

# 수도권 전동차(1호선)의 운용환경에 관한 연구

## A Study on the Operational Environment of KNR EMUs for the Line 1

김형진\*                      권성태\*\*                      서정원\*\*\*  
Kim, Hyeongjin      Kwon, Sungtae      Seo, Jungwon

---

### ABSTRACT

The Main objective of the study is to find out the basic running condition of KNR EMUs since the results can be useful in designing new EMUs. We had investigated the average annual mileages and decrepit levels. After that, we performed stress analysis for the carbody when uniformly distributed vertical loads due to the weight of the car body and passengers were applied to the underframes, in order to find out the most critical sections of the underframes and the effect of corrosion on the underframe strength.. Upon performing stress analysis, we carried out running tests of EMUs on the conventional line to measure dynamic stresses applied to the underframes.

---

Keywords : dynamic stress, underframe

### 1. 서론

본 연구에서는 수도권에서 운행되는 전동차의 운용환경을 분석하여 향후 전동차의 안전설계에 기여하기 위해 차량 주행이력 등 전동차의 현황조사 및 분석, 언더프레임 취약부 파악을 위한 구조해석, 부식이 차체강도에 미치는 영향을 고려하기 위한 부식도 등을 측정하였다. 또한, 전동차는 주행 중 진동 등 외부요인으로 인해 지속적으로 동적 하중을 받기 때문에 차량제작 시 안전을 고려하여 0.2 ~ 0.3g 정도를 수직하중에 추가하여 설계하므로 본 연구에서는 실제로 운행되고 있는 차체 언더프레임에 작용하는 동응력의 크기를 측정하기 위해 실차시험을 수행하였다. 실차시험은 수도권 1호선에서 운행되는 전동차를 대상으로 하여 공차시험 및 영차시험을 구로 - 인천 및 구로 - 수원 구간에서 실시하였다.

### 2. 주행이력 분석

철도차량은 비교적 숫자가 적은 동력차를 제외하면 각각의 차량별 주행거리 및 영공차의 비율에 대한 상세한 이력검토가 어려운 상황이므로 차량 구분 없이 연간 운행된 주행거리의 총계와 당해연도의 차량 보유량 수를 기준으로 하여 각 차량의 연간 평균 주행거리를 산출하였다. KNR의 수도권 전동차 주행거리는 1976년부터 1999년까지 철도청의 통계자료[1]를 인용하여 산출하였

---

\* 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원, 정회원  
\*\* 한국철도기술연구원 철도안전성능시험 인증센터 선임연구원, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 차량연구본부 주임연구원, 정회원

는데 도입초기인 1976년부터 1980년대까지는 대체로 연간 16만 km를 상회하였으나 1990년대 들어 지속적인 신규차량 투입으로 주행거리는 점차 낮아져 12 - 13만 km 대를 유지하고 있다. 이는 도입 초기와 비교할 때 약 20%정도 저감된 수치여서 노후도 개선 측면에서는 긍정적으로 평가되고 있다.

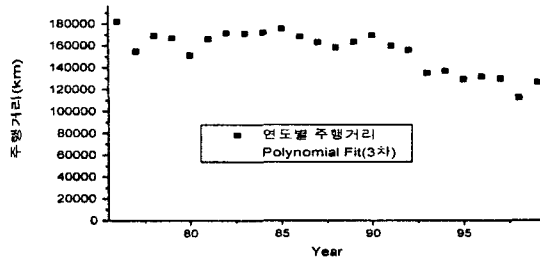


그림 1. 수도권 전동차의 연간 주행거리

### 3. 부식두께 측정

부식은 부재의 노후도와 직결되어 부재 수명 및 재질강도에 상당한 영향을 미치므로 구조물 설계시 종종 부식을 고려하여 over design하는 사례가 있다[2]. 따라서 본 연구에서는 부식의 영향을 분석하기 위해 초음파 두께측정기로 골조의 두께를 측정하여 측정 두께와 도면의 치수를 비교, 부식정도를 산정 하였다. 차량 노후도 조사 결과, 사이드실을 제외한 부위에서는 부식이 거의 없어 사이드 실에서 발생하는 부식만을 측정하였다. 그림 2는 부식측정 결과를 보여주고 있는데 사용연수 10년까지는 도장 막이 부식을 어느 정도 억제하였으나 10년 이후부터는 급격히 부식이 증가하였고 25년에 이르면 사이드실의 부식은 0.6~1.0mm까지 진전될 것으로 예측된다.

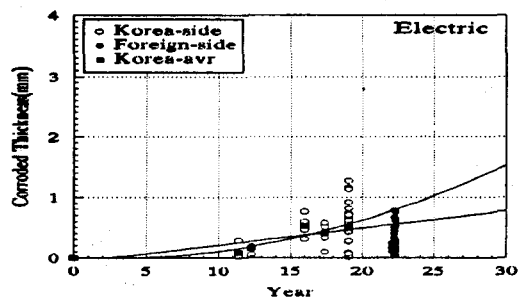


그림 2. 전동차 사이드실의 부식 측정결과

### 4. 구조해석

#### 4.1 신조차량

구조해석은 전동차 언더프레임의 취약 부위 파악 및 노후도에 따른 부재의 응력변화, 실차 시험 시 strain gage의 적정 부착위치를 파악하기 위해 수행되었다. 사용 S/W는 NISA II를

이용하였으며 해석 대상은 가장 중량이 큰 M<sup>1</sup>차량(1301호)으로 하였다.

Modeling은 차체의 길이 및 폭 방향으로 전체의 1/4을 대상으로 하여 모두 6691개의 Node와 6674개의 shell 요소를 사용하였고 주요 해석 부위는 차체 주요 골조인 언더프레임의 Center Sill, side sill, Cross Beam 및 Body Bolster이다.

도표 1. 해석 대상 차량의 주요 제원

항 목	제 원	비 고
구체 길이	19,500mm	
구체 높이	3,800mm	
구체 폭	3,120mm	
볼스터 중심간 간격	13,800mm	
차륜직경	860mm	
케간 거리	1435mm	

언더프레임 골조에 사용된 소재는 SS400강으로 도표 2는 SS400강의 기계적 성질을 나타내고 있다. 하중은 언더프레임의 윗면에 수직 방향 균일 분포하는 것으로 하였고 영·공차시 부과 하중은 다음과 같다.

- ① 구체 하중 = 14,650Kg
- ② 공차 중량 = 48,480Kg
- ③ 대차 중량 = 17,800Kg
- ④ 승객 정원 = 160명(좌석 54명, 입석 106명)
- ⑤ 설계 승객하중 = 25,000Kg
- ⑥ 수직하중 (공차 시) = ② - ③ = 30,680Kg
- ⑦ 수직하중 (영차 시) = ② - ③ + ⑤ = 55,680Kg

그림 3은 영차 하중(55,680 kg) 작용시 차체에 발생하는 응력 분포를 보여주고 있으며 그림 4는 하중조건에 따른 최대응력의 변화를 보여주고 있는데 모든 경우에서 최대응력은 보디볼스터와 센터 실이 교차하는 지점의 바닥 면에서 발생하였다. 영차 하중 작용시 이 부위에서 작용하는 응력은 15.76 kgf/mm<sup>2</sup>로 평가되었다. (그림 3, 5 참조).

도표 2. SS400강의 기계적 성질(JIS E4207[3])

기계적 성질	값	비고
인장강도( $\sigma_B$ )	41 Kg/mm <sup>2</sup>	
항복점( $\sigma_s$ )	24 Kg/mm <sup>2</sup>	
항복점에 대한 허용응력( $\sigma_o$ )	21 Kg/mm <sup>2</sup>	
탄성계수	21,000 Kg/mm <sup>2</sup>	
Poisson's 비	0.3	

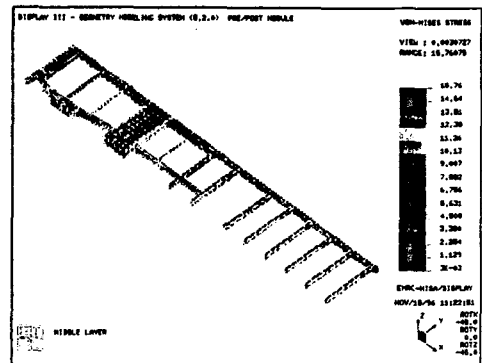


그림 3. 영차하중(55,680 Kg)이 작용할 때의 응력 분포

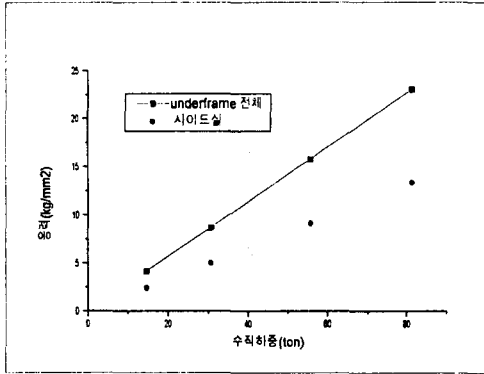


그림 4. 하중조건에 따른 underframe 최대응력

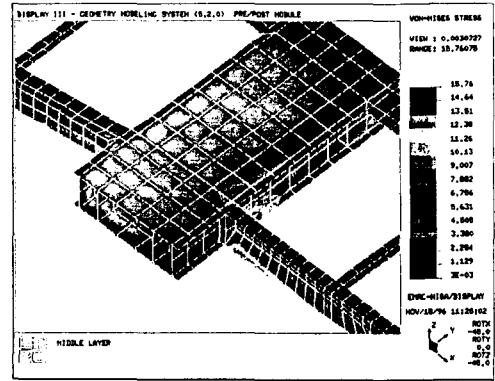


그림 5. 영차시 최대응력 발생부(센터실과 보디볼스터 교차부위)

보디볼스터의 경우 센터플레이트 취부위치 주위에서 최대 값을 보이다가 사이드 실 쪽으로 갈수록 감소하였으며 센터실의 경우는 센터실과 보디볼스터 연결부위에서 최대 값을 보이고 차체 중앙 방향으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 영차시 사이드실에 작용하는 응력의 최대 값은  $9.134\text{kgf/mm}^2$ 로 나타났다. 사이드실의 상대 변위의 경우 차체 중앙부위에서 최대 ( $5.57\text{mm}$ )를 보이고 있다. 신조차량의 경우는 모든 하중조건에서 센터실에서의 최대응력이 사이드실에서의 최대응력보다 큰 것으로 나타났다(도표 3 참조).

도표 3. 하중 조건에 따른 최대응력 및 사이드 실 상대 처짐량

구 분	Underframe 최대응력( $\text{kgf/mm}^2$ )	사이드 실 처짐량	비 고
구체하중 (14,650 kg)	4.15	1.47	
공차하중 (30,680 kg)	8.68	3.07	
영차하중 (55,680 kg)	15.76	5.57	

## 4.2 부식을 고려한 구조해석

그림 6은 부식을 고려하여 해석(영차 조건 시)한 것으로 제작후 20년을 경과한 차량에서 예상되는 부식을 감안하여 해석한 차체의 응력 분포이다. 사이드실에서의 부식만을 고려하였으므로 당연한 결과로 예상되었지만, 그림 7에서 나타나듯이 센터실보다 사이드실에서 작용하는 응력이 부식에 훨씬 민감함을 알 수 있었다.

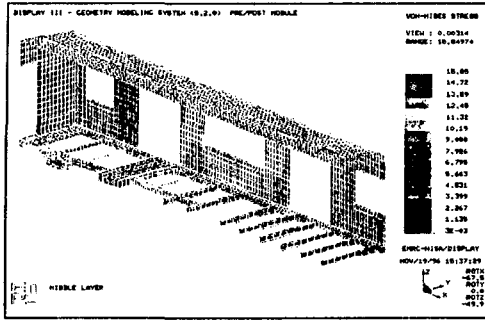


그림 6. 제작후 20년경과 전동차 차체의  
응력 분포(영차조건 시)

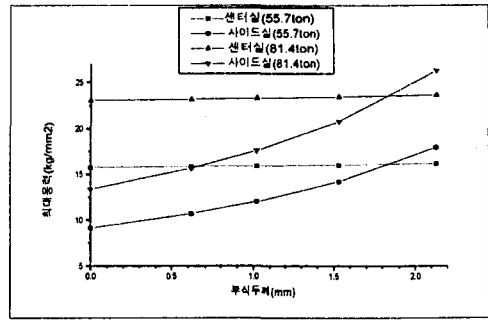


그림 7. 부식두께 변화에 의한 underframe  
최대응력 변화

도표 4. 부식두께 고려시 전동차 underframe 작용응력 및 사이드 실 처짐

구분		운용년수					비 고
		0	20	25	30	35	
영차하중시 (55,680Kg) 최대응력 (kgf/mm <sup>2</sup> )	센터실	15.76	15.85	15.92	16.02	16.17	
	사이드실	9.13	10.71	12.03	14.21	17.96	
설계하중시 사이드실 처짐량(mm)		5.57	5.64	5.70	5.78	5.90	
사이드실 부식두께(mm)		0.00	0.62	1.02	1.53	2.13	

## 5. 실차시험

### 5.1 게이지 취부위치

실제 운행과 동일한 조건하에서 경인선과 경수선에서 영차 및 공차 차량에 대한 실차시험을 실시하였다. 차종에 따라 4 ~ 6개정도 게이지를 취부 하였으며 M차는 영차조건으로 하고 나머지 차량은 공차 조건으로 하였으며 실차시험에 사용된 차량의 제원은 도표 5와 같다.

도표 5. 수도권 전동차 차량 제원

구 분		Tc	M	M'	비 고
차 호		1001	1201	1301	
자 중		33.4	42.1	46.1	ton
환 산 량 수		1.4	1.4	1.4	계산 차량길이/14
열차 중량	영	1.5	1.7	1.8	환산 (차량의 자중+하중)/40
	공	0.9	1.18	1.2	환산 차량의 자중/40
정 원		148	160	160	명

각 차종별로 응력을 측정하기 위하여 게이지를 취부한 위치는 그림 8 ~ 10과 같다.

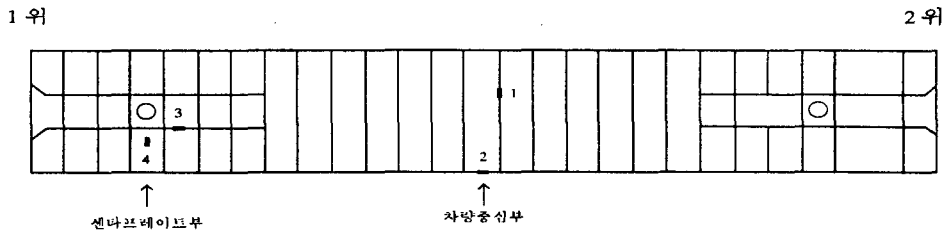


그림 8 게이지 부착위치(전동차 Tc)

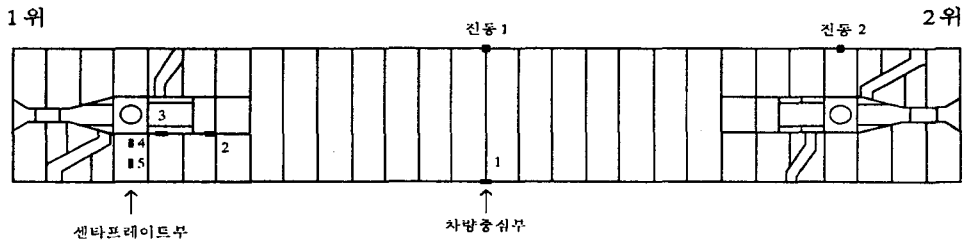


그림 9 게이지 부착위치(전동차 M)

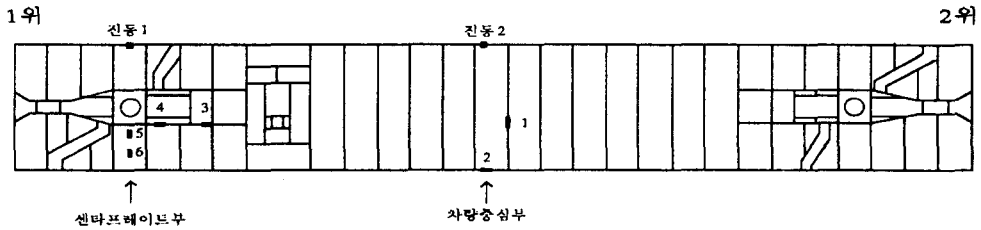


그림 10 게이지 부착위치(전동차 M')

## 5.2 정치시험

정치시험은 공차상태의 M차(1201호)에 대하여 하중을 적재하여(14.4 ton) 각 부위별 응력을 측정(도표 6) 하였다. 하중적재로 인한 응력 최대부위는 ch3으로 센타실과 보디볼스터가 교차하는 지점 부근에서 약  $4.0 \text{ kg/mm}^2$  정도의 응력이 작용하였다. 이를 출퇴근 시에 예상되는 최대하중 30톤의 경우로 환산하면 하중증가로 인한 응력은 약  $7.0 \sim 8.0 \text{ kg/mm}^2$  정도가 될 것으로 추정된다.

도표 6. 전동차의 ch 별 응력측정 결과(M)

Ch point	방 향	응력(kg/mm <sup>2</sup> )	구 분
1	X	0.913	
2	X	0.279	
3	X	3.972	
4	Y	1.812	
5	Y	1.580	

### 5.3 실차시험 결과 분석

실차시험 분석결과 Tc차의 경우에는 센타프레이트 부위의 보디볼스터와 센터실이 교차하는 지점에서 2.0 kg/mm<sup>2</sup> 내외의 응력이 작용하였으며 크로스 빔에서는 거의 작용하지 않았다. M차도 Tc차와 같은 지점에서 3.0 kg/mm<sup>2</sup> 내외의 하중이 작용하였으며 이 지점은 정치시험에서도 가장 높은 응력(약 4.0 kg/mm<sup>2</sup>)이 작용한 부위로 전동차 차체 중에서 가장 취약한 부위로 판단된다. M'차의 경우에도 타 차종과 유사한 부위인 센타프레이트 부위에서 2.0 ~ 3.0 kg/mm<sup>2</sup> 내외의 하중이 작용하였다.

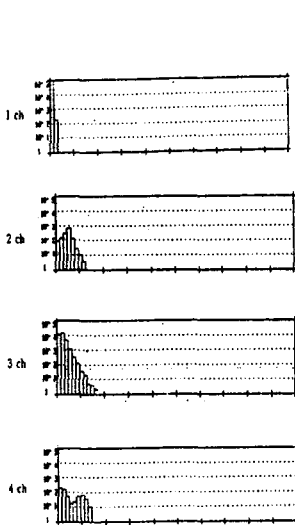


그림 11. Tc차의 동응력 발생 현황(공차조건)

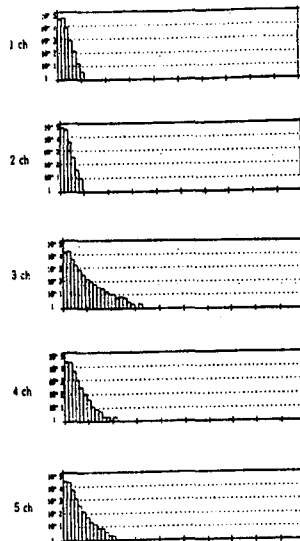


그림 12. M차의 동응력 발생 현황(영차조건)

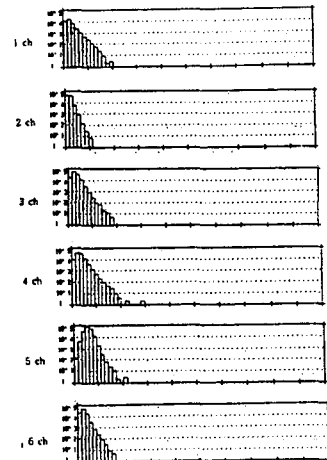


그림 13. M'차의 동응력 발생 현황(공차조건)

### 6. 결론

영차조건 시(55.68ton), 사이드실의 수직방향 최대 변위는 차체 중앙 부위에서 5.57mm가 발생하였는데 사이드실의 부식이 2.13mm(사용년수 35년) 진행되어도 수직방향 최대변위는

5.9mm에 불과해 부식이 처짐량에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 평가되었다. 차체에 작용하는 최대 응력(영차 조건시)은, 부식이 없을 경우, 보디볼스터와 센터실이 교차하는 부위 바닥 면에서  $15.76 \text{ kgf/mm}^2$ , 사이드실에서  $9.13 \text{ kgf/mm}^2$ 로 나타났으며 모든 하중조건에서 센터실에서의 최대응력이 사이드실에서의 최대응력보다 큰 것으로 나타났다. 부식이 2.13mm 진전될 경우는 각각  $16.17 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $17.96 \text{ kgf/mm}^2$ 로 나타나 사이드실에서의 응력이 더 큰 것으로 평가되어 부식은 센터실보다 사이드실에 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었으나 차량의 사용년수가 25년 내외인 점을 감안하면 부식이 차량의 강도에 미치는 영향은 그리 크지 않은 것으로 평가되었다.

M차에 대한 정치시험은 공차상태에서 14.4톤의 하중을 적재하여 측정하였는데 응력 최대부위인 센터실과 보디볼스터 교차하는 지점에서 약  $4.0 \text{ kg/mm}^2$  정도의 응력이 발생하였다. 이를 선형적으로 해석한다면 25톤의 하중을 적재할 경우 약  $6.94 \text{ kg/mm}^2$  정도가 되므로 M차와 유사한 구조를 지니는 M'차량의 영/공차시 구조해석 결과 응력 증가분  $7.08 \text{ kg/mm}^2$  와 유사하였다.

실차시험 결과, Tc, M, M'차 모두 센터프레이트 부위의 보디볼스터와 센터실이 교차하는 지점에서 가장 높은 동응력( $2.0\sim 3.0 \text{ kg/mm}^2$ )이 작용하였다. 이는 구조해석에서도 최대응력이 발생하는 부위로 나타났는데 최대 정응력을 기준으로 약 20~30% 수준으로 전동차 차체 중에서 가장 취약한 부위로 나타났다.

## 참고문헌

1. 철도청(2000), "철도청 통계연감"
2. Herbert H. Uhlig, R. Winston Revie(1991), "Corrosion and Corrosion Control", A wiley-Interscience Publication
3. JIS E 4207(1992), "Truck Frames for Rolling Stock-General Rules for Design", 일본규격협회