

AI 압출재 및 SUS 2층열차 차체의 강도해석 비교 검토

The Strength Comparisons between Double deck Car body Structures with AI Extruded Panels and SUS

황원주*1)
Hwang, Won-Ju

김형진**
Kim, Hyeong-Jin

강부병***
Kang, Bu-Byoung

허현무****
Hur, Hyun-Moo

ABSTRACT

The operation of double deck train have increased in many countries such as Japan, France, and the Netherlands as efficient, safe and convenient alternative transportation systems. Because of continuous concentration of population into Seoul metropolitan and serious traffic jam, the number of passengers using the commuter train have been increased rapidly. Considering these situations, we can find one of the solutions for heavy traffic problems through double deck trains. Stainless steel, and aluminum extruded panel are used to reduce the weight of double deck train. In this paper we compare the results of structural analysis of the double deck car body structures with AI extruded panels and stainless steel. We hope the results of this study may be used as basic guidelines in designing double deck trains in the future.

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

우리나라 수도권 지역의 늘어나는 교통혼잡과 보다 쾌적하고 편리한 교통수단의 대안으로써 2층열차는 적합하다고 할수 있다. 뿐만아니라 다른 부대시설비없이 선로사용률을 높일수 있으며 좀더 쾌적한 승객서비스를 제공가능한 점이 장점이라고 할수 있을 것이다. 유럽 및 일본등의 많은 선진국에서는 철저한 시험 및 검증을 통해서 2층열차의 운행이 보편화되었고 계속 늘어나고 있는 실정이다. 하지만 2층열차는 기존의 열차에 비해 무겁기 때문에 경량화는 필수라고 할수 있다. 이를 위해서는 구체의 질량이 가볍게 되고 강도및 강성이 크게되고, 구조체의 부품점수가 저감되어 지며 구조설계 및 생산기술의 개발이 필요하다. 2층열차를 운행하고 있는 유럽및 일본등 선진국에서는 이를 위한 재료의 개발과 연구가 끊임없이 수행되어져 오고 있다. 우리나라도 1980년이후로 스테인레스강을 차체의 재료로 사용하였으며, 최근에 들어 알루미늄 압출재를 차체의 재료로 적용하고 있다. 스테인레스강은 일반강보다 강도는 향상되었으나 용접과 미려도에서 다소 떨어진다. 반면 알루미늄 합금제 차량은 가볍기는 하지만 강제차량에 비하여 강도가 약하고 소재 가격 뿐만 아니라 제조 가공비와 초기 비용이 비싸다는 점이 있다. 철도차량분야에 있어서 에너지절약은 경량화이므로 스테인레스강제 차량에 있어서는 알루미늄합금제 차량정도의 질량과 비용저감을 요구하는 바 STS301L제를 사용하여 두께를 얇게 함으로 경량화를 도모함과 동시에 부품점수를 감소시켜 비용저감을 시도하였고, 알루미늄 합금 차량의 경우 A6005A 대형알루미늄 압출재 방식을 사용하여 비용절감과 강도를 향상시켰다. 본 논문에서는 철도차량용으로 사용되어지고 있는 스테인레스강과 알루미늄 합금소재를 사용하여 2층열차를 설계하고 강도해석을 수행, 이를 비교 검토해 봄으로 향후 2층열차 설계의 기초자료로 삼고자 한다.

1. 서론

국내의 전동차및 새마을호 객차 등의 차체소재가 일반 강재에서 스테인레스 강재로 교체된 것은 1980년 초반부터이며, 지하철용 전동차의 경우는 스테인레스 강재의 적용이 일반화되었다.

* 황원주 한국철도기술연구원 차량구조연구팀 연구원
** 김형진 한국철도기술연구원 차량구조연구팀 책임연구원
*** 강부병 한국철도기술연구원 차량구조연구팀 주임연구원
**** 허현무 한국철도기술연구원 차량구조연구팀 선임연구원

1950년대부터 경량화를 위해 철도차량에 알루미늄 합금이 창틀등 부분적으로 적용되어 왔다. 그러나 1970년 중반에 대형 압출재 형태로 차체구조에 적용되기 시작하면서 차체의 경량화는 급진전을 이루게 되었다. Table 1은 국내운용 전동차 구체의 재질에 따른 중량을 나타낸 것이다. 2층열차는 많은 승객좌석의 확보 때문에 편리성을 제공주기는 하지만 2층이기 때문에 기존의 열차보다 무겁고 그만큼 레일에 많은 하중을 주게 된다. 기존의 부대시설을 그대로 이용하며 레일을 달리는 2층열차를 개발하기 위해서는 경량화가 필수라고 할수 있다. 이에대한 많은 시험과 연구의 결과로 스테인레스강뿐 아니라 대형압출재 기술력으로 알루미늄 압출재를 재질로 사용하여 차체를 제작하고 있는 실정이다. 이는 경량화뿐만아니라 편리성, 고속화에 모든 조건을 충족시키고 있다. 하지만 알루미늄 압출재의 경우 가법기는 하지만 비용측면에서 많이 든다는 단점이 있고, 강도면에서 강이나 스테인레스 강보다 떨어진다고 할수 있다. 스테인레스강의 경우 강도측면에서 뛰어나지만 알루미늄보다는 외관이 미려하지 못하고 알루미늄보다는 다소 무겁다는 단점이 있다. 도표 1은 국내운용 전동차 구체의 중량을 나타내고 있다.

도표 1. 국내 전동차 구체의 중량

	재질	구체중량 (kg)
수도권 1호선	SS41	11,240
과천,분당선	STS301L	9,510
일산선	STS301L	9,100
4호선	STS301L	9,340
과천선	STS301L	9,760
7,8호선	STS301L	8,851
표준전동차	A6005A	6,640

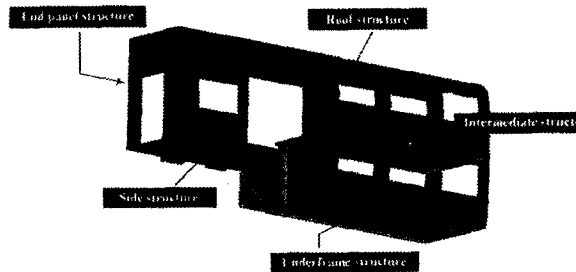


그림 1. 2층열차의 3차원 형상과 구성

2. 알루미늄 합금과 스테인레스 강을 적용한 차량의 모델소개

2층열차는 그림 1에서와 같이 크게 underframe, sideframe, intermediate, end panel, 그리고 roof structure 등으로 구성되어 있다. 2층열차의 단면은 운행될 역의 길이와 폭, 터널의 단면을 고려하였다. 그림 2는 SUS 2층열차의 단면을 보여주고 있으며, 도표 2는 스테인레스강과 알루미늄을 소재로 한 2층열차의 주요제원을 비교하여 나타낸 것이다. 이것을 근거로해서 2층열차를 설계하게 된다.

도표 2. 2층열차 개념설계 주요제원

영역(Item)	알루미늄 압출재		STS301L
차체길이	19500 mm		19500 mm
차체높이	1층	1985 mm	4070 mm (from rail)
	2층	1930 mm	4070 mm (from rail)
차체폭	3008 mm		3120 mm
대차중심간 거리	13800 mm		13800 mm
구조체 중량	9 ton		12 ton
공차중량	41.5 ton		44.5 ton
대차중량	15 ton		15 ton

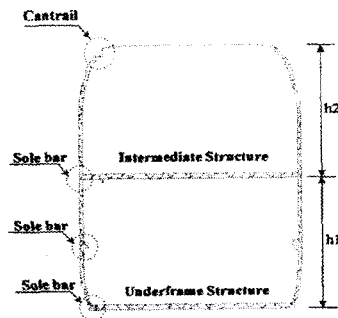


그림 2. 2층열차 단면형상

3. 알루미늄 합금과 스테인레스강의 기계적성질

구조용 재료로 사용되는 알루미늄 합금에는 5000계열과 6000계열, 7000계열등이 있다. 그중 6000 계열합금에서 6003 합금은 구조재로서 강도가 부족하기 때문에 보다 높은 강도가 요구되는 용도에는 Mg₂Si 량이 많은 A6061 또는 A6531 합금등이 이용된다. 그러나, A6061 합금은 압출가공성, 프레스 켄칭성 등이 나쁘기 때문에 이런 특성을 보완하기 위해 고강도 합금인 A6005A 합금이 개발되었다. A6005A 합금은 우수한 압출성과 열처리에 의한 적절한 강도성능으로 인해 최근 철도차량에 적용되고 있는 재질이다. 스테인레스강의 경우 차량 구체의 경량화에 대해서 많은 개발연구가 이루어져 알루미늄 차량에 가까운 중량, 강제차에 근접한 비용, 중량감소에 따른 운영비 절감등을 만족할 수 있는 STS301L 소재가 개발되어 차량제작에 적용되었다. 종류에는 STS301L-LT, DLT, ST, MT, HT등이 있으며 각각의 특성들에 맞게 차체제작에 사용되고 있다.

4. 강도적용기준

알루미늄 합금의 경우 실제 강도의 기준에 적용하기 위하여 모재에서는 항복강도 21.9kg/mm²와 인장강도의 70%인 18.6kg/mm² 중에서 작은 값인 18.6kg/mm²를 기준값으로 하였고, 여기에 안전율 1.5를 적용한 12.4kg/mm²를 허용응력으로 하며 용접부의 허용응력은 모재의 70%인 8.7kg/mm²로 하였다. 철도차량에 적용되는 301L 스테인레스강은 대부분 냉간압연하여 강도를 증가시킨 것으로 내식성을 유지하고 용접성을 향상시킴과 동시에 강도를 월등히 증가시킨 소재이다. 스테인레스강재는 일반 탄소강재에 비해 우수한 내식성, 강도 및 경량성으로 20년 이상 일본 및 국내에서 철도차량에 적용되어 왔다. 스테인레스강 차체는 언더프레임 일부를 제외한 대부분의 구조가 STS301L재로 되어있으며, 각 재질의 허용응력은 사용재질의 항복강도로 하였다. 도표 3은 스테인레스강의 기계적 성질에 따른 강도적용기준을 정리한 것이다. 도표 4는 해석시 적용된 Case별 하중값이며, 그림 4는 2층열차의 의자배치(3D)를 나타내었다. 강도해석은 도시철도차량구체 하중시험방법에 근거하였으며, 도표 4에 이를 표기하였다. 그림3은 2층열차 의자배치를 3차원으로 나타낸 것이다.

도표 3. STS301L에 대한 강도적용 기준

재질	항복강도	인장강도	비고
STS301L	LT	26	저인장력
	DLT	35	Dead Light Stock
	ST	42	특수 인장력
	MT	49	중간 인장력
	HT	70	고 인장력

도표 4. 해석시 적용된 각 Case별 하중값

Case	항목별 이름	하중값	비고
1	수직 하중	69.69(1층)*	동하중계수 : 0.2 승객하중의 3배
		12.46(2층)	
2	압축 하중	50	
3	비틀림 하중	4 ton · m	

* (공차중량 + 승객하중-대차중량) × (1 + 동하중계수)

* 각 항목별 하중값은 도시철도차량구체하중시험방법에 근거하였음

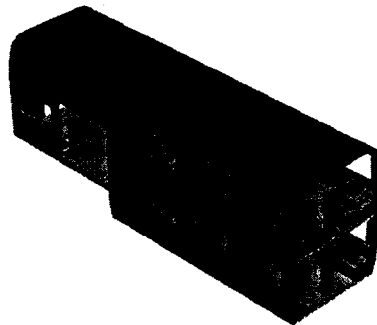


그림 3. 2층열차 의자배치(3차원)

5. 2층열차 모델링

해석모델은 차체의 대칭성을 고려하여 1/2에 대하여 셀요소를 사용하여 모델링하였으며 차체 길이방향을 x, 폭방향을 y, 높이방향을 z축으로 설정하였다. 경계조건은 대칭경계조건을 주었으며, 하중조건은 차체와 닿는 에어스프링부분에 z축방향을 고정하였다. 유한요소 해석을 위해서 사용된 상용유한요소 프로그램은 NISA II이다. 그림 4,5는 각각의 유한요소 모델을 나타내고 있다.

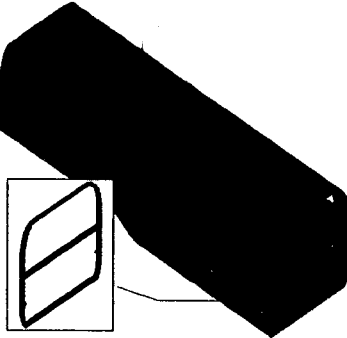


그림 4. 유한요소 모델(A6995A)

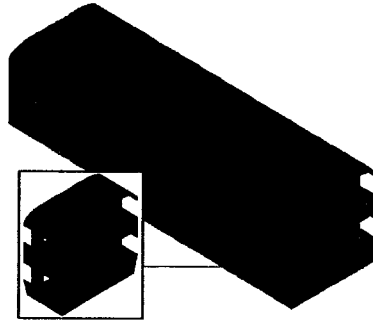


그림 5. 유한요소 모델(STS301L)

6. 해석결과

알루미늄 합금차량의 경우 수직하중시 출입문 부위(Sole bar)에서 증가응력 10.53kg/mm²이 발생하였으며, 이는 허용응력보다 작았다. 압축하중, 비틀림하중의 경우에도 최대응력이 증가응력으로 6.854, 5.341kg/mm²이 발생하였으며, 그 위치는 센터실 끝단과 끝단 창문부위에서 발생하였다. 이 값도 허용응력보다 작게 나옴을 확인할 수 있었다. 알루미늄 합금차체에 대한 강도해석결과를 그림 6~9에 나타내었다. 스테인레스강 차체에 대해서 수직하중시 27.55kg/mm²이 발생하였으며, 최대응력이 발생한 부위의 부재는 STS301L-ST로 허용응력보다 작게 나왔다. 압축하중의 경우 증가응력으로 kg/mm²이 발생하였으며 이때의 부재는 SMA50B로 허용응력보다는 작게 나왔다. 이 결과를 그림 10~11에 나타내었다.

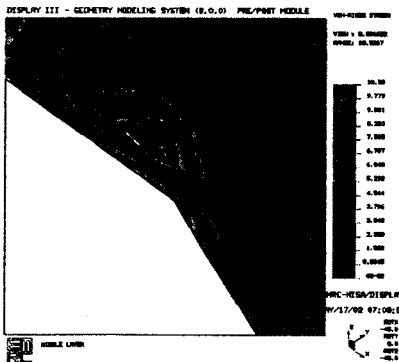


그림 6. 수직응력(Von Mises 응력,A6005A)

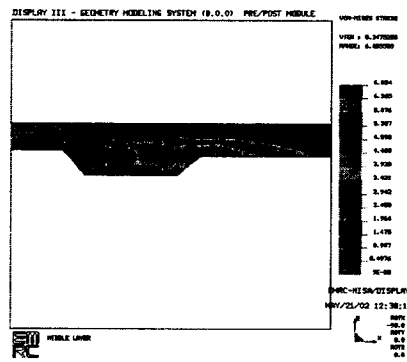


그림 7. 압축하중(Von Mises, A6605A)

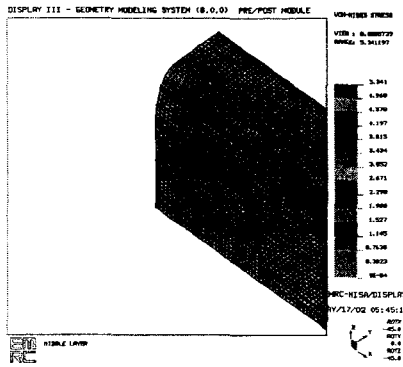


그림 8. 비틀림응력(Von-Mises,A6005A)

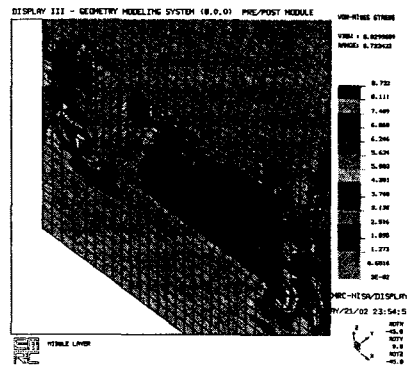


그림 9. 수직+압축하중(Von-Mises,A6005A)

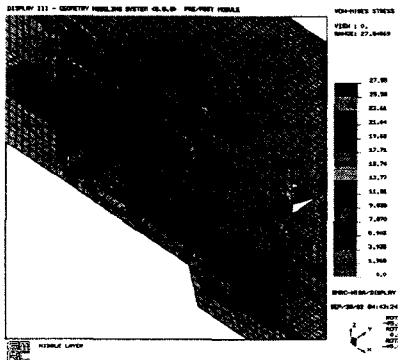


그림 10. 수직응력(Von-Mises,STS301L)

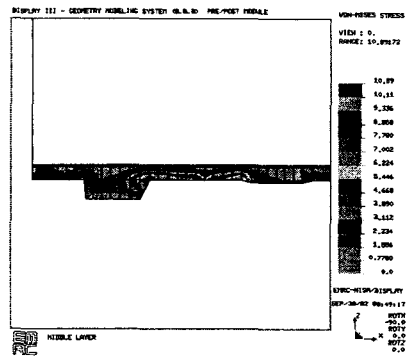


그림 11. 수평압축응력(SMA50B)

위의 결과를 정리하면 도표 5와 같다.

도표 5. 최대응력값의 크기와 발생위치

CASE	하중		항목	결과치 (kg/mm²)	허용치 (kg/mm²)	발생부위
1	수직 하중	알루미늄	최대응력	10.53	12.4	출입문 부위(솔마의 모재부)
			처짐량	12.7	13.8	언더프레임 중앙부위
		STS301L	최대응력	27.55	42	출입문 부위(beam)
2	압축 하중	알루미늄	최대응력	6.854	12.4	센터실 끝단
			처짐량	12.38	13.8	언더프레임 중앙부위
		SMA50B	최대응력	10.89	37	센터실 끝단
3	수직+압축	알루미늄	최대응력	8.732	12.4	출입문 부위(모재부)
4	비틀림하중	알루미늄	최대응력	5.341	8.7	끝단의 창문부위

7. 결론

이상에서 알루미늄 압출재와 스테인레스강을 소재로한 2층열차 차체의 개념설계를 하고 이를 모델링하여 강도해석을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 스테인레스강과 알루미늄 압출재를 소재로 한 2층열차 차체를 모델링하고 강도해석을 수행하였다. 결과 스테인레스강의 경우 중량이 12톤, 알루미늄 압출재일 경우 9톤의 중량을 나타내었다. 알루미늄 합금 압출재의 경우 스테인레스강을 소재로 한 경우보다 가벼운 것을 알수 있었다.
- (2) 알루미늄 압출재를 소재로 한 2층열차 차체의 강도해석의 결과 모든 경우에 대하여 응력값이 허용응력 이내로 발생하였음을 확인할 수 있었다.
- (3) 스테인레스강을 소재로 한 2층열차 차체의 강도해석의 결과 모든 경우에 대하여 응력값이 허용응력내에서 발생하였음을 확인할수 있었다.

이상에서 알루미늄 압출재와 스테인레스강을 소재로한 2층열차 차체에 대한 강도해석을 수행한 결과 각각의 경우 모두 강도상으로 안전함을 확인할 수 있었다. 하지만 스테인레스강의 경우 알루미늄 합금 차체보다 다소 중량이 많이 나왔다. 경량화의 측면에서 스테인레스강의 경우 구조 설계적인 보완과 연구가 필요하다고 판단되며 향후 이에 대한 연구가 계속 수행되어야 할 것이라 사려된다.

참고문헌

1. 황원주의3인,알루미늄 압출재를 적용한 2층열차의 개념설계 및 구조강도해석,한국철도학회,2000.5
2. 황원주의3인,“고속화차용 용접대차 개선모델의 구조강도평가”, 2001, 5, 철도학회
3. 황원주의3인,고속 컨테이너 화차 차체의 구조강도 평가, 2001, 4, 철도학회
4. 한국철도기술연구원, 2층 급행열차 운행을 위한 기술개발 및 설계기준에 관한 연구, 2002, 연구보고서
5. 홍재성의 3인,한국철도기술연구원,알루미늄 구조체의 치수 최적화에 관한 연구,
6. 이호용의3인.한국철도기술연구원,고무차륜 경량전철의 차체 기본설계, 한국철도논문집, 제3권,제3호,2000,pp161~169
7. “철도차량용 구조체의 변천”, 鐵道車輛技術, 2000년 여름호, p90-106
8. “철도차량 구조용 소재의 특성 및 제작 기술동향”, 鐵道車輛技術, 1999. 6, p67-87
9. 철도차량구조체의 하중 시험 방법,일본공업규격 JIS E 7105,1988