전동차 구조체의 안전성 평가 연구

정종덕*(한국철도기술연구원), 김정국(한국철도기술연구원), 편장식(한국철도기술연구원), 김원경(한국철도기술연구원), 홍용기(한국철도기술연구원)

On Study the Safety Assessment of Accident Electric Multiple Units

J. D. Chung(KRRI), J. K. Kim(KRRI), J. S. Pyun(KRRI), W. K. Kim(KRRI), Y. K. Hong (KRRI)

ABSTRACT

This paper describes the structural analysis result and load test result of accident EMU(Electric Multiple Units). Structural analysis and load test of EMU were performed for the criteria of safety assessment. Structural analysis using commercial I-DEAS software provided important information on the stress distribution and load transfer mechanisms as well as the amount of damages during rolling stock crash. The purpose of the load test is to evaluate a safety which carbody structure shall be considered fully sufficient rigidity so as to satisfy proper system function under maximum load and operating condition. The results have been used to provide the critical information for the criteria of safety assessment.

Key Words : Electric Multiple Units(전동차), Carbody(구조체), Vertical Load(수직하중), Compressive Load(압축하중), Underframe(언더프레임), Safety Assessment(안전성평가), Under Frame (언더프레임), Side Frame (측면 구조틀), Roof Frame(지붕 구조틀), End Frame (끝막이 골조)

1. 서론

차체는 정상적인 운행상태에서 개조 및 대대적인 보수, 보강 없이 최소 25 년간 사용할 수 있도록 설계되고 제작되도록 되어 있고, 차체의 구조는 언더프레임, 측면 구조틀, 지붕 구조틀 및 끝칸막이 구조틀로 구성되어 있으며, 차체를 이루는 모든 구성품은 최대하중과 정상운행 조건하에서, 과다한 변형으로 인한 기기의 오동작을 방지하고 원활한 기능 수행을 위해 충분한 강도 및 강성이 유지되도록 되어 있다.

전동차의 힘의 전달 경로를 살펴보면 수평하중시 차량과 차량을 연결해주는 연결기를 통해 언더프레임의 센터실에 장착되어 있는 Draft Gear ⇒ Center Sill ⇒ Bolster ⇒ Side Sill 로 수평하중이 전달되고, 수직하중시에는 측면골조, 끝막이 골조, 지붕골조에서 힘을 받지만 주로 언더프레임에서 힘을 받는 구조로 설계되어 있다.

본 논문에서는 차체의 강도 및 강성을 평가하기 위해서 기본적인 구조해석을 통하여 힘의 전달과정과 주요부재의 응력 취약부를 확인하고 압축하중시험을 실시하여 사고 전동차의 주요 부재의 파손부위와 비교하여 차체의 안정성을 종합적으로 검토하고자 한다.

2. 차체의 구조해석

본 구조해석의 목적은 차체에 작용하는 수직하중을 포함한 압축하중에 대해, 해석을 통하여 차체 구조에 전달되는 하중경로와 응력의 분포를 파악하기 위한 것이다.

2.1 해석모델

차체는 커플러 포켓에 가해지는 수평압축하중에 대하여 해석을 수행하였으며, 전후 및 좌우 대칭임을 감안하여 1/4 만을 모델링 하였다.

구조해석에 사용된 대부분의 요소는 shell 요소를 사용하였으며, 언더프레임에는 shell 과 solid 요소를 혼합하여 사용하였다. 전체 모델에 사용된 총

요소수는 54,270 개이며 절점수는 52,524 개이다. 구조해석에 사용된 Hardware 는 HP Workstation x2100 이며 해석 Package 는 I DEAS Master Series 8.0 을 사용하였으며, 차체의 제원은 Table 1 과 같다.

Table 1 Specification of EMU

No	Type	Length
1	차체길이	19,500mm
2	차체폭	3,120mm
3	지붕높이	3,800mm
4	대차중심간거리	13,800mm
5	연결기 높이	880±10mm

2.2 하중조건 및 물성치

차량간의 연결시에 발생하는 하중조건으로 수직하중 1g 가 작용하는 동시에 50 톤의 압축하중이 작용하는 혼합하중 상태이다.

도시철도법에 규정한 최대승객하중은 30 톤이나 통상적인 승객중량을 20 톤으로 가정하여 압축하중 50 톤이 동시에 작용하는 조합하중에 대해 해석하였다. 따라서 적용된 하중은 다음과 같이 계산되며, 구조해석 및 수평압축시험에 적용된 하중조건은 2 단계로 분류하여 해석을 수행하고자 한다. 1 단계는 도시철도법에서 규정한 하중조건이고 제 2 단계는 영구변형을 알아보기 위해 해석을 수행한 하중조건이며 그 하중크기는 Table 2 와 같다.

1) 제 1 단계
수평압축하중 =(공차중량+승객하중-대차중량-Bareframe 중량)+압축하중
=수직하중(29.3 톤)+압축하중(50 톤)

2) 제 2 단계
수평압축하중 =(공차중량+승객하중-대차중량-Bareframe 중량) + 압축하중
=수직하중(29.3 톤)+압축하중(95 톤)

Table 2 Computation weight of EMU

No.	Type	Weight
1	공차중량	33 ton
2	Bareframe 중량	11.7 ton
3	대차중량	12 ton
4	최대승객하중	20 ton

해석에 사용된 전동차의 재질은 SS400 이며 이 재질의 기계적 물성치는 Table 3 과 같다.

Table 3 Material Properties of EMU

Material	Yield stress (kg_f/mm^2)	Tensile stress (kg_f/mm^2)
SS400	25	41

2.3 구조해석 결과

구조해석은 전동차의 1/4 모델로 해석을 수행하였으며, Table 4 은 구조해석 결과를 나타낸 것이다. 응력분포는 Fig. 1 과 같으며, 대부분의 응력은 언더프레임에서 발생하였으며, 특히 센터실의 커플러 포켓 부근에서 높은 응력이 발생하였다. 발생응력의 흐름을 자세히 검토해보면, 센터실에서 발생한 높은 응력은 볼스터의 높은 강성으로 인해 차량 중심으로 갈수록 낮아지는 경향을 보이나 주요 하중전달 부재인 사이드실은 단부에서 두 번째 출입문 부근에서 다시 높아지는 응력 경향을 볼 수 있다. 하중시험으로부터 압축하중의 전달경로를 살펴보면 Coupler⇒Draft Gear⇒Center Sill⇒Bolster⇒Side Sill 로 연결된다. 이들 부재들은 고강도 주요 골조로서 차체 하중에 중요한 역할을 담당하는 부재들이다.

Table 4 Structural analysis result

No	구분 (하중조건)	위 치	발생응력 (kg_f/mm^2)
1	[제 1 단계]	Center Sill Coupler Pocket 전반부	14.90
2		Center Sill Coupler Pocket 중/후반부	14.30
3		Bolster 후위부 Center Sill	5.70
4		두번째 출입구 하부	6.79
5	[제 2 단계]	Center Sill Coupler Pocket 전반부	22.20
6		Center Sill Coupler Pocket 중/후반부	28.10

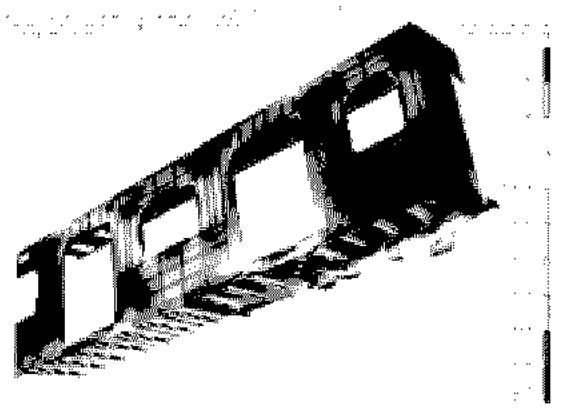

Fig. 1 Stress distribution of EMU model

Fig. 2 와 3 은 센터실 볼스터부위의 구조해석결과와 추돌로 인한 차량의 변형된 사진을 나타낸 것이며, 해석결과와 일치하는 것을 볼 수 있다.

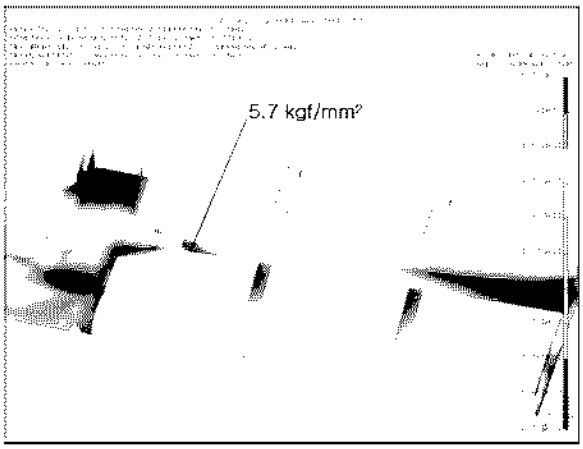

Fig. 2 Structural analysis result of center sill(Bolster)

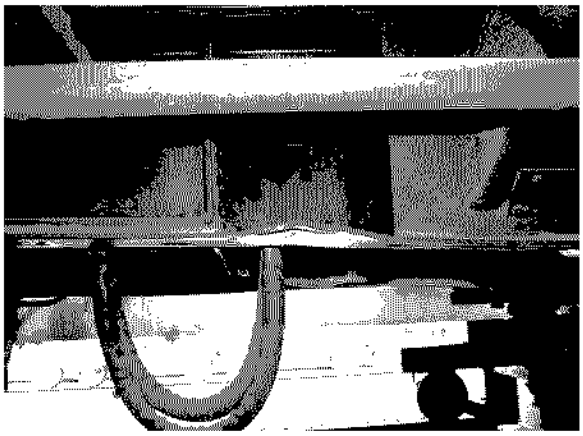
Fig. 3 Picture of center sill(Bolster)

3. 압축하중시험

압축하중시험은 차체에 작용하는 수직하중을 포함한 압축하중에 대해 전달되는 하중경로와 응력의 분포를 파악하기 위해 최근에 진행했던 도시철도차량의성능시험 차량에 추가로 스트레인 게이지를 취부하여 시험을 실시하였다.

3.1 시험방법

차체 언더프레임 상면에 등분포로 수직하중 11.7 톤을 가한 후, 차체 한 쪽 커플러 중심위치를 압축봉으로 고정한 상태에서 반대 쪽 커플러 중심위치에서 유압 장비를 이용하여 압축하중을 가한다.

- 하중단계 : 0 톤 → 11.7 톤(수직하중)
  0 톤 → 25 톤 → 50 톤(압축하중)

시험방법은 다음과 같다.

1) 응력의 기준 값을 잡기위하여 응력 측정기에서 응력값을 영으로 초기화 한다.
2) 다이알 게이지의 초기 값을 기록한다.
3) 유압 실린더로 언더프레임 상면에 수직하중 11.7 톤을 등분포 하중으로 부가한다.
4) 응력측정기로 응력을 측정한다.
5) 다이알 게이지의 지시값을 기록한다. 처짐량은 이 값과 초기 값의 차이가 된다.
6) 수직하중 11.7 톤을 유지한채로 압축하중 25 톤을 부가한다.
7) 압축하중 50 톤까지 2 번 - 5 번 과정을 반복한다.
8) 압축하중 시험이 완료되면 모든 하중을 제거한다.

Fig. 1 는 시험장치의 개략도이고, Fig. 2 는 strain gage 취부 위치이다.

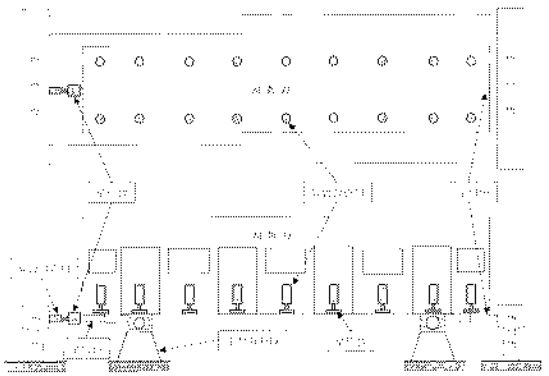
Fig. 3 Test apparatus for compressive loading

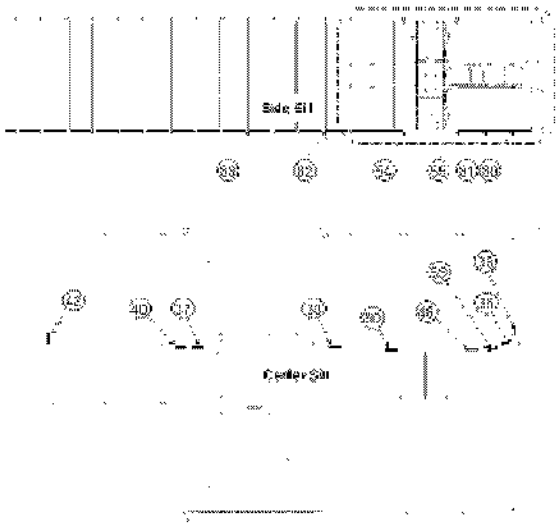

Fig. 4 Measurement of stress using strain gage

3.3 압축하중조건

수평압축시험에 적용된 하중조건은 "성능시험의 구조체 하중시험" 따라 아래와 같이 적용하며 하중작용방법은 압축하중 커플러 포켓에 하중을 부하한다.

수평압축하중=수직하중(공차중량-대차중량
-Bareframe 중량) + 압축하중
=수직하중(32.8 톤-13.6 톤-7.5 톤)+압축하중(50 톤)
= 수직하중(11.7 톤) + 압축하중(50 톤)

3.2 기계적 물성치

사고전동차의 재질은 SS400 이며, 이 시험에 사용한 전동차의 기계적 물성치는 Table 5 와 같다.

Table 5 Material properties of carbody

No	재 질	항복강도 [kg_f/mm^2]	인장강도 [kg_f/mm^2]	비 고
1	SMA490B	37	50	BOLSTER, CENTER SILL
2	STS301L -LT	22	56	CROSS BEAM, END SILL
3	STS301L -ST	42	77	CARLINE. ROOF PANEL
4	STS301L -HT	70	95	CANT RAIL, SIDE SILL, SIDE POST
5	STS304	21	53	ENTRANCE FRAME, BRACKET

3.4 압축하중시험결과

압축하중시험결과를 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 센터실의 경우 최대응력은 볼스타 후위부에서(S/G No. 37) 발생하였으며, 센터실의 전위부(S/G No. 48), 볼스타의 전위/하위부(S/G No. 38,42,48)에서 높은 응력이 발생하였다. Table 6는 주요 부위의 압축하중시험결과이다.

Table 6 Load test result

	S/G No.	수직하중 11.7ton			비고
		0ton	25ton	50ton	
Side Sill	80	0.93	-1.63	-4.44	END ⬇ CENTER
	81	0.11	-1.97	-4.37	
	55	0.08	0.46	0.90	
	54	1.49	-2.00	**-5.58**	
	82	-0.03	-0.59	-1.27	
	83	-0.19	-0.43	-0.71	
Center Sill	36	-0.03	0.70	1.20	END ⬇ CENTER
	35	0.28	1.96	2.97	
	53	-0.28	2.59	4.56	
	48	0.20	3.81	6.79	
	38	-1.56	-4.51	-7.37	
	37	-4.90	-6.43	**-7.83**	
	40	-2.92	-3.90	-4.72	
	42	0.00	-3.16	-6.34	

4. 결론

구조해석결과 Under Frame 에서 응력이 발생하였으며, 특히 Center Sill 의 Coupler Pocket 부근에서 높은 응력이 발생하였으며, 압축하중시험결과를 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과 값들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 센터실의 경우 최대응력은 볼스타 후위부에서 발생하였으며, 전체적으로 센터실의 End, Draft Gear, Bolster 에서 높은 응력이 발생하였다. 이 결과에 대하여 압축하중의 전달경로를 살펴보면 Coupler-Draft Gear⇒Center Sill ⇒Bolster⇒Side Sill 로 연결되며, 구조해석 결과와 실제 압축하중시험의 결과가 실제 사고차량의 변형과 일치함을 볼 수 있다. 이들 부재들은 고강도 주요 골조로서 차체 하중에 중요한 역할을 담당하는 부재들이다.

차량이 추돌 등과 같은 극한하중을 받는 경우를 상정한다면 대부분의 하중을 언더프레임에서 받게 될 것이므로 재질이 탄성한도를 넘어서게 될 것이다. 추돌사고 등으로 차체에 심각한 소성 변형이 과다하게 발생한 차량은 하중전달의 불균일, 하중전달경로의 변경 등의 양상이 발생할 수 있으므로 국부적인 응력집중 및 추가적인 소성변형의 가능성이 크다.

참고문헌

1. 정종덕, 김원경, 윤성철, 편장식, "스테인리스와 알루미늄으로 제작된 전동차의 구조체 하중시험에 대한 안전성평가," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 351, 2003.
2. 김원경, 정종덕, 윤성철, 홍용기, "냉연코일강판 수송용 화차의 안전성평가를 위한 차체하중시험과 진동시험," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 345, 2003.
3. J. G Kim, J. D. Chung, J. H. Kim, Y. K. Hong, W. K. Kim, J. S. Pyun & D. S. Bae, " Failure Analysis of Collided Subway Rolling Stocks for Safety Assessment," Proceedings of MARCON 2004.
4. 정종덕, 김원경, 홍용기, 김정국, 편장식, "구조해석방법을 이용한 사고전동차의 안전성평가," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 108, 2004.