

2층열차 차종에 따른 차체 유한요소해석 FEM Results of Double-Deck Train Carbodies

황원주*
Hwang, Won-Ju

김형진**
Kim, Hyung-Jin

ABSTRACT

We have studied the technologies for a double-deck train. But, there are no standards and test methods for a double-deck train. Therefore, we apply the standard and test method of the general train to transform the structural analysis of a double-deck train. This study is the result of a structural analysis by the finite element method for double-deck train carbodies. The results of the study can be used as basic guidelines in designing double-deck trains in the future.

Keyword : AEP(Alluminum extruded panel), EMU(Electric Multi Unit), Double-deck rolling stock vehicle

우리나라도 철도차량의 거듭되는 발전으로 300 km이상의 속도로 서울과 부산을 만나절이면 왕복 할수 있는 고속철도의 시대에 우리는 살고 있다. 차량은 계속 고속화되고, 또한 경량화되어 갈 것이다. 이러한 철도차량의 발전에 발맞춰 좀더 개선되고 좀더 혁신적인 차량을 소개한다면 2층열차라고 할수 있을 것이다. 현재 우리나라에서는 운행이 되고 있지는 않지만 유럽과 일본등 많은 나라에서 2층열차는 운행이 되고 있다. 유럽의 Duplex는 고속열차이면서도 2층열차로서 많은 사람 들로부터 좋은 호응을 받으며 현재 운행되어지고 있다. 우리나라에서도 갈수록 심각해져가는 수도권지역의 교통체증과 혼잡을 줄이고 보다 편리하고 나은 서비스를 제공할수 있는 차량의 모델로서 2층열차에 대한 연구가 진행되어 오고 있다. 현재까지 검토된 2층열차는 기존 시설물과 선로에서 운행될 경우 모두 10량 편성으로 이루어지며, 5M5T로 구성된다. 차종은 모두 4종류로서 각각 M car, T car, Mc car, M' car이다. 본 연구에서는각 차종의 차체에 대한 개념설계와 이에 대한 유한요소해석을 수행한 결과를 검토하였으며, 기존의 있는 하중시험방법을 2층열차에 맞게 적용하여 강도해석을 수행하였다.

1. 서 론

아직 2층열차는 국내에서 제작되지 않은 차량이며, 일반 차량의 경우 도시철도 차체 하중시험방법등의 규정에 따라 시험이 수행되고 있지만 2층열차에 대한 시험규정이나 관련 자료가 거의 없는 실정이다. 해외의 경우도 2층열차에 관련된 규정이나 시험방법에 관련된 자료가 있는 것이 아니고 기존의 차량에 대한 관련 규정과 시험방법을 2층열차에 맞게 적용하고 있는 실정이다. 국내에서는 처음으로 연구되어진 2층열차는 여러모로 일반전동차와는 다른 면들이 많이 있다. 2층열차 각 차량의 형상과 중량도 일반 차체와 많이 다르다. 또한 승객수도 일반전동차보다 많이 증가한다. 국내에서는 아직 2층열차의 차체에 대한 깊이 있는 연구가 없는 상태였고, 따라서 각 차종별 2층 열 차체에 대한 개념설계와 이에 따른 구조강도해석의 수행이 필요하게 되었다. 2층열차에 맞게 하중값을 적용하여 해석하고 그 결과를 검토하였다.

2. 2층열차의 구성

2층열차는 1편성이 10량으로 구성되며, 4종의 차량으로 이루어진다. T car는 승객이 탑승하는 차량으로 1층은 입석위주로 2층은 좌석위주로 설계되었다. M car는 T car와 같은 형태의 차량으로 다만 대차에 구동모터가 설치되어 있는 점이 다르다. 마찬가지로 1층은 입석위주, 2층은 좌석위주로 설계되었다. Mc car는 운전석이 있는 차량으로 각종 전장품이 설치되어 있으며 2층부분에 좌석위주로 승객들이 탑승할수 있도록 설계하였다. M' car는 전력을 공급받을수 있는 차량으로

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 연구원

** 한국철도기술연구원 차량연구본부 책임연구원

따라서 이에 따른 전장품이 배치되며 Mc car와 마찬가지로 2층부분에 승객들이 탑승할수 있다. 기존의 차량은 상하에 기기배치를 자유롭게 할수 있으나 2층 급행열차는 1, 2층 상면구조로 되어 있어 기기를 설비할 수 있는 공간이 없다. 따라서 구동차인 Mc, M, M' 차량에 추진장치, 주전원 및 보조전원장치 등의 기기설비를 하여야 한다. 부수차인 T car에는 냉방장치와 제동장치, 일반배전반 등을 설비할 수 있다. Fig. 1-4까지에 각 차량의 형상도 및 의자배치를 나타내었다.

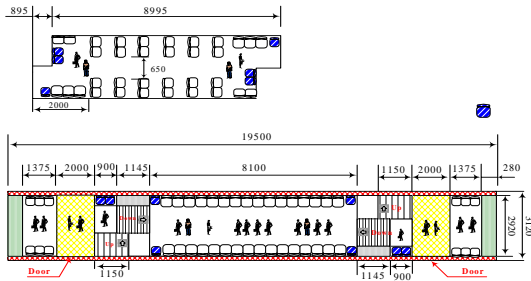


Fig. 1 내부형상도 및 의자배치(T car)

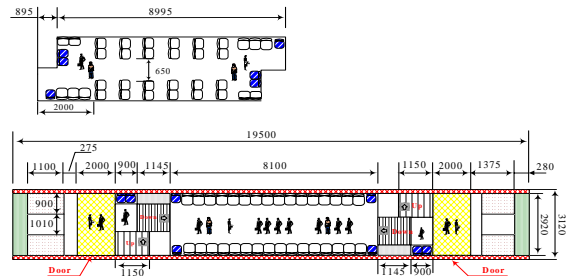


Fig. 2 내부형상도 및 의자배치(M car)

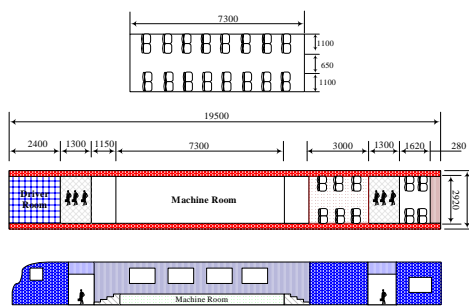


Fig. 3 내부형상도 및 의자배치(Mc car)

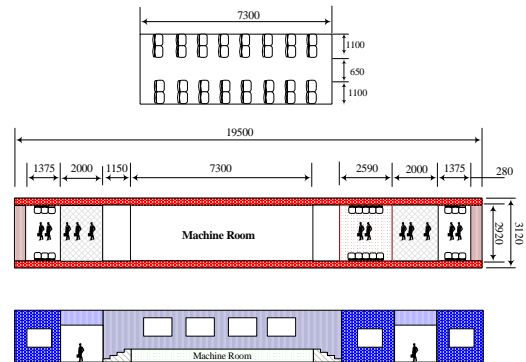


Fig. 4 내부형상도 및 의자배치(M' car)

3. 하중조건 및 승객하중값

3.1 하중조건

수직하중은 승객의 중량과 전장품의 무게에 의한 하중으로 Fig. 5와 같이 적용하였다. 승객하중값은 입석위주의 1층은 우리나라 전동차와 유사하므로 도시철도하중시험방법에 의거하여 계산하였고, 2층은 좌석위주로 유럽에서 운행되는 전동차와 유사하므로 UIC 566 OR에 의거하여 계산하였다. 경계조건은 그림에서 보는 것과 같이 차체와 닿는 부분인 에어스프링과 대차의 사이드프레임부분을 지지하고 1층과 2층바닥부분에 하중을 가하였다. 압축하중은 차량의 진행방향으로의 충격에 의한 하중으로 Fig. 6과 같이 차체 한쪽 커플러 중심 위치를 압축봉으로 고정된 상태에서 반대 쪽 커플러 중심 위치에 압축하중을 50톤을 부가한다.

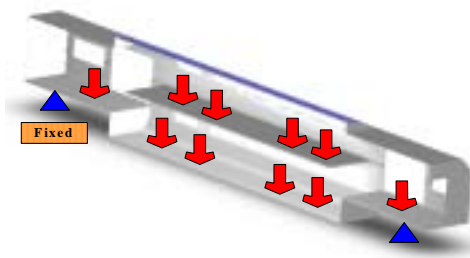


Fig. 5 수직하중조건

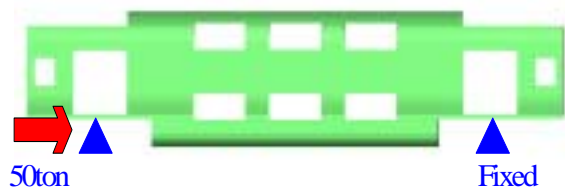


Fig. 6 압축하중조건

이때 더미하중을 수직하중으로 가한다. 비틀림하중은 차량의 곡선로를 주행할때 생길수 있는 하중으로 Fig. 7과 같이 한쪽 볼스터는 vertical support에 의해 지지되며, 반대쪽에는 차체의 rolling이 가능하도록 볼스터 중앙에 비틀림 프레임을 넣어 지지한 후 지지점 부근에 4 ton·m의 하중을 부가한다.

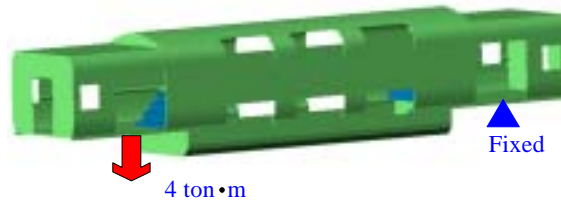


Fig. 7 비틀림 하중조건

3.3 승객하중값

2층열차에 대한 시험하중방법은 따로 문헌으로 나와있는 것은 없다. 따라서 기존의 전동차에 적용하는 하중시험방법을 2층열차에 맞게 적용하였다. 승객하중은 UIC 566 OR의 경우 식 (1)과 같이 계산된다.

$$W = 1.3 \times (m_1 + m_2) \dots\dots\dots(1)$$

여기서, m_1 = 의자의 중량, m_2 = 좌석수×80 + 복도면적×4×80 이다.

우리나라 도시철도차량 표준사양 기준에 의하면 최대승객하중값은 차량의 크기에 따라서 (2)와 같이 주어지도록 정하고 있다. 이는 승객 1인당 하중을 62kg으로 규정된 값을 고려하였을때 승객하중의 3배에 해당하는 값이라고 할수 있다.

$$W(\text{최대승객하중}) = 30\text{톤(A형)} \dots\dots\dots(2)$$

이상에서 강도해석을 수행하기 앞서 하중값을 정하기 위하여 UIC 기준과 도시철도표준사양의 기준을 살펴보았다. 2층열차의 경우 1층은 입석위주로 우리나라 일반전동차의 경우와 유사하고 2층의 경우 좌석위주로 유럽의 전동차와 비슷하므로 1층에는 도시철도차량 표준사양의 하중값을, 2층의 경우 UIC의 하중값을 적용하였다. 이를 기준하여 2층열차에 대한 승객하중을 계산한 것을 Table 1에 정리하였다. 그리고 각 하중조건에 대한 적용하중값을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

Table 1 차종에 따른 승객하중값 계산

차종	2층 승객하중	1층 승객하중	비고
	UIC(Ton)	도시철도표준사양(Ton)	
T car	9.093	28.3	+1층 도시철도표준사양 +2층 UIC 기준(OR 566)
M car	9.093	24.3	
Mc car	6.029	9.375	
M' car	6.029	15.56	

Table 2 강도해석에 적용된 각 경우별 하중값 계산(단위:ton)

		차종	*1층	2층	비고
수직 하중	T car	차체9, 대차11, 전장플14.37	62	9	+1층 도시철도표준사양 +2층 UIC 기준(OR 566)
	M car	차체9.2, 대차15.4, 전장플17.65	61.38	9	
	Mc car	차체7.8, 대차15.4, 전장플30.81	57.6	6	
	M' car	차체7.8, 대차15.4, 전장플 23.83	57	6	
압축 하중		전차량		50 ton	
비틀림 하중		전차량		4 ton·m	

* (공차중량+최대승객하중-대차중량)×(1+동하중계수) - 차체중량

4. 각 차량의 모델링

2층열차는 차량의 경량화를 위해 알루미늄 합금이라는 가벼운 재질을 적용하였다. 알루미늄 합금 중 5000계열은 적절한 강도를 가지면서 알루미늄의 압출성이 좋은 재질이기 때문이다. 2층열차는 총 24종의 압출재로 구성되어지며 Fig. 8에 2층열차의 전체 형상도와 각 부재들의 형상도를 나타내었다.

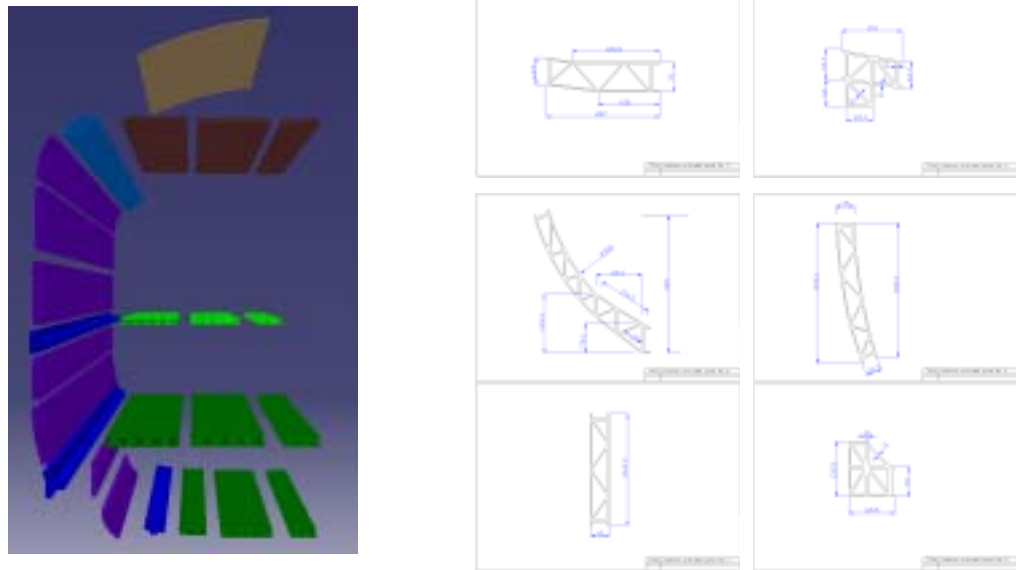


Fig. 8 알루미늄 차체의 압출재 구성

5. 유한요소모델

이상의 자료들을 가지고 각 차종별 차체를 설계하고 구조강도해석을 수행하였다. 사용된 상용유한요소 해석 프로그램은 NISAII이며 전체모델에 대하여 모델링을 하였다. 하중값은 2층열차에 맞게 적용하였고, 하중조건은 도시철도표준사양에 근거하여 수직, 압축, 비틀림 하중에 그대로 적용하였다. Fig. 8~11에 각 차종에 따른 유한요소모델을 나타내었다.

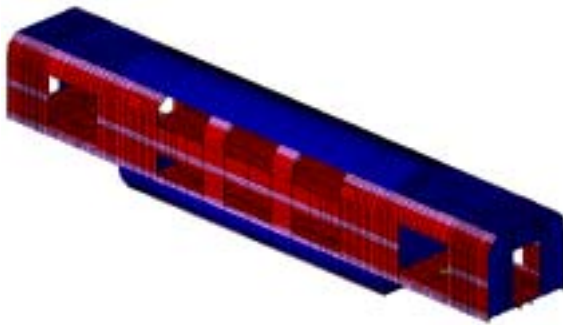


Fig. 9 M car 차체 유한요소 모델



Fig. 10 T car 차체 유한요소모델

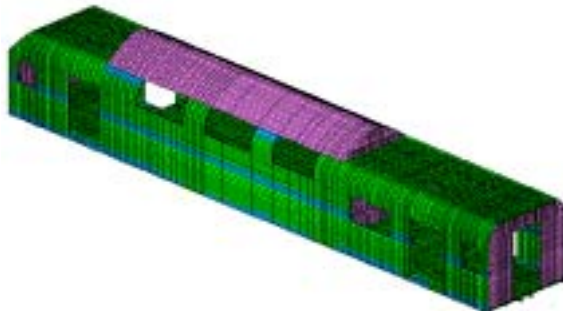


Fig. 11 Mc car 유한요소 모델

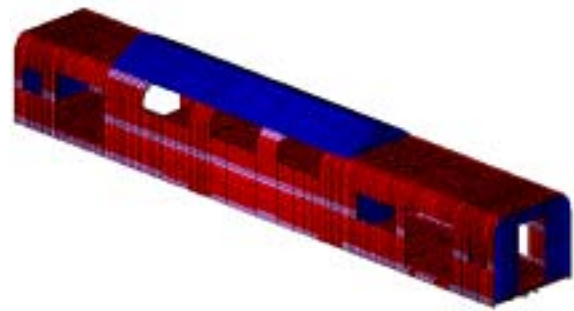


Fig. 12 M' car 차체 유한요소모델

6. 유한요소해석 결과

수직, 압축, 비틀림하중에 대한 강도해석을 수행하고 그 결과를 나타내면 Fig. 12~19와 같다.

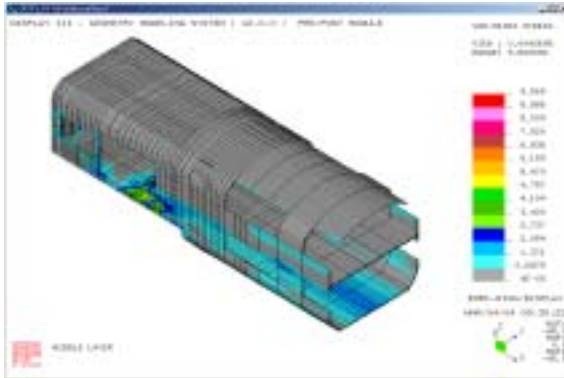


Fig. 12 수직하중 응력분포(T car, Von-Mises)

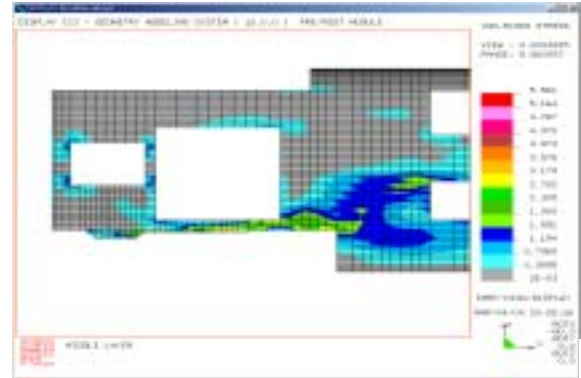


Fig. 13 압축하중(T car, Von-Mises)

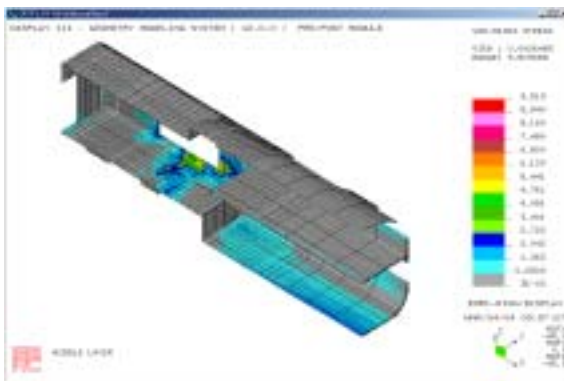


Fig. 14 수직하중 분포(M car, Von-Mises)

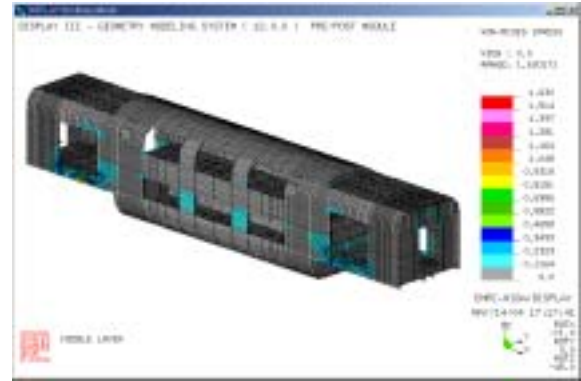


Fig. 15 비틀림하중 분포(M car, Von-Mises)

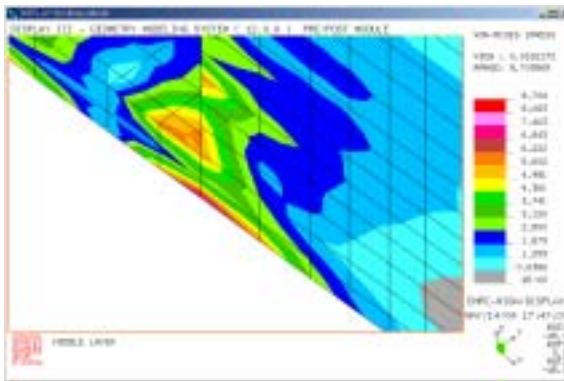


Fig. 16 수직하중 분포확대(M' car, Von-Mises)

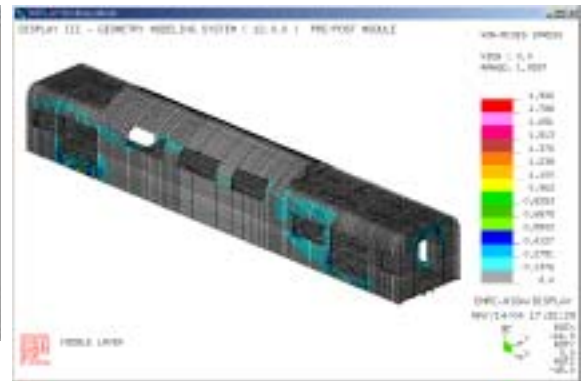


Fig. 17 비틀림하중 분포(M' car, Von-Mises)

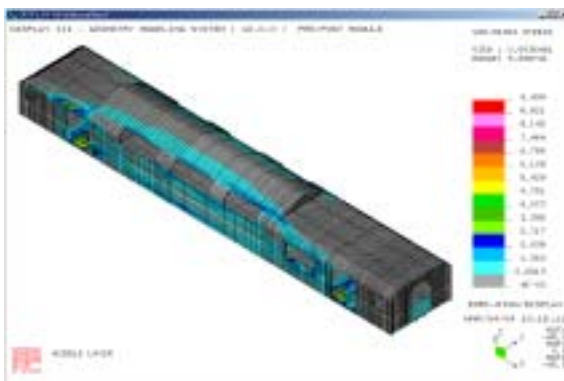


Fig. 18 수직하중 응력분포(Mc car, Von-Mises)



Fig. 19 압축하중시 응력분포(Mc car, Von-Mises)

이상의 해석결과를 정리하면 Table 4와 같다. T car의 경우 수직하중의 경우 최대용력이 9.03kg/m²으로 출입문 하단부에서 발생하였으며, 압축하중의 경우 엔드 패널 모서리와 센터실 끝단에서 최대용력이 발생하였는데, 용력값은 5.67kg/m²로 허용용력이내에 있었다. 비틀림하중의 경우 최대 발생용력이 등가용력으로 1.97kg/m²로서 출입문 하단부에서 발생하였다. M car의 T car와 거의 유사한 형태이지만 수직하중의 경우 최대발생용력이 8.9kg/m², 압축하중의 경우 4.1kg/m², 비틀림하중의 1.6kg/m²으로 T car보다 작게 용력이 발생하였다. M' car는 수직하중의 경우 최대발생 용력이 8.7kg/m²이었으며, 발생위치는 출입문 하단부였으며, 압축하중의 경우 센터실 끝단에서 6.44 kg/m²가 발생하였다. Mc car는 수직하중의 경우 최대용력이 마찬가지로 출입문 하단부에서 발생하였고, 그때의 값은 8.949kg/m²였다. 압축하중의 경우 다소 크게 나왔으며, 비틀림하중의 경우도 다른 차량보다 다소 큰 2.7kg/m²이 발생하였다. 모든 경우에 대하여 각 차종별 용력값은 허용용력 이내에 들어움을 확인할 수 있었다.

Table 5. 해석결과 정리(단위 : kg/m²)

Case 차종	수직하중		압축하중		비틀림하중	
	최대용력	허용용력	최대용력	허용용력	최대용력	허용용력
T car	9.03	*12.7	5.67	*12.7	1.97	*8.4
M car	8.9		4.1		1.6	
Mc car	8.949				2.752	
M' car	8.704		6.44		1.694	

*표준전동차 하중시험 적용기준

7. 결과

2층열차 각 차종에 대한 구조강도해석을 수행하였다. 2층열차에 관한 시험하중방법은 국내외적으로 규정된 문헌이 없으므로 일본과 유럽, 그리고 우리나라의 일반전동차에 대한 규정을 2층열차에 맞게 적용하였다. 모든 차량에 대해서 강도해석을 수행한 결과 설계된 2층열차는 모두 허용용력 이내에 들어움을 확인할 수 있었다. 모든 차종은 구조강도상 안전한 것으로 판단된다. 향후 2층열차가 도입될 경우를 대비하여 2층열차에 관련된 하중시험 방법등에 관한 규정을 정하는 것이 필요하다고 사료된다.

후기

이상의 연구는 건설교통부 건설교통기술혁신사업의 과제로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 황원주의3인, 알루미늄 압출재를 적용한 2층열차의 개념설계 및 구조강도해석, 한국철도학회, 2000.5
2. 황원주의 3인, "Al 압출재 및 SUS 2층열차 차체의 강도해석 비교 검토", 한국철도학회, 2001, p801~806,
3. 황원주의 1인, "2층열차 차체의 구조해석 관한 연구", 철도학회
4. 한국철도기술연구원, "2층급행열차 운영을 위한 기술개발 및 설계기준에 관한 연구", 건설교통 기술혁신사업 제2차년도 연차보고서,
5. 권태수, "알루미늄 차체의 압출재 형상결정을 위한 토폴로지 최적화기법의 적용에 대한 고찰", p378~385
6. 강부명의3인, "철도차량용서", 기전연구사, p427~447,
7. "도시철도표준사양" 건설교통부, 1998.2
8. "도시철도 차량의 성능시험에 관한 기준" 건설 교통부, 2000.5
9. 軌道車輛構体の荷重試験方法, JIS E 7105
10. 한국철도기술연구원, "전동차 표준사양 연구보고서", 1997
11. UIC 566 OR
12. Center for Engineering and Computer Technology, "NISA II User's manual", Vol. I, EMRC
13. Center for Engineering and Computer Technology, "Display III User's manual", Vol. I, EMRC