

표준전동차 개발을 위한 구조체의 강도해석

Bodyshell strength analysis for standard EMU

권태수 *
Kwon, Taesoo

이호용 *
Lee, Hoyong

이관섭 *
Lee, Kwansup

최성규 *
Choi, Sungkyou

ABSTRACT

The standardization urban transit project has been started by government and the Korean standard electrical railcar has been designed. The bodyshell of standard railcar is made of aluminium alloy. In the present paper, the design of its bodyshell is evaluated in the viewpoint of strength analysis. The loading condition is based on the 'Test Methods of Static Load for Body Structure of Electrical Multiple Unit', standard specification. The bodyshell of Korean standard EMU consist of longitudinal extrusion members which are double-skin structure type. The result in this paper is enough to satisfy strength requirement which is provided by standard specification. The comparison between actual experiment and analysis result will be presented in the next paper.

1. 서론

한국철도기술연구원은 건설교통부의 주관하에 '표준전동차'라 불리는 전동차를 개발중에 있다 [1]. 이 전동차는 국내에서 제작될 전동차의 표준모델로서 최신의 차량기술을 접목하게 된다. 표준전동차는 표준사양, 안전기준, 성능시험기준 등을 만족하도록 설계되고 있으며 종합제어방식의 적용, 추진제어장치의 국산화 등 발전된 성과를 이룰 것이다. 한편, 표준전동차의 구조체에서도 현재까지 우수한 형태로 알려지고 있는 Integral Design의 형태를 띠게 된다. 이것은 유럽에서 발달된 형식이며 알루미늄 합금을 이용하여 제작된다. 본문의 내용을 통하여 이에 대한 자세한 소개를 할 것이다. 또한, 표준전동차의 차체는 창문의 형식을 통유리로 하여 미관과 승객의 시야를 넓게 확보하였으며, 슬라이딩과 플러그가 혼합된 출입문 방식을 채택함으로써, 차체의 발전적 변화를 독자설계를 통하여 이루어내고 있다. 본 논문에서는 표준전동차 구조체의 설계를 위하여 강도해석만을 대상으로 삼고 있다. 실제 시험과의 비교는 향후 진행되어 검증될 것이다. 또한, 차체의 경량화를 위하여 최적설계를 이용한 단면의 치수를 결정하는 기법을 체계화하는 연구가 계속 진행될 것이다.

* 한국철도기술연구원, 정회원

2. 구조체의 형식

철도차량의 제작초기에는 구조체 목재로 제작하였다. 그러나, 강도 및 안전성, 내화성을 고려하여 강재를 재질로 사용하게 되었다. 강재차의 개발로 차량구조의 강도와 안전성을 대부분 만족시켰으나 중량이 증가함에 따라 동력비와 선로 보수비용이 증가하게 되어 차량의 경량화의 문제가 대두되게 되었으며, 아울러 내부식성 문제도 대두되게 되었다. 차량의 경량화는 차량의 설계에서 매우 중요한 위치를 차지하게 되었고, 경량화 및 내식성 향상 방법으로 가장 먼저 제안된 것은 소재 교체로서 일부 강재 구조물을 알루미늄 합금으로 교체하는 방법이 취해졌다. 현재 새로이 제작되는 철도차량의 구조체는 세계적으로 알루미늄 합금이 주종을 이루게 되는 시점에 도달하였다.

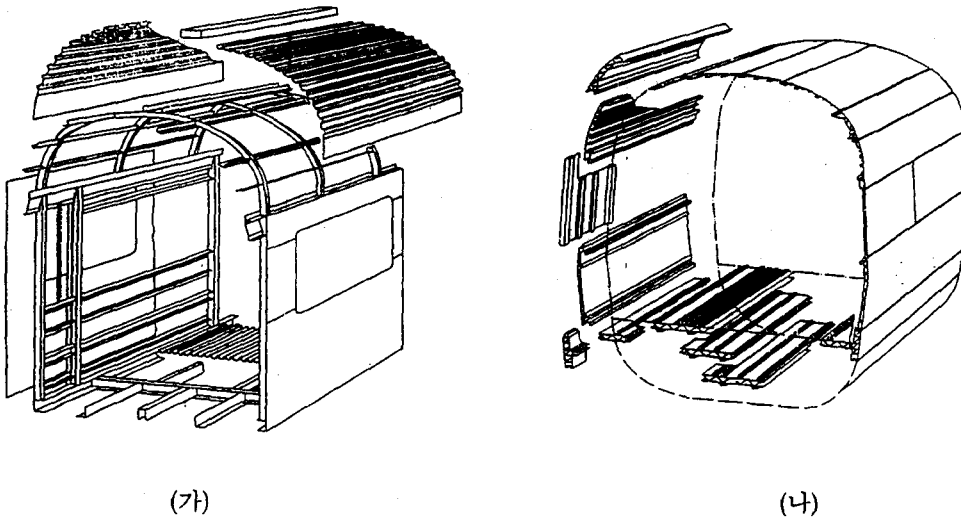


그림 1. SSD와 AED의 비교

알루미늄 차체 구조 형태는 SSD(Sheet-Stringer Design)과 AED (All Extrusion Design) 2가지로 분류할 수 있다. SSD (Differential Design이라고도 함) 구조는 그림 1 (가)에 보여지는 구조로서 하중을 전담하는 플조 및 외부/실내의 구분 역할을 하는 외피로 구성되는 구조로서 반강재차로부터 이제까지 적용되어 온 고전적인 개념이라 할 수 있다. 반면에 AED (Integral Design 이라고도 함)은 일반적으로 항공기 구조에 적용되는 구조로서 외피와 일부 縱通부재가 일체형으로 되어 외피도 하중을 부담하는 새로운 개념의 구조이다. 그림 1 (나)에 보이는 Integral Design은 알루미늄 합금차에서 본격적으로 이용되고 있으며, 이는 알루미늄 합금의 압출성이 우수하여 대형압출체의 제작이 가능한 점을 잘 이용한 경우이다. Integral Design은 횡방향 부재를 사용하지 않고 박판 중공형태(Hollow)의 압출재만을 사용하여 제작함으로써 혁신적인 제작공정의 자동화와 제작 공수의 절감을 이룩한 차량구조이다. 이제까지 국내에는 실제 노선에 알루미늄 합금 차량이 적용된 경우는 없으며, 연구개발의 대상으로 정부주도하에 알루미늄 합금 구조체가 개발된 사례가 존재한다. 알루미늄 합금 구조체의 장점을 최대한으로 살린 Integral Design 구조의 개발은 아직 이루어

지지 않았으며, 최근 이러한 분야에 대한 연구가 진행되고 있다.

3. 구조체의 강도해석

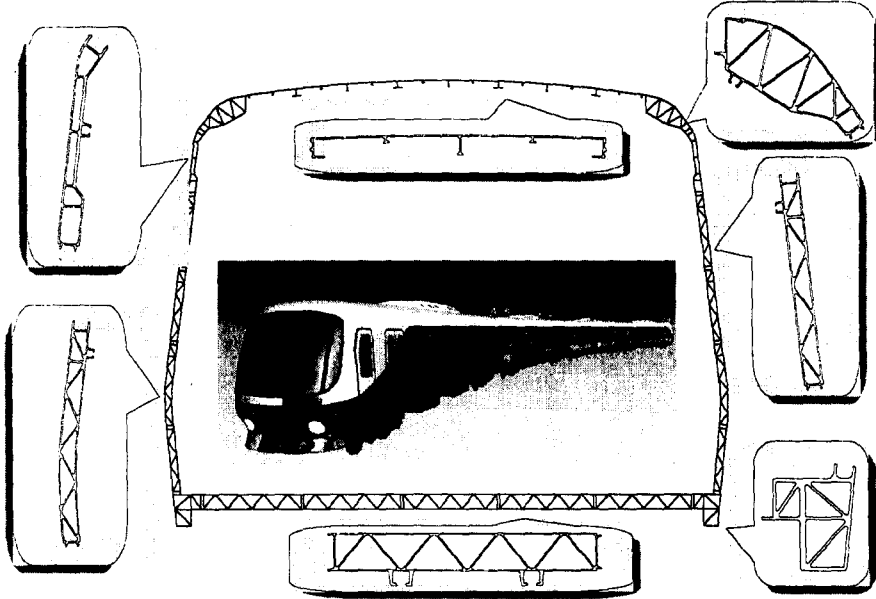


그림 2. 표준전동차의 단면도

표준전동차의 구조체의 개략적인 형태는 그림 2에 보여진다. 그림에서 보여진 단면은 전동차의 길이방향으로 일정한 형태로 생각할 수 있으며, 단 창문이나 출입문 부위는 밀링머신으로 제거하는 형태를 갖추고 있다. 그림에서 주요 금형의 모양을 나타내었으며, 이러한 금형의 압출재를 길이방향으로 용접함으로써 구조체의 형태를 만들게 된다. 단면도의 언더프레임과 지붕구조는 공기반과제[2]에서 제작된 금형을 최대한 이용하였으며, 주요부재인 쉐트레일, 솔바는 새로이 설계되었다. 또한, 사이드프레임을 길이방향 압출부재로 제작함으로써 제작공수 절감과 자동화를 유도하였다. 특히, 사이드프레임에 곡선부를 주어 외관미를 향상시켜 알루미늄 차체의 장점을 살릴 수 있도록 하였다.

3-1. 물성치 및 차체의 제원

구조체에 사용될 재질은 A6005A로 결정되었다[2]. 금형제작시 압출재 생산업체의 생산가능한 압출재의 모양을 사전에 검토하는 것은 필수 과정이 된다. 해석의 대상이 된 차량은 여러 종류의 차량중 구동차(M-Car)이다.

Table 1. 사용재질의 물성치

재질	인장강도 (kgf/mm ²)	항복강도 (kgf/mm ²)	탄성계수 (kgf/mm ²)	포아송비	밀도 (kgf/mm ³)	비고
A6005A	26.5	21.9	7.3×10^3	0.33	2.857×10^{-10}	

Table 2. 알루미늄 차체의 제원

항목	제원	비고	
차체 길이	19,500 mm	구조체중량	6.5 ton
차체 폭	3,120 mm	대차중량	14.62 ton
대차중심간 거리	13,800 mm	승객하중	30 ton
공차중량	33.59 ton	동적부가하중	0.2g

3-2. 하중조건

하중조건은 도시철도차량 하중시험방법[3]에 근거하여, 하중시험시 겪는 하중에 대하여 강도평가를 하였다.

Table 3. 하중조건

	하중	내용	크기
1	수직하중	차량의 운행중 발생할 수 있는 최악의 하중조건으로 최대 승객하중과 동하중계수를 고려한 상태이다.	(공차중량+승객하중-대차중량) × (1+동하중계수)-차체중량 = (33.59+30.00-14.62) × 1.2-6.5 톤 = 52.26 톤
2	수평압축하중	차량 연결기를 통하여 받는 압축하중과 공차상태에서 받는 수직하중의 조합이다.	압축하중 50톤 수직하중 공차하중
3	비틀림하중	차량의 곡선부 주행등에 의해 발생하는 불균일 하중상태	비틀림하중 4톤·m
4	굽힘고유진동수해석	차량주행시의 대차와의 공진현상등을 파악하기 위한 해석이다.	

차체 강도의 판정기준은 도시철도차량 구조체 하중시험방법[3]을 따라 설정하였다. 모재에서는 항복강도 21.9 kgf/mm²와 인장강도의 70% 인 18.6 kgf/mm²중에서 작은 값인 18.6 kgf/mm²를 기준값으로 하였고, 여기에 안전율 1.5를 적용한 12.4 kgf/mm²를 허용응력으로 하였다. 용접부의 허용응력은 모재의 70%인 8.7 kgf/mm²이다. 이 값은 DVS 1608에 의한 모재와 미그(MIG) 용접부의 설계 허용응력과도 일치하는 값이다[2]. 강성 및 고유진동수의 판정기준은 도시철도차량 표준사양과 동일하게 하였다. 정리하면 아래 표와 같다.

Table 4. 안전성 판정기준

구분	판정기준		비고
강도	정하중	모재부	12.4 kgf/mm ²
		용접부	8.7 kgf/mm ²
강성	Solebar의 최대처짐	볼스터간 거리의 1/1,000 이하	
굽힘고유진동수	10.0 Hz 이상		

3-3. 모델링 및 경계조건

그림 2에 보여지는 초기설계안을 대상으로 알루미늄 합금 구조체의 해석모델을 완성하였다. 기하학적 모델의 대칭성과 하중조건의 대칭성을 이용하여 1/2만을 구성할 수도 있으나, 비틀림하중의 경우 Full model을 필요로 하므로 전반적으로 Full model을 사용하였다. MSC/NATRAN[4]에서 제공하는 41,877개의 선형 쉘(Shell)요소와 28,667개의 절점을 사용하였다. 경계조건은 하중조건 1인 경우에는 에어백 지지부위에 수직방향 변위를 구속하였고 하중조건 2에서는 한쪽 센터실 부근을 고정하고, 다른쪽 센터실 연결기 장착부위에 하중을 가할 수 있도록 하였다. 하중조건 3의 비틀림 해석은 한쪽 차체 볼스터를 고정하였으며, 하중조건 4는 하중조건 1과 동일한 경계조건을 사용하였다.

3-4. 해석결과 및 고찰

(1) 수직하중

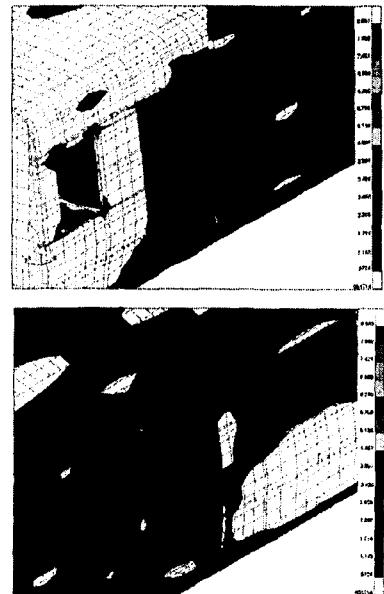
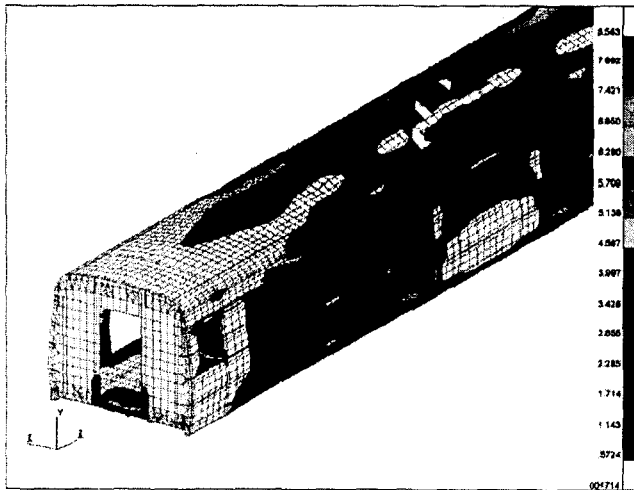


그림 3 수직하중하의 응력분포

그림 3에 수직하중에 의한 응력분포를 나타내었다. 응력집중부의 결과는 예상대로 출입문의 코너부와 창문의 코너부에서 발생하였으며, 응력집중부 이외에는 응력값이 상대적으로 적은 것으로 보인다. 특히 출입문 하부코너와 창문 하부코너에 응력이 집중되는 양상을 그림 3에 보였다. 최대응력이 비록 허용응력조건을 만족하고 있으나, 응력집중부가 용접부 근처에 위치하는 현상이 발생하였으므로, 설계 및 제작에 이러한 점에 주의를 기울여야 할 것으로 보인다. 슬바 및 언더프 프레임 중앙의 처짐은 강성의 평가조건(Table 4)을 만족하였다.

(2) 수평압축하중

그림 4에 수평압축하중에 의한 응력상태를 표시하였다. 차체 단부에서 차체 볼스타 사이에 집중적으로 응력이 작용하고 있으며, 특히, 출입문 하부코너와 센터실 부근에서 응력집중부가 발생하고 있다. 출입문 하부코너는 수직하중시에도 응력집중부이므로 주의를 해야 한다.

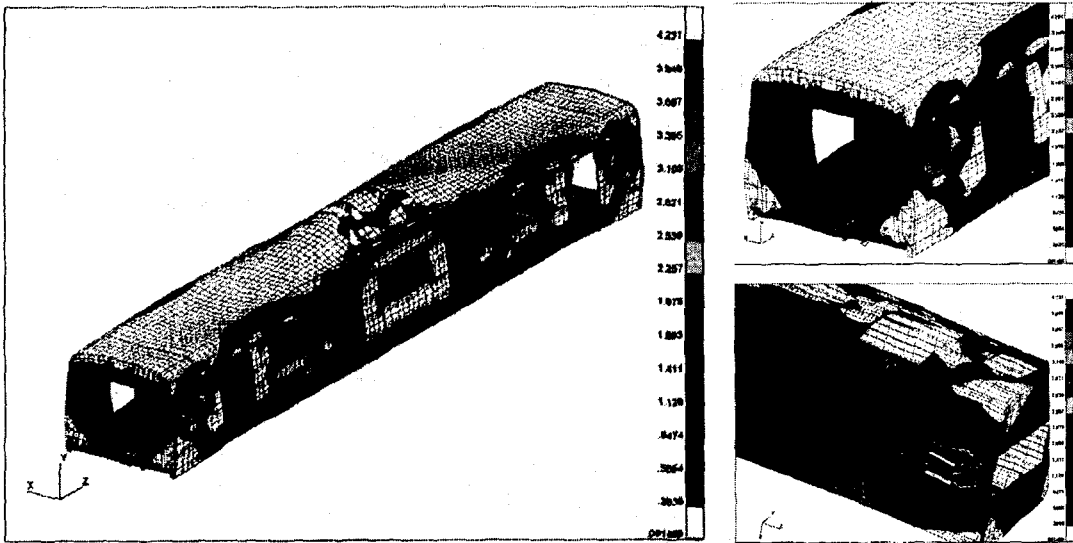


그림 4 수평압축하중하의 응력분포

(3) 비틀림하중

그림 5에 비틀림 하중에 의한 응력분포를 변형된 상태와 함께 보였다. 응력집중부는 출입문 하부코너와 단부출입문 상부 코너에서 발생하였으며, 하중을 가하는 지점에서 응력값이 크게 나타났다. 그러나, 최대응력값이 상대적으로 다른 하중조건때 보다 적은 값으로 나타났다. 특기할 만한 점은 수직하중과 수평압축하중시의 응력집중부인 출입문 하부코너가 비틀림에서도 응력집중부로 판단되므로 다양한 하중조건하에서 대부분 그 지점이 응력집중부가 될 것으로 보이므로 보완책을 마련하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

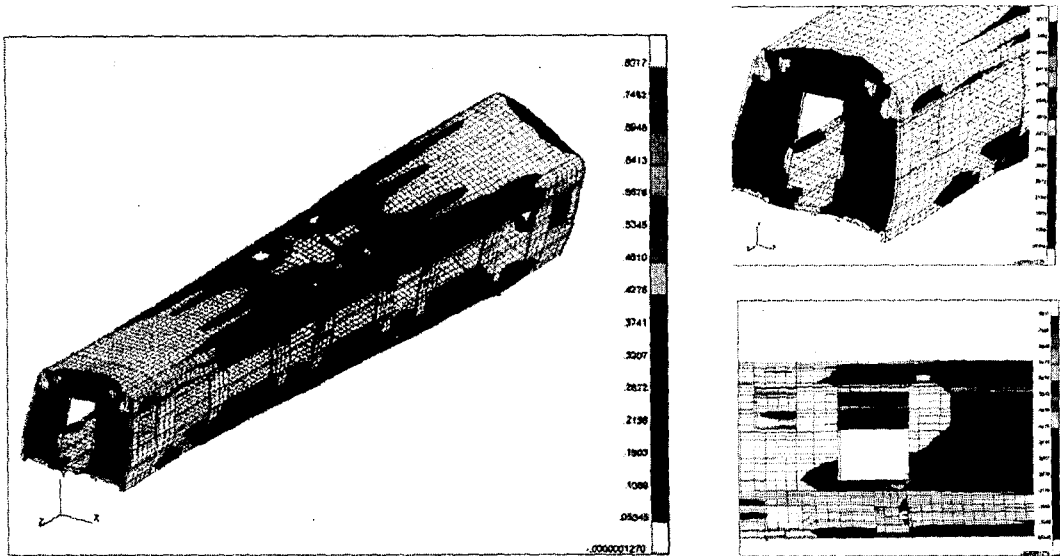


그림 5 비틀림하중하의 응력분포

(4) 굽힘고유진동수

그림6 에 굽힘고유진동모드를 보였다. 진동수는 일반적인 기준치보다 높은 것으로 나타나 대차와의 공진은 피할 수 있을 것으로 보인다.

하중조건 (1)(2)(3)(4)에서 발생한 응력집중부에서 설계시 유의하여야 할 부분은 창문 하부코너, 출입문 하부코너, 볼스타와 센터실이 만나는 지점 등으로 나타났다. 이러한 응력상태를 보다 더 정확하게 파악하고 보강책을 마련하기 위해서는 상세해석을 필요로 한다. 그림7에 창문 하부 코너의 서브모델링(submodeling) 기법을 이용한 상세해석 결과를 보였다. 전체

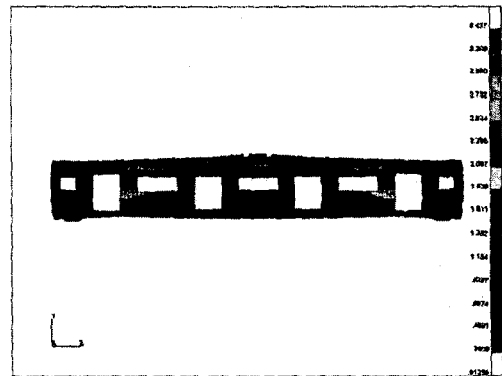


그림 6. 굽힘고유진동모드

적인 해석에서는 요소수와 절점수의 제약으로 인해 정교한 곡선부를 무시하였으나, 상세해석을 통해 상세부를 고려한 결과 최대응력값이 다소 감소함을 알 수 있었다. 그림7에 보이는 물체의 차체 바깥쪽과 안쪽 면을 비교할 때 안쪽의 응력값이 더 크게 나타났다.

각각의 하중조건에서의 최대응력값과 최대변위 등의 상태변수를 공기반과제의 결과와 비교하여 표 5에 나타내었다. 전반적으로 강성 및 강도 면에서는 양호한 것으로 보인다.

각각의 하중조건에 따른 해석결과를 아래 표에 정리하였다.

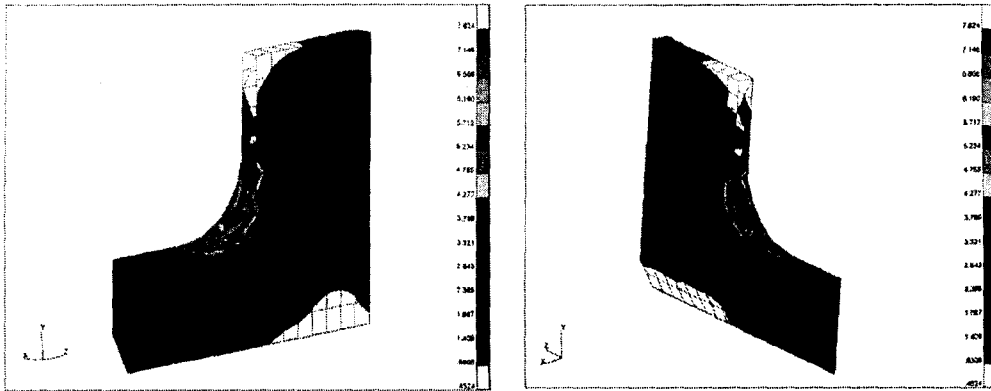


그림 7. 창문하단코너 응력집중부의 상세모델

Table 5. 해석 결과

하중	구분	결과		발생지점		
		표준전동차	공기반과제	표준전동차	공기반과제	
1	수직하중	최대응력	8.56 kgf/mm ²	7.56 kgf/mm ²	출입문상부코너	출입문상부코너
		처짐량	-11.00 mm	-9.51 mm	솔바중앙	솔바중앙
		처짐량	-20.85 mm	-21.8 mm	바닥중앙	바닥중앙
2	압축하중	최대응력	5.61 kgf/mm ²	3.73 kgf/mm ²	센터실과 볼스타의 경계부	센터실 골곡부
3	수평압축하중	최대응력	4.231 kgf/mm ²		볼스타와 솔바의 경계부	
4	비틀림하중	최대응력	1.40 kgf/mm ²	1.54 kgf/mm ²	출입문하부코너	출입문상부코너
5	굽힘 고유진동수	1차 모드	11.3	10.7 Hz		

4. 결론

본 연구에서는 표준전동차의 구조체를 개발하기 위한 강도평가를 수행하였다. 표준전동차는 알루미늄 합금이라는 소재를 국내 전동차에 적용하며, 구조체의 형식을 국내에서는 적용된 적이 없는 새롭고 우수한 형식을 선정하였다. 강도해석을 통해 살펴본 결과 언더프레임의 과다설계, 지붕의 상대적 강성부족 등의 개선점이 나타났지만, 구조체의 강도는 판정기준을 모두 만족하는 것으로 나타났고, 해석결과 강도상 우수한 것으로 판정된다. 이러한 점은 시험을 통하여 다시 검증되어야 할 것이다.

앞으로 진행될 연구는 정하중시험을 통하여 구조체의 강도평가를 하고 해석결과의 비교·고찰을 하는 것이 될 것이다. 아울러, 본 논문에서 다룬 Integral Design 구조형식에 있어서 격막의 두께를 최적설계기법을 통해 결정하는 경량화설계 기법연구가 진행될 것이다.

참고문헌

1. “전동차 표준사양 연구보고서 (분야 : 차체 및 설비)”, 1997.12, 건설교통부
2. “철도차량 구조용 알루미늄 압출형재 및 차체 구조 개발에 관한 연구”, 1996.6, 통상산업부
3. “도시철도차량 표준사양”, 1998, 건설교통부
4. Nastran Reference manual