

# 유한요소해석 및 실험에 의한 알루미늄 차체구조강도 평가 Structural Strength Evaluation of an Aluminum alloy Carbody by Finite Element Analysis and Tests

황원주\*, 구병준\*\*, 김형진\*\*\*, 정종덕\*\*  
Hwang Won-Ju, Kim Yong-Ki, Chang Se-Gi, Goo Byeong-choon

## ABSTRACT

Structural analysis and tests were conducted for a carbody manufactured by aluminum alloy. The results were compared, and structural safety was evaluated based on the results. Aluminum carbody in Kwangju turned out safe in terms of structural strength.

Keywords : Aluminum alloy carbody (알루미늄 차체), Structural strength (구조강도), Finite element analysis (유한요소해석)

## 1. 서론

철도차량의 안전은 인명과 재산에 직접적으로 관련되어 있기 때문에 그 중요성이 널리 인식되어 왔으며, 최근에는 열차의 고속화를 위한 차체 경량설계의 필요성이 증가되고 있다. 우리나라에서도 1980년대 이후로 차량의 경량화를 계속 추진하고 있다. 특히 재질에 있어서 강에서 스테인레스, 스테인레스에서 알루미늄 합금과 같은 가벼운 재질로 변화하고 있는 추세에 있다.[1,2,3] 최근에는 알루미늄 합금이 적절한 강도를 가질 뿐만 아니라 가볍기 때문에 차세대 철도차량의 재질로서 각광받고 있다. 압출재는 일정한 크기로 압출되어 각 부재들이 용접이 되어 제작되어진다. 본 연구의 전동차 모델은 DC전원을 전차선을 통해 공급받 통근형 직류전동차이다. 길이 17,500 mm, 폭 2,750mm, 지붕높이(레일상면 기준) 3,600 mm로서, 중형 전동차에 해당하는 차량이다. 이러한 알루미늄 전동차 차체에 대해 모델링을 하고 구조강도해석을 수행하였으며 취약부위에 대한 응력값을 검토하여 평가를 하였다.

## 2. 차체 유한요소해석

### 2.1 모델링

알루미늄 차체의 전체에 대한 유한요소모델을 완성하였다. 모델링에는 상용유한요소 프로그램인 NISA II/DISPLAYIII을 사용하였으며, 본 프로그램에서 제공하는 쉘요소(Shell element)와 절점(node)을 사용하였다. 모델링에는 34290개의 절점과 55900개의 요소가 사용되었다.

### 2.2 재질의 기계적 성질과 판정기준

A6005A 합금은 우수한 압출성과 열처리에 의한 적절한 강도성능으로 인해 최근 철도차량에 적용되고 있는 재질이다. 광주전동차 차체의 재질인 알루미늄 합금 A6005A의 DIN 1748 독일규격에 근거하여 재질의 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

\* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 연구원, 비회원  
\*\* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 책임연구원, 정회원

Table 1. Mechanical properties (DIN1748)

재질	인장강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	항복강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kgf/mm <sup>2</sup> )	포아송비	밀도 (kgf/mm <sup>3</sup> )
A6005A	26.5	21.9	7.3×10 <sup>3</sup>	0.33	2.857×10 <sup>-8</sup>

여기서, 실제 강도의 기준에 적용하기 위하여 모재에서는 항복강도 21.9kg/mm<sup>2</sup>와 인장강도의 70%인 18.6kg/mm<sup>2</sup> 중에서 작은 값인 18.6kg/mm<sup>2</sup>를 기준값으로 하였고, 여기에 안전율 1.5를 적용한 12.4kg/mm<sup>2</sup>를 허용응력으로 하며 용접부의 허용응력은 모재의 70%인 8.7kg/mm<sup>2</sup>으로 하였다. 여기서, 알루미늄 합금의 강도기준은 Table 1과 같으나 안전을 위해 항복강도와 인장강도의 70%를 기준으로 안전율 1.5를 고려한 것이다. 강도판정기준을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Reference values for the decision of strength

해석종류	평가항목	평가기준	
수직/압축하중	강도	모재부	12.4 kg/mm <sup>2</sup>
		용접부	8.7 kg/mm <sup>2</sup>
	처짐량	대차간 중심길이의 1/1000이하	
비틀림 하중	강도	모재부	8.7 kg/mm <sup>2</sup>
		용접부	4.9 kg/mm <sup>2</sup>

### 2.3 하중조건

JIS E 7105(철도차량구조체 하중시험 방법)에 근거하여 수직, 압축, 비틀림 각각의 하중조건에 대해서 구조해석을 수행하였으며, Table 3은 각각의 경우에 대한 적용하중 값을 나타내었다.

Table 3. Values of loading used in analyses (\* JIS E 7105)

Case	수직하중 (ton)	비고
수직하중	47.6	(공차중량+승객하중-대차중량)×동하중계수 - 차체중량
압축하중	50(압축) 14.6(더미)	(공차중량-대차중량)+압축하중
비틀림하중	4ton • m	

### 2.4 해석결과

수직, 압축, 비틀림 하중에 대해 해석을 수행하고 결과를 정리하면 Table 4와 같다. 수직하중의 경우 최대응력은 등가응력으로 9.65 kg/mm<sup>2</sup>이 나왔으며, 그 위치는 두번째 출입문의 상부에서 발생하였고, 다음은 첫번째 출입문의 하부에서 4.9 kg/mm<sup>2</sup>의 응력이 발생하였다. 이는 허용응력 12.4 kg/mm<sup>2</sup>이내에 해당한다. 압축하중의 경우 최대응력은 센터실의 끝단에서 5.7 kg/mm<sup>2</sup>이 나왔으며 이는 허용응력이내에 들어있다. 비틀림하중의 경우 첫번째 출입문의 하단 모서리부위에서 1.7 kg/mm<sup>2</sup>의 응력이 발생하였으며 이 또한 허용응력 8.7 kg/mm<sup>2</sup>이내 들어있다. 이상으로 광주전동차는 강도상 안전한 것으로 판단된다.

Table 4. Analysis results

CASE		최대응력	허용치	발생부위
수직하중	최대응력	10.07	12.4	두번째 출입문 상부 모서리
	처짐량	8	13.8	
압축하중	최대응력	5.7	12.4	센터실 끝단
비틀림하중	최대응력	1.74	8.7	두번째 출입문 상부 모서리

수직하중 해석결과를 Fig. 1-2에 압축하중 해석결과를 Fig. 3에, 비틀림하중 해석결과를 Fig. 4에 나타내었다.

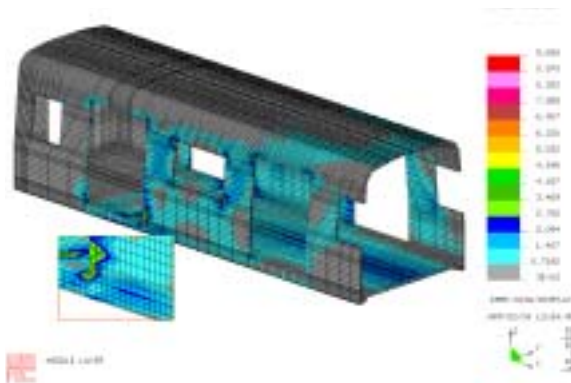


Fig. 1. Equivalent stress for vertical loading



Fig. 2. Amount of deflection for vertical loading

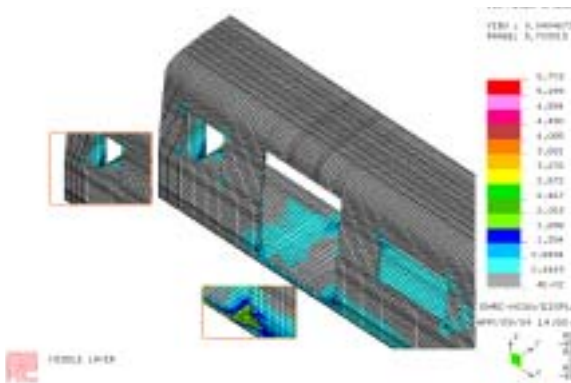


Fig. 3. Equivalent stress for compressive loading

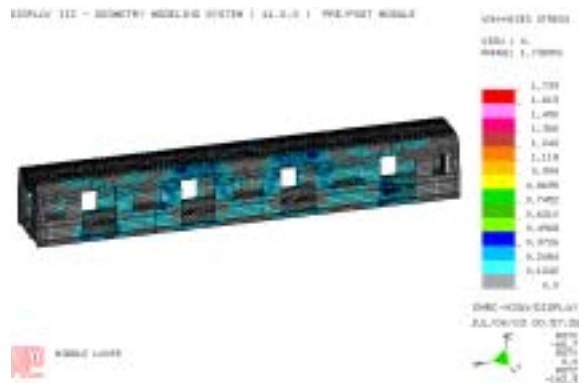


Fig. 4. Equivalent stress for torsion.

### 3. 차체 시험

해석을 통하여 응력집중부위를 확인하고 게이지를 부착하여 시험을 수행하였다. 하중시험에 적용된 하중조건은 광주시 도시철도 1호선 전동차 제작구매 사양서에 기초하여 도시 철도차량의 안전 기준에 관한 규칙 및 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준을 우선 적용하였다.

#### 3.1 수직하중 시험

$$\begin{aligned} \text{수직하중} &= [\text{공차중량} + \text{승객하중} - \text{대차중량}] \times \text{동하중계수} - \text{차체프레임 중량} \\ &= [32.3 + 24 - 6.52 \times 2] \times 1.2 - 6.3 = 45.7 \text{ 톤} \end{aligned}$$

여기서, 차체중량은 실측 중량을 이용하여 수정 한 후 수직하중을 최종결정한다. 시험 자체의 지지 및 하중 부하방법은 “성능시험 3. 마 구조체의 지지 방법 및 시험하중의 부하 방법”에 따라 차체의 에어 스프링 위치에 vertical support로 지지되며, 하중은 유압 실린더에 의해 차체 언더프레임 상면에 등분포 하중으로 부하한다.

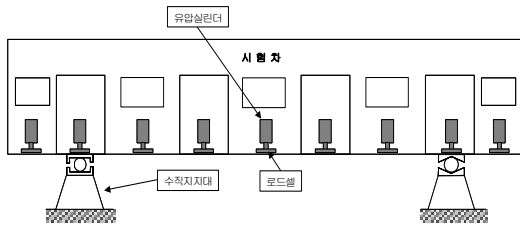


Fig. 5. Test method for vertical loading

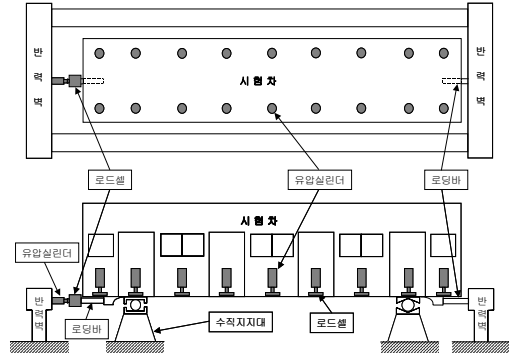


Fig. 6. Test method for compressive loading

### 3.2 압축하중 시험

차체 언더프레임 상면에 등분포로 수직하중을 부과한 후, 차체 한 쪽 커플러 중심 위치를 압축봉으로 고정한 상태에서 반대 쪽 커플러 중심위치에서 유압 장비를 이용하여 압축하중을 부가한다.

- ① 수직하중 : 14.6 톤
- ② 압축하중 : 50 톤

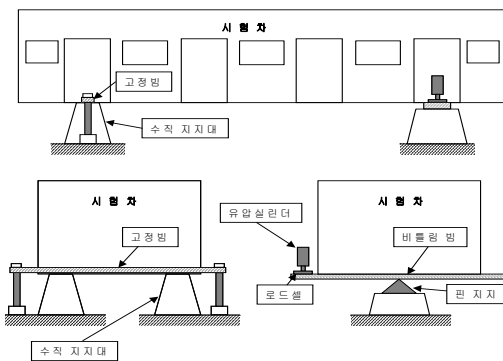


Fig. 7. Test method for torsional loading

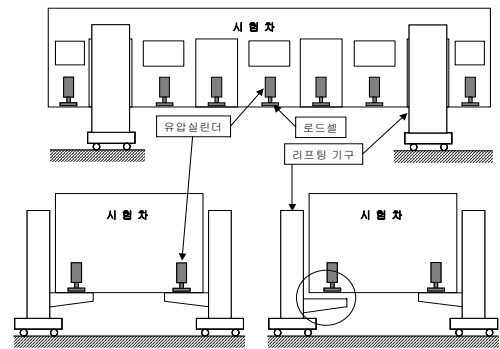


Fig. 8. Test method for 3 point support

### 3.3 비틀림 하중 시험

차체의 한쪽 볼스타는 수직지지대에 의해 지지되며, 반대쪽에는 차체의 rolling 이 가능하도록 볼스타 중앙에 비틀림 프레임을 넣어 지지 한후 지지점 부근에 하중을 부가하였다.

### 3.4 3점 지지하중 시험

차체는 볼스터 사이의 4개소의 리프팅 패드 위치에서 수직지지대로 지지되며 4개소중의 1개소는 유압실린더 또는 상하 이동식 지그에 의해 지지된 후 유압실린더를 사용하여 언더프레임 상면에 18.1 톤의 수직하중을 가한 후 1개소의 수직지지대를 강하시켜 3점 지지 상태를 유지하였다.

Table 5는 시험하중조건을 정리하여 나타낸 표이며 Fig. 5-8은 각 시험방법에 대해서 나타내고 있다. 각 하중조건에서 최대응력이 발생하는 부위의 게이지 위치와 번호를 Fig. 9-11에 나타내었다. Fig. 9는 수직하중 시 최대응력이 발생하는 2번째 출입문 부위의 게이지 부착위치와 번호를 나타내고 있으며, Fig. 10은 압축하중시 최대응력이 발생하는 센터실 부근의 게이지 부착위치와

번호를 나타내고 있다. Fig. 11은 비틀림하중시 최대응력이 발생하는 부위의 게이지 위치를 나타낸 것이다. Fig. 12-18에 각 게이지의 응력의 해석값을 나타내고 있다.

Table 5. Loading conditions

Case	하중크기 (ton)	하중작용방법
수직하중	47.6	언더프레임 상면에 부하
압축하중	50(압축) 14.6(더미)	압축하중 커플러 포켓에 부하
비틀림하중	4 ton · m	지지점 부근에 부하
3점 지지	14.6	언더프레임 상면에 부하

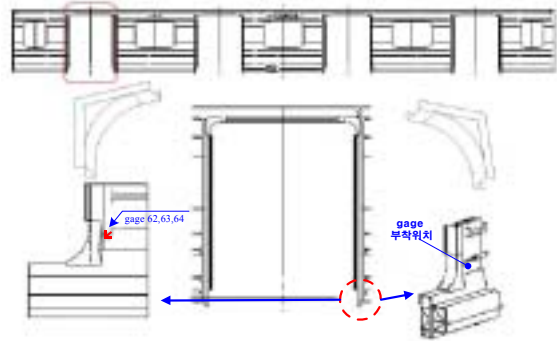


Fig. 9. Position of attached gauge (No.62,63,64)

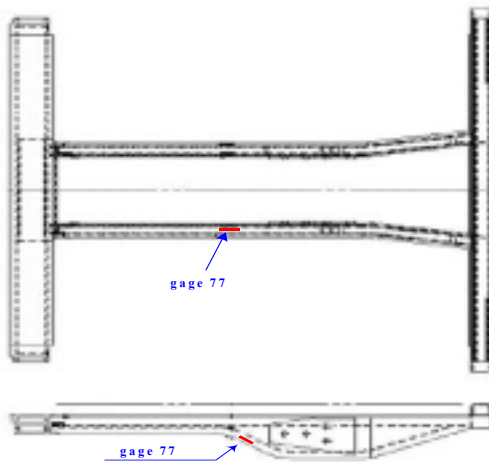


Fig. 10. Position of attached gauge (No. 77,78)

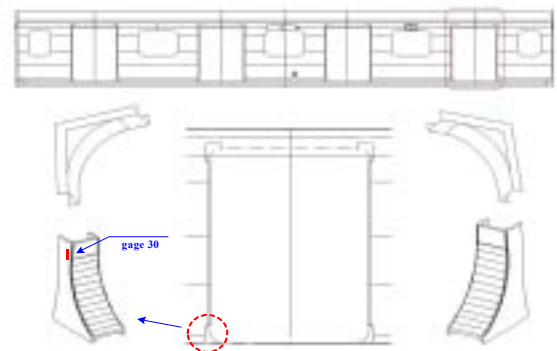


Fig. 11. Position of attached gauge (No.30)

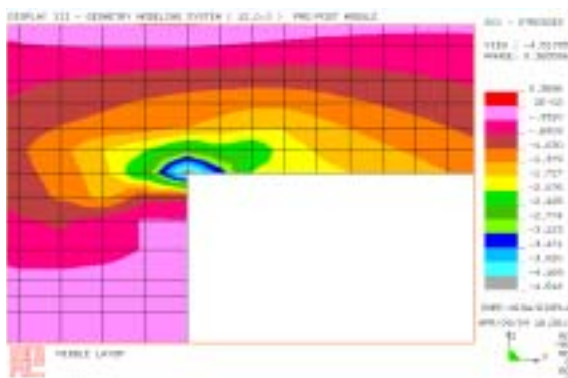


Fig. 12. Stress  $S_{xx}$  at #40, #42 gauges

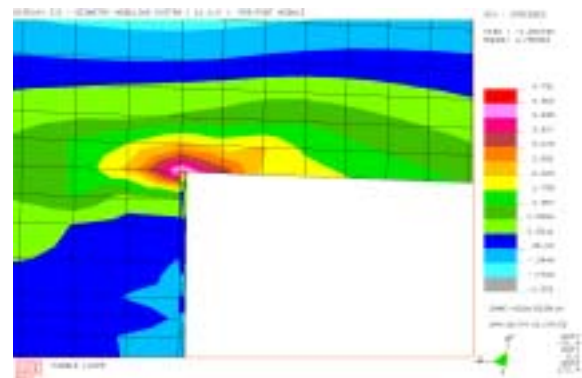


Fig. 13.  $S_{xx}$  at #19 gauge for vertical loading

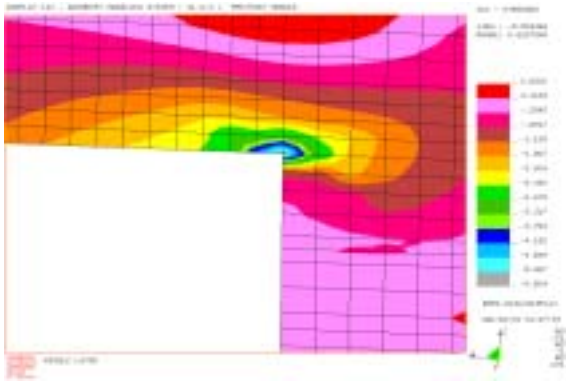


Fig. 14.  $S_{xx}$  at #21 gauge for vertical loading

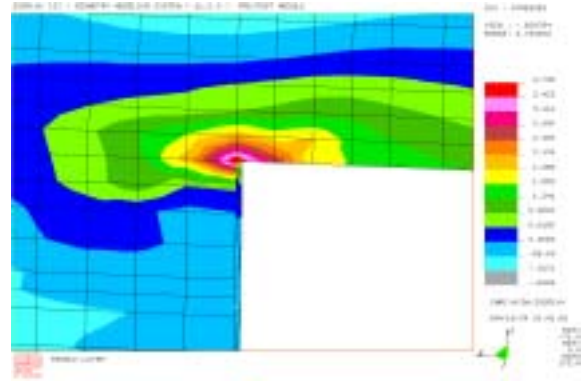


Fig. 15.  $S_{xx}$  at #25 gauge for vertical loading

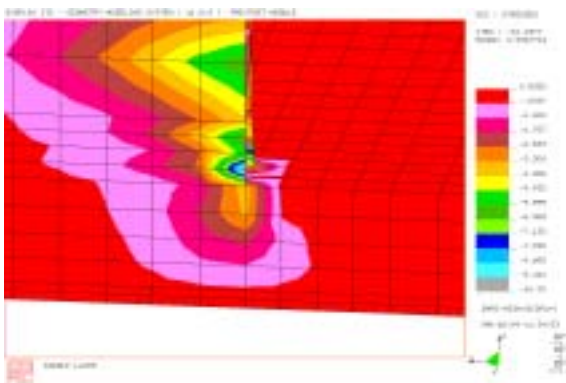


Fig. 16.  $S_{zz}$  at #30 gauge for vertical loading

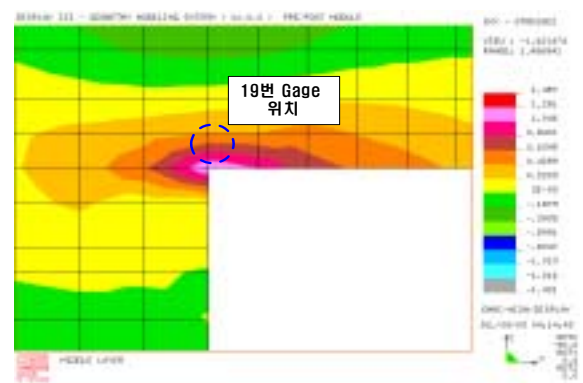


Fig. 17. Location of #19 gauge for torsional loading  $S_{xx}$

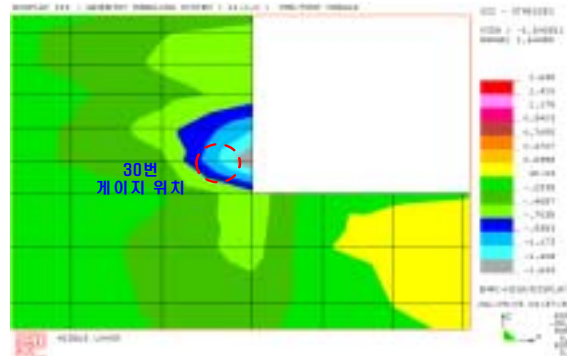


Fig. 18. Location of #30 gauge for torsional loading ( $S_{zz}$ )

#### 4. 결론

광주전동차의 구조해석을 수행하고 시험값과 비교하였다. 각각의 하중조건에서 최대발생부위에 대해 발생한 응력값을 해석치와 시험치로 나타내었다. 수직하중의 경우 해석값과 시험값의 오차가 1~12%정도였으며, 압축하중의 경우 6.8%, 비틀림하중의 경우 약 9%정도 되었다. Table 6에 이를 정리하여 나타내었다.

Table 6. Comparison between experimental and numerical stress results

CASE	Gage No.	측정치	해석치	오차
수직하중	40, 42	-2.85	-2.79	2.1 %
	49	3.02	2.944	2.5 %
	19	3.32	3.5	5 %
	21	-3.77	-4.1	8 %
	25	2.88	3.1	7 %
	30	-6.18	-7.1	12 %
	7	5.05	5.1	0.9 %
	14	4.75	4.64	2.3 %
압축하중	40, 42	-1.093	-1.08	1.3 %
	49	0.638	0.6459	1.2 %
	30	-1.56	-1.425	8.6 %
	21	-1.50	-1.38	8 %
	77	-4.69	-4.62	6.8 %
비틀림하중	19	-1.28	-1.43	10 %
	30	1.74	1.6	8 %

#### 후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) "표준전동차 개발을 위한 구조체의 강도해석", 권태수 외 3인, 한국철도학회논문집, 1998
- (2) "알루미늄 철도차량 차체설계 및 대형 알루미늄 압출재생산 기술개발", 서승일 외 4인, 한국철도학회논문집, 제2권, 제1호, p1~134
- (3) "도시철도표준사양" 건설교통부, 1998.2
- (4) "도시철도 차량의 성능시험에 관한 기준" 건설 교통부, 2000.5
- (5) 軌道車輛構体の荷重試験方法, JIS E 7105
- (6) "Wrought Aluminum and Aluminium Extruded Sections", Part1, DIN 1748, 1983
- (7) 이호용 외, "전동차용 대차프레임 구조해석 및 최적설계", KRRI, 2001
- (8) 박기준 외, "표준전동차 대차틀 피로강도평가(I)", 한국철도학회논문집, 제 3권, 제 3호, KSR 0007, pp170~177, 2000
- (9) JIS E 4207, "Truck frames for railway rolling stock-general rules for design"
- (10) Center for Engineering and Computer Technology, "NISA II User's manual", Vol. I, EMRC
- (11) Center for Engineering and Computer Technology, "Display III User's manual", Vol. I, EMRC
- (12) Center for Engineering and Computer Technology, "Display III User's manual", Vol. II, EMRC