

알루미늄 구조체의 구조해석 및 하중시험

Structure Analysis and Loading Test of Body Structure having Aluminum

윤성철***
Yoon, Sung-Cheol

김원경**
Kim, Won-kyung

홍용기*
Hong, Yung-Ki

편장식****
Pyun, Jang-Sik

ABSTRACT

This paper describes the result of structure analysis and load test of body structure. The purpose of the analysis and test is to evaluate an safety which body structure shall be considered fully sufficient rigidity so as to satisfy proper system function under maximum load and operating condition. Material of body structure applied an aluminum alloy.

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 JIS E 7105

1. 서론

에너지와 재료의 절약을 위하여 차량구조물의 경량화에 대한 연구는 계속 되고 있다. 도시철도차량의 구조체로는 과거에 주로 연강(mild steel)으로 제작되었고, 현재에는 스테인리스(stainless steel), 알루미늄 합금(aluminum alloy)으로 제작되고 있다. 이러한 변천과정은 차량의 대형화와 아울러 경량화 측면을 동시에 만족시킬수 있도록 설계가 요구되어진다. 따라서 이러한 경량차량구조물인 알루미늄 합금(aluminum alloy)으로 제작된 도시철도차량 구조체를 구조해석을 하였으며, 해석에 적용된 하중조건은 도시철도차량의 안전기준에 관한 규칙 및 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준을 우선 적용하여 구조해석을 수행하였으며, 하중시험은 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준에 의거하여 성능시험을 수행하였다.

구조체의 구조해석 및 하중시험을 통해 강도를 확인하여 구조체의 안전성을 평가하고자 하며 시험차의 특성을 분석하고자 한다.

* 한국철도기술연구원 수석연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

**** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

2. 구조체의 구조해석

2.1 해석 모델

본 해석은 알루미늄 구조체에 대하여 유한요소법을 이용한 구조체 강도평가에 대한 것이다. 구조체의 제원은 표1과 같으며, 해석은 쉘/솔리드 요소를 사용하였고 수직하중 및 압축하중 일 경우 경계조건이 구조체의 폭 및 길이방향으로 대칭이라 가정하여 1/4을 모델링 하였으며 해석모델은 그림 2과 같다. 3점지지 및 비틀림하중에 대해서는 경계조건이 길이 및 폭 방향으로 비대칭인 점을 고려하여 전체를 모델링 하였다.

표 1. 알루미늄 구조체(M-car)의 제원

항목	제원(mm)
차체의 길이	17,500
차체의 폭	2,650
지붕 높이	3,600
볼스타 중심간 거리	12,400
연결기 높이	880±10(레일 상면에서)

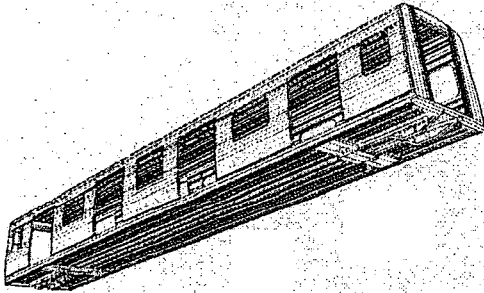


그림 1. 알루미늄 구조체(M-car)의 구조해석 모델(전체 모델)

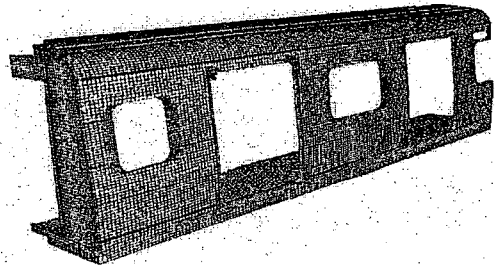


그림 2. 알루미늄 구조체(M-car)의 구조해석 모델(1/4 모델)

2.2 하중조건

알루미늄 전동차(M-car)의 계산중량은 표2와 같다.

표 2. 알루미늄 구조체 (M-car)의 계산 중량

항목	중량
공차 중량	32.3 ton
Bareframe 중량	6.3 ton(설계중량)
대차 중량	13 ton
최대승객하중	24 ton
동하중 계수	0.2g

표 3. 해석시 고려한 알루미늄 구조체(M-car)의 전장품 중량

항목	중량
VVVF Box	500kg(1EA)
DBRe Box	305kg(1EA)
Air Conditioner	500kg(1EA)
Pantograph	180kg(1EA)

차체에 작용하는 하중은 성능시험의 구조체 하중시험에 따라 다음과 같이 계산된다.

- 1) 수직하중 = (공차중량 + 최대승객하중 - 대차중량) × (1 + 동하중계수) - Bareframe 중량
- 2) 압축하중 = (공차중량 - 대차중량 - Bareframe 중량) + 압축하중
- 3) 3점 지지하중 = 공차중량 - 대차중량 - Bareframe 중량
- 4) 비틀림 하중 = 4 ton · m

알루미늄 구조체의 해석에 적용되는 하중조건과 크기는 수직하중은 45.7ton이며, 압축하중은 수직하중(13ton)과 압축하중 (50ton)이 작용하고, 3점 지지하중은 13ton이고, 비틀림 하중은 4 ton · m로 적용하여 해석을 수행하였다.

2.3 구조체 재질의 기계적 성질

표 4. 알루미늄 구조체 재질의 기계적 성질

재질		항복강도
A6005A-T6	모재부	21.92 kgf/mm ² 이상
	용접부	11.72 kgf/mm ² 이상
A5083-0	모재부	16.21 kgf/mm ² 이상
	용접부	15.09 kgf/mm ² 이상

2.4 판정기준

차체의 강도는 재질의 항복응력이하 이어야 한다.

3. 구조체의 하중시험

알루미늄 차량의 구조체를 대상으로 수직하중, 압축하중, 3점지지시험, 비틀림하중시험을 실시하여 그 특성을 비교하고, 향후 구조체 설계시 취약부위를 찾아내어 보강하고 불필요한 구조체의 부재에 대해서는 변경 또는 제거하여 경량화를 이루고자 한다.

구조체 하중시험의 시험차량은 모두 하중조건이 제일 가혹한 차량인 동력차(M-car)를 시험차량으로 선정하였으며 제원 및 중량은 표1, 2, 하중조건은 위와 같으며 시험장비 설치도는 그림3과 같다.

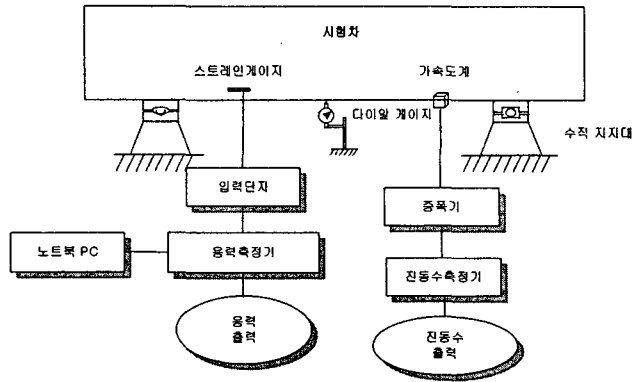


그림 3. 시험 장비 설치도

4. 구조체의 구조해석과 하중시험 결과

4.1 구조해석 결과

각 하중조건별 응력 분포는 그림 4~10에서 보여주고 있다. 수직하중시 최대응력은 창문코너 하부 모재부에서 8.55 kgf/mm^2 으로 이 부분의 재질인 A6005A-T6(21.92 kgf/mm^2)의 항복응력 이내에 있으며, 그림 4에 나타내었고, 두 번째 출입문 코너 상부 용접부의 응력은 6.88 kgf/mm^2 으로 A6005A-T6(11.72 kgf/mm^2)의 항복응력 이내에 있으며 그림 5에 나타내었고, 첫 번째 출입문 코너 하부 용접부의 응력은 7.36 kgf/mm^2 으로 이부분의 재질인 A6005A-T6(11.72 kgf/mm^2)의 항복응력 이내에 있으며 그림 6에 나타내었다.

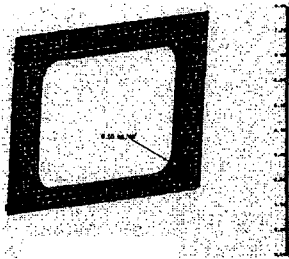


그림 4. 창문코너의 응력분포

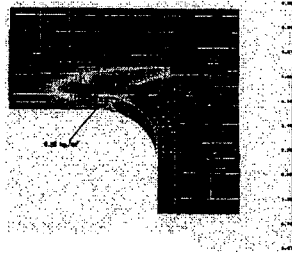


그림 5. 두 번째 출입문 코너 상단부의 응력분포

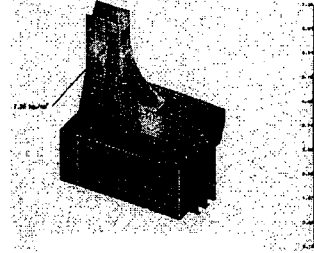


그림 6. 첫 번째 출입문 코너 하단부의 응력분포

압축하중시 최대응력은 그림 7에서 보여주고 있으며, 커플러 포켓 용접부의 곡선부위에서 6.74 kgf/mm^2 으로 이 부분의 재질인 A6005A-T6(11.72 kgf/mm^2)의 항복응력 이내에 있다. 3점 지지하중시 최대응력은 비지지점의 맞은편 재킹패드가 위치하는 sole bar의 모재부에서 6.83 kgf/mm^2 으로 이 부분 재질인 A6005A-T6(21.92 kgf/mm^2)의 항복응력 이내이며 그림 8에 나타내었다. 두 번째 출입문 코너 상부 용접부의 응력은 5.69 kgf/mm^2 으로 이 부분의 재질인 A6005A-T6(11.72 kgf/mm^2)의 항복응력 이내에 있으며 그림 9와 같다. 비틀림 하중시 최대응력은 두 번째 출입문 코너 상부 용접부에서 1.80 kgf/mm^2 으로 이 부분 재질인 A6005A-T6(11.72 kgf/mm^2)의 항복응력 이내에 있으며 그림 10와 같다.

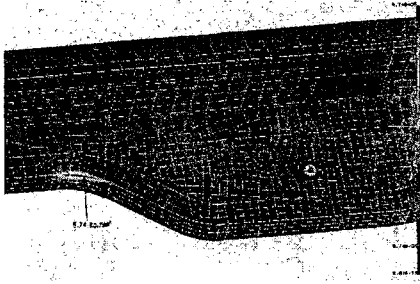


그림 7. 커플러 포켓의 응력분포 (압축하중시)

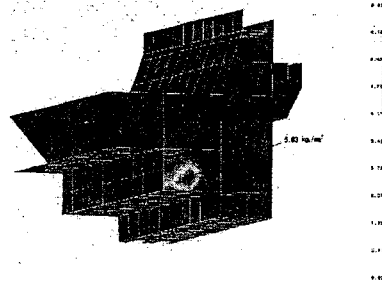


그림 8. 재킹 패드 위치의 응력분포 (3점 지지하중시)

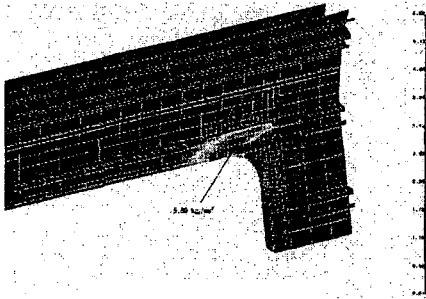


그림 9. 두 번째 출입문 코너 상부의 응력 분포 (3점지지 하중시)

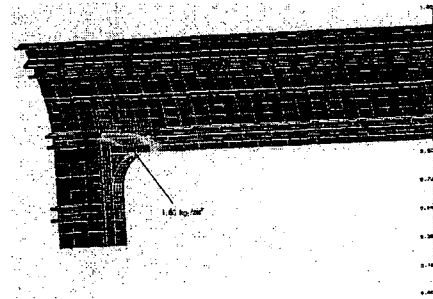


그림 10. 두 번째 출입문 코너상부의 응력 분포 (비틀림 하중시)

4.2 하중시험 결과

4.2.1 수직하중시험

수직 하중시험결과 측정 측정응력이 6.0 kg/mm^2 이상인 측정점들은 표 5와 같으며 이 결과를 살펴 보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 출입문 하부 코너의 Side Structure 압출재(스트레인 게이지 No. 62, 63, 64)에서 발생하였다.

표 5. 수직하중시험의 응력분포 결과

스트레인 게이지	수직하중 부하 단계					재질	허용응력 kg/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.

4.2.2 압축하중시험

압축 하중시험결과 측정응력이 4.4 kg/mm^2 이상인 측정점들은 표 6과 같으며 이 결과들을 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 센터실의 커플러 포켓 부위(스트레인 게이지 No. 77)에서 발생하였다.

표 6. 압축하중시험의 응력분포 결과

스트레인 게이지	0 톤	수직 하중 : 14.6 톤			하중제거	재질	허용응력 kg/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	

4.2.3 3점 지지시험

3점 지지시험결과 측정응력이 6.0 kg/mm² 이상인 측정점들은 표 7과 같으며 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 출입문 상부코너(스트레인 게이지 No. 19)에서 발생하였다.

표 7. 3점 지지시험의 응력분포 결과

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

4.2.4 비틀림하중시험

비틀림 하중시험결과 측정응력이 1.25 kg/mm² 이상인 측정점들은 표8과 같으며, 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다. 부가된 하중에서의 최대응력은 1차 시험 시 출입문 하부 코너(스트레인 게이지 No. 30)에서 발생하였다.

표 8. 비틀림하중시험의 응력분포 결과

스트레인 게이지	0 톤	4 톤 · m	하중제거	재질	허용응력 kg/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.

5. 결론

알루미늄차량의 구조체에 대하여 구조해석과 하중시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 구조해석결과 최대응력은 수직하중시 창문코너 하부 모재부에서 8.55 kg/mm², 압축하중시 커플러 포켓 용접부의 곡선부위에서 6.74 kg/mm², 3점 지지하중시 비지지점의 맞은편 재킹패드가 위치하는 sole bar의 모재부에서 6.83 kg/mm², 비틀림 하중시 두 번째 출입문 코너 상부 용접부에서 1.80 kg/mm²으로 나타났다.
- 2) 하중시험결과 최대응력은 수직하중시험시 출입문 하부 코너의 Side Structure 압출재에서(스트레인 게이지 No. 62,63,64), 압축 하중시험시 센터실의 커플러 포켓 부위에서(스트레인 게이지 No. 77), 3점 지지시험시 출입문 상부 코너에서(스트레인게이지 No. 19), 비틀림하중시험시 출입문 하부 코너에서(스트레인 게이지 No. 30) 발생하였다.
- 3) 구조해석결과 알루미늄 차량의 최대응력은 수직하중 작용시 창문코너 하부에서 발생하였고, 하중 시험결과 최대응력은 수직하중 작용시 출입문 하부코너에서 발생됨을 알 수 있었으나 모두 허용응력 범위 이내에 있어 강도적으로 안전하다 할 수 있겠다.