

스테인리스와 알루미늄으로 제작된 전동차의 구조체 하중시험에 대한 안전성 평가

정종덕(한국철도기술연구원)*, 김원경 (한국철도기술연구원), 윤성철(한국철도기술연구원),
편장식(한국철도기술연구원)

A safety evaluation on the loading test of EMU's carbody having stainless and aluminum

J. D. Chung(KRRI), W. K. Kim(KRRI), S. C. Yoon(KRRI), J. S. Pyun(KRRI)

ABSTRACT

This paper describes the result of carbody load test. The purpose of the test is to evaluate an safety which carbody structure shall be considered fully sufficient rigidity so as to satisfy proper system function under maximum load and operating condition. Carbody material applied a stainless steel and an aluminum alloy, The stainless steel model is the carbody of a motor car which is delivering to KNR line 1 in 2002 and the aluminum alloy model is the carbody of a motor car which is delivering to GWANGJU line 1 in 2003.

Key Words : Carbody(구조체), Vertical load(수직하중), Compressive load(압축하중), Three-point bending(3 점지지), Twisting load(비틀림하중), Frequencies(진동수)

1. 서론

도시철도차량의 구조체는 주로 연강(mild steel), 스테인리스(stainless steel), 알루미늄 합금(aluminum alloy)으로 제작되고 있다. 이러한 변천과정은 차량의 대형화와 아울러 경량화 측면을 동시에 만족시킬수 있도록 설계가 요구되기 때문이다.

시험 대상인 구조체는 스테인리스 차량인 철도청 1 호선 신조차와 알루미늄차량으로 제작된 광주시 1 호선 도시철도차량을 “도시철도차량의 성능시험에관한기준” 에 의거하여 성능시험을 수행하였다. 성능시험은 창원과 의왕에서 각각 실시 되었으며 예비시험과 본시험을 2 차례로 나누어서 수행되었다.

구조체의 하중시험을 통해 캠버량 측정, 강도 및 강성을 확인하여 차체의 안전성을 평가하고자 하며 시험차의 재질별로 그 특성을 분석하고자 한다.

2. 구조체 하중시험

철도청 1 호선 개조차에 적용되는 스테인리스 차량과 광주시 1 호선에 적용되는 알루미늄 차량의 구조체를 대상으로 수직하중, 압축하중, 3 점지지 시험, 비틀림하중, 굽힘과 비틀림 고유진동수 시험을 실시하여 그 특성을 비교하고 향후, 구조체 설계시 취약부위를 찾아내어 보강하고 불필요한 구조체의 부재에 대해서는 변경 또는 제거하여 경량화를 이루고자 한다.

시험의 하중조건은 구조체 하중시험의 시험차량에 모두 하중조건이 제일 가혹한 차량인 동력차(M-car)를 시험차량으로 선정하였으며, 하중조건은 Table 1 과 같다.

Table 1 Test load condition

구분	스테인리스 차량	알루미늄차량
수직 하중	60.5 ton	45.7 ton
압축 하중	50 ton	50 ton
3 점지지 하중	18.9 ton	13 ton
비틀림 하중	4 ton·m	4 ton·m
굽힘/비틀림고유진동수	9.1 ton	6.3 ton

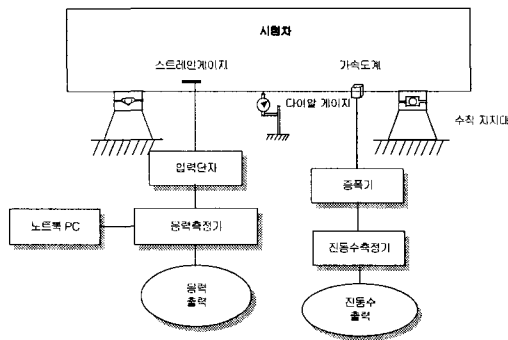


Fig. 1 Disposition test equipment diagram

2.1 재료의 기계적 성질

스테인리스 차량의 구조체는 볼스타와 센터실은 고장력강으로 되어 있으며 나머지 주요 구조체는 스테인리스강재 (STS301L)로 제작되었다. 알루미늄 구조체는 알루미늄 압출재(A6005A-T6)을 사용하였고 출입문 코너부의 재질은 A6061P-T651 을 그밖의 브라켓류의 재질은 A5083-0 을 사용하여 제작되었다.

2.2 판정 기준

차체의 강도는 재료의 항복강도를 기준으로 하며, side sill 의 처짐량은 볼스타간 거리의 1/1,000 인 13.8 mm 이하이어야 한다. 또한 차체의 상당 굽힘강성은 $0.6 \times 10^{14} \text{ kgf/mm}^2$ 이상이어야 하며, 굽힘 고유 진동수는 사양서의 기준인 10.0Hz 이상 이어야 한다.

3. 응력의 측정 결과

3.1 수직하중시험

3.1.1 스테인리스 강 차량

수직 하중시험결과 측정응력이 20 kgf/mm^2 이상인 측정점의 재질은 STS301L-DLT 이며, 허용응력은 35 kgf/mm^2 들은 아래표와 같으며 이 결과를 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 출입문 하부코너에서 발생하였다.

Table 2 Measurement data of vertical load test

스트레인 게이지	수직하중 부하			허용응력 kgf/mm^2
	0 ton	60.5 ton	하중제거	
17	0.40	-22.80	0.64	35
78	0.23	22.21	0.16	35
23	0.05	20.92	0.19	35

3.1.2 알루미늄 차량

수직 하중시험결과 측정응력이 6.0 kgf/mm^2 이상인 측정점들은 아래표와 같으며 이 결과를 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 출입문 하부 코너의 Side Structure 압출재에서(스트레인 게이지 No. 62,63,64) 발생하였다.

Table 3 Measurement data of vertical load test

스트레인 게이지	수직하중 부하			허용응력 kgf/mm^2
	0 ton	47.6 ton	하중제거	
11,12,13	0.01	6.74	0.09	21.92
16,17,18	0.01	6.20	0.06	21.92
62,63,64	0.01	7.28	0.08	11.72

3.2 압축하중시험

3.2.1 스테인리스강 차량

압축하중시험결과 측정응력이 17.0 kgf/mm^2 이상인 측정점들은 Table 4 와 같으며, 이 결과들을 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 센터실의 커플러 포켓 부위에서(스트레인게이지 No. 37) 발생하였다.

Table 4 Measurement data of compressive load test

스트레인 게이지	수직 하중 : 18.9 톤			허용응력 kgf/mm ²
	0 톤	50 톤	하중제거	
32	2.39	17.38	0.64	37
37	-4.32	-20.78	0.18	37
39	-2.41	-18.55	-0.32	37

3.2.2 알루미늄 차량

압축 하중시험결과 측정응력이 4.4 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 5 와 같으며, 이 결과들을 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 센터실의 커플러 포켓 부위에서(스트레인 게이지 No. 77) 발생하였다.

Table 5 Measurement data of compressive load test

스트레인 게이지	수직 하중 : 14.6 톤			허용응력 kgf/mm ²
	0 톤	50 톤	하중제거	
65	-0.01	-4.48	0.07	11.72
77	-0.02	-5.26	0.06	11.72
78	-2.41	-4.58	0.06	11.72

3.3 3점 지지시험

3.3.1 스테인리스강 차량

3 점지지시험결과 측정응력이 20.0 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 6 과 같으며 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 출입문 상부 코너에서(스트레인게이지 No. 59) 발생하였다.

Table 6 Measurement data of three-point bending load test

스트레인 게이지	0 톤	수직 하중 : 18.9 톤		0 톤	허용응력 kgf/mm ²
		0 톤	3 점지지상태		
25	0.29	-5.66	-20.79	0.37	35
58	-0.23	-4.66	-27.08	-0.44	42
59	-0.14	4.00	27.64	0.05	42

3.3.2 알루미늄 차량

3 점지지시험결과 측정응력이 6.0 kgf/mm² 이상인

측정점들은 Table 7 과 같으며 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 출입문 상부 코너에서 (스트레인게이지 No. 19) 발생하였다.

Table 7 Measurement data of three-point bending load test

스트레인 게이지	0 톤	수직 하중 : 18.9 톤		0 톤	허용응력 kgf/mm ²
		0 톤	3 점지지상태		
19	-0.01	1.03	7.17	0.11	14.8
21	0.02	-1.00	-6.25	0.00	14.8
49	-0.01	0.92	6.06	0.09	14.8

3.4 비틀림 하중시험

3.4.1 스테인리스강 차량

비틀림 하중시험결과 측정응력이 2.8 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 8 과 같으며, 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며, 부가된 하중에서의 최대 응력은 1 차 시험시 출입문 상부에서 (스트레인 게이지 No. 59) 발생하였다.

Table 8 Measurement data of twisting load test

스트레인 게이지	0 톤	4 톤 · m	하중제거	허용응력 kgf/mm ²
58	0.29	-2.80	-0.06	42
59	0.24	4.08	0.18	42
79	0.76	3.46	-0.39	35

3.4.2 알루미늄 차량

비틀림 하중시험결과 측정응력이 1.25 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 9 와 같으며, 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다. 부가된 하중에서의 최대응력은 1 차 시험시 출입문 하부 코너에서 (스트레인 게이지 No. 30) 발생하였다.

Table 9 Measurement data of twisting load test

스트레인 게이지	0 톤	4 톤 · m	하중제거	허용응력 kgf/mm ²
11, 12, 13	0.03	1.30	0.10	21.92
19	0.00	-1.20	0.09	14.8
30	0.01	1.83	0.09	25.0

3.5 처짐량 측정결과

3.5.1 알루미늄 차량의 처짐량선도

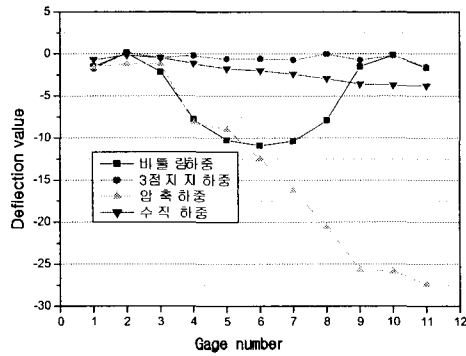


Fig. 2 Side sill deflection graph

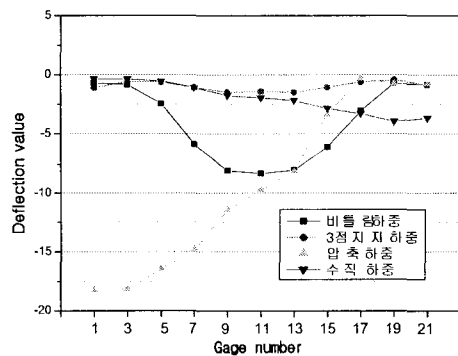


Fig. 3 Sole bar deflection graph

3.6 차체의 상당굽힘강성

차체의 상당굽힘강성은 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$EI_{eq} = \frac{a > l_2}{384 \times a} (5 \times l_2^3 - 24 \times l_1^3) \quad (1)$$

따라서 스테인리스 차량 차체의 상당굽힘강성은 $EI_{eq}=1.068 \times 10^{14}$ (kgf/mm²)이며, 알루미늄 차량 차체의 상당굽힘강성은 $EI_{eq}=0.8862 \times 10^{14}$ (kgf/mm²) 이다.

3.7 고유진동수

Table 10 Measurement data of natural frequency

스테인리스		알루미늄	
굽힘	비틀림	굽힘	비틀림
14.6 Hz	10.8 Hz	15.5 Hz	17.0 Hz

4. 결론

철도청 1 호선 스테인리스 차량의 구조체와 광주시 1 호선 알루미늄차량의 구조체에 대하여 도시 철도차량의 성능시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 스테인리스 차량의 최대응력은 3 점지지하중 작용시 출입문 상부코너부분에서 알루미늄차량의 최대응력은 수직하중 작용 시 출입문 하부코너에서 발생됨을 알 수 있었으나 모두 허용응력 범위 이내에 있어 강도적으로 안전하다 할 수 있다.

2) 스테인리스 구조체의 수직 하중시험에서의 사이드실의 최대처짐은 수직하중 60.5 ton 작용시 10.9 mm으로 판정기준인 13.8 mm 이내에 있다. 또, 이에 따른 상당굽힘강성은 $EI_{eq}=1.068 \times 10^{14}$ (kgf/mm²)으로 나타났다. 알루미늄 구조체의 수직하중시험에서의 Sole bar 의 최대처짐은 수직하중 47.6 ton 작용시 7.53 mm으로 판정기준인 12.4 mm 이내에 있다. 또, 이에 따른 상당굽힘강성은 $EI_{eq}=0.8862 \times 10^{14}$ (kgf/mm²)으로서 이는 판정 기준인 0.6×10^{14} kgf/mm² 이상이므로 본 차량은 강성적인 측면에서 안전한 것으로 판단되었다.

3) 스테인리스 차체의 굽힘 고유진동수는 약 14.6 Hz 이고 알루미늄 차체의 굽힘 고유진동수는 약 15.5 Hz 이므로 판정기준인 10.0 Hz 이상을 만족시키고 있음을 알 수 있었다.