

도시형 자기부상열차 대차 프레임의 피로강도 평가[§]

한정우^{*†} · 김흥섭^{*} · 방제성^{*} · 송시엽^{**}

* 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부, ** 현대로템(주) 기술연구소 응용기술연구팀

Fatigue Strength Evaluation of Bogie Frame of Urban Maglev Train

Jeong Woo Han^{*†}, Heung Sub Kim^{*}, Je Sung Bang^{*} and See Yeob Song^{**}

* Mechanical Systems Safety Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials,

** Applied Technology Research Team, Hyundai Rotem Company

(Received December 28, 2012 ; Revised May 27, 2013 ; Accepted May 28, 2013)

Key Words: Urban Maglev Train(도시형 자기부상열차), Bogie Frame(대차 프레임), Fatigue Analysis(피로해석), Fatigue Limit Diagram(피로내구선도), Fatigue Test(피로시험)

초록: 본 논문은 도시형 자기부상열차에 사용되는 대차프레임의 피로강도를 평가하는 방법을 제안하였다. 가상의 하중 시나리오로부터 구조해석을 수행하여 응력해석결과를 Goodman 선도상의 피로한계선도와 비교하였으며, UIC 규격에 적용되는 3단계의 피로조건을 적용하여 피로누적손상도(cumulative fatigue damage, D)를 계산하였다. 피로해석결과, Goodman 선도상에서 대차 프레임 사용소재인 A6005 알루미늄 합금 Butt 용접부의 피로한계선도를 초과하지 않았다. 가장 높은 피로손상도는 캐스팅 블록 및 전자석 폴 연결부로서 1×10^7 cycles 기준으로 $D=0.808$ 로 계산되어 파손기준을 초과하지 않음을 확인하였다. 피로해석과 동일 조건으로 실시된 수직, 좌우, 전후 방향의 피로시험에서 대차 프레임의 어느 위치에서도 균열이 발생되지 않았으며, 이는 피로안전측으로 계산된 해석결과와 부합되는 결과이다.

Abstract: This study evaluated the fatigue strength of the bogie frame of an urban maglev train through fatigue analysis, cumulative damage, and fatigue tests based on a proposed fatigue evaluation method. The results of FEM analysis in which various load combinations were adopted showed that all data were under the fatigue limit of a butt welded joint made of A6005 in a Goodman diagram. The cumulative fatigue damage was calculated at the highest level from a bolt connecting the area of the electromagnetic pole in the casting block; however, the total sum was evaluated as $D=0.808$ based on 1×10^7 cycles, which indicates that it did not exceed the failure criteria. In addition, the results of the fatigue test showed that there was no crack at any position in the bogie frame, which corresponded to the results of fatigue analyses.

1. 서론

도시형 자기부상열차에 사용되는 대차 프레임은 부상력, 안내력 및 추진력을 반복적으로 받으면서 운행되기 때문에 피로하중에 견딜 수 있는 충분한 강도가 확보되어야 하고, 적절한 시험평가법을 통해 이를 검증하여야 한다.⁽¹⁻³⁾

대차프레임에 대한 시험평가법은 UIC, EN 또는 JIS 규격⁽⁴⁻⁶⁾에 바퀴식 차량을 대상으로 잘 정

립되어 있으나, 자기부상열차에 적용하는데 한계가 있다. 반면, 자기부상열차의 경우는 국제적으로 통용되는 시험규격이 없으나, 상용 운행되고 있는 LINIMO⁽⁷⁾ 및 TRANSRAPID⁽⁸⁾의 개발과정에서 다양한 해석과 시험평가를 통해 대차프레임의 안전성 검증을 위한 방법을 만들고 있지만, 제한적 기술공개로 인하여 현실적으로 적절한 시험방법을 찾기가 매우 어렵다.

본 논문은 바퀴식 차량에 적용되는 시험규격을 토대로 피로내구해석, 누적손상도 계산 및 피로시험을 수행하여 도시형 자기부상열차의 대차프레임 안전성 검증에 적용 가능한 피로평가법에 대하여 연구하였다.

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, jwhan@kimm.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

2. 피로해석

2.1 한국형 자기부상열차 대차 프레임

한국형 자기부상열차는 2013년 인천국제공항과 공항철도 용유역을 연결하는 시범노선에 개통될 예정이다. 이 열차는 1량 4대차 시스템을 적용하고 있으며, 최고 속도 110 km/h, 최대 가속도 4.5 km/h/s로서 도시형에 적합한 중저속형이다. 부상방식으로는 상전도 흡인식이 적용되었으며, 부상공극 8 mm, 공극편차는 최대 ±3mm이다. 주요사양은 Table 1과 같다.

자기부상열차에 사용되는 대차 프레임은 일반적으로 차량의 하중을 지지하고, 추진력과 제동력을 전달하는 역할을 한다. 이를 구성하는 주요부재는 Fig. 1과 같이 사이드 프레임과 이를 연결하는 타이빔, 캐스팅 블록, 전자석 폴 등이며, 부상력과 안내력을 발생하는 전자석, 견인력을 발생하는 리니어

모터, 견인로드와 사이드 프레임으로 되어 있다.

사이드 프레임은 사이드 빔과 캐스팅 블록으로 구분되며, 사이드 빔에는 리니어 모터와 견인로드가 연결되어 있어 리니어 모터의 하중을 지지하고 견인로드를 통해 차량으로 추진력과 제동력을 전달한다. 캐스팅 블록은 알루미늄 압출재 양끝단에 연결되어 있다. 이 캐스팅 블록은 비상롤러, 랜딩스키드, 배장기, 리프팅 와이어와 공기스프링을 취부할 수 있도록 제작되어 있다. 하부에는 전자석이 연결되어 부상력을 차량에 전달하며, 공기스프링으로 전달된 차량의 하중을 지지하고, 이 하중을 랜딩스키드와 비상롤러 시스템으로 전달한다. 전자석에는 모듈의 횡방향 구속을 위해 횡방향 스톱퍼가 취부되어 있다. 제동장치와 gap sensor도 이 전자석에 설치된다. 타이빔은 슬라이딩 메커니즘(sliding mechanism)을 적용한 4절점 링크 구조로 되어 있어, 직선 또는 곡선 주행시 횡방향과 비틀림에 대하여 자유로운 변위를 허용한다.^(9,10)

대차 프레임 부재의 대부분은 A6005 계열의 알루미늄 소재로 제작되었으며, 안내 스키드 및 전자석 폴 등 일부만 강 소재를 사용하였다. 캐스팅 블록은 EN AC42200소재의 알루미늄 주물재로서, 공기스프링 포켓, 타이빔, 착지륜, 사이드 프레임, 전자석 브라켓 연결부가 있는 복잡한 구

Table 1 General description of Korean Maglev vehicle

Information	Value
Maximum design speed	110 km/s
Maximum operation speed	100 km/s
Length of vehicle	24.5 m
Train formation	2 Cars
Empty weight of vehicle mass, m_v	20,000 kgf
Passenger weight, c_2	6,500 kgf
Number of bogies, n_b	4
Bogie weight, m^+	1,825 kgf

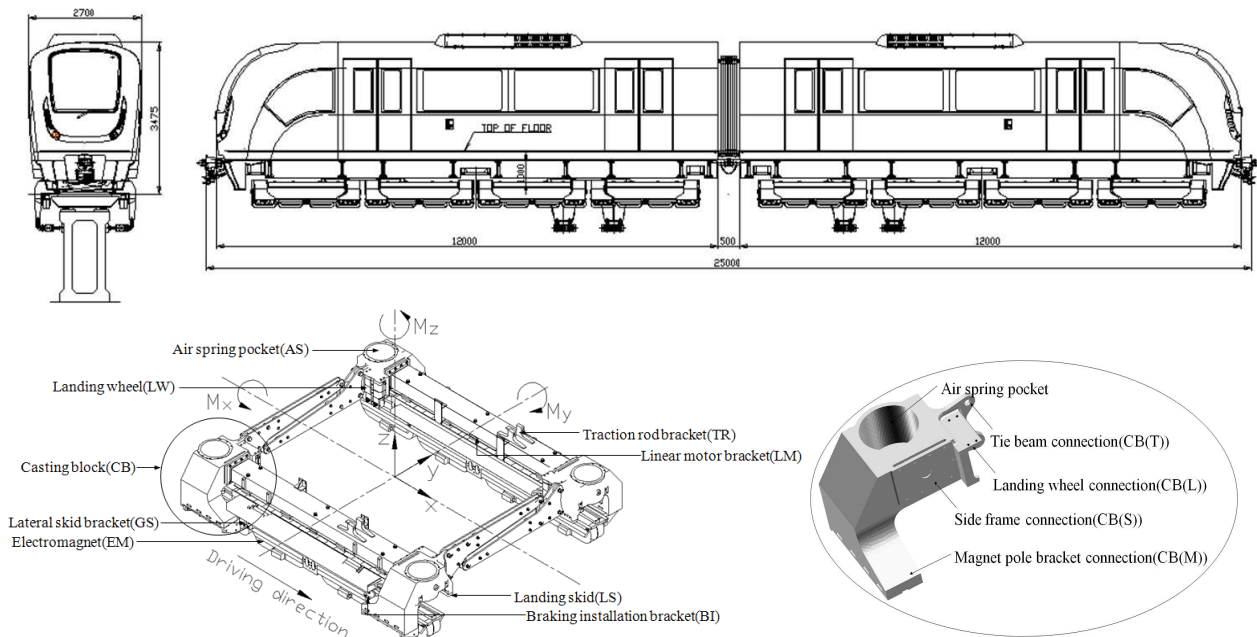


Fig. 1 Configuration of bogie frame of Korean maglev train

조로 되어 있다. 일반적으로 주물재는 피로강도 측면에서 취약하며 특히, 캐스팅 블록과 사이드 프레임 연결하는 Butt 용접이음부는 모재에 비해 균열 발생 가능성이 높기 때문에 피로해석을 통해 충분한 피로강도가 확보되어야 할 필요가 있다.

2.2 UIC 규격

UIC 규격⁽⁴⁾에서 대차 프레임에 적용되는 기본 하중은 수직하중(F_z), 좌우하중(F_y) 및 전후하중(F_x)등의 세 가지 하중으로 구분하고 있으며, 각 하중에 대한 계산식은 식 (1)과 같다.

$$F_z = \frac{g}{2n_b}(m_v + 1.2c_2 - n_b m^+) \quad (1)$$

$$F_y = 0.5(F_z + 0.5m^+ g)$$

$$F_x = 0.1(F_z + \frac{m^+}{2} g)$$

여기서, n_b 는 차량당 대차수, m_v 는 차량중량, c_2 는 승객중량, m^+ 는 대차중량, g 는 중력가속도로서 9.81 m/sec^2 이다. 피로하중은 식 (1)에서 계산된 F_z 및 F_y 과 롤링 운동(rolling motion) 계수인 a 및 바운싱 운동(bouncing motion) 계수 β 를 사용하여 Table 2와 같은 하중조합을 만든다.

피로하중은 Fig. 2와 같이 정하중(static load), 준정적 하중(quasi-static load), 동하중(dynamic load) 성분을 중첩시키며, 일정 사이클의 주기로 비틀림 하중의 방향을 변환시킨다.

피로하중 프로파일은 Fig. 3과 같이 대차 프레임이 받는 차량하중에 해당되는 정적 수직하중을 일정하게 유지시키면서 준정적 하중 및 동하중 크기를 3단계에 걸쳐 20%씩 증가시켜서 총 1×10^7 cycles를 부가한다. 각 단계별 하중성분과 소요 하중 사이클 수는 다음과 같다.

Table 2 Fatigue load configuration of UIC code⁽⁴⁾

Load case	Vertical load per side frame		Transverse load, F_y
	F_{z1}	F_{z2}	
1	F_z	F_z	0
2	$(1+a-\beta)F_z$	$(1-a-\beta)F_z$	0
3	$(1+a-\beta)F_z$	$(1-a-\beta)F_z$	$+F_y$
4	$(1+a+\beta)F_z$	$(1-a+\beta)F_z$	0
5	$(1+a+\beta)F_z$	$(1-a+\beta)F_z$	$+F_y$
6	$(1-a-\beta)F_z$	$(1+a-\beta)F_z$	0
7	$(1-a-\beta)F_z$	$(1+a-\beta)F_z$	$-F_y$
8	$(1-a+\beta)F_z$	$(1+a+\beta)F_z$	0
9	$(1-a+\beta)F_z$	$(1+a+\beta)F_z$	$-F_y$

- 1단계 : [$F_{zs}+100\%\{F_{zq}+F_{yq}, F_{zd}+F_{yd}\}$] 6×10^6 cycles + [100% twist load] 6×10^5 cycles
- 2단계 : [$F_{zs}+120\%\{F_{zq}+F_{yq}, F_{zd}+F_{yd}\}$] 2×10^6 cycles + [120% twist load] 2×10^5 cycles
- 3단계 : [$F_{zs}+140\%\{F_{zq}+F_{yq}, F_{zd}+F_{yd}\}$] 2×10^6 cycles + [140% twist load] 2×10^5 cycles

여기서, F_{zs} 는 수직 정하중으로 식 (1)의 F_z 와 같으며, F_{zq} 는 수직 준정적 하중으로 $\pm aF_z$ 이고, F_{zd} 는 수직 동하중으로 $\pm \beta F_z$ 이다. 또한, F_{yq} 및 F_{yd} 는 각각 좌우 준정적 하중 및 동하중으로 $F_{yd} = \pm 0.25(F_z + 0.5m^+ g)$ 이다.

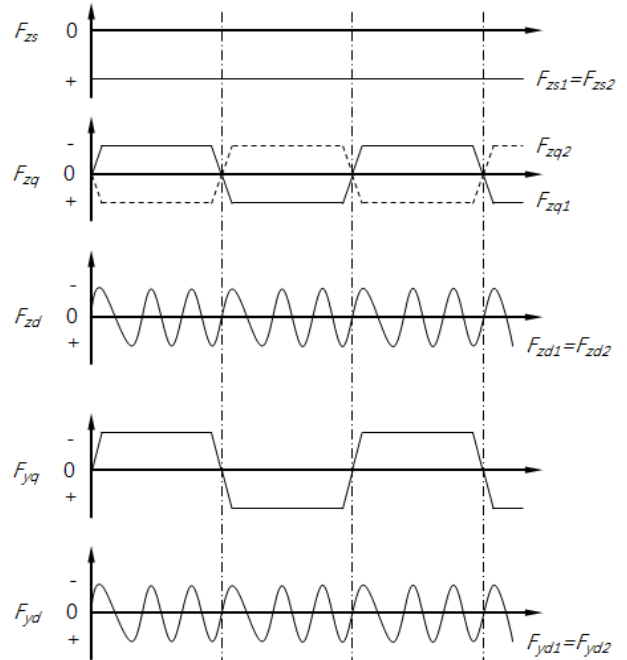


Fig. 2 Diagram of fatigue load in relation to time⁽⁴⁾

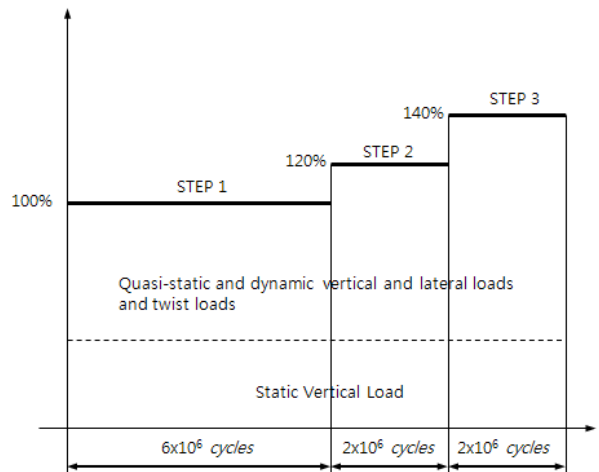


Fig. 3 Definition of fatigue test steps⁽⁴⁾

2.3 피로시험하중

자기부상열차의 대차 프레임은 Fig. 4와 같이, 부상력 및 안내력 뿐만 아니라, 주행시 차량진동으로 인하여 동하중을 받는다. 동하중은 선로의 곡률반경, 등판기울기, 불규칙도 등과 같은 선로 조건과 차량속도의 운행조건에 크게 영향을 받기 때문에 동역학 시뮬레이션을 통하여 동적 영향이 고려된 정하중 조건을 결정하는 것이 좋다. 그러나, 실제 차량 시스템의 현가장치와 선로특성에 대한 데이터가 충분히 확보되지 않으면 설계단계에서 하중조건을 결정하는 것은 매우 어렵다. 본 논문에서는 도시형 자기부상열차 특성이 반영된 동역학 시뮬레이션 결과와 UIC 규격⁽⁴⁾과 일본 LINIMO⁽⁷⁾의 설계기준을 참고하여 하중조건을 결정하였다.

자기부상열차의 대차 프레임은 사이드 프레임을 연결하는 4절점 링크 구조로 인해 비틀림 하중을 크게 받지 않는 반면에, 차량의 출발/제동에 따른 전후방향의 하중을 반복적으로 받는다. 따라서, 대차의 내구성능에 영향을 주는 피로하

중은 Fig. 5와 같이 UIC 규격에서 적용하고 있는 비틀림 하중 대신에 전후 방향의 하중을 고려하여 수직하중(F_z), 좌우하중(F_y), 전후하중(F_x)으로 결정하였다. 이때, F_y 는 곡선선로 영향에 의한 하중이며, 롤링모션에 의한 동하중 변화량은 aF_z 로, 바운싱 모션에 의한 동하중 변화량은 βF_z 로 변환시켜 적용하였다. 본 대차 프레임에는 $a=0.1$ 과 $\beta=0.2$ 를 적용하였으며, UIC 규격⁽⁴⁾에 정의된 피로하중을 참고하여 Table 3과 같이 17개의 하중조합을 구성하였다.

2.4 피로내구선도

자기부상열차 대차 프레임의 피로평가를 위하여 Table 3의 하중조합과 부상주행에 상응하는 경계조건으로 유한요소해석을 수행하여 주응력 크기와 방향을 계산하였다. 유한요소해석에 사용된 프로그램은 I-DEAS이며, 사용요소는 8절점 Solid 요소이다.

최대응력 σ_{max} 와 최소응력 σ_{min} 은 17개 하중조건으로 유한요소해석으로 계산된 결과 중 가장 높은 주응력 σ_{max} 와 주응력 방향 θ_{max} 를 찾아내어 나머지와 다른 응력을 θ_{max} 의 연장선상에 투사시켜서 가장 낮은 응력 σ_{min} 를 결정하였다. 이와 같이 결정된 σ_{max} 와 σ_{min} 를 이용하여 평균응력 $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$ 과 응력진폭 $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$ 을 피로내구선도인 Goodman diagram 선도상에 나타내면, Fig. 6과 같다.

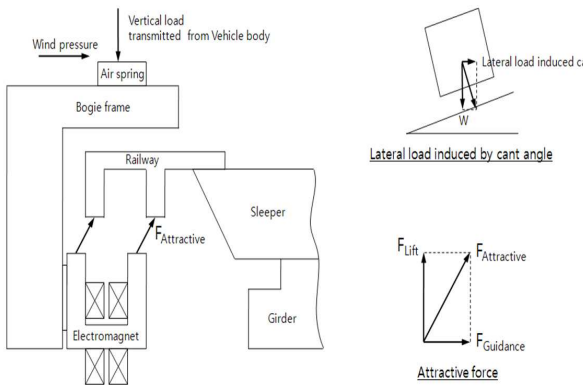


Fig. 4 Configuration of typical loads subjected to bogie frame

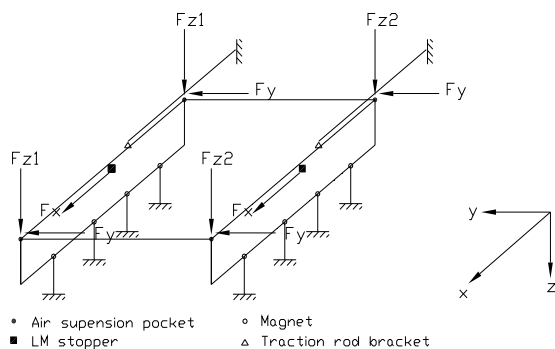


Fig. 5 Definition of fatigue loads

Table 3 Fatigue load combinations

Load No.	Vertical load, F_z (kN)		Lateral load, F_y (kN)	Longitudinal load, F_x (kN)
	F_{z1}	F_{z2}		
1	12.57	12.57	-	-
2	11.31	8.80	-	1.48
3	11.31	8.80	2.13	1.48
4	16.34	13.83	-	1.48
5	16.34	13.83	2.13	1.48
6	8.80	11.31	-	1.48
7	8.80	11.31	-2.13	1.48
8	13.83	16.34	-	1.48
9	13.83	16.34	-2.13	1.48
10	11.31	8.80	-	-1.48
11	11.31	8.80	2.13	-1.48
12	16.34	13.83	-	-1.48
13	16.34	13.83	2.13	-1.48
14	8.80	11.31	-	-1.48
15	8.80	11.31	-2.13	-1.48
16	13.83	16.34	-	-1.48
17	13.83	16.34	-2.13	-1.48

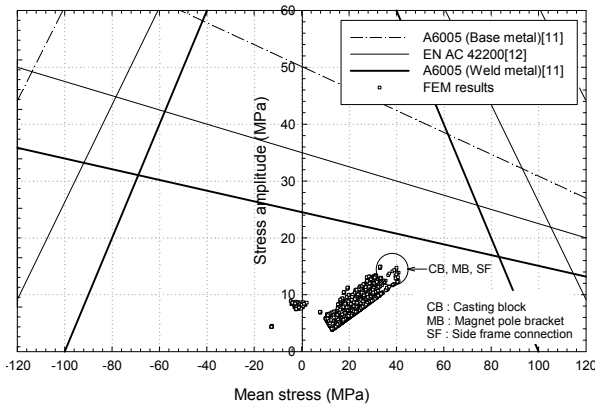


Fig. 6 Goodman diagram for all data calculated by FEM

모든 데이터는 피로강도가 가장 낮은 A6005 Butt 용접부의 피로한계선도 아래에 놓여 있으므로 피로강도측면에서 안전함을 확인할 수 있다. 그러나, 피로한계선도에 가까운 타이 빔, 캐스팅 블록, 사이드 프레임의 연결부는 균열발생 가능성 높은 취약한 부분으로 평가되었으며 특히, 전자석 풀이 취부되는 브라켓은 공기 스프링을 지지하는 캐스팅 블록과 전자석을 지지하는 풀을 연결해 주는 구조물이고, 부상력 작용시 대차 내부로 모우멘트를 받는 핵심 부재이므로 상세한 유한요소해석과 많은 피로실험 데이터로부터 정도 높은 피로해석이 필요할 것으로 판단된다.

2.5 누적손상도 계산

Fig. 7은 Table 3의 하중조합을 피로하중시험에 적용하기 위해 변환시킨 피로하중 파형이다. 이 파형은 F_z , F_y 및 F_x 의 조합하중으로 구성되어 있으며, F_z 및 F_y 가 10 cycle 주기로 변동한다. 동하중의 크기는 20%씩 단계적으로 증가시켜 총 3단계에 걸쳐 1×10^7 회 반복되는 조건이다. 따라서, Table 7의 피로하중조합의 최대 140%까지 응력을 단계적으로 적용한다. 누적손상도 D 는 Fig. 7의 피로파형을 토대로 유한요소 해석으로 계산된 σ_a 과 σ_m 을 이용하여 유한요소 모델의 각 절점에 작용하는 응력 스펙트럼을 구하고, 사용소재의 S-N선도와 식 (2)의 Palmgren- Miner 법칙을 이용하여 계산하였다. 이때, 응력 스펙트럼은 Rainflow counting법으로 구하였다.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

여기서, N_i 는 i 번째 응력준위에 대한 피로수명이며, n_i 는 실제 반복수를 나타낸다.

Table 4 Calculated results of cumulative damages

1 st Load Step	2 nd Load Step	3 rd Load Step	Total
100% FL 6×10^6 cycles	120% FL 2×10^6 cycles	140% FL 2×10^6 cycles	
0.205	0.181	0.422	0.808

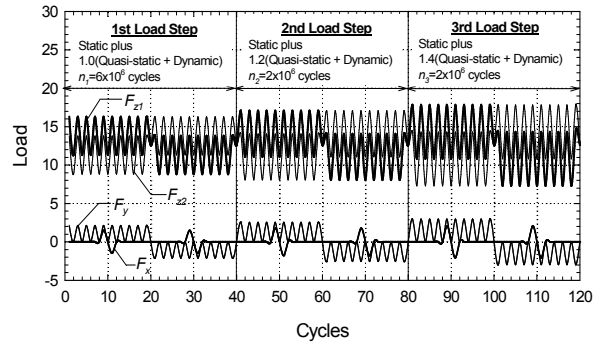


Fig. 7 Diagram of fatigue loads applied during three fatigue test load steps

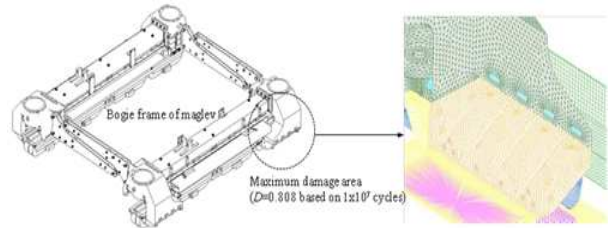


Fig. 8 Maximum damage area calculated by Palmgren-Miner rule

Table 4는 대차 프레임의 누적손상도 계산결과 중 가장 크게 계산된 D 값을 취하여 피로하중의 단계별로 나타내었다. 최대 손상도가 발생된 부위는 Fig. 8의 캐스팅 블록과 전자석 풀의 볼트 체결부로서 차량무게가 공기스프링을 거쳐 대차 프레임의 전자석 풀로 전달되어 볼트구멍에 응력이 하중이 집중됨에 따라 응력이 크게 걸리는 곳이다. 이 부위의 피로손상도 합은 1×10^7 회를 기준으로 $D=0.808$ 로서 파손기준을 1로 가정하면 안전측에 놓임을 알 수 있다. 하중 단계별로 살펴보면, 세번째 단계는 첫번째 단계보다 하중 반복수가 작음에도 불구하고 40% 증가된 동하중 크기로 인하여 $D=0.422$ 로 계산되었고, 이는 전체 손상도의 52%를 차지하므로, 피로손상에 가장 크게 기여한 하중단계로 볼 수 있다.

3. 피로시험

자기부상열차 대차프레임의 피로시험은 Fig. 7

의 하중조건으로 3단계에 걸쳐 1×10^7 회까지 수행되었다. 시험설치는 Fig. 9와 같이 전자석 폴의 더미 전자석에 고정치구를 설치하여 대차 프레임을 시험대에 고정시켰다. 하중가력은 F_z 및 F_y 의 경우, 공기스프링 포켓 4곳에 25톤 용량 유압가력기를 이용하여 수직방향과 수평방향으로 가력하였으며, F_x 의 경우, 사이드 프레임의 추진전동기 브라켓에 5톤 용량으로 가력하였다. 이때, 가력하중의 주파수는 3Hz이다.

피로시험이 종료된 후에 염료침투법을 이용하여 균열발생을 관찰한 결과, 대차 프레임의 어느 위치에서도 균열이 발생되지 않음을 확인하였다. Fig. 10은 피로손상도가 가장 크게 계산된 캐스팅 블록과 전자석 폴의 볼트 체결부에서 관찰한 염료침투시험 장면으로 균열발생이 없음을 보여주고 있다. 이러한 시험결과는 2.3절 및 2.4절에서 피로강도가 안전측으로 계산된 해석결과와 부합된다.

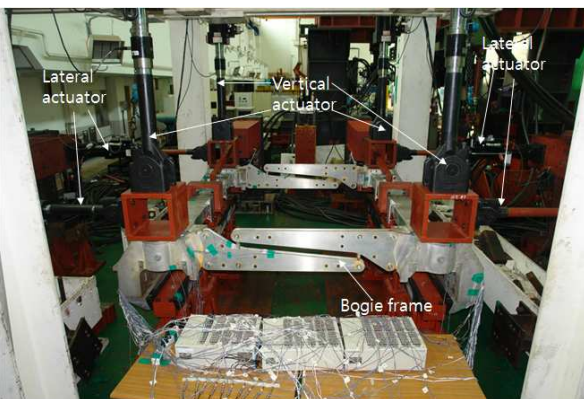


Fig. 9 A view of fatigue test of bogie frame for and urban maglev



Fig. 10 Crack inspection of casting block and magnet pole bracket connection

4. 결론

바퀴식 철도차량에 적용되는 시험규격을 토대로 도시형 자기부상열차 대차프레임의 피로해석 및 피로시험법을 개발하고 한국형 자기부상열차 대차프레임을 대상으로 피로내구해석, 누적손상도계산 및 피로시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) Goodman 선도상에 나타난 유한요소 해석결과는 모든 데이터가 A6005 압출재의 Butt 용접이음부의 피로한계선도의 아래에 놓여 피로강도측면에서 안전함을 확인하였다.

(2) 피로누적손상도는 캐스팅 블록과 전자석 폴의 볼트 체결부에 가장 크게 계산되었으나, 이 부위의 피로손상도의 합은 1×10^7 회를 기준으로 $D=0.808$ 로 평가되어 파손기준을 초과하지 않음을 확인하였다.

(3) 피로시험결과, 대차프레임의 어느 위치에서도 균열발생이 없었으며, 이는 피로안전측으로 계산된 해석결과와 부합되는 결과이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 도시형 자기부상열차 실용화 사업의 일환으로 수행되었음을 밝혀두면서, 연구수행에 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kassner, M., 2012, "Fatigue Strength Analysis of a Welded Railway Vehicle Structure by Different Methods," *International Journal of Fatigue*, Vol. 34, pp. 103~111.
- (2) Oda, Y., Yagi, T., Okino, T. and Ishiduka, H., 2007, "Fatigue Life Estimation for Welds of Truck Frames for Rolling Stock Using Stress Frequency in Service Load," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. A73, No. 734, pp. 1171~1176.
- (3) Mancini, G. and Cera, A., 2008, "Design of Railway Bogies in Compliance with New EN 13749 European Standard," *Proceedings of WCRR*.
- (4) UIC Code 615-4, 1994, "Movie Power Units

- Bogies and Running Gear Bogie Frame Structure Strength Tests," *International Union of Railway*.
- (5) EN 13749, 2005, "Railway applications - Wheelsets and Bogies - Methods of Specifying Structural Requirements of Bogie Frames," *European Committee for Standardization*.
- (6) JIS E7105, 1994, "Test Methods for Static Load of Body Structures of Railways Rolling Stock," *Japanese Industrial Standard*.
- (7) U. S. Department of Transportation, 2004, "Chubu HSST Maglev System Evaluation and Adaptability for US Urban Maglev," *FTA-MD-26-7029-03.8*, Federal Transit Administration.
- (8) U. S. Department of Transportation, 2002, "Electromagnetic Field Characteristics of the Transrapid TR08 Maglev System," *DOT-VNTSC-FRA-02-11*, Federal Railroad Administration.
- (9) Lee, N. J., Han, H. S., Lee, W. S. and Kim, C. G., 2009, "Manufacturing and Dynamic Performance Test for Prototype Bogie of Half Maglev Vehicle," *Proceedings of Conference of the Korean Society for Railway*, pp. 1575~1580.
- (10) Kim, K. J., Lee, J. M., Lee, N. J. and Yang, S. J., 2009, "Prediction of Dynamic Loads on the Aluminum Bogie of a Maglev Vehicle Using Flexible Multibody Dynamics," *Proceedings of Conference of the Korean Society for Railway*, 2773~2778.
- (11) Shin, K. S., 2002, "Evaluation of Fatigue Strength And Reliability on 6005A Butt and Lab Welded Joints," *Report of Research Institute of Advanced Material in Seoul National University*.
- (12) Handbuch der Gusswerkstoffe, Honsel, 23