

구조해석 및 시험에 의한 경량화 차체 구조강도 평가

윤성철*(한국철도기술연구원), 김원경(한국철도기술연구원),
전창성(한국철도기술연구원), 김명룡(한국철도기술연구원)

Structural Strength Evaluation of a Carbody by Finite Element Analysis and Tests

S. C. Yoon(KRRI) , W. K. Kim(KRRI) , C. S. Jun(KRRI) , M. Y. Kim(KRRI)

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. Body structure consist of side frame, under frame, roof frame, end frame.

Both FEM analysis and load test are based on "Performance Test Standard for Electrical Multiple Unit, noticed by Ministry of Construction & Transportation, in 2000 " and reference code is JIS E 7105. The test results have been very safety and stable for design load conditions.

Key Words : Body structure (구조체), Finite Element Method (유한요소법), Stress analysis (응력해석), Load test (하중시험), Frequency (진동수)

1. 서 론

에너지와 재료의 절약을 위하여 차량구조물의 경량화에 대한 연구는 계속 되고 있다. 우리나라에서도 1980년 이후로 차량의 경량화를 계속 추진하고 있다. 도시철도차량의 구조체로는 재질에 있어서 강에서 스테인리스, 스테인리스에서 알루미늄 합금과 같은 가벼운 재질로 변화하고 있는 추세에 있다. 최근에는 알루미늄 합금이 적절한 강도를 가질 뿐만 아니라 가볍기 때문에 차세대 철도차량의 재질로서 각광을 받고 있다. 이러한 변천과정은 차량의 대형화와 아울러 경량화 측면을 동시에 만족시킬수 있도록 설계가 요구되어진다. 따라서 이러한 경량차량 구조물인 알루미늄 합금으로 제작된 도시철도차량 구조체에 대해 모델링을 하고 구조강도해석을 수행하였으며, 해석에 적용된 하중조건은 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준을 적용하였다. 하중시험은 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준에 의거하여 성능시험을 수행하였다. 본 연구의 도시철도차량 모델은 DC전원을 전차선을 통해 공급받는 통근형 직

류전동차이다. 길이 17,500 mm, 폭 2,750mm, 지붕높이 (레일상면 기준) 3,600 mm로서, 중형 전동차에 해당하는 차량이다. 구조체의 구조강도해석 및 하중시험을 통해 강도를 확인하여 구조체의 안전성을 평가하고자 하며 시험차량의 특성을 분석하고자 한다

2. 구조체의 구조해석

2.1 해석 모델

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

Table 1 Dimension of body structure

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

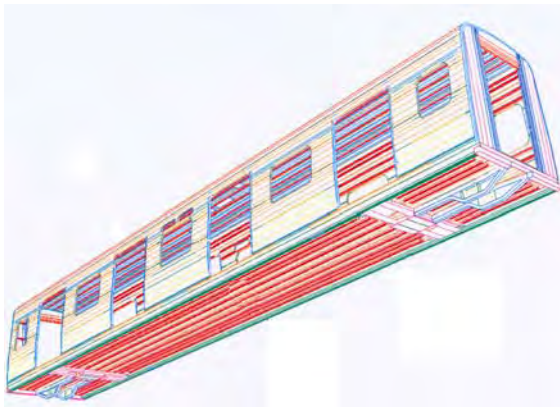


Fig. 1 Analysis model of body structure (full model)

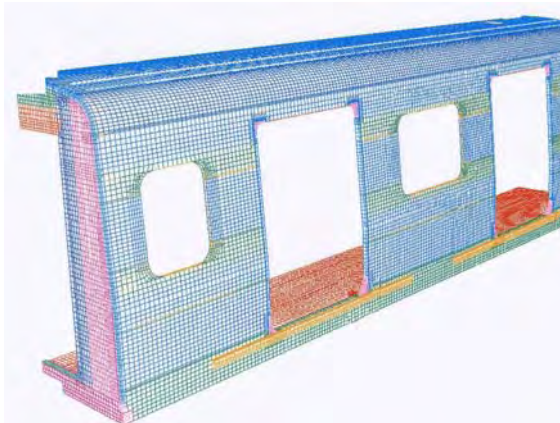


Fig. 2 Analysis model of body structure (quarter model)

2.2 하중조건

알루미늄 전동차(M-car)의 계산중량 및 해석을 위한 전장품의 중량은 Table 2, 3과 같다.

Table 2 Weight of body structure

항 목	중 량
공차 중량	32.3 ton
Bareframe 중량	6.3 ton(설계중량)

대차 중량	13 ton
최대승객하중	24 ton
동하중 계수	0.2g

Table 3 Weight of electric part for analysis

항 목	중 량
VVVF Box	500kg(1EA)
DBRe Box	305kg(1EA)
Air Conditioner	500kg(1EA)
Pantograph	180kg(1EA)

차체에 작용하는 하중은 성능시험의 구조체 하중 시험에 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 재료의 기계적 성질

Table 4 Mechanical property of body structure

재 질		허용응력
A6005A-T6	모재부	21.92 kgf/mm ²
	용접부	11.72 kgf/mm ²
A5083-0	모재부	16.21 kgf/mm ²
	용접부	15.09 kgf/mm ²

2.4 판정기준

구조체의 강도는 재료의 항복강도를 기준으로 하며, side sill 의 처짐량은 볼스타간 거리의 1/1,000 인 13.8 mm 이하이어야 한다. 또한 구조체의 상당굽힘강성은 0.6×10^{14} kgf·mm² 이상이어야 하며, 굽힘 고유진동수는 사양서의 기준인 10.0 Hz 이상이어야 한다. 이상의 판정기준을 정리하면 Table 5와 같다.

Table 5 Standard of decision

구분	판정 기준		비고
강도	응력	재질의 허용응력 이하	-도시철도차량의 성능시험 기준 -수직, 수평압축, 비틀림, 3점지지
강성	Side Sill의 최대처짐	13.8 mm 이하	-도시철도차량의 표준사양
	상당굽힘강성	0.6×10^{14} kgf·mm ² 이상	-제작구매사양서
고유진동수	굽힘 고유진동수	10.0 Hz 이상	-도시철도차량의 성능시험 기준

3. 구조체의 하중시험

구조체의 구조해석 결과로부터 고응력이 예상되는 부위와 형상변화 등에 의한 응력집중이 예상되는 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 응력을 측정하였으며 시험항목으로는 수직하중, 압축하중, 3점지지 시험, 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 체원 및 중량은 Table 1, 2, 하중조건은 위와 같으며 시험장비 설치도는 Fig. 3과 같다.

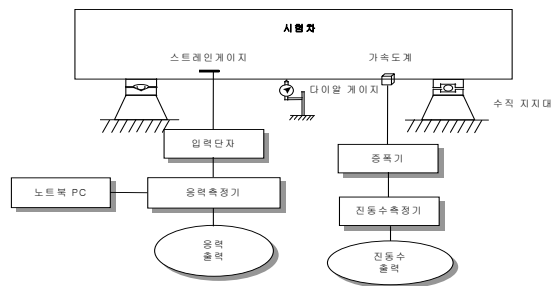


Fig. 3 Arrangement diagram of test equipment

4. 구조해석 및 하중시험 결과

4.1 구조해석 결과

각 하중조건별 응력 분포는 Fig. 4~10에서 보여주고 있다. 수직하중시 최대응력은 창문코너 하부 모재부에서 8.55 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인

A6005A-T6(21.92 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며, Fig. 4에 나타내었고, 두 번째 출입문 코너 상부 용접부의 응력은 6.88 kgf/mm²으로 A6005A-T6(11.72 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 5에 나타내었고, 첫 번째 출입문 코너 하부 용접부의 응력은 7.36 kgf/mm²으로 이부분의 재질인 A6005A-T6(11.72 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 6에 나타내었다.

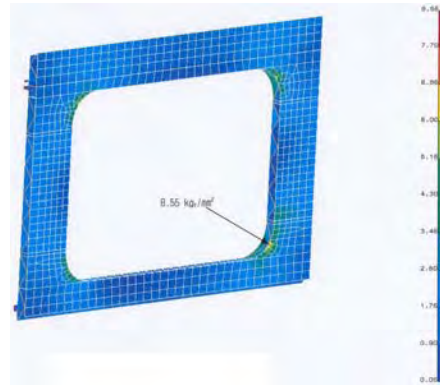


Fig. 4 Stress diagram of window corner

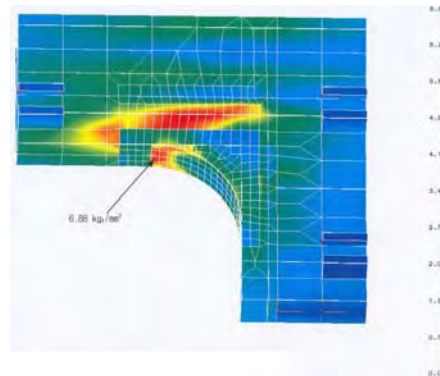


Fig. 5 Stress diagram of second door corner (top)

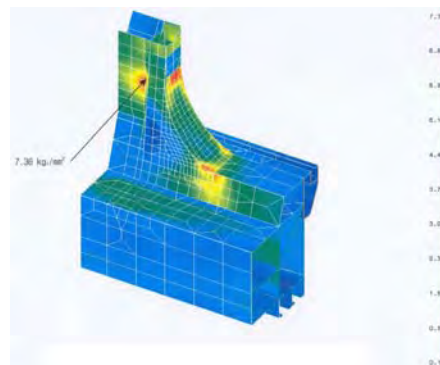


Fig. 6 Stress diagram of first door corner (bottom)

압축하중시 최대응력은 Fig. 7에서 보여주고 있으며, 커플러 포켓 용접부의 곡선부위에서 6.74 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 A6005A-T6(11.72 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있다. 3점 지지하중시 최대응력은 비지지점의 맞은편 재킹패드가 위치하는 sole bar의 모재부에서 6.83 kgf/mm²으로 이 부분 재질인 A6005A-T6(21.92 kgf/mm²)의 허용응력 이내이며 Fig. 8에 나타내었다. 두 번째 출입문 코너 상부 용접부의 응력은 5.69 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 A6005A-T6(11.72 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 9와 같다. 비틀림 하중시 최대응력은 두 번째 출입문 코너 상부 용접부에서 1.80 kgf/mm²으로 이부분 재질인 A6005A-T6(11.72 kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 10과 같다.

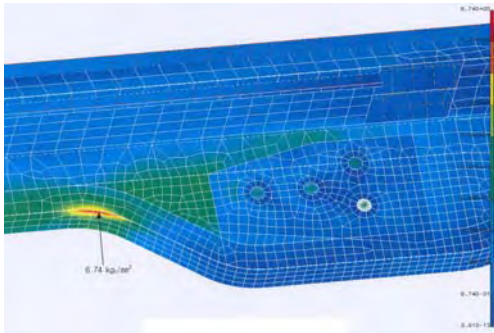


Fig. 7 Stress diagram of coupler pocket (compression load)

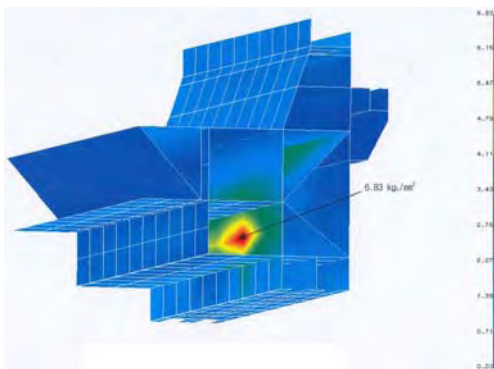


Fig. 8 Stress diagram of jacking pad (three point load)

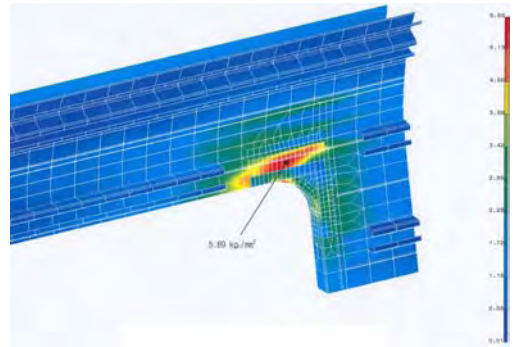


Fig. 9 Stress diagram of second door corner (top, three point load)

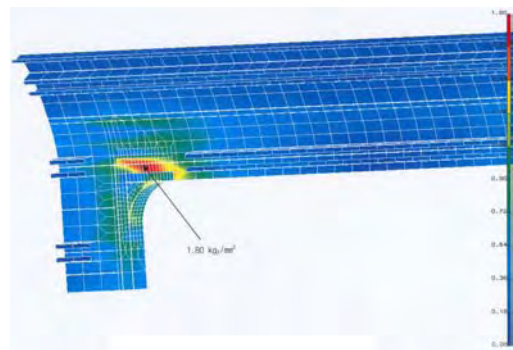


Fig. 10 Stress diagram of second door corner (top, twist load)

4.2 하중시험 결과

4.2.1 수직하중시험

수직 하중시험결과 측정 측정응력이 6.0 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 6과 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 7.28 kgf/mm² 이 발생하였다.

Table 6 Stress measure of vertical load

S/G No.	수직하중 부하 단계					재 질	허용응력 kgf/mm ²
	0 톤	13 톤	37 톤	47.6 톤	하중 제거		
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

4.2.2 압축하중시험

압축 하중시험결과 측정응력이 4.4 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 7과 같으며 이 결과들을 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 허용응력 이

내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 센터실의 커플러 포켓 부위(스트레인 게이지 No. 77)에서 -5.26 kgf/mm² 이 발생하였다.

Table 7 Stress measure of compression load

S/G No.	0 톤	수직 하중 :			하중 제거	재 질	허용응력 kgf/mm ²
		14.6 톤					
		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
78	-0.01	-2.41	-2.09	-4.58	0.06	A6005A-T6	11.72

4.2.3 3점지지시험

3점 지지시험결과 측정응력이 6.0 kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 8과 같으며 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 최대응력은 출입문 상부코너(스트레인 게이지 No. 19)에서 7.17 kgf/mm² 이 발생하였다.

Table 8 Stress measure of three point load

S/G No.	0 톤	수직 하중 :		0 톤	재 질	허용응력 kgf/mm ²
		18.9 톤				
		0 톤	3점지지상태			
19	-0.01	1.03	7.17	0.11	A6061P-T651	14.8
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 비틀림 하중시험

비틀림 하중시험결과 측정응력이 1.25 kg/mm² 이상인 측정점들은 Table 9와 같으며, 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다. 부가된 하중에서의 최대응력은 출입문 하부 코너(스트레인 게이지 No. 30)에서 1.83 kg/mm² 이 발생하였다.

Table 9 Stress measure of vertical load

S/G No.	0 톤	4 톤 ·	하중제거	재 질	허용응력 kgf/mm ²
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

4.2.5 처짐량 측정결과

Sole bar 의 상대 처짐량은 아래와 같다.

$$8.29 - (0.82 + 0.70)/2 = 7.53 \text{ mm}$$

위의결과로부터 수직하중과 압축하중은 차량의 좌우측거동이 대칭을 이루고 있음을 보여주고 있으며, 비틀림하중 및 3점지지하중은 경계조건상 좌우

대칭을 이루지 않고 있다. 수직하중시 Sole bar의 최대처짐은 7.53 mm로 판단기준인 12.4 mm이하인 것을 알 수 있다.

Table 10 Maximum displacement of Sole bar

게이지 번호	12	13 볼스타	14	15	16
수직 하중	-0.65	-0.82	-2.43	-5.83	-8.29
수평압 축하중	-0.60	-0.17	-0.30	-0.70	-1.29
3점 지지	-5.51	-2.67	-2.06	-0.60	-2.52
비틀림 하중	0.45	0.27	0.35	0.25	0.61

17 중앙	18	19	20	21 볼스타	22
-8.29	-7.96	-6.13	-3.05	-0.70	-0.84
-1.23	-1.31	-1.04	-0.65	-0.50	-0.75
-1.84	-1.15	-1.85	0.58	1.83	2.41
0.55	0.48	0.87	0.78	0.77	0.66

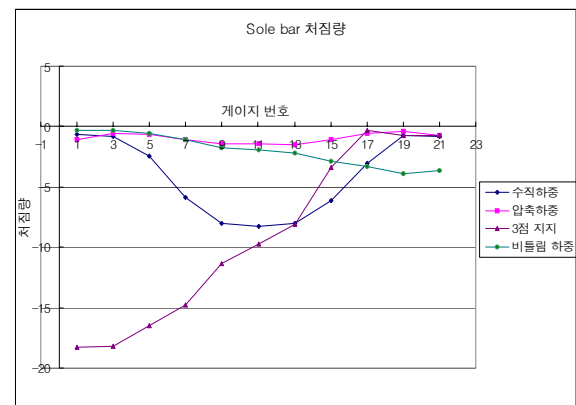


Fig. 11 Displacement diagram of each load condition

4.2.6 구조체의 상당굽힘 강성

구조체의 상당굽힘강성은

$$EI_{eq} = \frac{\omega \times l_2^2}{384 \times \delta} (5 \times l_2^2 - 24 \times l_1^2)$$

여기서 ω = 단위길이당등분포하중 = 47600/17500 = 2.72 kgf/mm

l_1 = 차단에서 대차중심까지거리 = 2550 mm

l_2 = 대차중심간거리 = 12400 mm

δ = sole bar의 처짐량 = 7.53 mm

따라서 본 구조체의 상당굽힘강성은 다음과 같

다.

$$EI_{eq} = 0.8862 \times 10^{14} \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

참고문헌

4.2.7 구조체의 굽힘고유진동수

굽힘고유진동수시험시 구조체는 수직지지대로 지지되며 언더프레임 상면 중앙에 유압실린더를 사용하여 순간적으로 하중을 가한 후 제거하여 구조체에 진동을 발생시키며 진동파형은 진동수기록계로 측정한다. 측정된 결과 굽힘고유진동수는 15.5 Hz가 발생하였다.

3. 결론

알루미늄차량의 구조체에 대하여 구조해석과 하중시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 구조해석결과 최대응력은 수직하중시 창문코너 하부 모재부에서 8.55 kgf/mm², 압축하중시 커플러 포켓 용접부의 곡선부위에서 6.74 kgf/mm², 3점 지지하중시 비지지점의 맞은편 재킹패드가 위치하는 sole bar의 모재부에서 6.83 kgf/mm², 비틀림 하중시 두 번째 출입문 코너 상부 용접부에서 1.80 kgf/mm²으로 나타났다.

2) 하중시험결과 최대응력은 수직하중시험시 출입문 하부 코너의 Side Structure 압출재에서(스트레인 게이지 No. 62, 63, 64) 7.28 kg/mm², 압축하중시험시 센터실의 커플러 포켓 부위에서(스트레인 게이지 No. 77) -5.26 kg/mm², 3점 지지시험시 출입문 상부 코너에서(스트레인게이지 No. 19) 7.17 kg/mm², 비틀림하중시험시 출입문 하부 코너에서 (스트레인 게이지 No. 30) 1.83 kg/mm² 이 발생하였다.

3) 구조해석결과 알루미늄 차량의 최대응력은 수직하중 작용시 창문코너 하부에서 발생하였고, 하중 시험결과 최대응력은 수직하중 작용시 출입문 하부 코너에서 발생됨을 알 수 있었으나 모두 허용응력 범위이내에 있어 강도적으로 안전하다고 할 수 있다.

4) 구조체의 수직 하중시험에서의 Sole bar의 최대처짐은 수직하중 47.6 톤 작용 시 7.53 mm으로 판정기준인 12.4 mm 이내에 있다.

또, 이에 따른 상당 굽힘강성은

$$EI_{eq} = 0.8862 \times 10^{14} \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2 \text{ 으로서}$$

이는 판정 기준인 $0.6 \times 10^{14} \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2$ 이상이므로 본 차량은 강성적인 측면에서 안전한 것으로 판단되었다.

5) 구조체의 굽힘 고유진동수는 약 15.5 Hz 이므로 판정기준인 10.0 Hz 이상을 만족시키고 있음을 알 수 있었다.

1. 건설교통부, “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”, 구조체 하중시험, 2000
2. 건설교통부, “도시철도차량 표준사양”, 1998
3. 표준전동차 개발을 위한 구조체의 강도해석, 권태수 외 3인, 한국철도학회추계학술대회논문집, 1998
4. Japanese Industrial Standards, “Test methods for static load of body structure of railway rolling stock”, E 7105, 1989