

도시철도차량의 안전진단평가 기법에 관한 연구

정종덕*(한국철도기술연구원), 한석윤(한국철도기술연구원),
박기준(한국철도기술연구원), 박옥정(한국철도기술연구원)

A Study on Safety Evaluation Methods for Electric Multiple Units

J. D. Chung(KRRI), S. Y Han(KRRI), K. J. Park(KRRI), O. J. Park(KRRI)

ABSTRACT

Automobile is in charge of most transportation system in modern urban city. However, in fact, cause of problem of road state, environment, and the other reasons, urban transit system is using as Mass Transit nowadays.

Nevertheless Urban transit system is considering many kind of safety fact of that system which is increasing continuously nowadays, it occurs various train accident.

This paper describes 3D Dimensional Measurement(EDM testing) and tensile testing results of carbody structure for crashed EMU(Electric Multiple Units). Tensile tests were performed on two different types of specimens in order to evaluate the strength changes before and after damages, obtained from plastic deformed area and nondeformed region of the crashed EMU.

And Structural analysis of EMU was 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 testing results have been used to provide the critical information for the criteria of safety diagnosis.

Key Words : Electric Multiple Units(전동차), Carbody(구조체), Bogie(대차), Under Frame(언더프레임), Safety Diagnosis(안전진단), Vertical Load(수직하중), Compressive Load(압축하중)

1. 서론

현대적인 대도시의 교통시스템은 자동차가 그 대부분을 담당하고 있으나, 현실적으로 도로 및 환경 등 여러 가지 제반문제로 인해 대규모 교통수단(Mass Transit)인 도시철도차량을 병행하여 운용하고 있다. 근래에 지속적으로 증가되고 있는 도시철도차량의 운용은 시스템적으로 여러 가지 안전요소가 고려되어져 있음에도 불구하고 현실적으로는 각종 차량사고가 발생하고 있다. 이러한 차량사고는 정도에 따라 차량 구조물의 영구변형 및 파단을 동반하며 고가의 공공재산인 철도차량을 폐기하는 손실을 초래할 수도 있다. 이러한 배경하에 국내에서 최초로 수행된 본 연구는 사고발생차량에 대한 여러 가지 공학적인 판단을 통해 총체적인 구조 건전성(structural soundness)을 평가하고 사고 차량에 대한 보수가능성 및 폐기 여부를 판가름 하는 도시철도차량의 안전진단 기준에 대한 타당성 및 기법을 제시

하고자 한다.[1] 이를 위해 본 연구에서는 사고차량의 구조체와 주행장치에 대해 기존의 철도차량에서 사용되지 않았던 새로운 3차원 측정 방법 제시와 사고 발생시 손상의 가장 큰 원인이 되는 충돌력의 전달 경로와 주요부재에 대한 고응력 발생부위를 구조 해석 및 충돌해석을 통해 확인하였다.

이러한 해석을 기반으로 실제 사고차량에 대한 구조체 하중시험을 수행하였으며 이를 해석 결과와 비교평가 하는 입증절차를 수행하였다. 여기에 부가하여, 보다 정밀한 안전성 평가를 위해 사고차량의 주요 부재중 일부 소성변형이 발생된 언더프레임의 엔드실(end sill), 센터실(center sill), 사이드실(side sill) 등에 대한 재질의 기계적 성질 변화를 조사하기 위해 재질시험 및 비파괴시험을 실시하였으며, 이 시험의 결과를 근거로 기계적 성질에 대한 판단기준을 수립한 후 변형이 발생된 주요 부재들에 대한 정성적 손상여부를 확인하여 재사용 가부와 신규제작에 대한 기준을 제시하였다.

2. 차체 주요 치수측정

2.1 치수 측정방법 및 기준점 세팅

정밀진단 대상 항목인 차량의 치수측정은 “도시 철도차량의정밀진단지침”에 의거하여 진단 신청자가 제시한 기준도면 및 자료에 의하여 실시하였으며, 치수검사의 대상부위는 차체의 주요치수를 선정하고 3차원 측량장비를 이용하여 측정 실시하였다.

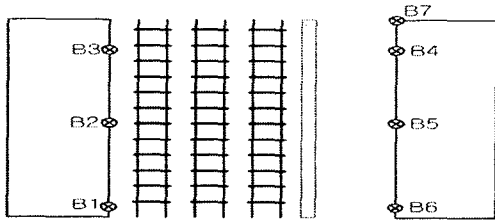


Fig. 1 Fiducial point diagram

정밀진단 지침에서 제시하는 다량의 치수를 측정하고, 측정값의 정밀도를 높이기 위한 방법으로 특정 위치의 기준점을 배치하여 각 부위의 치수를 측정하는 방법을 사용하였다. 동일 레벨선상의 직선구간의 선로를 확보하기 위해 공장 유치선 주변의 건물에 대상차량측정위치로 선정하였으며, 기준점은 다음 Fig. 1과 같이 배치하였다. 이때 유치선 주변의 건물에 설치된 기준점의 초기 측정 좌표는 Table 1과 같다.

Table 1 Survey result of fiducial point

측점	X	Y	Z	TARGET
POINT B1	99936.6	0	84.0	Tape Target
POINT B2	49197.7	15.9	61.2	
POINT B3	0	0	0	
POINT B4	1705.0	35976.5	-659.0	
POINT B5	47506.4	36022.9	-667.0	
POINT B6	102703.0	36064.3	-705.8	
POINT B7	-3226.6	30787.3	-8775.8	

2.2 차체치수측정 결과

차체 캠버량은 역캠버가 발생되지는 않았지만 9량 중 7량이 캠버 범위에서 벗어나 있음을 알 수 있었으며, 언더프레임의 수평도는 1량을 제외하고는 대체로 양호한 상태이다. 차체길이는 3량이 기준치에서 벗어나 있었고, 이는 차체단부가 충돌로 인하여 상면은 들어가고 반대로 하면은 나옴에 따라 차체길이가 변화되었음을 알 수 있었다. 차체의 대각선 차이는 전위방향에서는 충돌순서에 따라 3량이 기준치에서 벗어나 있었다.

레일상면에서 언더프레임의 높이 및 차체의 높이는 전량이 기준치에서 벗어나 있는데 이는 초기 설계하중보다 운행하중이 크게 작용 따라 크리이프(Creep)가 발생됨을 알 수 있었다. 출입구는 너비 및 높이가 모두 기준치에서 벗어났으며, 이는 오랜 운행으로 인하여 개구부(Open Section)가 넓어 변형이 쉽게 발생되었음을 알 수 있었다. 3차원으로 측정한 차체의 치수측정결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Measured dimension for carbody

측정 항목	기준치 (mm)	위치	차량번호									
			01호	02호	03호	04호	05호	06호	07호	08호	09호	
캠버	13.8 ± 5	좌측	-18.1	-20.9	-21.9	-15.9	-17.0	-21.4	-18.7	-22.9	-25.4	
		우측	-17.8	-20.1	-15.9	-17.8	-15.2	-18.1	-22.7	-22.1	-18.7	
언더프레임 차체 높이	1025	전좌	960.2	980.8	991.9	965.8	973.3	972.6	963.3	976.5	980.4	
		전우	969.4	981.8	979.4	957.1	970.1	955.8	967.3	972	983.7	
		후좌	976.1	974.4	978.9	966.6	967.9	977.7	961	976.2	978.3	
		후우	973.4	959.9	958	954.4	961.4	948.1	953.6	970.9	968.6	
언더프레임 수평도 높이	25 이내	전후차	15.9	6.4	13.0	0.2	5.4	5.1	2.3	0.3	2.1	
		대각차	13.2	20.9	13.9	11.4	11.9	24.5	9.7	5.6	11.8	
	15 이내	좌우차	6.7	7.4	0.5	8.5	2.2	21.9	6.3	4.2	5.4	
		좌우차	9.2	1.0	12.5	8.7	3.2	16.3	4.0	4.5	3.3	
차체 길이	19500 (+12 / -2)	위	좌측	19479	19395	19499	19498	19507	19500	19511	19517	측정 불가
			우측	19492	19377	19491	19491	19501	19511	19509	19529	측정 불가
		아래	좌측	19513	19516	19508	19508	19506	19510	19508	19517	19510
			우측	19513	19510	19513	19503	19501	19508	19505	19516	19508
차체 높이	3800 ± 5	전위대차	3795	3748	3796	3749	3755	3756	3751	3757	3765	
		차량중앙	3767	3772	3766	3768	3767	3765	3766	3776	3768	
		후위대차	3588	3737	3747	3792	3756	3759	3611	3752	3766	

2.3 측정방법 및 장비

본 연구에서는 광파거리 측량기(Light Wave EDM)를 사용하여 용벽의 변위 계측을 수행하였다. 광파거리 측량기는 가시광선, 적외선, 레이저광선 등을 이용하는 것으로서 강도 변조한 광파를 측정점에 세운 기계로부터 발사하여 이것이 목표점의 반사경에 반사하여 돌아오는 반사파와 발사파의 위상차로 거리를 관측한다. 광파거리측량기는 주로 중단거리용으로 쓰이며 정확도는 통상(5mm? ppm)의 정확도이나 본 연구에서 사용된 장비는 현재까지 개발된 광학측정장비 중 가장 정확도가 높은 LEICA사의 TC2002(정밀도 : 1mm? ppm)를 사용하였다.

3. 구조해석

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

3.1 해석모델

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

구조해석에 사용된 대부분의 요소는 shell 요소를 사용하였으며, 언더프레임에는 shell과 solid 요소를 혼합하여 사용하였다. 전체 모델에 사용된 총 요소수는 54,270개이며, 절점수는 52,524개이다. 구조해석에 사용된 장비는 HP workstation x2100이며, 해석 Package는 I DEAS Master Series 8.0을 사용하였다. 차체의 재원은 도시철도차량의 중형차를 적용하였다.

3.2 압축하중 조건

차량간 연결시에 발생하는 하중조건으로 수직하중 1g가 작용하는 동시에 50톤의 압축하중이 작용하는 혼합하중 상태이다. 도시철도법에 규정한 최대승객하중은 30톤이나 통상적인 승객중량을 20톤으로 가정하였고, 압축하중 50톤이 동시에 작용하는 조합하중에 대해 해석하였다. 따라서 적용된 하중은 다음과 같이 계산되며, 구조해석 및 수평압축시험에 적용된 하중조건은 2단계로 분류하여 해석을 수행하고자 한다. 제1단계는 도시철도법에서 규정한 하중조건으로 수직하중(29.3톤)과 압축하중(50톤)을 적용하였으며, 제2단계는 영구변형을 분석하기 위해 해석을 수행한 하중으로 수직하중(29.3톤)과 압축하중(95톤)을 적용한 조건이다.[2]

3.3 해석결과

구조해석은 전동차의 1/4모델로 해석을 수행하였다. Table 3은 구조해석 결과를 나타낸 것이다. 응력분포는 Fig. 2와 같으며, 대부분의 응력은 언더프레임에서 발생하였다. 특히 센터실의 커플러 포켓 부근에서 높은 응력이 발생하였다.

Table 3 Structural analysis result

No	구분 (하중조건)	위치	발생 응력 (kg/mm ²)
1	제1단계	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 출입문 하부	6.79
5	제2단계	Center Sill Coupler Pocket 전반부	22.20
6		Center Sill Coupler Pocket 중/후반부	28.10

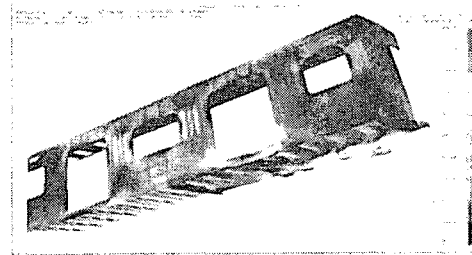


Fig. 2 Stress distribution of EMU model

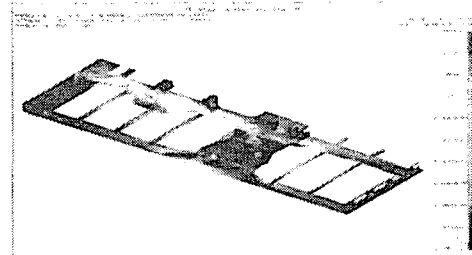


Fig. 3 Stress distribution of Under Frame

Fig. 3은 언더프레임의 센터실 응력분포를 나타낸 것으로 발생응력의 흐름을 세부적으로 분석하면, 센터실에서 발생한 높은 응력은 볼스터의 높은 강성으로 인해 차량 중심으로 갈수록 낮아지는 경향을 보이나 주요 하중 전달 부재인 사이드실은 단부에서 두 번째 출입문 부근에서 다시 높아지는 응력 경향을 볼 수 있다. 하중시험으로부터 압축하중의 전달 경로를 살펴보면 Coupler ⇒ Draft Gear ⇒ Center Sill ⇒ Bolster ⇒ Side Sill로 연결된다. 이들 부재들은 고강도 주요 골조로서 차체 하중에 중요한 역할을 담당하는 부재들이다.

Fig. 4는 하중 95톤 부과시 응력분포를 나타낸 것이며 센터실(커플러 포켓 중/후반부)에서 SS400의 항복응력보다 더 높게 나타난 것을 통해 충돌시 90톤 이상의 하중이 작용한 것으로 보인다.

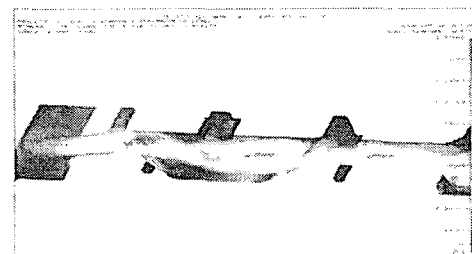


Fig. 4 Stress distribution of Center Sill(Compressive load : 95 ton)

3.4 결과비교분석

구조해석결과 언더프레임에서 응력이 발생하였으며, 특히 센터실의 커플러 포켓부근에서 높은 응력이 발생하였다. 전체적으로도 센터실의 엔드, 드래프트 기어, 볼스터에서 높은 응력이 발생하였다. 이 결과에 대하여 압축하중의 전달경로는 Coupler ⇒ Draft Gear ⇒ Center Sill ⇒ Bolster ⇒ Side Sill로 연결되며, 구조해석 결과와 실제 사고차량의 변형부위가 일치함을 볼 수 있다. 이들 부재들은 고강도 주요 골조로서 차체 하중에 중요한 역할을 담당하는 부재들이다. Fig. 5(a)와 5(b)는 Center Sill 부위의 구조해석결과와 충돌로 인한 차량의 변형된 사진을 나타낸 것이다.

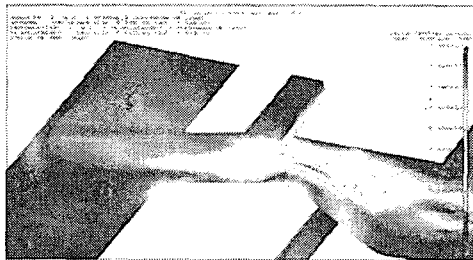


Fig. 5(a) Structural analysis result of center sill

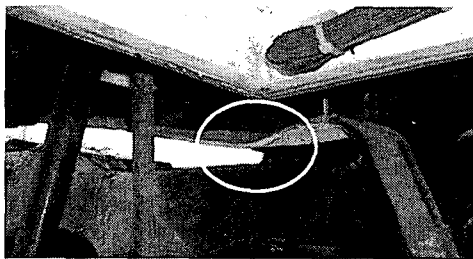


Fig. 5(b) Picture of center sill

Fig. 6(a)와 6(b)는 출입문하부 Side Sill 부위의 구조해석결과와 충돌로 인한 차량의 변형된 사진을 나타낸 것이며, 해석결과와 일치하는 것을 볼 수 있다.

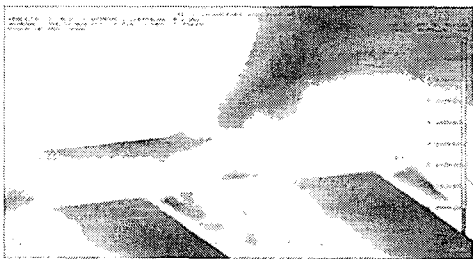


Fig. 6(a) Structural analysis result of side sill under the door entrance frame

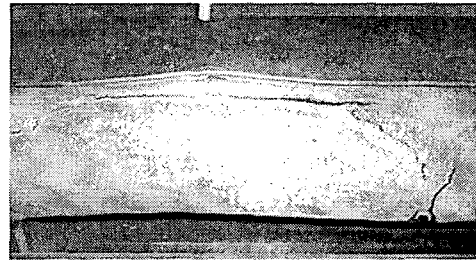


Fig. 6(b) Picture of side sill under the door entrance frame

4. 결론

차체 외관상태검사와 3차원 치수측정을 한 결과 측면골조, 끝막이 골조, 언더프레임 등이 충돌로 인하여 변형이 일어났으며, 변형된 부위의 차량을 살펴보면 충돌 순서 차량대로 9량 중 4량이 모두 힘을 받는 주요부위가 손상이 되었음을 알 수 있었다.

차체의 주요부위에 대한 인장시험결과 변형된 부위가 정상부위보다 강도가 감소한 것을 볼 수 있었으며, 사고당시 충격으로 인하여 변형된 부위는 정상부위보다 연신율이 크게 감소한 것을 볼 수 있었다. 이러한 사고당시 충격에 의해 변형이 발생한 골조의 부재를 보수나 보강이 없이 재사용할 경우 기계적 특성상 연신율의 폭이 적어 사고 재발시 안전에 중대한 문제가 될 수 있다.

구조해석 결과 압축하중 전달경로는 Coupler ⇒ Draft Gear ⇒ Center Sill ⇒ Bolster ⇒ Side Sill로써, 하중이 전달되는 경로를 파악할 수 있었다. 또한 구조해석결과를 통해 실제 사고차량의 변형부위와 일치함을 볼 수 있었다. 차량이 충돌시 극한하중을 받는 경우를 가정한다면 대부분의 하중을 언더프레임에서 받게 될 것이므로 재질이 탄성한도를 넘어서게 될 것이다. 충돌사고 등으로 차체에 심각한 소성 변형이 과도하게 발생한 차량은 하중전달의 불균일, 하중전달경로의 변경 등의 양상이 발생할 수 있다. 따라서 국부적인 응력집중 및 추가적인 소성변형의 가능성이 크고 또한 보수하기가 어려운 부분이 많이 발생함으로써 교정 또는 보강을 통한 차체의 재사용은 바람직스럽지 않은 방법이라고 판단된다.

참고문헌

1. 도시철도차량의 정밀진단지침, 건설교통부고시 제 2000-334호, 2000. 12. 17
2. 도시철도차량의 성능시험기준에 관한 기준, 2000-126호, 2000. 5. 17