

경전철 차량 개발을 위한 차체 강도 평가

Carbody strength evaluation for a light rail vehicle

김진혁* 박근수* 박상규*
Kim, Jin-Hyuck Park, Geun-Soo Park, Sang-kyu

ABSTRACT

LRV(Light Rail Vehicle) is one of the most useful way for urban transit. HDPIC has designed and manufactured the LRV train set for Manila Line 1 expansion. The LRV is composed of two carbody sections which are coupled by a articulated bogie. The articulated bogie and two motorized bogies have slewing rings in order to improve the curving performance and ride quality. Carbody structures are mainly made of low-carbon stainless steel (STS301L), and the carbody bolsters and draft sills are made of rolled steel for welded structures. The authority's specifications specified the design load conditions and weight limits. Design load conditions are vertical load, compressive load and diagonal jacking, and the maximum axle load is 10.7 ton. In order to meet those requirements, the stiffness and strength of carbody structure were predicted using finite element analysis during design stage. The half or full structure is modeled and analyzed with design load conditions, and critical areas are analysed in detail using sub-modeling method. The strength and stiffness of carbody structure was also verified by the load test. The analysis and test results show a good agreement.

1. 머리말

현대정공(주)는 국내 최초로 연접형(articulation type)의 경전철 차량을 개발하여, 1998년 5월 현재 마닐라 경전철 28량을 제작·납품하고 있으며, 아다나 경전철을 수주하여 세부 설계 단계에 있다. 마닐라 경전철은 4량 1편성으로 제어동력차(Mc)-동력차(M)-동력차(M)-제어동력차(Mc)로 구성되며, 총 승차 인원은 596명이다. 각 차량은 A-차체와 B-차체가 연접대차(articulated trailer bogie)를 통해 결합되며, 각 차체의 볼스터에 연결되는 동력대차로 구동된다. 연접형 경전철은 기존의 전차를 경량화하고, 편성을 단순화하며, 회전반경을 작게 하는 등 소규모 운송에 적합한 운송 수단이다. 경전철의 운송 능력은 버스와 지하철의 중간 정도인 시간당 1만명 정도이며, 지하철에 비해 건설비 및 운영비가 적게 들기 때문에 대도시 내 지선과 중소도시의 간선으로서의 역할이 기대되고 있다.

경전철 차량의 구조체는 경량 구조이면서 최대한의 안전을 고려해야 하므로, 설계 초기 단계부터 구조체에 발생하는 변위 및 응력 상태를 정확히 예측하여, 응력이 낮은 곳은 경량화하고, 응력이 높은 곳은 보강하는 것이 필수적이다. 마닐라 경전철 차체는 기초설계 단계부터 유한요소해석을 이용하여 차체의 거동을 예측하고, 제작 규격서¹⁾에 규정된 수직하중, 압축하중, 대각들기(diagonal jacking)에 대해 요구되는 허용 조건을 만족하도록 강도·강성을 평가하여 설계에 반영하였으며, 시제차량 제작 후 하중시험을 실시하여 차체의 강도·강성을 검증하였다. 본 논문에서는 구조 해석과 하중 시험을 통한 차체 강도 평가 과정을 기술하고자 한다.

* 현대정공(주) 기술연구소

2. 하중 조건

제어동력차와 동력차는 차체의 구조가 거의 같으므로, 차체 중량 및 승객 하중을 비교하여 하중 조건이 더 가혹한 동력차에 대해 구조 해석 및 하중 시험을 실시하였다. 동력차의 A-차체와 B-차체는 연결대차 연결부를 제외한 구조가 동일하므로, 수직 하중 시험과 압축 하중 시험은 B-차체를 대상으로 실시하였으며, 대각들기의 경우에는 A-차체, B-차체 및 대차를 포함한 차량 전체를 시험하였다.

2.1 제원 및 계산 중량

구조해석 및 하중시험의 대상인 동력차(M)의 제원과 계산 중량을 표 1에 정리하였다.

표 1. 마닐라 경전철 동력차의 제원 및 계산 중량

구분	제원	비고
차체 길이	26,000 mm	
차체 폭	2,590 mm	
대차 중심간 거리	10,000 mm	
지붕 높이	3,300 mm	레일 상면 기준
연결기 높이	600 mm	레일 상면 기준
공차 중량	38,949 kg	차체 대차 포함
승객 하중 (65 kg/명)	22,685 kg	좌석:67, 입석:257

2.2 하중조건

제작 규격서를 기준으로 차체 구조해석과 하중시험에 적용되는 하중조건은 수직하중, 압축하중, 대각들기(diagonal jacking)이다. 수직하중과 압축하중은 국내의 도시철도차량 표준사양²⁾ 및 일본공업규격³⁾과 일치하며, 대각들기는 3점지지(3-point support)와 대응되지만, 2 부분의 차체가 연결부로 결합되어 있는 경전철 차량의 특성상 상이한 면이 있다.

(1) 수직하중(23.7톤) : 최대 승객이 탑승한 상태에서 동하중 계수(0.25)를 고려하여 결정되며, 중량이 200 kg 이상 되는 기기는 집중하중으로 가한다.

(2) 압축하중(50톤) : 조차 시 작용하는 하중으로 연결기 장착부와 연결대차 연결부에 작용한다.

(3) 대각들기 : 대각들기 시험의 개념은 그림 1에 나타나 있다. 공차 상태에서 A-차체는 4 곳에서 지지되고, B-차체는 차체 단부의 2 곳에서만 지지되며, 각 대차 또는 그에 상당하는 중량이 대차 연결부에 달린다. B-차체의 지지위치중 한 곳을, 반력이 초기 반력의 10%가 될 때까지 낮추었다가 다시 초기 반력이 될 때까지 올린다.

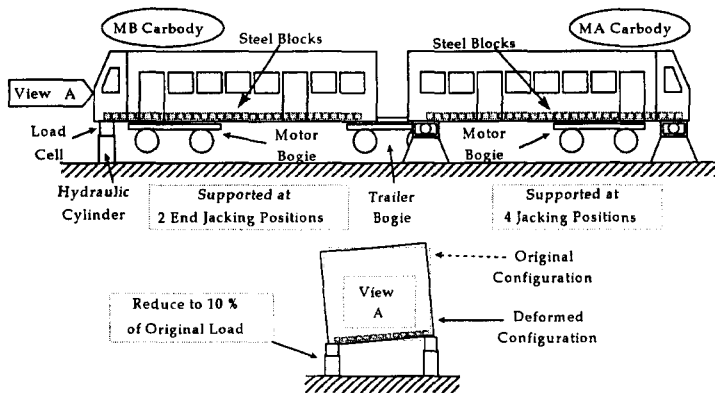


그림 1. 대각들기 시험 개념도

3. 판정기준

3.1 재질 및 허용응력

마닐라 경전철 차체는 단부 언더프레임(SMA490B와 SS400)을 제외한 대부분의 구조가 STS301L 재질로 되어 있다. 각 재질에 대한 강도 판정기준은 수직하중의 경우 항복강도의 50%, 압축하중은 항복강도, 대각틀기는 항복강도의 90%이다. 사용된 각 재질의 기계적 성질 및 허용응력을 표 2에 나타내었다.

표 2. 사용 재질의 기계적 성질 및 허용응력 (단위 : kg/mm²)

재 질	인장 강도	항복 강도	허용 응력		
			수직하중	압축하중	대각틀기
SS400	41	22	11	22	19.8
SMA490B	50	33	16.5	33	29.7
STS304L	49	18	9	18	16.2
*STS301L-LT	75	35	17.5	35	31.5
STS301L-DLT	70	35	17.5	35	31.5
STS301L-ST	77	42	21	42	37.8
STS301L-HT	95	70	35	70	63.0

* STS301L-LT의 인장강도 및 항복강도는 인장시험결과 중 최소치를 적용함

3.2 처짐량 제한 조건

운행 중 차체의 안정성을 보장하기 위해서는 차체 구조가 최대 수직 하중 하에서 양의 캠버를 유지해야 한다. 이를 위해서 다음과 같이 정의되는 측면 받침대(side sill)의 최대 상대 처짐량이 차체 제작 시 적용되는 캠버량보다 작아야 한다. 최대 상대 처짐량의 측정 개념을 그림 2에 나타내었다.

$$\delta_{relative\ max.} = \delta_{absolute\ max.} - \frac{L_1 \times \delta_{articulation\ end} + L_2 \times \delta_{bolster}}{L_1 + L_2}$$

각 기호의 의미는 다음과 같다.

- $\delta_{relative\ max.}$: 최대 상대 처짐량
- $\delta_{absolute\ max.}$: 최대 절대 처짐량
- $\delta_{articulation\ end}$: 연접대차 연결부 처짐량
- $\delta_{bolster}$: 볼스터 처짐량
- L_1 : 볼스터 중심에서 최대 처짐 위치까지의 거리
- L_2 : 연접대차 연결부에서 최대 처짐 위치까지의 거리

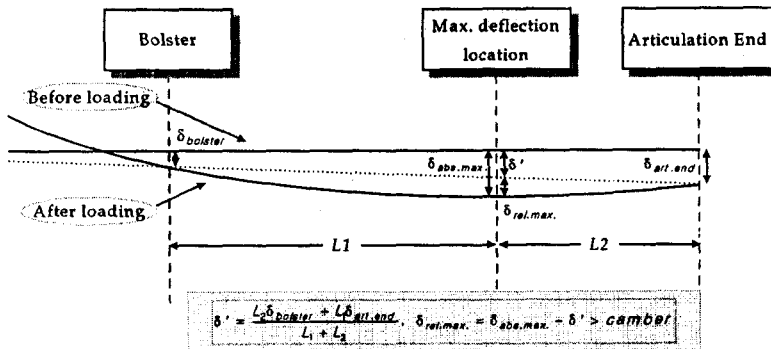


그림 2. 최대 상대 처짐량 개념도

4. 구조 해석

4.1 해석 방법

해석 대상인 동력차의 B-차체는 차체 중심 면에 대해 폭 방향으로 대칭이며, 수직하중과 압축하중도 이 면에 대해 대칭이므로, B-차체의 절반을 유한요소 모델화하여 구조해석을 실시하였다(그림 3). 절반 모델은 약 41,000 개의 요소와 29,000 개의 절점으로 이루어져 있다. 언더프레임과 측면 구조를, 천장 구조는 모두 셸(thin shell) 요소로 이루어져 있으며, 중천장의 일부는 보(beam) 요소를, 연결대차 연결부의 일부는 입체(solid) 요소를 사용하였다. 바닥의 주름판(corrugated plate)은 직교이방성(orthotropic)의 판 요소로 모델링하였다. 대각들기의 경우 하중조건이 대칭이 아니므로, 그림 3의 절반모델을 대칭화한 전체 모델을 이용하여 해석하였다.

그림 3의 절반모델과 이를 대칭화한 전체 모델의 경우, 차체 전체의 거동을 알아내고 응력분포를 구하는 데는 충분하다고 할 수 있으나, 높은 응력이 발생하는 부위의 국부적인 거동과 응력을 알아내는데는 보다 상세한 모델이 필요하다. 그래서, 수직하중이 작용할 때 가장 취약한 부위인 출입구 상부 모서리, 창문 사이의 구조틀(window corner frame), 창문과 출입구 사이의 구조틀(door frame at waist rail level)에 대해서는 서브모델링(Submodeling) 기법을 이용하여 상세 해석을 실시하였다. 이를 위한 출입구 상부 모서리의 상세 모델은 그림 4에 나타나 있으며, 서브모델링 기법의 개념은 그림 5(a)와 같다. 그림 5(a)와 같은 모델로 해석한 결과는 필렛에서 먼 곳에서는 정확하지만, 필렛 부근에서는 급격한 응력변화에 비해 유한 요소 모델이 성기기 때문에 부정확하게 된다. 그러므로, 그림 5(b)와 같이 필렛 주위를 자세히 모델링한 상세 유한요소 모델을 만들고 그 경계에는 그림 5(a)의 전체 모델을 이용한 해석 결과에서 추출한 변위를 경계조건으로 부과하여 해석한다. 이와 같은 과정으로 그림 4와 같은 상세 모델에, 그림 3의 절반 모델에 대한 해석 결과로부터 추출한 경계 조건을 적용하여 상세해석을 수행하였다.

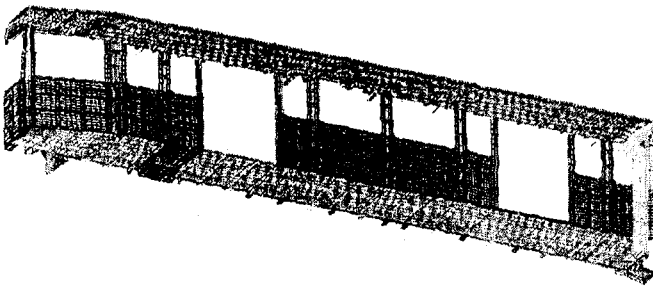


그림 3. 동력차 B-차체의 절반 모델

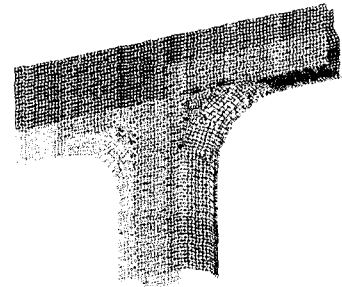


그림 4. 문 모서리의 상세모델

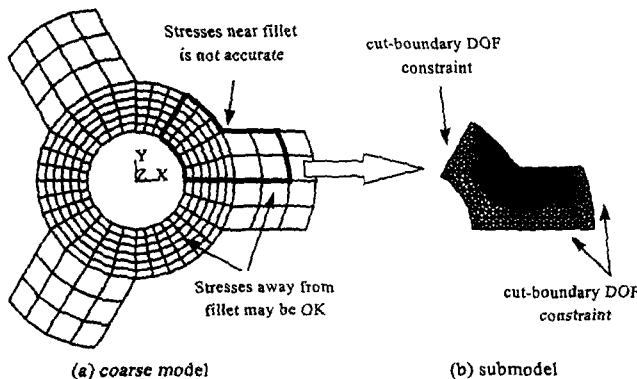


그림 5. 서브모델링(Submodeling)의 개념

4.2 해석 결과

그림 3의 절반 모델 및 전체 모델을 이용하여 해석한 각 하중조건에 대한 고응력부를 표 3에 정리하였으며, 서브모델링을 이용한 고응력부의 수직하중에 대한 상세 해석 결과를 표 4에 정리하였다. 단, 모든 해석 결과는 등가응력(von Mises stress)으로 표현된다.

서브모델링에 의한 상세 해석 결과의 일례로, 출입구 상부 모서리틀(door upper corner frame)에 대한 응력분포를 그림 6에 나타내었다. 출입구 상부 모서리틀은 프레스 성형으로 제작되기 때문에 통상 가공성이 좋은 STS304L(항복강도 18 kg/mm²) 재질로 제작되었으나, 마닐라 경전철의 경우 수직하중의 허용응력이 항복강도의 50%로 통상의 허용응력인 항복강도의 100%에 비해 낮기 때문에 이 부위의 강도가 문제가 되었다. 상세 해석 결과 이 부위의 응력은 16.8 kg/mm²으로, 허용응력인 9 kg/mm²보다 크게 높을 것으로 예측되어, STS301L-ST 재질로 설계 변경되었다. 시제차 제작 후 실시한 하중 시험 결과는 구조 해석 결과를 입증하고 있다.

그림 7은 대각들기에 대한 해석 결과로, 차체의 변형과 응력 분포를 나타내고 있으며, 차체의 단부 지지 위치, 창문 주위, 연결 대차 연결부, 연결부 단부 출입구 등에 응력이 집중됨을 보여 준다.

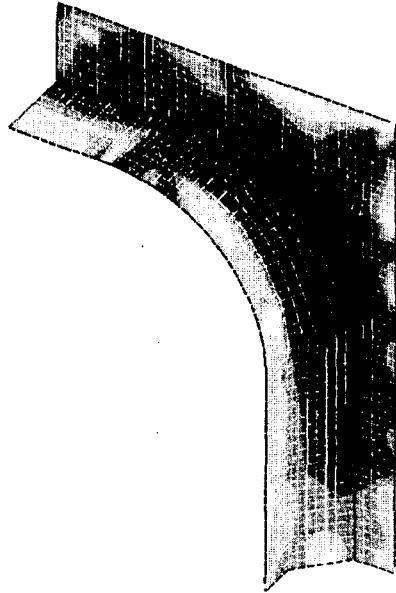


그림 6. 상세 해석 결과
(출입구 상부 모서리)

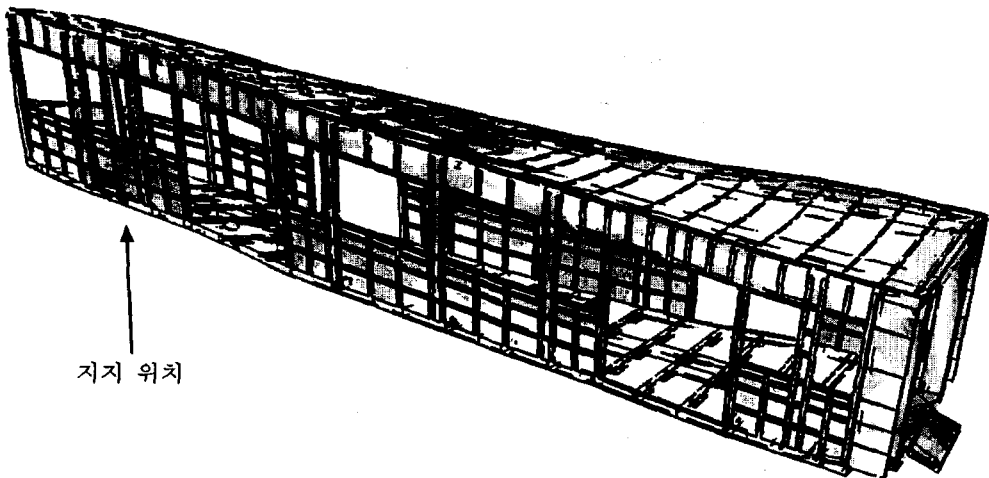


그림 7. 대각들기에 대한 해석 결과 (차체 변형 및 응력 분포)

표 3. 하중조건별 고용력부

(단위 : kg/mm²)

하중 조건	고용력부 위치	재 질	허용 용력	해석 결과
수직 하중	출입구 옆 창틀 하부 모서리	STS301L-DLT	17.5	15.0
	출입구 상부 모서리	STS301L-ST	21.0	13.6
	연접부 창틀 하부 모서리	STS301L-DLT	17.5	9.2
	센터실	STS301L-LT	17.5	13.6
	연접대차 연결부	SMA490B	16.5	10.5
압축 하중	연결기 취부 위치	SMA490B	33.0	29.2
	연접부 센터실	STS301L-LT	35.0	15.7
대각 들기	단부 지지 위치	STS301L-ST	63.0	19.2
	창틀 모서리	STS301L-DLT	31.5	24.0
	연접대차 연결부	SMA490B	30.0	19.9
	연접부 측면판	STS301L-DLT	31.5	20.4
	연접부 단부 출입구 상부 모서리	STS304L	16.2	14.4

표 4. 수직하중에 대한 상세 해석 결과

(단위 : kg/mm²)

상세 해석 부위	부 재	재 질	해석 결과	허용 용력
창문과 문 사이의 구조물	십자형 브라켓	STS301L-ST	18.0	21
	측면판	STS301L-DLT	15.6	17.5
출입구 상부 구석	모서리틀	STS301L-ST	16.8	21
창문 사이의 구조물	십자형 브라켓	STS301L-ST	11.3	21
	측면판	STS301L-DLT	12.7	17.5

5. 하중시험

5.1 하중 시험 방법

마닐라 경전철 차체의 하중시험은 현 대정공(주) 창원공장의 철차 시작실에서 1998년 1월 13일부터 20일까지 실시되었다. 시험차체는 동력차의 B-차체로 시험 전에 캠버와 중량을 측정하고, 높은 용력이 예상되는 부위에 변형률 게이지를 취부하였다. 대칭성을 고려하여 차체의 1/2 영역에 집중적으로 게이지를 취부하였으며, 일부 부위에는 대칭위치에 변형률 게이지를 취부하여 하중의 대칭성을 확인하였다. 85 곳의 측정위치는 유한요소해석 결과를 토대로 선정하였으며, 27 곳은 현장에서 결정되었다. 처짐량은 다이얼 게이지를 이용하여 양쪽 측면 받침대에 각각 7개소에서 처짐량을 측정하였다.



그림 8. 차체 하중 시험 장면 (수직 하중)

(1) 수직하중(23.7톤) : 분포하중(21.7톤)은 20 kg의 스틸 블록을 이용하여 언더프레임 상면에 부과하였으며, 200 kg이상의 기기인 MCM, ACM, 에어컨에 의한 하중(2톤)은 각각의 취부 위치에 집중하중으로 가하였다.

(2) 압축하중(50톤) : 압축하중시험용 고정구를 설치한 다음, 연결기 취부 위치에서 유압장비를 이용하여 압축하중을 가하는 동시에 로드셀을 이용하여 부과된 하중을 측정하였다.

(3) 대각들기 : 차체가 공차 하중 상태가 되도록 언더프레임 상면에 스틸 블록을 이용하여 분포 하중을 가하였으며, 대차의 중량에 상당하는 스틸 블록을 대차 연결부에 매달은 상태에서, 이동식 리프트를 이용하여 그림1과 같은 방법으로 시험을 실시하였다.

5.2 하중 시험 결과

(1) 처짐량

수직하중시험과 압축하중시험의 처짐량 측정 결과를 그림 9과 그림 10에 각각 나타내었다. 수직하중에 대해서는 해석 결과와 측정결과를 측면받침대의 상대처짐량으로 비교하였으며, 압축하중의 경우는 측정결과 만을 측면 받침대의 절대 처짐량으로 나타내었다.

수직하중에 대한 측면 받침대의 최대 상대 처짐량은 해석 결과 5.4 mm로 계산되었으며, 측정결과인 5.12 mm와 5.62 mm와 비교하면 정확하게 예측하였음을 알 수 있다. 마닐라 경전철 차체는 10³ mm의 캠버를 갖도록 설계되었으며, 수직하중 하에서 측면 받침대의 최대 상대 처짐량 5.62 mm가 캠버의 하한치인 7 mm보다 작으므로, 처짐량 제한 조건을 만족한다. 연결부와 볼스터 사이의 처짐량은 잘 맞으나, 볼스터와 끝받침대(end sill) 사이의 처짐량은 다소 차이가 난다.

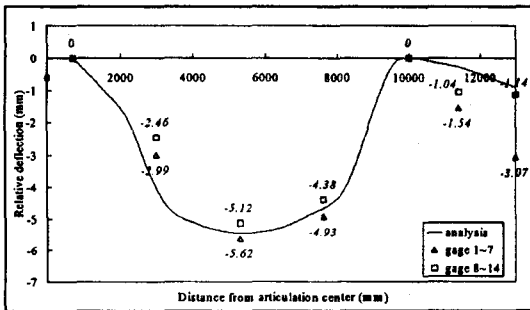


그림 9. 측면받침대 상대처짐곡선 (수직하중)

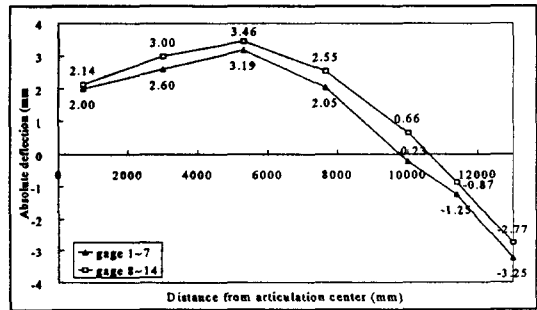


그림 10. 측면받침대 절대처짐곡선 (압축하중)

(2) 응력

각각의 하중조건에 대한 고응력부에 대한 구조해석 결과와 하중시험 결과를 표 5에 정리하였으며, 수직하중과 대각들기의 고응력부에 대해 하중-응력선도를 그림 11과 그림 12에 각각 나타내었다. 수직하중 시험에서 21.7톤까지는 등분포하중으로 가한 후, 2톤을 집중하중으로 가하였다. 등분포 하중을 가하는 동안에는 선형성이 유지되나, 집중하중은 같은 크기의 등분포 하중보다 큰 영향을 주고 있다. 대각들기의 응력 측정 결과는 하중-응력 관계의 선형성을 잘 보여 주고 있다.

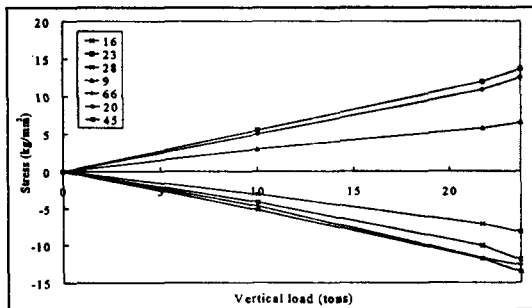


그림 11. 수직하중 - 응력 선도

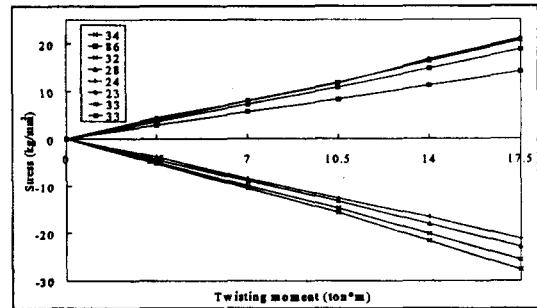


그림 12. 비틀림 하중 - 응력 선도

하중을 여러 단계로 나누어 부과하면서 응력을 측정된 후 하중-응력 관계의 선형성을 확인함으로써, 소성 변형, 버클링(buckling) 등 바람직하지 않은 구조체의 비선형적인 거동을 확인할 수 있으며, 하중시험 결과 마닐라 경전철 차체는 이러한 현상이 발생하지 않았음을 알 수 있다.

주요 부위에 대한 해석과 시험 결과를 비교한 결과, 응력이 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 압축하중 작용 시 응력이 집중되는 드래프트실(draft sill) 부위는 설계 변경 전의 응력이 29.2 kg/mm² 으로 허용응력인 33 kg/mm² 보다는 작지만, 이 부위에 충격하중이 자주 작용하는 것을 고려하여 보강을 한 결과, 계산응력과 측정응력을 모두 20 kg/mm² 이내로 감소시켰다.

표 5. 해석결과와 시험결과의 비교

(단위 : kg/mm²)

하중조건	고응력부	해석결과	시험결과	허용응력
수직하중	창문 모서리(23)	15.6	13.67	17.5
	출입구 모서리(15)	16.8	12.98	21
	센터실(66)	13.8	-12.64	17.5
압축하중	연결기 취부위치(71)	18.9	-19.89	33
	연결기 취부위치(82)	18.9	-16.25	33
	센터실(15)	15.7	-14.70	35
대각들기	창문 모서리(34)	24.0	-25.03	31.5
	연접부 출입구	14.4	14.62	16.2
	상부 모서리(86)			

* (숫자)는 변형을 게이지 번호이며, 해석 결과는 von Mises 응력으로 나타내었다.

6. 맺음말

본 연구에서는 국내에서 최초로 개발된 연접형 경전철 차체의 개발 과정에서의 구조해석 및 하중시험에 대해 기술하였다.

경전철 차체에 대해 절반 모델, 전체 모델, 부분 상세 모델을 만들어, 수직하중, 압축하중, 대각들기 등 설계하중에 대해 다양한 해석을 수행하였으며, 해석 결과를 설계과정에 반영하여 상당한 중량 감소 및 취약부위의 보강이 이루어졌다. 시제차 제작 후, 측정 결과와 해석 결과를 비교하여, 구조 해석 결과가 시험 결과와 잘 일치함을 확인하였고, 모든 강도 설계조건을 만족함을 검증하였다.

철도 차량의 개발 및 제작 기간은 점점 짧아지고 있으며, 이 과정에서 차체 구조의 설계 및 시험 기간에 대한 단축 요구는 더욱 커지고 있다. 구조 해석에 의한 설계의 검증 및 개선은 이러한 요구에 대응하는 유효한 방법이며, 더 나아가 시제 비용 절감, 차량 경량화에 의한 운영비 절감 등 많은 효과를 볼 수 있다. 따라서, 향후 철도 차량 차체의 설계에 있어서 구조해석의 역할은 더욱 커질 것으로 생각되며, 이번 연구로 향후 개발되는 차종에 대해서는 더 정확하고 효율적인 예측이 가능할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) "Manila line 1 expansion technical specification, part 3, rolling stocks", Manila Light Rail Transit Authority
- (2) "도시철도차량 표준사양", 1998, 건설교통부
- (3) "JIS E 7105 鐵道車輛構体の荷重試験方法", 1989, 일본규격협회
- (4) "ANSYS user's manual Vol. 1 Procedures", 1992, Swanson analysis systems, Inc.