

대차틀의 구조해석 및 하중시험에 관한 연구

A Study on the Structural Analysis and Loading Test of Bogie Frame

윤성철* · 김원경*

Sung-Cheol Yoon · Won-kyung Kim

Abstract

This paper describes the results of structural analysis and loading test of a bogie frame. The purpose of the analysis and test is to evaluate the safety and functionality of the bogie frame under maximum load. The bogie system consist of the bogie frame, suspensions, wheel-sets, a brake system and a transmission system. Of these components, the bogie frame is the major component subjected to the vehicle and passenger loads. The evaluation method used the JIS E 4207 specifications throughout the FEM analysis and static load test. The test results have shown the bogie frame to be safe and stable under design load conditions.

Keywords : Bogie frame(대차틀), Finite element method(유한요소법), Stress analysis(응력해석), Load test(하중시험)

1. 서론

철도차량용 주행장치인 대차는 차체의 하중을 지지하고, 승객 및 차량의 안전, 주행성능 및 승차감에 지대한 영향을 미치는 핵심 구조부품이다. 주행장치는 크게 대차틀, 차륜 및 차축, 1차 2차 현가장치, 제동장치, 전동기 및 동력전달 장치 등으로 구성되며, 대차의 구조물이라 할 수 있는 대차틀은 형상이 복잡하고 하중을 직접 지지할 뿐만 아니라 하중조건도 정적 및 동적하중이 복합적으로 작용하고 있어, 차체하중 및 승객하중에 의한 정하중과 곡선주행, 제동시 발생하는 준정적하중 및 불규칙한 선로와 차체, 주행장치, 윤축의 운동모드에 의한 동하중을 받고 있다[1]. 본 연구의 대차는 대구에서 운행예정인 중형전동차의 공기스프링식 볼스타레스 대차이며 궤간 1,435mm, 축간거리 2,100mm, 차륜경 860mm, 제동방식은 답면제동이다. 주행장치의 주요 구성품인 대차틀에 대하여 먼저 구조해석을 실시한 후 이를 바탕으로 하중시험을 통해 강도를 확인하여 대차의 구조 안정성을 평가하여 대차의 특성을 분석하고자 한다.

구조해석에 적용된 하중조건은 도시철도차량의 안전기준에 관한 규칙 및 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준을 우선 적용하여 수직하중, 비틀림하중, 전후하중, 좌우하중, 구동장치하중, 주전동기하중, 브레이크하중의 시험하중에 대한 구조해석을 수행하였으며, 하중시험은 구조해석 결과를 참고하여 각 하중조건에서 높은응력이 예상되는 부위에 스트레인게이지를 부착하여 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준에 의거하여 성능시험을 수행하였다[2, 3-5].

2. 대차의 구조해석

2.1 해석 모델

본 해석은 볼스타레스형 용접구조이며 1차 현가장치인 Roll rubber spring과 2차 현가장치인 Air spring으로 구성된 구동대차 프레임에 대하여 유한요소법을 이용하여 대차틀 강도평가를 시행하였다. 해석은 쉘요소와 솔리드 요소를 사용하였고 Roll rubber spring은 스프링요소를 사용하였다. 해석모델은 Fig. 1과 같다

† 책임저자: 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원
E-mail : scyoon1@krril.re.kr
TEL : (031)460-5512 FAX : (031)460-5509

* 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원

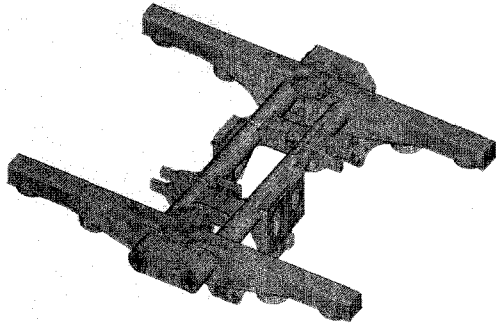


Fig. 1. 구동대차 프레임의 구조해석 모델

2.2 하중조건[3-6]

전동차용 구동대차의 계산중량은 Table 1과 같으며 수직 하중 등 각 시험하중은 Table 1로 부터 계산된다

대차틀에 작용하는 하중은 성능시험의 대차시험에 따라 다음과 같이 계산되며 Table 3의 하중조건[3]을 적용하여 구조해석을 수행하였다.

- 1) 수직하중 = 수직정하중 × 1.3g(대차당 수직정하중에 동적효과 0.3g를 고려한 하중)
- 2) 비틀림하중 = 수직정하중(레일의 불균형에 의해 발생하는 하중)
- 3) 전후하중 = 수직정하중 × 0.3g(주행중 전후진동에 의해 발생하는 하중)
- 4) 좌우하중 = 수직정하중 × 0.3g(주행중 좌우진동에 의해 발생하는 하중)

Table 1. 구동대차 프레임의 계산 중량

| No | 항 목 | 중 량 | 비 고 |
|----|---------|--------|-----------------|
| 1 | 공차 중량 | 32,800 | |
| 2 | 최대 승객하중 | 24,000 | |
| 3 | 대차 하중 | 13,614 | 2 sets |
| 4 | 스프링하 중량 | 6,852 | 2 sets |
| 5 | 대차당 하중 | 24,974 | [(1)+(2)-(4)]/2 |

Table 2. 대차 재질의 기계적 성질 (단위 : kgf/mm²)

| 재 질 | 항복 강도 | 인장 강도 | 피로강도 | | | 비 고 |
|---------|-------|-------|------|------|-----|---|
| | | | 모재부 | G/R부 | 용접부 | |
| SWS490A | 33 | 50 | 16 | 11 | 7 | side frame, transom support bracket, T/M bracket, stiffener |
| STKM18B | 32 | 50 | 14 | | | transom pipe |
| SS400 | 25 | 41 | 14 | | | stiffener, seat |

- 5) 구동장치하중 = 기어반력(차량의 구동시 휠과 레일 사이의 점착력에 의해 발생하는 하중)
- 6) 주전동기하중 = 주전동기 중량 + 주전동기 반력(주전동기의 상하진동에 의해 발생하는 하중)
- 7) 브레이크하중 = 제동반력 + 제동우력(제동에 의해 발생하는 하중)

2.3 판정기준

대차의 강도는 Table 2의 대차 각 부위별 재질의 허용응력 이하 이어야 하며 조합응력으로 환산하여 피로내구선도상의 위치에 따라 안전성을 평가한다.

2.4 대차의 구조해석 결과

각 하중조건별 응력분포는 Table 4와 같으며 Fig. 2~8에서 보여주고 있다. Table 4에서 보는 바와 같이 수직하중시 최대응력은 brake hanger bracket에서 13.0 kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SWS490A(33.0kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 2에 나타내었고, 비틀림하중시 최대응력은 brake hanger bracket에서 10.6kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SWS490A(33.0kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 3에 나타내었고, 전후하중시 최대응력은 Mono link bracket에서 10.6kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SWS490A(33.0kgf/

Table 3. 대차의 하중조건

| No. | 하중조건 | 하중크기 | 하중방향 | 비 고 |
|-----|--------|-------------|------------|-----------|
| 1 | 수직하중 | 24,974kg | 하방향 | 정하중(1.0g) |
| | | 32,466kg | 하방향 | 동하중(1.3g) |
| 2 | 비틀림하중 | 24,974kg | 하방향 | 2,3위 변위 |
| | | 24,974kg | 하방향 | 1,4위 변위 |
| 3 | 전후하중 | 7,492kg | 전진시 | |
| | | 7,492kg | 후진시 | |
| 4 | 좌우하중 | 7,492kg | 좌측방향 | |
| | | 7,492kg | 우측방향 | |
| 5 | 구동장치하중 | 3,837kg | 상하방향 (전진시) | |
| | | 3,837kg | 상하방향 (후진시) | |
| 6 | 주전동기하중 | 3,673kg | 하방향 (5.0g) | |
| | | 2,373kg | 상방향 (3.0g) | |
| 7 | 브레이크하중 | 3,405+936kg | 전진시 | |
| | | 3,405+936kg | 후진시 | |

mm)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 4에 나타내었고, 좌우하중시 최대응력은 transom support bracket에서 8.0kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SWS490A(33.0kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 5에 나타내었다. 구동장치하중시 최대응력은 gear hanger bracket에서 5.7kgf/mm²으로 이 부분의 재질

Table 4. 하중조건별 최대응력

| (단위 : kgf/mm ²) | | | | | |
|-----------------------------|--------|------|------|---------|---------------------|
| No. | 하중조건 | 최대응력 | 허용응력 | 재질 | 비고 |
| 1 | 수직동하중 | 13.0 | 33.0 | SWS490A | Brake hanger brk |
| 2 | 비틀림하중 | 10.6 | 33.0 | SWS490A | Brake hanger brk |
| 3 | 전후하중 | 10.6 | 33.0 | SWS490A | Mono link brk |
| 4 | 좌우하중 | 8.0 | 33.0 | SWS490A | Transom support brk |
| 5 | 구동장치하중 | 5.7 | 24.0 | SS400 | Gear hanger brk |
| 6 | 주전동기하중 | 8.6 | 33.0 | SWS490A | Traction motor brk |
| 7 | 브레이크하중 | 6.5 | 33.0 | SWS490A | Brake hanger brk |

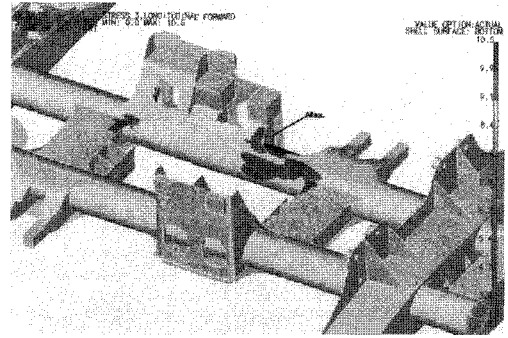


Fig. 4. 전후하중의 응력분포

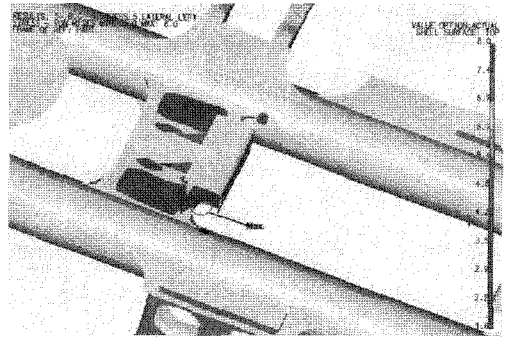


Fig. 5. 좌우하중의 응력분포

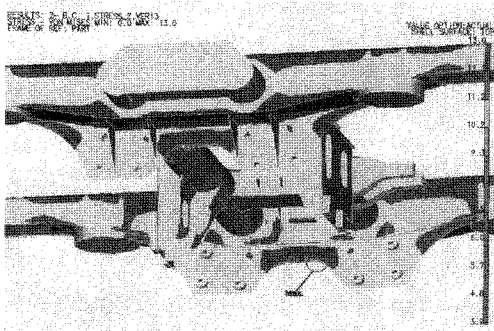


Fig. 2. 수직동하중의 응력분포

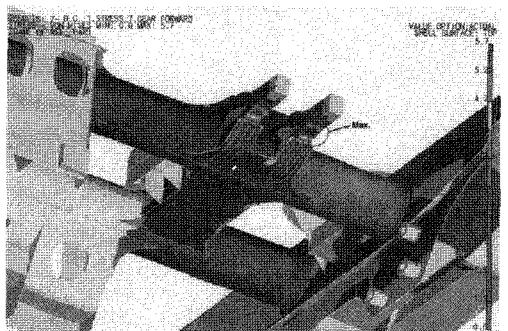


Fig. 6. 구동장치하중의 응력분포

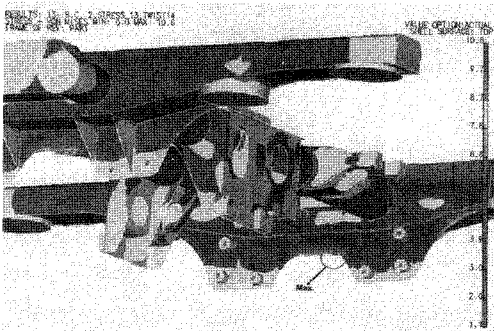


Fig. 3. 비틀림하중의 응력분포

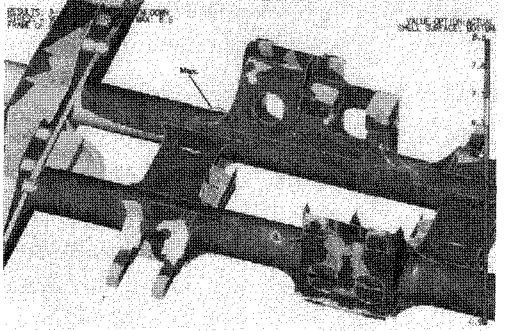


Fig. 7. 주전동기하중의 응력분포

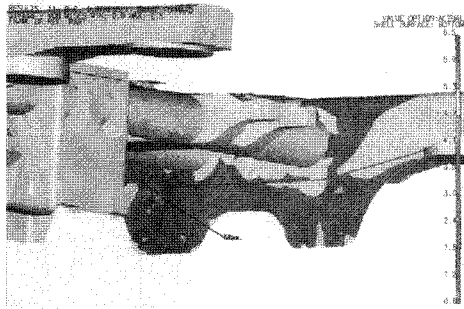


Fig. 8. 브레이크하중의 응력분포

인 SS400(24.0kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 6에 나타내었고, 주전동기하중시 최대응력은 Traction motor brk에서 8.6kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SWS490A(33.0kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 7에 나타내었고, 브레이크하중시 최대응력은 brake hanger bracket에서 6.5kgf/mm²으로 이 부분의 재질인 SWS490A(33.0kgf/mm²)의 허용응력 이내에 있으며 Fig. 8에 나타내었다.

3. 대차의 하중시험

대차들의 구조해석 결과를 참고하여 각 하중조건에서 높은응력이 예상되는 부위와 형상변화 등에 의한 응력집중이 예상되는 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 수직하중, 비틀림하중, 전후하중, 좌우하중, 구동장치하중, 주전동기하중, 브레이크하중을 측정하였다. 스트레인 게이지는 대차들의 대칭성을 고려하여 1/2 부분에 집중적으로 취부하였으며, 중량은 Table 1과 같으며 시험장비 설치도는 Fig. 9와 같다.

3.1 대차의 하중시험 결과[7]

3.1.1 수직하중

수직하중 시험결과 측정응력이 3.0kgf/mm²이상인 측정점

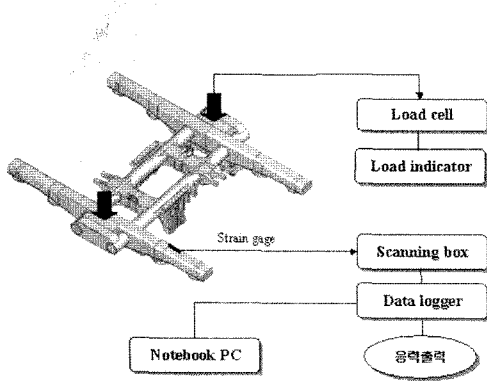


Fig. 9. 시험장비 설치도

들은 Table 5와 같다. 이 결과를 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 수직하중조건에서의 최대응력은 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 52)에서 발생하였으며, 그 값은 13.52kgf/mm²로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33kgf/mm²이내에 있다.

3.1.2 비틀림하중

비틀림 하중시험결과 측정응력이 4.2kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 6과 같다. 이 결과들을 살펴보면 전체적으로 응력 측정 결과값들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있으며 비틀림하중조건에서의 최대응력은 2,3위 시험시 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 52)에서 나타나고 있으며, 그 값은 11.66kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33kgf/mm² 이내에 있다.

3.1.3 전후하중

전후하중 시험결과 측정응력이 4.9kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 7과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

전후하중조건에서의 최대응력은 전진시험 시 Mono Link bracket(스트레인 게이지 No. 47)에서 나타나고 있으며, 그 값은 9.71kgf/mm² 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33 kgf/mm² 이내에 있다.

Table 5. 수직하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm²)

| S/G No. | 수직하중 부하 단계(kg) | | | | 비고 |
|---------|----------------|--------|--------|------|----|
| | 0 | 24,974 | 32,466 | 0 | |
| 52 | 0.20 | 10.93 | 13.52 | 0.30 | |
| 55 | 0.12 | 7.98 | 9.82 | 0.30 | |
| 56 | 0.16 | 7.56 | 9.60 | 0.34 | |
| 53 | 0.18 | 7.83 | 9.42 | 0.26 | |
| 59 | 0.14 | 2.90 | 3.06 | 0.36 | |

Table 6. 비틀림하중시험직하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm²)

| S/G No. | 비틀림하중 부하 단계(kg) | | | | 비고 |
|---------|-----------------|--------|--------|-------|----|
| | 0 | 18,731 | 24,974 | 0 | |
| 52 | 0.04 | 8.55 | 11.66 | -0.34 | |
| 55 | 0.08 | 7.12 | 9.48 | -0.10 | |
| 53 | 0.06 | 6.54 | 8.82 | -0.28 | |
| 56 | 0.12 | 6.51 | 8.69 | -0.12 | |
| 30 | -0.34 | 3.63 | 4.23 | 0.48 | |

3.1.4 좌우하중

좌우하중 시험결과 측정응력이 -6.5kgf/mm^2 이상인 측정점들은 Table 8과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

좌우하중조건에서의 최대응력은 좌하중시험시 transom support bracket(스트레인 게이지 No. 11)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -6.45kgf/mm^2 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33kgf/mm^2 이내에 있다.

3.1.5 구동장치하중

구동장치하중 시험결과 측정응력이 2.5kgf/mm^2 이상인 측정점들은 Table 9와 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

구동장치하중조건에서의 최대응력은 전진하중시험시 gear hanger bracket(스트레인 게이지 No. 50)에서 나타나고 있으며, 그 값은 6.93kgf/mm^2 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33kgf/mm^2 이내에 있다.

3.1.6 주전동기하중

주전동기하중시험결과 측정응력이 -8.1kgf/mm^2 이상인 측정점들은 Table 10과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

주전동기하중조건에서의 최대응력은 하방향 하중시험시

Table 7. 전후하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm^2)

| S/G No. | 전후하중 부하 단계(kg) | | | | 비고 |
|---------|----------------|-------|-------|------|----|
| | 0 | 5,619 | 7,492 | 0 | |
| 47 | 0.11 | 7.32 | 9.71 | 0.30 | |
| 30 | 0.62 | 6.72 | 8.45 | 0.50 | |
| 43 | 0.55 | 5.55 | 7.01 | 0.49 | |
| 46 | 0.57 | 4.00 | 5.06 | 0.53 | |
| 42 | 0.59 | 4.00 | 4.91 | 0.49 | |

Table 8. 좌우하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm^2)

| S/G No. | 좌우하중 부하 단계(kg) | | | | 비고 |
|---------|----------------|-------|-------|-------|----|
| | 0 | 5,619 | 7,492 | 0 | |
| 37 | -0.02 | -1.09 | -1.75 | 0.02 | |
| 44 | -0.12 | -1.05 | -1.78 | 0.06 | |
| 5 | -0.16 | -1.85 | -2.96 | 0.08 | |
| 6 | -0.24 | -1.69 | -3.04 | 0.66 | |
| 11 | -0.18 | -4.48 | -6.45 | -0.02 | |

transom support bracket(스트레인 게이지 No. 39)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -8.06kgf/mm^2 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33kgf/mm^2 이내에 있다.

3.1.7 브레이크하중

브레이크하중 시험결과 측정응력이 -4.9kgf/mm^2 이상인 측정점들은 Table 11과 같다. 이 결과들을 살펴보면 측정 응력들은 모두 허용응력 이내에 있음을 알 수 있다.

브레이크하중조건에서의 최대응력은 후진시험시 brake hanger bracket(스트레인 게이지 No. 57)에서 나타나고 있으며, 그 값은 -4.81kgf/mm^2 로서 사용재질(SWS490A)의 허용응력 33kgf/mm^2 이내에 있다.

Table 9. 구동장치하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm^2)

| S/G No. | 구동장치하중 부하 단계(kg) | | | | 비고 |
|---------|------------------|-------|-------|------|----|
| | 0 | 2,878 | 3,837 | 0 | |
| 50 | 0.10 | 5.15 | 6.93 | 0.10 | |
| 49 | 0.10 | 3.99 | 5.27 | 0.56 | |
| 35 | -0.02 | 2.89 | 3.51 | 0.56 | |
| 26 | -0.02 | 2.64 | 3.02 | 0.70 | |
| 8 | -0.08 | 2.30 | 2.52 | 0.86 | |

Table 10. 주전동기하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm^2)

| S/G No. | 주전동기하중 부하 단계(kg) | | | | 비고 |
|---------|------------------|-------|-------|-------|----|
| | 0 | 2,755 | 3,673 | 0 | |
| 48 | 0.32 | -3.88 | 4.58 | -0.20 | |
| 33 | 0.20 | -3.51 | 4.39 | -0.34 | |
| 13 | 0.04 | 3.71 | -5.11 | -0.56 | |
| 23 | -0.16 | 3.93 | -5.37 | -0.54 | |
| 39 | 0.08 | 5.35 | -8.06 | -0.52 | |

Table 11. 브레이크하중시험의 응력측정 결과

(단위 : kgf/mm^2)

| S/G No. | 브레이크하중 부하 단계(kg) | | | | 비고 |
|---------|------------------|-----------|-----------|-------|----|
| | 0 | 2,554+702 | 3,405+936 | 0 | |
| 58 | 0.63 | -1.08 | -1.90 | -0.42 | |
| 53 | 0.57 | -0.93 | -2.03 | -0.40 | |
| 52 | 0.57 | -1.41 | -2.76 | -0.40 | |
| 59 | 0.64 | -1.35 | -3.05 | -0.40 | |
| 57 | 0.64 | -3.11 | -4.81 | -0.57 | |

3.1.8 조합응력

시험결과 중에서 응력이 보다 큰 값을 나타내는 결과를 사용하여 조합응력 및 피로내구선도를 구하였다. 조합응력 계산식[6]에서 응력기호는 Table 3에 표시되어 있고 계산결과와 조합응력의 평균응력이 6.6kgf/mm² 이상인 측정점들과 응력진폭이 6.2kgf/mm² 이상인 측정점들은 Table 12, 13과 같으며 Fig. 10, 11에 피로내구선도를 나타내었다. 이 결과들을 살펴보면 조합응력에서 평균응력이 높게 나타나고 있는 부위는 제동시 air spring seat(스트레인게이지 No. 5, 그라인딩)에서 -12.22kgf/mm²이며 응력진폭이 높게 나타나고 있는

Table 12. 조합응력 결과(평균응력)

(단위 : kgf/mm²)

| S/G No. | 조합응력(구동) | | 조합응력(제동) | | 비 고 |
|---------|----------|-------|----------|-------|------|
| | 평균 응력 | 응력 진폭 | 평균 응력 | 응력 진폭 | |
| 5 | -11.89 | 4.28 | -12.22 | 4.27 | 그라인딩 |
| 6 | -11.57 | 4.92 | -11.99 | 4.53 | 그라인딩 |
| 53 | 10.40 | 2.15 | 7.68 | 2.03 | 모재 |
| 52 | 13.81 | 3.03 | 10.24 | 3.02 | 모재 |
| 55 | 10.47 | 3.20 | 10.48 | 3.01 | 모재 |

Table 13. 조합응력 결과(응력진폭)

(단위 : kgf/mm²)

| S/G No. | 조합응력(구동) | | 조합응력(제동) | | 비 고 |
|---------|----------|-------|----------|-------|-----|
| | 평균 응력 | 응력 진폭 | 평균 응력 | 응력 진폭 | |
| 47 | 0.75 | 9.68 | 0.89 | 9.50 | 모재 |
| 30 | 1.74 | 8.79 | 1.50 | 8.78 | 모재 |
| 43 | 0.09 | 8.51 | -0.25 | 8.45 | 모재 |
| 12 | 1.61 | 7.68 | 1.18 | 7.65 | 모재 |
| 21 | 1.70 | 7.58 | 1.19 | 7.59 | 모재 |

Table 14. 시험과 해석결과

(단위 : kgf/mm²)

| 구 분 | 시험결과 | 해석결과 | 시험/해석 | 위 치 |
|--------|-------|-------|-------|---------------------|
| 수직하중 | 13.52 | 13.00 | 1.04 | Brake hanger brk |
| 비틀림하중 | 11.66 | 10.60 | 1.10 | Brake hanger brk |
| 전후하중 | 9.71 | 10.60 | 0.92 | Mono link brk |
| 좌우하중 | -6.45 | 8.00 | 0.81 | Transom support brk |
| 구동장치하중 | 6.93 | 5.70 | 1.22 | Gear hanger brk |
| 주전동기하중 | -8.06 | 8.60 | 0.94 | Transom support brk |
| 브레이크하중 | -4.81 | 6.50 | 0.74 | Brake hanger brk |

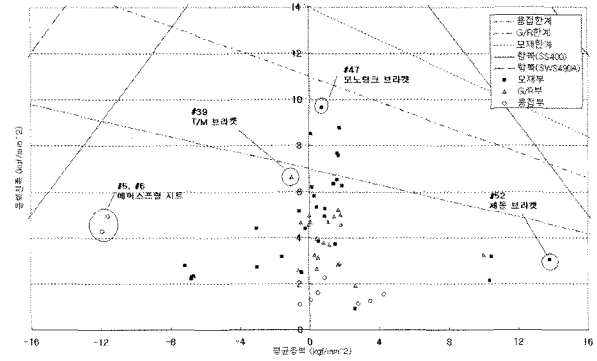


Fig. 10. 주행시의 피로내구선도

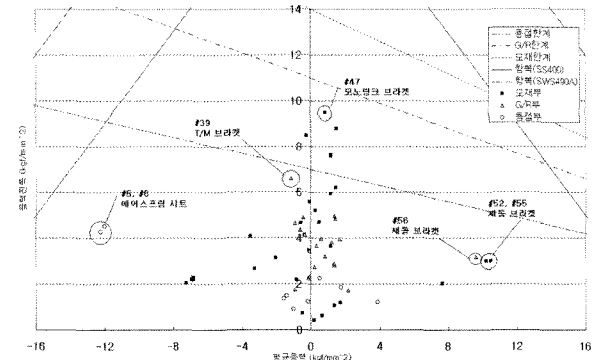


Fig. 11. 제동시의 피로내구선도

부위는 주행시 mono link bracket(스트레인게이지 No. 47, 모재)에서 9.68kgf/mm²이며 Fig. 10, 11과 같이 모두 각 부위별 안전역에 위치하고 있다

4. 시험과 해석결과 비교

구조해석과 하중시험의 하중조건별 최대응력을 비교한 결과 아래 Table 14와 같은 결과를 얻었다.

각각의 하중조건에서 수직하중, 비틀림하중, 전후하중, 주전동기하중의 경우 시험값과 해석값의 오차가 4~10% 정도이었으며, 좌우하중의 경우 19%, 구동장치하중의 경우 22%, 브레이크하중의 경우 26%정도로 나타났다. 오차가 큰 경우는 향후과제로서 보다 정확한 해석을 위해서 해석 메쉬를 작게 모델링하여 해석한 후 추가 검증이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

도시철도차량의 대차에 대하여 구조해석과 하중시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 구조해석결과와 하중시험결과를 비교하여 보면 각 하중 조건에서 최대응력 발생위치가 동일하며 각 재질의 허용응력 범위안에서 발생하였다.
- (2) 최대응력 발생부위는 수직하중시 Brake hanger brk의 하단 곡률부에서 13.52kgf/mm^2 , 비틀림하중시 Brake hanger brk의 하단 곡률부에서 11.66kgf/mm^2 으로 사용재질의 허용응력의 이내에 포함된다.
- (3) 조합응력계산결과 최대 평균응력은 제동시 airspring seat(그라인딩)에서 발생된 12.22kgf/mm^2 이며, 최대 응력 진폭은 주행시 link bracket(모재)의 연결부에서 발생된 9.68kgf/mm^2 이다.
- (4) 시험결과 모든 조합응력은 피로내구선도상의 안전역에 위치하고 있다.

이상의 결과로부터 대구시 전동차 대차들은 충분한 정적 강도와 피로강도를 갖고 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 박기준, 이호용 외 “표준전동차 대차틀 피로강도 평가”, 한국철도학회논문집 Vol.3, No.3, pp.170-176, 2000
2. 건설교통부, “도시철도차량 안전기준에 관한 규칙”, 주행장치의 안전기준, 2000
3. 건설교통부, “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”, 대차 하중 시험, 2000
4. Japanese Industrial Standards, “Truck Frames for Railway Rolling Stock-General Rules for Design”, E 4207, 1992
5. Japanese Industrial Standards, “Test Methods of Static Load for Truck Frames and Truck Bolsters of Railway Rolling Stock”, E 4208, 1988
6. 한국표준협회, “철도차량용 대차 스톡 설계 통칙”, R 9210, 1996
7. 윤성철, 김원경 외 “대차틀의 구조해석 및 하중시험에 관한 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.165-171, 2004