

와전류 제동장치 프레임 설계검토를 위한 강도해석 Static analysis of eddy current brake's frame for design evaluation

정경렬* · 김정택** · 이병현** · W. Mantsch***

Kyung-Ryul Chung, Kyung-Taek Kim, Byung-Hyun Lee and W. Mentsch

Key Words : 구조적 요구조건(Structural requirement), 와전류 제동장치(Eddy current brake system), 항복강도 (Yield stress) 피로강도(Fatigue stress), 제동하중 (Braking load)

ABSTRACT

In this paper, static analysis of eddy current brake's frame, which is one of key structural components of brake system for high speed train, was performed in order to evaluate the design by computer simulation. Calculation was carried out in general for the driving modes "braking" and "frame in upper position(brakes inactive)". Several yield stress load cases and fatigue load cases were analysed for each of the driving modes. The fatigue load resulting from the Multi Body System simulation was also taken into consideration. The simulation results shows that some of structural part should be improved for more increasing reliability of frame.

1. 서 론

선도기술개발사업(일명 G7사업)으로 수행중인 '고속 전철기술개발'사업에서 제작되어 시험운전중인 시제차량의 최고 속도는 350 km/h를 목표로 하고 있다. 이러한 고속차량에서 안전한 제동거리를 확보하기 위해서는 최고속도 300 km/h의 경부고속전철(KTX)보다 1.36배의 제동에너지를 분담해야 하고 고속영역에서의 짐착계수 저하라는 극한 상황을 극복해야만 한다. 따라서 기존의 제동장치, 즉 회생제동(전기제동), 디스크제동 및 담면제동(공기 또는 기계제동)만으로는 안전한 제동거리 확보가 어려운 이유로 철도선전국인 독일에서 가장 최근에 개발되어 운행되고 있는 ICE3나 프랑스의 AGV에는 기존의 제동장치 뿐만 아니라 와전류 제동장치(eddy current brake ; ECB)가 추가로 채택되어 있다.

개발중인 한국형 고속전철 시제차량(HSR 350X) 역시 와전류 제동장치를 전기제동장치로 채택하여 취부하고 있으며 본 논문에서는 국내 최초로 독자적으로 설계되어 제작된 와전류 제동장치의 프레임 설계검토를 위한 해석 결과를 요약하여 정리하였다. 와전류 제동장치의 기계적인 구성요소는 중량뿐만 아니라 고속주행중에서 강한 자력에 의해 발생하는 하중을 견뎌야 한다.

2. 시제차량 편성과 와전류 제동장치

2.1 시제차량 편성

시제차량은 7량 편성은 그림1 에서 나타내는 바와 같이 양끝에 2대의 동력차와 2대의 동력객차가 있으며 가운데 3대의 객차로 구성되어 있다. 시제차량 대차는 6개의 동력대차와 4개의 부수대차로 구성되며 와전류 제동장치는 각 부수대차에 부착되어 있다.¹¹⁾

2.2 와전류 제동장치의 개요

(1) 와전류 제동 시스템의 구성

* 한국생산기술연구원 시스템엔지니어링팀
E-mail : chungkr@kitech.re.kr
Tel : (041) 5898-251, Fax : (041) 5898-230
** 한국생산기술연구원 시스템엔지니어링팀
*** LogoMotive사 (독일)

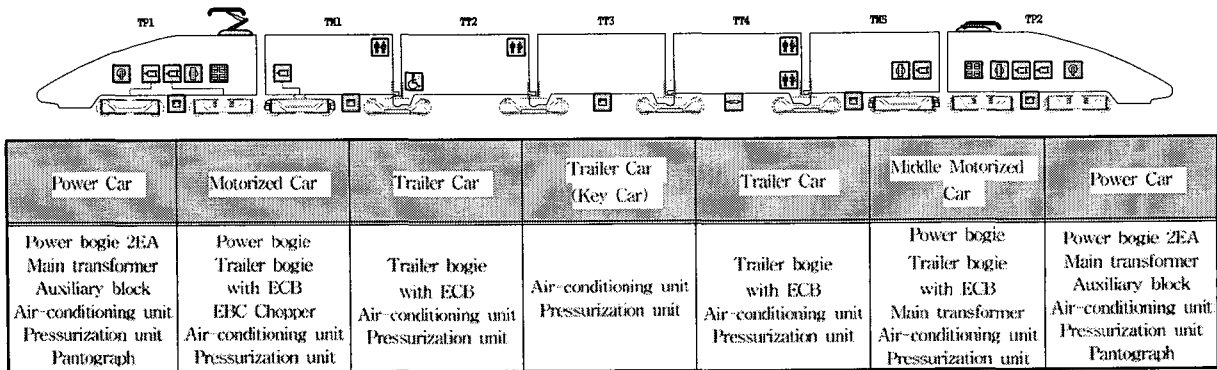


Fig.1 Formation of HSR 350X

와전류 제동 시스템은 제동력을 발생하는 전자석과 전자석에 전원을 공급하는 전원공급장치(ECB chopper), 제동에 대한 연산과 전원공급장치에 지령을 내리는 와전류 제동 제어장치(eddy current brake control unit ; ECCU)로 전기시스템을 구성하고, 전자석을 대차에 부착하고, 전자석과 레일의 간극을 유지하며 제동력과 흡입력을 대차로 전달하는 프레임(frame)과 프레임의 상하 방향 이동을 제어하는 공압시스템(pneumatic system)이 기계시스템을 구성하고 있다.^[2]

(2) 와전류 제동장치 기계시스템

와전류 제동은 레일간의 간극(gap)에 따라 제동력이 크게 변하기 때문에 간극이 일정하게 확보되도록 해야 한다. 이 때문에 대차 현가장치 하부에 취부하지 않으면 안되나 이 경우 현가하중량(Unsprung mass)이 커지고 고속대차에서는 주행안정성 면에서 문제가 발생한다. 따라서 주행중에는 현가장치 위에 위치시키고 제동시에만 하강하여 현가장치 아래에 취부될 수 있도록 설계되어 있다.^[3]

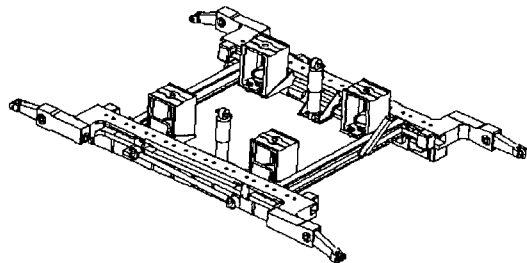


Fig.2 ECB frame layout

와전류 제동장치 프레임에서 대차와 물리적으로 연결된 부분은 링크부(link part), 스톱퍼부(stopper part), 실

린더부(cylinder part), 댐퍼(damper)가 있다. 제동 완료시 와전류 제동 프레임은 실린더부에 의해 대차 프레임에 고정되고, 제동 인가시에는 하강하여 스톱퍼와 링크파트에 의해 고정된다. 이때 수직방향의 힘과 좌우 방향의 힘은 스톱퍼에 의해 구속되고, 주축방향의 힘, 즉 제동력은 링크부에 의해 대차에 전달된다. 그리고 댐퍼는 프레임에 작용하는 진동을 흡수하며, 스톱퍼와 와전류 제동 프레임에 미치는 충격을 최소화하고 대차에서 올라오는 시스템의 공진현상을 방지한다. 와전류 제동 프레임의 기본사양은 표 1과 같다.^[4]

Table.1 Specification of ECB frame

| Location | Under every trailer bogie | |
|---------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|
| | length | 3000 mm |
| Size | width | 1885 mm |
| | height | 450 mm |
| Mass | 1100 kg | |
| Characteristic of ECB structure | Natural frequency (bending mode) | 17 ~ 20 Hz |
| | Damping coefficient | 100 kNs/m * 2EA |
| Operation speed | 80 km/h (from 150 km/h the current is reduced) | |
| Air gap | 7 mm | |

3. 강도해석 모델 및 조건

3.1 해석모델

해석모델은 3차원 모델로 구성하였으며 프레임은 사면체 요소(tetrahedral element)로 모델링 하였으며 전자석 및 대차 연결부는 빔요소(beam element)로 모델링 하였다. 해석모델에 적용된 주요 물성치는 독일 DIN 규격을 참조하였다.^{[3][6]}

3.2 해석조건

정하중 해석과 피로하중 해석을 수행하였다. 정하중 해석의 경우 와전류제동을 인가한 경우와 인가하지 않은 각각의 경우마다 2개의 다른 하중조건을 적용하여 총 4가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

피로해석의 경우도 기본적으로 정하중 해석과 같은 4개의 경우에 대한 해석을 수행하였으며, 여기에 별도로 다물체 동역학 해석 (Multi Body System simulation :MBS)결과를 피로해석의 하중조건으로 사용한 6개의 경우에 대한 해석을 수행하였다.^[7] 6개의 해석조건은 속도별로 시제차량 최고 운행속도인 시속 350 km/h 영역의 경우 4개 경우와 저속 운행속도 시속 150km/h 영역에서 2개의 경우로 구분되어 해석이 수행되었다. 표 2의 해석조건의 경우 "KITECH"은 한국생산기술연구원(이하 : 생기원)에서 제공한 하중조건으로 고속전철 시제차량 기본사양과 와전류 제동장치 제작사의 권장 하중조건을 기본으로 구성되어 있으며 "GM/RT 2100"은 독일의 철도차량 사양 조건을 나타낸다.^{[8][9]} 표 3은 정하중 해석과 피로하중 해석시의 각 조건별로 적용된 하중조건을 나타낸다. 일반적으로 수직하중의 경우 GM/RT 2100이 KITECH 제공 하중보다 훨씬더 큰 값을 사용하는 것을 볼 수 있으며 조건 S1, S2, F1, F2에 적용한 제동력(F_{brake})와 흡입력($F_{attract}$)은 차량이 속도 150 km/h로 주행할 경우 전자석 1개당 발생하는 제동력과 흡입력의 계산값이다.

표 4는 다물체 동역학 해석 결과를 피로해석의 하중조건으로 사용한 경우로 두 개의 궤도조건이 적용된다. "ERRI" 궤도조건은 유럽 Gottingen-Hanover 구간에서의 궤도 데이터이며 "KITECH" 궤도조건은 경부고속전철 시험궤도에서 계측한 궤도조건으로 실제로 시제차량이 운행할 구간의 궤도 조건이다. (그림4)

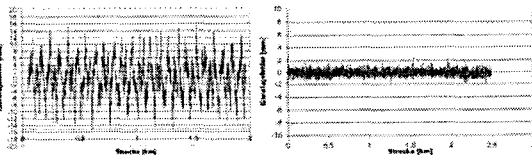


Fig.4 The comparison of track irregularities (vertical level) of ERRI (Left) & KTX Line (right)

4. 해석결과

모든 해석결과는 각각의 해석 조건별, 구성부품별로 발생하는 응력을 폰미세스(von Mises equivalent stress) 등가응력으로 환산하여 표현하였다.

Table 2 Analysis case of static & fatigue analysis

| Analysis | Case | Load condition | Braking condition |
|----------|------|----------------|-------------------|
| Static | S1 | KITECH | Braking |
| | S2 | GM/RT 2100 | Braking |
| | S3 | KITECH | without braking |
| | S4 | GM/RT 2100 | without braking |
| Fatigue | F1 | KITECH | Braking |
| | F2 | GM/RT 2100 | Braking |
| | F3 | KITECH | without braking |
| | F4 | GM/RT 2100 | without braking |

Table 3 Load condition of static & fatigue analysis

| Case | KITECH | Case | GM/RT 2100 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S1 | ax = 5g ay = 10g az = 25g(+1g) $F_{brake} = 2111\text{ N}$ $F_{attract} = 982\text{ N}$ Safety: 1.15 | S2 | ax = 5g ay = 5g az = 50g(+1g) $F_{brake} = 2111\text{ N}$ $F_{attract} = 982\text{ N}$ Safety: 1.0 |
| S3 | ax = 2.5g ay = 5g az = 10g(+1g) Safety: 1.15 | S4 | ax = 5g ay = 3g az = 20g(+1g) Safety: 1.0 |
| F1 | ax = ±5g ay = ±10g az = ±5g(+1g) $F_{brake} = 1547\text{ N}$ $F_{attract} = 726\text{ N}$ Safety: 1.1 | F2 | ax = ±3g ay = ±3g az = ±25g(+1g) $F_{brake} = 1547\text{ N}$ $F_{attract} = 726\text{ N}$ Safety: 1.0 |
| F3 | ax = ±2.5g ay = ±2.5g az = ±2.5g(+1g) Safety: 1.1 | F4 | ax = ±0.5g ay = ±1.5g az = ±10g(+1g) Safety: 1.0 |

Table 4 Fatigue load case by MBS simulation

| Case | Track condition | Velocity | Braking condition |
|------|-----------------|----------|-------------------|
| D1 | ERRI-Track | 350 km/h | Braking |
| D2 | ERRI-Track | 350 km/h | without braking |
| D3 | ERRI-Track | 150 km/h | Braking |
| D4 | KITECH-Track | 350 km/h | Braking |
| D5 | KITECH-Track | 350 km/h | without braking |
| D6 | KITECH-Track | 150 km/h | Braking |

4.1 정하중 해석 결과

(1) 조건 S1 : 제동시-생기원 하중적용

메인 프레임의 경우 부분적으로 항복응력을 초과하는 부위가 발생하였다. 압 베어링의 하우징 부분의 곡률부와 램프브라켓 주변의 곡률부가 강도 취약부로 나타났다. 최대응력은 800 N/mm²로서 압 베어링의 하우징 부

분의 곡률부 (그림 4)에서 발생하였으며 크로스바의 경우 I형 단면과 플랜지(flange)가 만나는 접촉부에서 최대 응력 970 N/mm²가 발생하였다. 암베어링의 경우 양 끝단의 구멍 주위가, 서포트 블록의 경우에는 구멍 주위와 베어링 인접부가 강도취약부로 나타났다. (그림5)

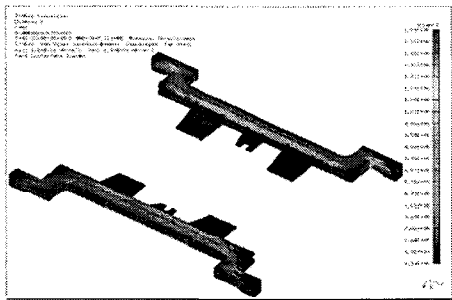


Fig.5 Stress in both longitudinal girder of frame

2) 조건 S2 : 제동시-GM/RT 2100 하중적용

조건 S2는 조건 S1에 비하여 상대적으로 많은 부분에서 항복응력을 초과하는 것으로 나타났으며 이는 적용한 하중조건 GM/RE 2100이 생기원 하중조건보다 상대적으로 높기 때문인 것으로 판단된다. 최대응력 발생부위는 조건 S1과 비슷한 경향을 나타내며 메인 프레임(그림 6)과 크로스바의 경우 각각 1000 N/mm², 1800 N/mm²의 높은 응력값을 나타내었다. 암베어링의 경우 외형 곡률부에서 600 N/mm², 서포트 블록의 경우 베어링 인접부에서 1900 N/mm²의 높은 응력이 발생하는 것으로 나타났다.

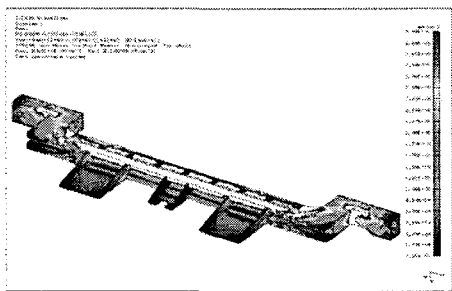


Fig.6 Longitudinal girder left, stress location lower than R_{0.2} (345 N/mm²): upper side

(3) 조건 S3 : 제동완해시-생기원 하중적용

제동 완해시에는 앞선 조건 S1, S2에 비하여 부과된 하중이 상대적으로 적기 때문에 전반적으로 낮은 응력분포를 보여준다. 암 베어링의 하우징 부분의 곡률부와 댄퍼브라켓 주변의 곡률부에서의 응력값은 100 ~ 170

N/mm² 사이의 낮은 응력값을 나타내었다. 하지만 크로스바의 경우에는 최대응력이 480 N/mm²로 나타나 항복응력인 300 N/mm²를 여전히 초과하는 것으로 나타났다. 암베어링과 서포트 블록의 경우에는 재동이 인가되지 않았으므로 특별히 고려할 만한 높은 응력은 나타나지 않았다.

(4) 조건 S4 : 제동완해시-GM/RT 2100 하중적용

조건 4의 경우에는 제동 완해시임에도 불구하고 높은 수직하중조건 (Z-load : 21g)이 적용되어 메인 프레임에 높은 응력값을 나타내었다. 크로스바의 경우에도 886 N/mm²의 높은 응력이 I형 단면과 플랜지(flange)가 만나는 접촉부 나타났다. 암베어링과 서포트 블록은 조건 S3과 같은 이유로 특별히 고려할 만한 높은 응력은 나타나지 않았다

4.2 피로하중 해석 결과

(1) 조건 F1 : 제동시-생기원 하중적용

정적 해석시 강도 취약부로 나타났던 부분들이 피로해석시에도 문제가 있는 것으로 나타났다. 메인 프레임의 경우 안전계수 1.5 이하인 부분이 많이 나타났으며, 일부는 안전계수 1.1, 그리고 1.0 이하인 부분도 있는 것으로 나타났다. 크로스바의 경우 안전계수 1.1 이하인 부분이 많이 있는 것으로 나타났으며 최소 안전계수는 0.95였다. 암 베어링의 경우 중간의 구멍 주위에 안전계수 1.5 이하인 부분이 상대적으로 많은 것으로 나타났으며 최소 안전계수는 0.7로 나타났다. 서포트 블록의 경우 역시 안전계수 1.5 이하인 부분들이 상대적으로 많았으며 최소 안전계수는 0.3으로 나타났다. (그림 8)

(2) 조건 F2 : 제동시-GM/RT 2100 하중적용

메인프레임의 경우 상·하부 표면부에서 안전계수 1.5 이하인 부분들이 많이 나타났으며, 최소 안전계수는 0.4로 나타났다.(그림9) 이때의 강도 취약부는 정적 해석시 문제가 되었던 암 베어링의 하우징 부분의 곡률부와 댄퍼브라켓 주변의 곡률부 부분, 크로스바와 연결부위 등이다. 크로스바의 경우 안전계수 1.5 이하인 부분들이 많은 부분에서 나타났으며 최소 안전계수는 0.3 이었다. 암 베어링과 서포트 블록의 경우에도 역시 안전계수 1.0 이하인 부분들이 많이 나타났으며 최소 안전계수는 각각 0.25,와 0.18로 나타났다.

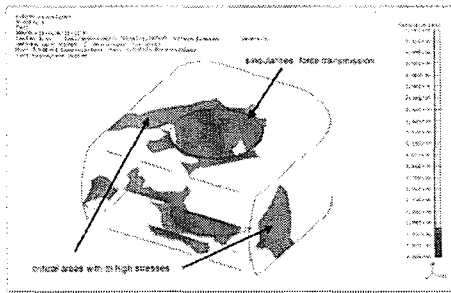


Fig.8 Support block, area with a safety smaller than 1.5

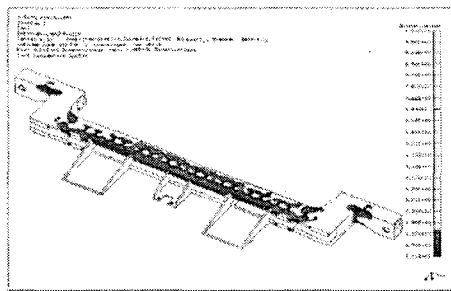


Fig.9 Longitudinal girder left, area with a safety smaller than 1.0

모든 구성 부품에 대하여 가속도, 감쇄력, 제동력, 전자석의 흡입력, 등을 포함하고 있는 다물체 동역학 해석 결과를 하중조건으로 적용하여 해석한 결과이다.

(1) 조건 D1 : 350 km/h-제동시 (ERRI 제도)

메인프레임의 경우 0.833, 크로스바의 경우 최소 안전계수가 0.443 라는 값을 나타냈다. 크로스바의 경우 기존의 피로해석 결과와 마찬가지로 I형 단면과 플랜지(flange)가 만나는 접촉부가 취약한 것으로 나타났다. (그림 10) 암베어링의 경우 1.04의 최소 안전계수를 나타내었다.

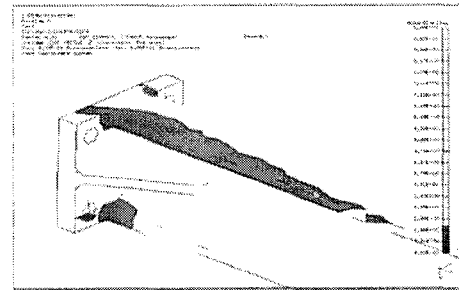


Fig.10 Cross bar, area with a safety smaller than 1.5

(3) 조건 F3 : 제동완해시-생기원 하중적용

제동 완해조건시 메인 프레임의 경우에는 256 N/mm^2 라는 낮은 최대응력값이 나타났으며 이때의 최소 안전계수는 1.66으로 앞선 피로해석 조건에 비해 상당히 높은 안전계수를 보여준다. 크로스바 역시 최소안전계수 1.08을 나타내어 높은 안전계수를 보여준다. 마찬가지로 암베어링은 15 N/mm^2 , 서포트블럭은 0.28 N/mm^2 의 낮은 응력값을 나타냈으며 이와 같은 낮은 최대 응력값을 이유로 별도로 안전계수를 고려하는 것은 크게 의미가 없는 것으로 판단된다.

(4) 조건 F4 : 제동완해시-GM/RT 2100 하중적용

메인프레임의 경우 상부 실린더 브라켓 부위의 안전계수가 1.0 ~1.5 사이로 나타났고, 크로스바의 경우 I형 단면과 플랜지(flange)가 만나는 접촉부에서의 0.52의 낮은 안전계수가 나타났다. 제동완해 조건인 이유로 조건 F3와 마찬가지로 암베어링은 43.6 N/mm^2 , 서포트블럭은 0.5 N/mm^2 의 낮은 응력값을 나타내었다.

4.2 피로하중 해석 결과 (MBS 결과 사용)

(2) 조건 D2 : 350 km/h-제동완해시 (ERRI 제도)

메인프레임의 경우 1.6, 크로스바의 경우 최소 안전계수가 2.25라는 높은 값을 나타냈으며 암베어링은 18 N/mm^2 , 서포트블럭은 1 N/mm^2 의 낮은 응력값을 나타냈다. 이와 같은 높은 안전계수와 낮은 최대 응력환경 하에서 안전계수를 고려하는 것은 크게 의미가 없는 것으로 판단된다.

(3) 조건 D3 : 150 km/h-제동시 (ERRI 제도)

구조적으로 안전한 것으로 평가되었으며 메인프레임은 131 N/mm^2 , 크로스바는 90 N/mm^2 , 암베어링은 130 N/mm^2 , 서포트블럭은 156 N/mm^2 의 낮은 응력값을 나타냈다.

(4) 조건 D4 : 350 km/h-제동시 (생기원 제도)

메인프레임의 경우 대차와 링크로 연결되는 부위 주변에서 최소 안전계수 1.43이 나타났으며, 암베어링과 서포트블럭의 최소 안전계수는 각각 1.77, 1.86으로 나타났다. 따라서 구조적으로 위험하지 않다고 평가할 수 있다. 그림 11은 안전계수 1.5 이하의 부분을 보여주는 것으로서 그림 10과 비교할 때 안전계수가 낮은 부분이 현저히 감

소되었음을 알 수 있다.

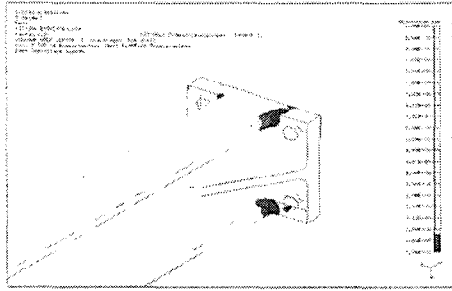


Fig.11 Cross bar, area with a safety smaller than 1.5

(5) 조건 D5 : 350 km/h-제동완해시(생기원 궤도)

메인프레임은 22 N/mm², 크로스바는 46 N/mm², 압베어링은 1.39 N/mm², 서포트블럭은 0.01 N/mm² 의 낮은 응력값을 나타냈다.

(6) 조건 D6 : 150 km/h-제동시 (생기원 궤도)

구조적으로 안전한 것으로 평가되었으며 메인프레임은 129 N/mm², 크로스바는 81 N/mm², 압베어링은 122 N/mm², 서포트블럭은 146 N/mm² 의 낮은 응력값을 나타냈다.

5. 결론 및 제언

유한요소 모델을 이용한 와전류 제동장치 프레임의 정적해석 및 피로강도 해석이 수행되었다. 해석결과의 신뢰성 확보와 현실성 있는 문제해결을 위한 대안 검토를 위해 외국의 전문기관과 공동으로 연구를 수행하였으며 이를 통해 국내에서 획득하기 어려운 강도 평가기준 관련 사양과 해석결과의 객관성을 확보하였다.

모두 14개의 세부 조건별로 해석이 수행되었으며 해석 결과에 따라 4개의 분류로 구분하여 아래와 같이 정리하였다.

- 분류 1: 구성부품이 구조적으로 안전한 경우
D2, D5, D3, D6, F3가 이에 해당하며 주로 동역학 해석결과를 고려한 피로해석의 결과와 정하중 피로해석 결과가 양호한 것으로 나타났다.
- 분류 2: 구성부품의 일부 부위의 강도에 문제가 있는 경우
D1, D4, F4의 경우이며 분류 1과 마찬가지로 동역학 해석결과를 고려한 피로해석의 결과와 정하중 피로해석 결과가 포함된다. 대체로 구조강도는 양호하나 일

부 부위에 응력집중이 발생하는 경우이다.

- 분류 3: 일부 구성품 강도에 문제점이 있는 경우
S1, S3, F1의 경우이며 생기원에서 제시한 조건으로 정적해석을 수행한 경우 2가지와 피로해석 경우 1가지를 포함한다. 이러한 문제점은 소재의 변경과 열처리를 통한 소재특성 변화를 통해 해결될 수 있을 것으로 평가되었다.
- 분류 4: 구성품에 대한 전반적인 고려가 필요한 경우
S2, S4, F2의 경우로 GM/RT 2100 독일 하중조건을 적용하여 정적강도와 피로강도를 해석한 결과가 이에 해당한다. 분류 3과 마찬가지로 소재의 재선정과 응력집중을 피할수 있는 하중경로 변경설계를 통해 문제점을 해결해야 할 것으로 평가되었다.

해석을 통해 평가된 값은 일부 구조강도면에서 불충분한 결과를 나타내기도 하였으나 보다 구체적인 성능검증 결과는 차량의 본선 시운전 시험 측정결과와 비교/분석된 예정이고 분석된 부품별, 부위별 강도평가 자료를 활용하여 설계개선 대안들이 마련될 것이다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 "차량시스템 엔지니어링기술개발" 과제의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 정경렬 외, 2001, "차량시스템 엔지니어링기술개발" 연구보고서, 한국생산기술연구원
- (2) 박수태 외, 1999, "제동시스템 개발", 유진기공산업(주) pp. 394-406
- (3) 김선호, 1997, "철도시스템의 이해", 자작 아카데미 pp. 132-133.
- (4) 유진기공산업(주), 2001, "The Functional Spec.", 설계자료
- (5) DIN 17182 "Cast steel with improved welding properties and strength for general use"
- (6) DIN 1686 "Cast steel for general use"
- (7) Logomotive, 2001, "Dynamic Analysis of Eddy Current brake frame", Technical Report
- (8) 한국생산기술연구원, 2001, "Technical Data for Dynamics Eng. Service", 내부기술자료
- (9) GM/RT 2100 "Structural requirement for railway vehicles"