시 총중량	41.5 (표준전동차 39이하)	구체+대차 +부속기기
축중	13 (표준전동차 16)	

도표 6. 해석시 적용된 각 Case별 하중값

Case	항목별 이름	하중값(톤)	비고
1	수직하중	69.69(1층)	※
		12.46(2층)	
2	압축하중	50톤	
3	비틀림하중	4 ton · m	

※(공차중량 + 승객하중-대차중량) × (1 + 동하중계수)

2.4 해석결과

각 경우에 대한 해석결과가 그림 6~13에 나타나 있다. 수직하중의 경우 최대응력이 출입문 근처의솔바의 모재부에서 발생하였다. 이때의 응력값은 10.53 kg/mm²으로 모재부의 허용응력보다는 작았다. 압축하중의 응력분포는 연결기가 체결되는 센터실의 끝단에서 최대응력이 발생하였으며, 출입문 부위의 솔바에서도 높은 응력이 발생하였다. 센터실 끝단에서 발생한 응력값은 6.854로서, 모재부의 허용응력보다 작았다. 비틀림 응력의 경우 최대응력은 창문의 모서리부분에서 발생하였으며 이 또한 5.341으로서 비틀림시 적용되는 모재부의 허용응력 8.4보다 작았다. 강도해석의 모든 경우에 대해 허용응력보다 작게 나타남을 확인할 수 있었다.

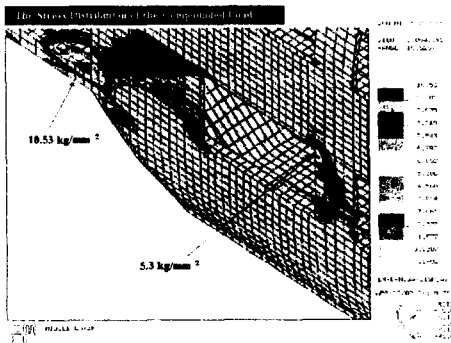


그림 6. 수직하중 최대응력 발생부위

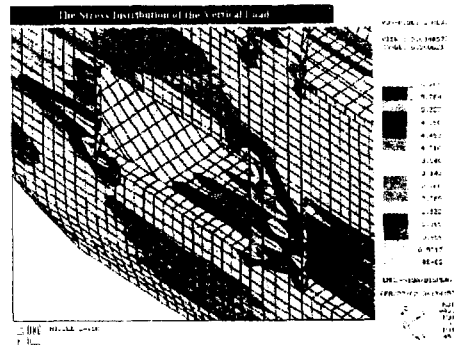


그림 7. 창문부위의 응력분포

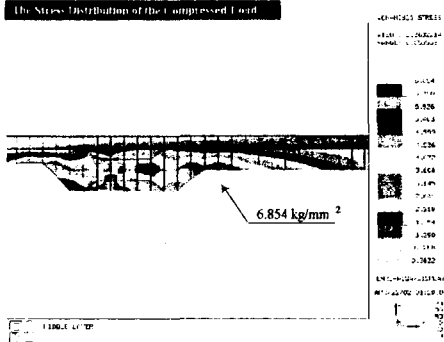


그림 8. 압축하중 최대응력발생부위

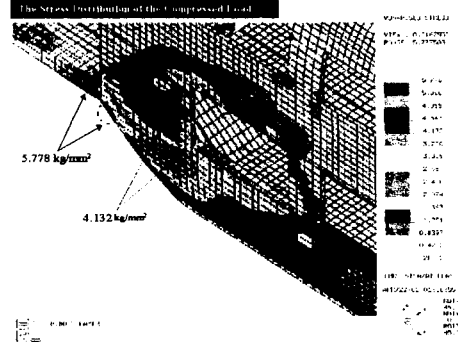


그림 9. 언더프레임 부위의 응력분포

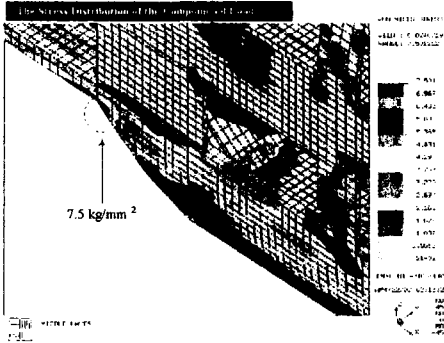


그림 10. 복합하중 응력분포

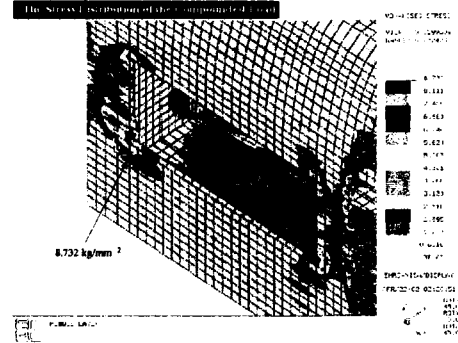


그림 11. 창문부위 응력분포

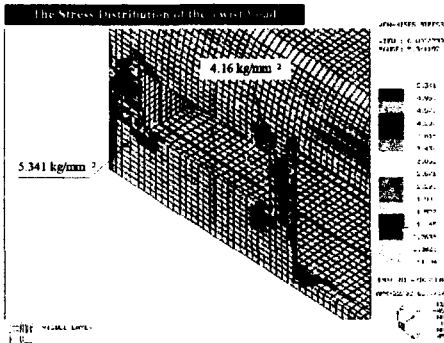


그림 12. 비틀림응력시 최대응력발생부위

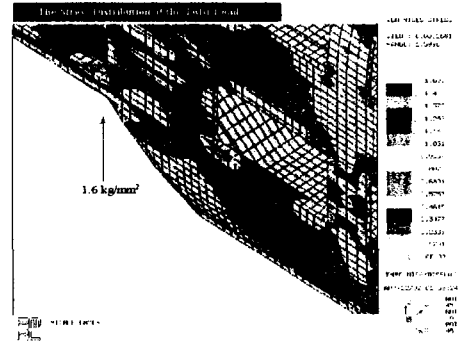


그림 13. 출입문 부위의 응력분포

위의 결과를 표로 정리하면 도표 8과 같다.

3. 결론

2층 차체에 대한 강도해석을 수행한 결과, 모든 경우에 있어서 최대응력은 허용응력 이내에서 발생함을 확인할 수 있었다. 수직과 복합하중일 경우에 출입문의 슬바에서 최대응력이 발생하였는데, 이는 모재부로서 허용응력 이내이었다. 압축하중의 경우 연결기가 체결되는 부위인 센터실 끝단에서 최대응력이 발생하였으며 이 또한 허용응력 이내 이었다. 비틀림하중의 경우 끝단 출입문쪽 창문의 모서리 부위에서 최대응력이 발생하였으며 이 또한 허용응력 이내에서 발생하였다. 이상에서 2층열차 차체는 강도상으로 안전하게 설계되었음을 결과에

서 알수 있었다. 앞으로 구체형상과 알루미늄 압출재의 두께에 대한 최적화설계를 통해 좀 더 보강되고 개선된 설계가 필요하다고 판단된다.

도표 8. 해석결과 정리

CASE	하중	항목	결과치 (kg/mm ²)	발생부위
1	수직하중	최대응력	10.53	출입문 부위(솔바의 모재부)
			6.2	창문 부위
		변형	12.7	언더프레임 중앙부위
2	압축하중	최대응력	6.854	센터실 끝단
			5.778	출입문 부위(솔바의 모재부)
		변형	12.38	언더프레임 중앙부위
3	수직+압축	최대응력	8.731	차체 끝단의 창문 부위
		변형	18.24	언더프레임 중앙부위
4	비틀림 하중	최대응력	5.341	차체 끝단의 창문부위
		변형	10.47	언더프레임 중앙부위

참고문헌

1. "한국인 체형에 맞는 차량내 공간배치에 관한 조사연구", 포항공과대학, 1992.12
2. "표준전동차 개발을 위한 구조체의 강도해석", 권태수의 3인, 한국철도학회논문집, 1998
3. "알루미늄 구조체의 치수 최적화에 관한 연구", 홍재성의 3인, 한국철도학회논문집
4. "평판형 주름판별에 대한 등가연속체 모델링기법", 이상윤외1인, 한국철도학회논문집, 제3권, 제2호, p43~50
5. "알루미늄 철도차량 차체제작 및 도장기술 개발", 서승일의4인, 한국철도학회논문집, 제2권, 제2호, p1~5, 1999.1
6. "알루미늄 철도차량 차체설계 및 대형 알루미늄 압출재생산 기술개발", 서승일의4인, 한국철도학회논문집, 제2권, 제1호, p1~13
7. "3-D복합재료 샌드위치 구조물의 2층 경전철 철도차량 구조체 적용성에 관한 연구", 이영신의4인, 한국철도학회논문집, 제3권, 제2호, 2000, p92~99
8. "도시철도표준사양", 건설교통부, 1998.2
9. "도시철도차량의 성능시험에 관한 기준", 건설교통부, 2000.5
10. 軌道車輛構體の荷重試驗方法, JIS E 7105
11. Center for Engineering and Computer Technology, "NISA II User's manual", Vol. I, EMRC
12. VAW사의 표준 vaw profile