도시철도차량의 스테인리스와 알루미늄 구조체 하중시험에 대한 안전성평가

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

정 종덕* 김 원경** 홍 용기** 윤 성철* 이 장욱***

Chung, Jong-Duk Kim, Won-kyung Hong, Yung-Ki Yoon, Sung-Cheol Lee Chang-Wook

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

This strength test is based on "performance test standard for Electrical Multiple Unit, noticed by Ministry of Construction & Transportation, in 2000 " and reference code is UIC 566 and JIS E 7105

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 요구되어진다.

시험 대상인 구조체는 스테인리스 차량인 철도청 1호선 신조차와 알루미늄차량으로 제작된 광주시 1호선 도시철도차량을 "도시철도차량의성능시험에관한기준" 에 의거하여 성능시험을 수행하였다. 성능시험은 창원과 의왕에서 각 각 실시되었으며 예비시험과 본시험을 2차례로 나누어서 수행되었다.

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

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 한국철도기술연구원 책임연구원

*** (주)로템 이장욱 주임연구원

2. 구조체 하중시험

2.1 개 요

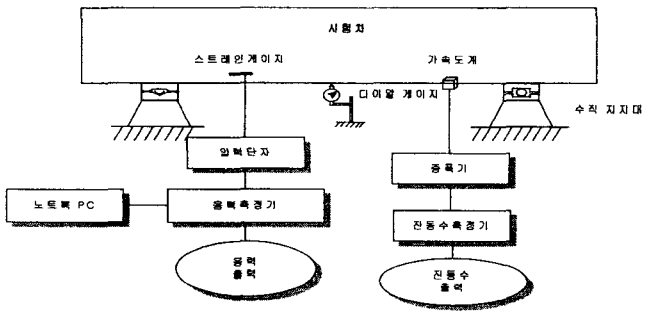
철도청1호선 개조차에 적용되는 스테인리스 차량과 광주시 1호선에 적용되는 알루미늄 차량의 구조체를 대상으로 수직하중, 압축하중, 3점지지시험, 비틀림하중, 굽힘과 비틀림 고유진동수 시험을 실시하여 그 특성을 비교하고 향후, 구조체 설계시 취약부위를 찾아내어 보강하고 불필요한 구조체의 부재에 대해서는 변경 또는 제거하여 경량화를 이루고자 한다.

2.2 하중조건

구조체 하중시험의 시험차량은 모두 하중조건이 제일 가혹한 차량인 동력차(M-car)를 시험차량으로 선정하였으며 제원, 중량 및 하중조건은 아래와 같다.

제 원			중 량			하중조건		
구 분	스테인리스 차량	알루미늄차량	구 분	스테인리스 차량	알루미늄 차량	구 분	스테인리스 차량	알루미늄 차량
1. 차체 길이	19,500 mm	17,500 mm	1. 공차 중량	42 ton	32.3 ton	1. 수직 하중	60.5 ton	45.7 ton
2. 차체폭	3,120 mm	2,650 mm	2. Bare frame	9.1 ton	6.3 ton	2. 압축 하중	50 ton	50 ton
3. 지붕 높이	3,750 mm	3,600 mm	3. 대차 중량	14 ton	13 ton	3. 3점지지 하중	18.9 ton	13 ton
4. 볼스타 중심간 거리	13,800 mm	13,800 mm	4. 최대 승객 하중	30 ton	24 ton	4. 비틀림 하중	4 ton · m	4 ton · m
						5. 굽힘/비틀림 고유진동수	9.1 ton	6.3 ton

2.3 시험장비 설



2.4 판정 기준

2.4.1 재질의 기계적 성질

스테인리스 차량의 구조체는 볼스타와 센터실은 고장력강으로 되어 있으며 나머지 주요 구조체는 스테인리스강재(STS301L)로 제작되었다. 알루미늄구조체는 알루미늄압출재(A6005A-T6)을 사용하였고 출입문 코너부의 재질은 A6061P-T651을 그밖의 브라켓트류의 재질은 A5083-0을 사용하여 제작되었다. 제작된 구조체의 기계적 성질은 다음과 같다.

스테인리스				알루미늄			
구 분		재 질	항복 응력 (kg_f/mm^2)	구 분	재 질		항복 응력 (kg_f/mm^2)
1. U/F	bolster, center sill	SMA490B	37	1. 주요 골조 · U/F · SIDE · ROOF · END	A6005A-T6	모재부	21.92
	cross beam	STS301L (LT)	22			용접부	11.72
	side sill	STS301L-H (HT)	70				
2. S/D	post	STS301L-H (HT)	70	2. 출입문 코너부	A6061P-T651	모재부	25.0
	plate	STS301L-1/4H (DLT)	35			용접부	14.8
3. END, ROOF		STS301L-1/2H (ST)	42	3. 브라켓트	A5083-0	모재부	16.21
						용접부	15.09

2.4.2 판정 기준

차체의 강도는 재질의 항복강도를 기준으로 하며, side sill 의 처짐량은 볼스타간 거리의 1/1,000 인 13.8 mm 이하이어야 한다. 또한 차체의 상당굽힘강성은 0.6×10^{14} $kg_f \cdot mm^2$ 이상이어야 하며, 굽힘 고유 진동수는 사양서의 기준인 10.0 Hz 이상이어야 한다. 이상의 판정기준을 정리하면 아래표와 같다.

구 분	판정 기준		비 고
강 도	응 력	재질의 항복강도 이하	- 도시철도차량의 성능시험기준 ·수직, 수평압축, 비틀림, 3점지지
강 성	Side Sill 의 최대처짐	13.8 mm 이하	- 도시철도차량의 표준사양
	상당굽힘강성	0.6×10^{14} $kg_f \cdot mm^2$ 이상	- 제작구매사양서
고유진동수	1차 굽힘 고유진동수	10.0 Hz 이상	- 도시철도차량의 성능시험기준

2.5 응력 측정결과

2.5.1 수직하중시험

2.5.1.1 스테인리스 차량

수직 하중시험결과 측정응력이 20 kg_f/mm^2 이상인 측정점들은 아래표와 같으며 이 결과를 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 출입문 하부코너에서 발생하였다.

스트레인 게이지	수직하중 부하 단계					재질	허용응력 kg_f/mm^2	비 고
	0 톤	18.9 톤	48.9 톤	60.5 톤	하중제거			
17	0.40	-6.65	-18.77	**-22.80**	0.64	STS301L-DLT	35	Max.
78	0.23	6.99	18.19	22.21	0.16	STS301L-DLT	35	
23	0.05	7.14	17.44	20.92	0.19	STS301L-DLT	35	

2.5.1.2 알루미늄 차량

수직 하중시험결과 측정 측정응력이 6.0 kg_f/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.

스트레인 게이지	수직하중 부하 단계					재질	허용응력 kg_f/mm^2	비 고
	0 톤	13 톤	37 톤	47.6 톤	하중제거			
11,12,13	0.01	1.98	5.27	6.74	0.09	A6005A-T6	21.92	
16,17,18	0.01	1.61	4.78	6.20	0.06	A6005A-T6	21.92	
62,63,64	0.01	2.04	5.69	**7.28**	0.08	A6005A-T6	11.72	Max.

2.5.2 압축하중시험

2.5.2.1 스테인리스 차량

압축 하중시험결과 측정응력이 17.0 kg_f/mm^2 이상인 측정점들은 아래표와 같으며 이 결과들을 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 센터실의 커플러 포켓 부위에서(스트레인게이지 No. 37) 발생하였다.

스트레인 게이지	0 톤	수직 하중 : 18.9 톤				하중제거	재질	허용응력 kg_f/mm^2	비 고
		0 톤	15 톤	30 톤	50 톤				
32	0.21	2.39	6.49	11.72	17.38	0.64	SMA490B	37	
37	-2.36	-4.32	-9.12	-14.32	**-20.78**	0.18	SMA490B	37	Max.
39	-0.03	-2.41	-6.53	-11.92	-18.55	-0.32	SMA490B	37	

2.5.2.2 알루미늄 차량

압축 하중시험결과 측정응력이 4.4 kg_f/mm^2 이상인 측정점들은 아래표와 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.

스트레인 게이지	0 톤	수직 하중 : 14.6 톤			하중제거	재질	허용응력 kg_f/mm^2	비 고
		0 톤	25 톤	50 톤				
65	0.01	-0.01	-2.39	-4.48	0.07	A6005A-T6	11.72	
77	-0.01	-0.02	-2.85	**-5.26**	0.06	A6005A-T6	11.72	Max.
78	-0.01	-2.41	-2.09	-4.58	0.06	A6005A-T6	11.72	

2.5.3 3점 지지시험

2.5.3.1 스테인리스 차량

3점 지지시험결과 측정응력이 20.0 kg_f/mm^2 이상인 측정점들은 아래표와 같으며 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 출입문 상부 코너에서(스트레인게이지 No. 59) 발생하였다.

스트레인 게이지	0 톤	수직 하중 : 18.9 톤		0 톤	재질	허용응력 kg_f/mm^2	비 고
		0 톤	3점지지상태				
25	0.29	-5.66	-20.79	0.37	STS301L-DLT	35	
58	-0.23	-4.66	-27.08	-0.44	STS301L-DLT	42	
59	-0.14	4.00	**27.64**	0.05	STS301L-DLT	42	Max.

2.5.3.2 알루미늄 차량

3점 지지시험결과 측정응력이 6.0 kg_f/mm^2 이상인 측정점들은 아래표와 같으며 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 출입문 상부 코너에서(스트레인게이지 No. 19) 발생하였다.

스트레인 게이지	0 톤	수직 하중 : 18.9 톤		0 톤	재질	허용응력 kg_f/mm^2	비 고
		0 톤	3점지지상태				
19	-0.01	1.03	7.17	0.11	A6061P-T651	14.8	
21	0.02	-1.00	-6.25	0.00	A6061P-T651	14.8	Max.
49	-0.01	0.92	6.06	0.09	A6061P-T651	14.8	

2.5.4 비틀림 하중시험

2.5.4.1 스테인리스 차량

비틀림 하중시험결과 측정응력이 2.8 kg_f/mm^2 이상인 측정점들은 아래표와 같으며. 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며,

부가된 하중에서의 최대응력은 1차 시험 시 출입문 상부에서(스트레인게이지 No. 59) 발생하였다.

스트레인 게이지	0 톤	4 톤·m	하중제거	재질	허용응력 kg_f/mm^2	비 고
58	0.29	-2.80	-0.06	STS301L-ST	42	
59	0.24	**4.08**	0.18	STS301L-ST	42	Max.
79	0.76	3.46	-0.39	STS301L-DLT	35	

2.5.4.2 알루미늄 차량

비틀림 하중시험결과 측정응력이 1.25 kgf/mm2 이상인 측정점들은 아래표와 같으며, 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

부가된 하중에서의 최대응력은 1차 시험 시 출입문 하부 코너에서 (스트레인 게이지 No. 30) 발생하였다.

스트레인 게이지	0 톤	4 톤·m	하중제거	재질	허용응력 kg_f/mm^2	비 고
11,12,13	0.03	1.30	0.10	A6005A-T6	21.92	
19	0.00	-1.20	0.09	A6061P-T651	14.8	
30	0.01	**1.83**	0.09	A6061P-T651	25.0	Max.

2.5.5 처짐량 측정결과

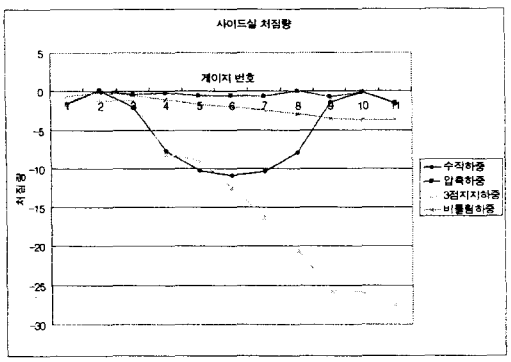
2.5.5.1 스테인리스 차량의 처짐량

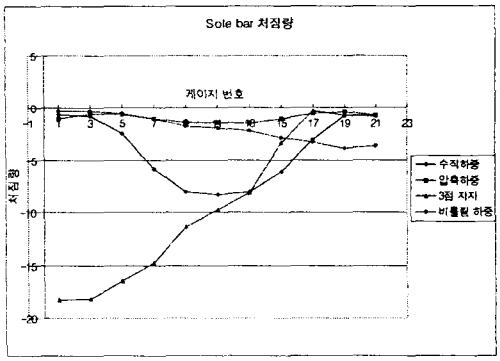
구 분	1	2 볼스타	3	4	5	6 차체중앙	7	8	9	10 볼스타	11
수직하중	-1.53	0.125	-2.11	-7.77	-10.3	-10.9	-10.3	-7.88	-1.5	-0.13	-1.63
압축하중	-1.72	0.155	-0.45	-0.21	-0.58	-0.59	-0.7	0	-0.74	-0.16	-1.53
3점지지하중	-1.55	-1.18	-1.17	-8.13	-8.95	-12.4	-16.2	-20.5	-25.6	-25.8	-27.4
비틀림하중	-0.68	-0.12	-0.47	-1.14	-1.73	-1.98	-2.39	-2.93	-3.59	-3.7	-3.75

2.5.5.2 알루미늄차량의 처짐량

구 분	1	3 볼스타	5	7	9	11 차체중앙	13	15	17	19 볼스타	21
수직하중	-0.68	-0.82	-2.43	-5.87	-8.04	-8.29	-7.98	-6.12	-3.05	-0.70	-0.83
압축하중	-1.10	-0.55	-0.61	-1.07	-1.46	-1.40	-1.47	-1.05	-0.58	-0.41	-0.77
3점지지하중	-18.26	-18.18	-16.47	-14.80	-11.38	-9.74	-8.07	-3.35	-0.28	-0.70	-0.73
비틀림하중	-0.34	-0.34	-0.53	-1.07	-1.74	-1.94	-2.16	-2.84	-3.28	-3.93	-3.64

2.5.5.3 처짐량 선도





2.5.6 차체의 상당굽힘 강성

2.5.6.1 스테인리스 차량

차체의 상당굽힘강성 EI_{eq} 은 다음과 같이 계산된다.

$$EI_{eq} = \frac{\omega \times l_2^2}{384 \times \delta}(5 \times l_2^2 - 24 \times l_1^2)$$

따라서 본 구체의 상당굽힘강성은 다음과 같다.

· $EI_{eq} = 1.068 \times 10^{14} (kg_f \cdot mm^2)$

2.5.6.2 알루미늄 차량

· $EI_{eq} = 0.8862 \times 10^{14} (kg_f \cdot mm^2)$

2.5.7 고유진동수

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

3. 결 론

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

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

2) 스테인리스 구조체의 수직 하중시험에서의 사이드실의 최대처짐은 수직하중 60.5톤 작용시 10.9 mm으로 판정기준인 13.8 mm 이내에 있다. 또, 이에 따른 상당 굽힘강성은 $EI_{eq} = 1.068 \times 10^{14} (kg_f \cdot mm^2)$으로 나타났으며, 알루미늄 구조체의 수직 하중시험에서의 Sole bar의 최대처짐은 수직하중 47.6 톤 작용 시 7.53 mm으로 판정기준인 12.4 mm 이내에 있다. 또, 이에 따른 상당 굽힘강성은 $EI_{eq} = 0.8862 \times 10^{14} (kg_f \cdot mm^2)$ 으로서 이는 판정기준인 0.6×10^{14} $kg_f \cdot mm^2$ 이상이므로 본 차량은 강성적인 측면에서 안전한 것으로 판단 되었다.

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.