

사고전동차 구조체의 안전진단에 관한 고찰

On Study the Safety Diagnosis of Carbody Structure for Crashed Electric Multiple Units

정종덕* · 배대성* · 박근수**

Jong-Duk Chung, Dae-Sung Bae, Geun-Soo Park

Abstract

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.

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

1. 서론

국내 도시철도차량의 운행이 지속되면서 차량 사고가 발생함에 따라 차량복구의 안전성 확보와 복구보수비용 절감 등에 기여할 수 있는 안전진단 수행체계의 범제화를 통한 도시철도차량의 안전운행확보가 절실하다. 그러므로 도시철도차량 안전진단은 차량을 복구하기 전 복구 가능 여부를 확인하기 위하여 상태평가, 안전성평가 등을 실시하게 된다.

본 연구의 안전진단 대상 차량은 충돌에 의한 충격으로 전동차 10량 가운데 마지막 객차 1량이 크게 부서져 탈선되고 6량의 연결고리와 측면이 파손된 차량을 안전진단 대상으로 선정하였다. 대상 차량에 대한 상태검사를 실시하였으며, 차체의 3차원 치수측정은 “도시철도차량의 정밀진단지침”에 의거하여 정밀진단 신청자가 제시한 기준도면 및 자료에 의하여 실시하였다[1]. 치수 검사의 대상부위

는 차체의 주요치수를 선정하고 3차원 측정장비를 이용하여 측정 및 실시하였다. 정밀진단지침에서 제시하는 다량의 치수를 측정하고, 측정값의 정밀도를 높이기 위한 방법으로 특정 위치의 기준점을 배치하여 각 부위의 치수를 측정하는 방법을 사용하였다. 사고전동차의 주요부재인 언더프레임의 엔드실(End Sill), 센터실(Center Sill), 사이드실(Side Sill) 일부 부재가 영구변형을 일으켜 재질이 갖는 특성을 알아보기 위해 재질시험을 실시하였다. 최종적으로 이 재질시험의 결과를 기초로 하여 기계적 특성을 고려하여 복구차량에 그 결과를 적용하고자 한다.

전동차의 힘의 전달 경로를 살펴보면 수평하중시 차량과 차량을 연결해주는 연결기를 통해 언더프레임의 센터실에 장착되어 있는 Draft Gear ⇒ Center Sill ⇒ Bolster ⇒ Side Sill로 수평하중이 전달되고, 수직하중시에는 측면골조, 끝막이 골조, 지붕골조에서 힘을 받지만 주로 언더프레임에서 힘을 받는 구조로 설계되어 있다.

본 연구에서는 첫째, 차체의 강도 및 강성을 평가하기 위해서 기본적인 구조해석을 통하여 힘의 전달과정과 주요부재의 응력 취약부를 확인하고 둘째, 사고 전동차의 주요부

* 책임저자 : 정회원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과 및 한국철도기술연구원

* 정회원, 한양대학교 정밀기계공학과 정교수

** 정회원, Rotem 책임연구원

재의 파손부위와 종합적으로 비교 검토하여 사고차량의 복구 가능여부를 확인한다. 셋째, 상태평가, 안전성평가 등을 실시하여 차량의 안전한 복구에 효과적으로 기여할 수 있는 도시철도차량 안전진단을 실시한 결과에 대해 소개하고자 한다.

2. 사고전동차의 상태검사

2.1 개요

차량의 외관상태 검사는 진단 차량의 구조체에 대한 치수 측정을 실시하기 전에 차량의 외관상태 조사를 수행하였으며, 외관상태 검사의 범위는 충돌로 인한 차체의 변형도를 주로 조사하였다.

2.2 사고전동차의 상태

Fig. 1(a)와 1(b)는 사고전동차의 TC-car 외형사진이다. 외관상태 검사결과 끝막이골조, 측면골조, 언더프레임의 엔드실, 센터실, 사이드실, 크로스빔 등이 충돌로 인하여 변형이 일어났다. 변형된 부위의 차량을 살펴보면 9량 중 4량이 모두 힘을 받는 주요 부위가 손상이 되었음을 알 수 있었다.



Fig. 1(a). TC-car (trailer car with driving cab) of accident EMU (Front)

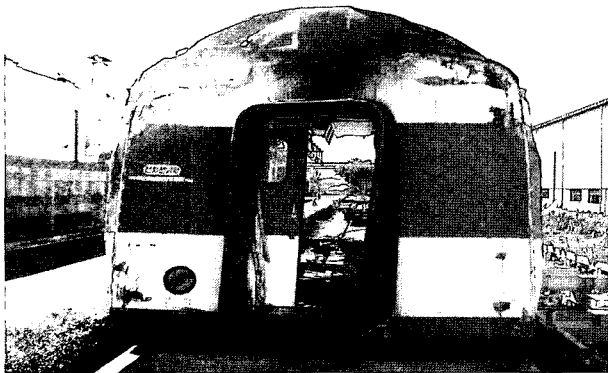


Fig. 1(b). TC-car (trailer car with driving cab) of accident EMU (Rear)

3. 차체치수검사

3.1 치수측정과 변위계측

3.1.1 치수검사 개요

차량형상의 치수 및 변위 계측은 차량 안전성 평가의 지표로서 매우 중요하다. 여기서 차량의 제작초기의 치수와 설계상의 치수가 동일하다는 가정하에 변형여부의 평가가 이루어질 수 있다. 일반적인 제작전 차량 부재 단면의 치수는 측정간에 인바테이프나 변위계를 사용하여 계측할 수 있으나, 제작이 완료된 후의 치수측정은 공간적인 제약으로 인하여 3차원 측정기를 사용하여 측정하여야 한다. 본 검사에서는 차량의 치수 및 변위측정을 위해서 측정간의 거리를 비접촉방법인 3차원 좌표측량기를 사용하여 공차상태 조건하에서 치수 및 변위 여부를 계측하였다[2,3,4].

3.1.2 EDM을 사용한 변위의 계측

적외선, 레이저광선, 극초단파 등의 전자기파(Electromagnetic Wave)를 이용하여 거리를 관측하는 방법을 전자기파거리측량기(EDM)이라 한다. 전자기파거리측량기를 사용하면 짧은 시간에 지형이나 장애물에 관계없이 측정할 수 있으며 최대 100km 이상의 장거리를 정밀도 1/100,000이상으로 빠른 시간내에 간편하게 측량할 수 있다. 전자기파거리측량기는 광파거리 측량기와 전파거리 측량기로 크게 나눌 수 있으며 본 연구에서는 광파거리 측량기를 사용하여 변위를 계측하였다.

3.1.3 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 ± 5ppm)의 정확도이나 본 연구에서 사용된 장비는 현재까지 개발된 광학측정장비 중 가장 정확도가 높은 LEICA사의 TC2002(정밀도 : 1mm ± 1ppm)를 사용하였다.

3.2 차체 주요 치수측정

3.2.1 치수 측정방법 및 기준점 세팅

정밀진단 대상 항목인 차량의 치수측정은 “도시철도차량의 정밀진단지침”에 의거하여 진단 신청자가 제시한 기준도면 및 자료에 의하여 실시하였으며, 치수검사의 대상부위는 차체의 주요치수를 선정하고 3차원 측정장비를 이용하여 측

정 실시하였다.

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 건물을 대상차량측정위치로 선정하였으며, 기준점은 다음 Fig. 2와 같이 배치하였다. 이때 유치선 주변의 건물에 설치된 기준점의 초기 측정 좌표는 Table 1과 같다.

또한 선로의 기울기에 의한 영향을 받지 않는 차량의 창문 등의 측정은 검수고 야외에서 측정(Fig. 3)하여 측정기간

을 단축하도록 하였다.

3.3 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 크리프(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 측정된 차체의 치수측정결과는 Table 2와 같다.

4. 재질시험

사고전동차의 차량 중 주요 부재인 언더프레임의 앤드실, 센터실, 사이드실 일부 부재가 영구변형을 일으켜 재질이 갖는 원래의 기계적 성질을 유지하고 있는지를 알아보기 위해 시험

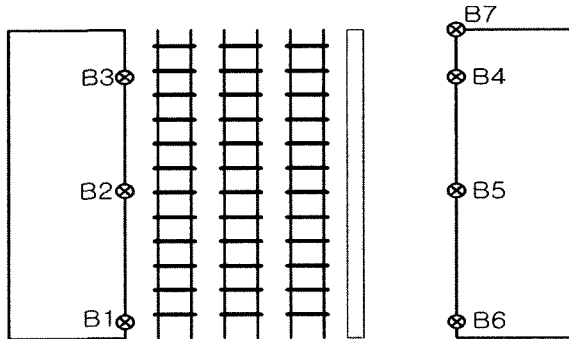


Fig. 2. Fiducial point diagram

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	

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	-23.0	-21.0	-15.9	-17.0	-21.4	-18.7	-22.3	-20.4	
		우측	-19.3	-20.4	-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	965.6	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	
			4.0	21.9	21.4	2.7	8.7	7.7	13.7	1.1	15.1	
	25 이내	대각차	13.2	20.9	33.9	11.4	11.9	24.5	9.7	5.6	11.8	
			6.7	7.4	0.5	8.5	2.2	21.9	6.3	4.2	5.4	
	15 이내	좌우차	9.2	1.0	12.5	8.7	3.2	16.8	4.0	4.5	3.3	
			2.7	14.5	20.9	11.2	6.5	29.6	7.4	5.3	9.7	
차체 길이	19500 (+12/-2)	위	좌측	19479	19385	19489	19490	19507	19500	19511	19517	측정 불가
			우측	19492	19377	19491	19491	19501	19513	19509	19520	측정 불가
		아래	좌측	19513	19514	19508	19508	19506	19510	19508	19517	19510
			우측	19518	19510	19513	19503	19501	19508	19505	19516	19508
차체 높이	3800 ±5	전위대차	3735	3748	3760	3749	3755	3746	3754	3757	3760	
		차량중앙	3757	3772	3768	3753	3757	3752	3750	3770	3768	
		후위대차	3598	3735	3747	3602	3756	3752	3611	3752	3756	

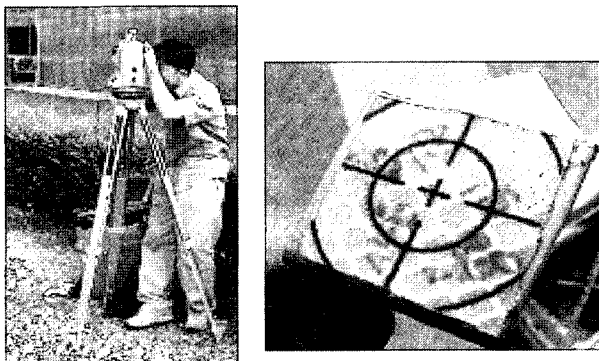


Fig. 3. Picture of survey and tape target

Table 3. Specimen extraction and situation

시편절체부	상태	수량	재질	두께(mm)	시편방향 (차량기준)
사이드실	건전한 상태	2	SS 400	4.5	길이방향
	변형된 상태	3	SS 400	4.5	
사이드 외판	건전한 상태	2	SS 400	2.3	횡방향
	변형된 상태	3	SS 400	2.3	
크로스빔	건전한 상태	2	SS 400	4.5	횡방향
	변형된 상태	3	SS 400	4.5	

을 실시하게 되었다. 이 재질시험의 결과를 기초로 하여, 복구 차량에 기계적 특성을 고려한 결과값을 적용하고자 한다.

4.1 소재 및 시험편 제작

시험편 제작을 위해 Table 3과 같이 대파된 차량(TC-car)의 주요부위 중 변형이 있는 부위와 변형이 진행된 부위로 나누었으며, 시편을 절취하여 인장시험 시편을 제작하였다[5,6].

4.2 시험장치 및 시험방법

인장시험에 사용된 시험기는 시마주(Shimadzu)사의 25ton

용량 전기모터식 인장시험기(Model AG-25TG)를 사용하였다. 시험 속도를 1mm/min로 하여 시험을 수행하였으며, 게이지(Gauge)길이가 25mm인 신장강도계(Extensometer)를 부착하여 시험편이 파단될 때까지 변위를 측정하였다. 신장강도계는 압축응력과 굽힘에 민감하기 때문에 시험기와 시험편의 축 정렬과 하중제어에 주의하였다. 본 시험을 시작하기 전에 하중, 변위 및 변형률에 대한 교정을 실시하여 시험기의 정밀도를 확인하였다. 시험기의 제어, 데이터 처리 및 결과 해석은 PC를 사용하여 수행되었다. 인장시험이 진행되는 동안 하중신호와 변위신호를 제어기(Controller)를 통하여 컴퓨터에 연속적으로 기록하였다[7].

4.3 시험결과

사고전동차의 차량부재 중 변형이 된 부분의 기계적 특성을 알아보기 위하여 재질시험을 실시하였으며, 변형된 부위에 대한 특성을 비교분석하기 위해 정상부위에서도 시료를 채취하여 시험을 실시하였다. Fig. 5, 6은 시험후의 시료 변형결과이다.

Fig. 6은 외판의 응력-변형률 선도를 도시화한 그래프이다. 외판에 대한 인장시험결과 최대인장강도 및 파단장도가

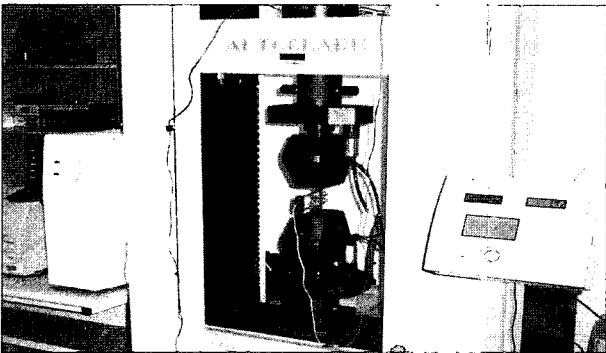


Fig. 4. Picture of tensile test

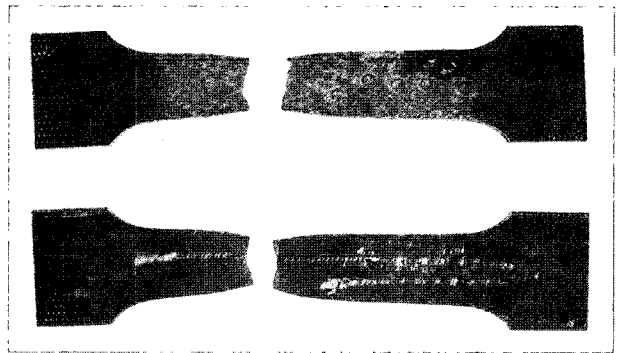


Fig. 5. Specimen shape (after tensile test)

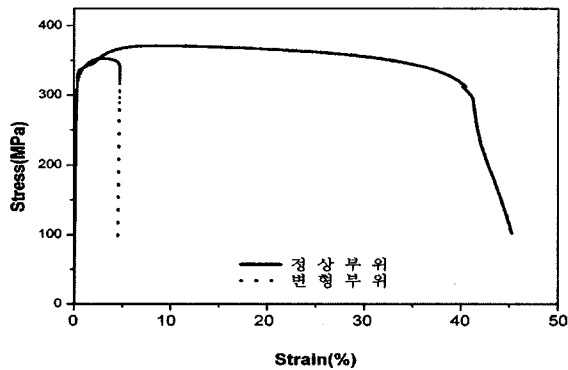


Fig. 6. Stress and strain curve (Outside plate)

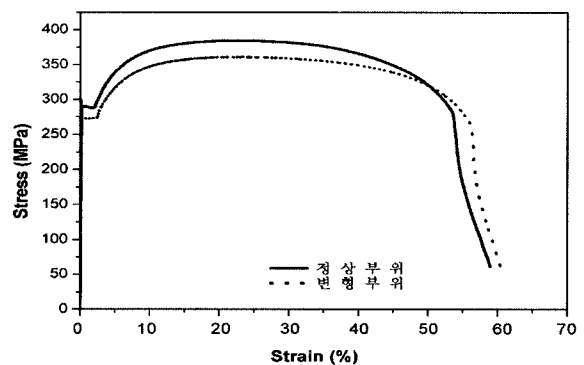


Fig. 7. Stress and strain curve (Cross beam)

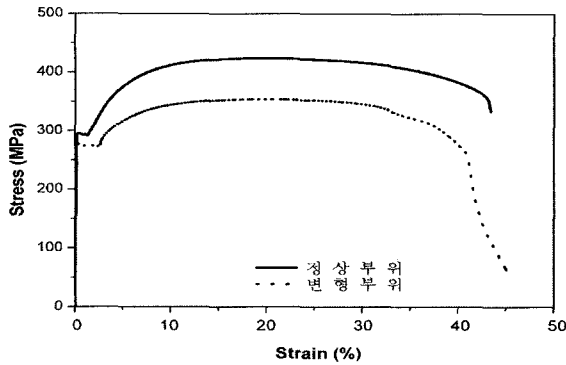


Fig. 8. Stress and strain curve (Side sill)

변형된 부위가 정상부위보다 강도가 약 5% 감소한 것을 볼 수 있었다. 사고당시 충격으로 인하여 변형이 된 부위는 정상부위 연신율(11.3mm)에 비하여 연신율(1.1mm)이 크게 감소한 것을 볼 수 있었다.

이러한 사고당시 충격에 의해 변형이 발생한 골조의 부재를 보수나 보강이 없이 재사용할 경우 기계적 특성상 연신률의 폭이 적어 사고 재발시 안전에 중대한 문제가 발생될 수 있다.

Fig. 7은 크로스빔의 응력-변형률 선도를 도식화한 그래프이다. 크로스빔의 경우 최대인장강도는 변형부위가 정상부위보다 6.1%정도 적게 나타났으며, 과단강도는 5.4%정도 적게 나타났지만 연신율은 큰 변화가 없었다.

Fig. 8은 사이드실의 응력-변형률 선도를 도식화한 그래프이다. 사이드실의 경우는 최대인장강도는 변형부위가 정상부위보다 16.6%정도 적게 나타났으며, 과단강도는 83.3%정도 적게 나타났다. 시료를 채취한 부위는 사고당시 충격에 의한 변형이 심한 것으로 파악된다.

4. 구조해석

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

Table 4. Specification of EMU

No	Type	Length
1	차체길이	19,500mm
2	차체폭	3,120mm
3	지붕높이	3,800mm
4	대차중심간거리	13,800mm
5	연결기 높이	880±10mm

4.1 해석모델

차체는 커플러 포켓에 가해지는 수평압축하중에 대하여 해석을 수행하였으며, 전후 및 좌우 대칭임을 감안하여 1/4만을 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 Table 4와 같다.

4.2 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 하중조건이며, 제2단계는 영구변형을 분석하기 위해 해석을 수행한 하중조건이다. 그 하중크기는 Table 5와 같다[8].

1) 제1단계

$$\begin{aligned} \text{수평압축하중} &= (\text{공차중량} + \text{승객하중} - \text{대차중량} \\ &\quad \text{Bareframe 중량}) + \text{압축하중} \\ &= \text{수직하중}(29.3\text{톤}) + \text{압축하중}(50\text{톤}) \end{aligned}$$

2) 제2단계

$$\begin{aligned} \text{수평압축하중} &= (\text{공차중량} + \text{승객하중} - \text{대차중량} \\ &\quad \text{Bareframe 중량}) + \text{압축하중} \\ &= \text{수직하중}(29.3\text{톤}) + \text{압축하중}(95\text{톤}) \end{aligned}$$

4.3 사용재료의 기계적 물성치

해석에 사용된 전동차의 재료는 SS400이며, 이 재료의 기계적 물성치는 Table 6과 같다.

Table 5. Computation weight of EMU

No.	Type	Weight
1	공차중량	33 ton
2	Bareframe 중량	11.7 ton
3	대차중량	12 ton
4	최대승객하중	20 ton

Table 6. Material Properties of EMU

Material	Yield stress(kgf/mm ²)	Tensile stress(kgf/mm ²)
SS400	25	41

Table 7. Structural analysis result

No	구분 (하중조건)	위 치	발생 응력 (kgf/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 출입구 하부	6.79
5	제2단계	Center Sill Coupler Pocket 전반부	22.20
6		Center Sill Coupler Pocket 중/후반부	28.10

4.4 해석결과

구조해석은 전동차의 1/4모델로 해석을 수행하였다. Table 7은 구조해석 결과를 나타낸 것이다. 응력분포는 Fig. 9와 같으며, 대부분의 응력은 언더프레임에서 발생하였다. 특히 센터실의 커플러 포켓 부근에서 높은 응력이 발생하였다.

Fig. 10은 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 전달경로를 살펴보면 Coupler ⇒ Draft Gear ⇒ Center Sill ⇒ Bolster ⇒ Side Sill로 연결된다. 이들 부재들은 고강도 주요 골조로서 차체 하중에 중요한 역할을 담당하는 부재들이다.

Fig. 11은 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.

4.5 결과비교분석

Fig. 12(a)와 12(b)는 Center Sill 부위의 구조해석결과와 충돌로 인한 차량의 변형된 사진을 나타낸 것이다.

Fig. 13(a)와 13(b)는 출입문하부 Side Sill 부위의 구조해석결과와 충돌로 인한 차량의 변형된 사진을 나타낸 것이며, 해석결과와 일치하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

차체 외관상태검사와 3차원 치수측정을 한 결과 측면골조, 끝막이 골조, 언더프레임 등이 충돌로 인하여 변형이 일

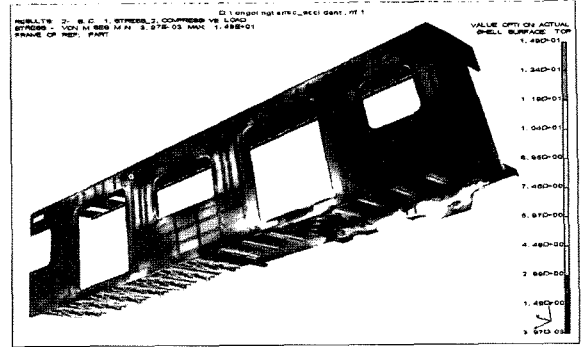


Fig. 9. Stress distribution of EMU model

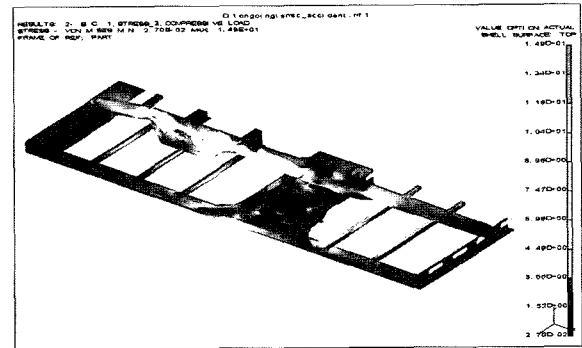


Fig. 10. Stress distribution of Under Frame

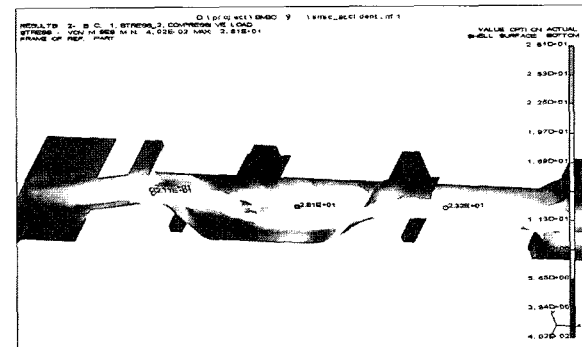


Fig. 11. Stress distribution of Center Sill(Compressive load : 95 ton)

어났으며, 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.

