

◆ 특집 ◆ 레일방식 철도차량의 고속화 기술

KTX-산천 열차용 모터 감속기 고정대의 피로 수명 평가

Fatigue Life Evaluation of Motor Block Bracket Units for KTX-Sancheon Trains

이찬우^{1,✉}, 이동형¹

Chan Woo Lee^{1,✉} and Dong-Hyong Lee¹

¹ 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)

✉ Corresponding author: cwlee@krii.re.kr, Tel: 031-460-5204

Manuscript received: 2012.4.13 / Accepted: 2012.4.27

In this study, fatigue life of the motor block bracket units for KTX-Sancheon trains was assessed. Design evaluation for railway structures was performed based on the UIC 566 regulation, and test and evaluation of fatigue life in welded parts was performed in accordance with standard ERRI B 12/RP17 and ERRI B 12/RP60. The actual vehicle dynamic stress testing was executed in KTX-Sancheon service line with the service operating speed. The dynamic stress was measured with commercial data acquisition system (MGC plus). The cumulative damage was evaluated by applying standard BS 7608 - Class F and cycle counting was used rain-flow counting method. As a result, the motor block bracket units for KTX-Sancheon trains was designed to fit the regulation and the safety of fatigue life for 30 years, assuming that KTX-Sancheon trains travels 600,000km annually, were confirmed under current operating conditions.

Key Words: Dynamic Service Stress (실동응력), Motor Block Bracket Units (모터 감속기 고정대), Fatigue Life Evaluation (피로 수명 평가)

기호설명

T_{max} = max. torque of axle gear reduction system
 $F_{int}(z,y,x)$ = directional inertia weight of axle gear re-
duction system
 σ_y = yield strength(MPa)
 σ_t = tensile strength(MPa)
 σ_D = dynamic service stress(MPa)
 σ_p = permissible stress(MPa)
R1 = driving gear 1(axle-gear)
R2 = driving gear 1(tripod shaft-gear)
S = safety factor

1. 서론

KTX-산천(KTX-Sancheon)은 국내 연구진들이 1996년 12월부터 2002년 10월까지 총 6년 동안 G7 선도기술개발 사업의 일환으로 개발된 시험차량 HSR-350x의 기술을 이용하여 만들어진 고속열차이다. KTX-산천은 KTX-1 열차가 20량 편성인 것에 비해 승객수요에 맞추어 운행할 수 있도록 10량 1 편성으로 구성되어 있고, 중련 운전으로 20량까지 확대편성을 할 수 있도록 만들어진 국내 순수기술로 제작된 고속차량이다. KTX-산천 차량의 영업 최고속도는 305 km/h 이고, 설계 최고속도는 330 km/h 로 되어 있다. 이 차량의 설계수명

은 30 년, 연간 주행거리 기준은 600,000 km/year 로, 설계수명에 따른 총 주행거리는 18,000,000 km 로 되어 있다. 국내에서 운행되고 있는 고속철도 차량은 철도안전법 제 26 조(철도차량의 안전기준)에 의거하여 안전기준에 적합하지 않으면 운행하지 못하도록 되어 있다. 동법시행령 제 22 조(철도차량의 구조 및 장치)에서는 모터 감속기 고정대와 같은 차체-대차 연결장치에 대한 장치는 안전기준에 적합해야 함을 규정하고 있다. 또한 철도차량안전기준에 관한 규칙 제 37 조(구조체의 설계등)에서는 철도차량의 주요 구조체는 철도차량의 사용 내구연한(설계수명)까지 안전하게 운행되도록 설계 되어야 함을 명시하고 있다. 철도차량 주요 구조체의 건전성 또는 피로 수명 평가에 대한 선행연구로서는 철도차량 대차틀 피로균열 평가법 연구가 있다.¹² 또한 철도차량 주행안정성 평가에서도 본선 실차 주행시험을 통해 주행성능 평가를 하는 것이 일반적이다.³ 일본의 경우에도 차체-대차 연결장치 관련 용접부 피로강도평가는 영업노선에서의 실동응력을 측정하여 실시하고 있다.⁴

본 논문에서는 고속열차용 동력장치인 모터 감속장치(motor block system) 장치를 차체-대차에 연결해 주는 고정대의 건전성을 설계 피로 수명 기준으로 평가하였다. 본 연구에서 적용한 설계 피로 수명 평가방법은 KTX-산천 차량이 운행되는 선로에서 실동 응력을 측정하여 평가하였다.

2. 모터 감속기 고정대 설계 기준 적정성 분석

KTX-산천 차량에 있어서 모터 감속기 고정대는 동력 차축에 장착된 유도전동기와 감속기 박스를 통해 동력이 전달되는 장치는 대차와 차체 하부 언더 프레임에 연결되어 있다. Fig. 1 은 KTX-산천 동력차량에 있는 1 개 대차 내 4 개의 모터 감속기 고정대 위치를 평면으로 보여주고 있다. 모터 감속기 고정대는 대차 차축에 연결된 감속기를 차체 하부 언더 프레임에서 잡아주는 구조로 되어 있어서, 실제 차량이 운행하는 선로 불규칙도와 차량 운행속도에 가장 큰 영향을 받게 되고, 차량의 동적 거동에 의한 비틀림 응력도 함께 받는 구조로 되어 있다.

모터 감속기 고정대의 설계 수명 검증은 실제 운행선로에서의 실동응력(dynamic service stress) 측정을 통해 이루어져야 하므로, 본 연구에서는 KTX-산

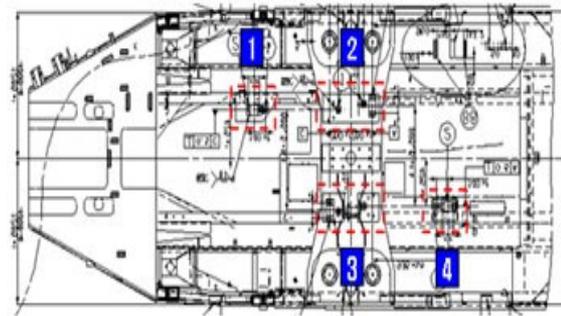


Fig. 1 Each motor block bracket units position on carbody underframe

천 열차의 모터 감속기 고정대의 가장 취약 부분으로 평가되고 있는 차체하부 언더 프레임에 용접되어 있는 부위에 대한 실동응력을 실제 영업선로에서 영업 속도 조건하에서 측정하여 설계를 평가하였다.

2.1 하중 및 토오크에 대한 설계 검토

KTX-산천 차량의 모터 감속기 고정대 설계 시 하중 및 토오크 조건은, 철도차량 구조체의 피로 해석 하중 조건을 제시하고 있는 UIC 566 에 따라 설계하였다.⁵ UIC 566 에 따른 모터 감속기 고정대에 부가되는 상하 관성(inertia) 하중은 $\pm 3 g$, 좌우 관성 하중은 $\pm 1 g$ 그리고 전후 관성 하중은 $\pm 5 g$ 를 부가하게 되어 있다. 또한 모터 감속기 고정대 설계의 경우에는 최대 토오크가 회전체인 차축에 기어박스를 통해 힘이 부가되는 구조이므로 회전 관성 하중을 함께 고려하여 설계되어야 한다. 따라서 KTX-산천 차량의 모터 감속기 고정대 설계 시 하중 부가 개념식은 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{max} + F_{int}(z,y,x) \tag{1}$$

KTX-산천 모터 감속기의 안전기능을 가지고 있는 트리포드(tripod) 축 끝단에서 차단 토오크 설계 기준 값은 약 19 ~ 24 kN · m 로 되어 있다.

또한 모터 감속기는 차축에 붙어 있는 기어의 구동기어(driving gear 1 ; R1, 차축-모터 직접연결)와 1 차축에서 안전축 기능을 가진 트리포드에 연결되어진 2 차축 구동기어(driving gear 2 ; R2) 사이의 기어비 설계 값은 식 (2)와 같다.

$$R1 : R2 = 1.159 : 1.889 \tag{2}$$

식(2)에 의해 설계 기준 토크에 의한 트리포드 축에서 발생할 수 있는 최대 토크 T_{max1} 는 식(3)처럼 계산될 수 있다.

$$T_{max1} = 24 \text{ kN} \cdot \text{m} \div 1.159 = 20.7 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (3)$$

또한 모터 블록이 단락 되는 경우를 상정한 경우의 최대 토크 T_{max2} 모터블록 자중과 모터블록 취부 끝단부 거리에 의해 계산될 수 있는데 식(4)처럼 계산된다.

$$T_{max2} = F(\text{모터 블록자중}) \times L(\text{취부 거리}) \quad (4)$$

$$= 14.945 \text{ kN} \times 2.92 \text{ m} = 43.67 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

KTX-산천 모터 감속장치는 모터 축 감속기와 차축 축의 차축 기어 감속기를 기계적으로 연결하는 것으로 차체와 대차와의 모든 상대운동(즉 수직운동, 횡방향운동, 회전운동, 전후방향운동 등)을 허용하도록 설계되어 있다.

이 모터 감속장치는 차체-대차 연결장치 기능을 가지고 있으므로 차량이 곡선 통과 시 대차와 차체의 회전 편차로 많은 힘을 받게 되고, 직선 주행 시에는 차량-궤도 인터페이스에 의한 차량의 자력 진동(self-excited vibration)이 발생하게 되어 수직방향, 횡방향, 전후방향 및 요 운동을 받게 되어 있다.

이와 같이 KTX-산천 고속차량은 고속선-기준선 구간을 동시에 운행하면서 30 년 동안 장시간 안전하게 건전성이 유지되어야 하므로 KTX-산천 모터 감속장치를 지지하고 있는 모터 감속기 고정대의 피로 해석은 매우 중요하다고 볼 수 있다.

2.2 사용 재질 선정에 대한 적정성

KTX-산천 차량의 모터 감속기 고정대에 사용된 재료는 SM490YB 이다. SM490YB 재질은 샤르피 흡수에너지가 27 J 이상으로 충격에너지가 큰 부위에 사용되는 재질이다.

모터 감속기 고정대와 같이 철도차량의 대차-차체 연결부위 특성상 대차 윤축부에 연결되어 있는 기어 감속기에는 주행 중 충격에너지가 크게 되므로 이에 대한 충격에너지의 흡수를 가능케 하고, 고 강도(항복, 인장) 재질인 SM490YB 재질을 선정한 것은 모터 감속기 고정대 특성을 적절하게 고려한 것이라 판단되어 진다.

Table 1 은 모터 감속기 고정대에 사용된 SM490YB 에 대한 재료 물성치를 보여 주고 있다.

Table 1 Applied material properties

| Type | σ_y (MPa) | σ_t (MPa) | Remark |
|---------|---------------------|---------------------|------------|
| SM490YB | ≥ 320 | ≥ 520 | JIS G 3106 |

2.3 용접부 피로 수명 평가 검토

모터 감속기 고정대는 전형적인 용접구조물로 되어 있기 때문에 철도차량의 용접부 안전기준에 대한 지침을 제공해 주고 있는 ERRI Report B 12/RP17 Appendix E.1⁶ 을 이용하여 피로 내구 선도를 설계 판정기준으로 적용하였다.

이 기준은 사용 재질의 허용응력(σ_p)을 운행 조건 하중에 따른 실동응력(σ_D)값으로 나누어서 피로 하중에 대한 안전계수 S 로 평가하는 것이다. 안전계수 S 는 식(5)와 같이 정의한다.

$$S = \sigma_D / \sigma_p \quad (5)$$

Table 2 는 모터 감속기 고정대의 주요 부재 재질인 SM490YB 의 모재부와 용접부의 허용응력 값을 나타내 주고 있다.

Table 2 The permissible stress of SM490YB

| Type | Base metal (MPa) | Welding zone (MPa) |
|---------|---------------------|-----------------------|
| SM490YB | ≤ 320 | ≤ 291 |

3. 모터 감속기 고정대 설계 검증을 위한 실차 동응력 시험

3.1 실차 동응력 시험 준비

KTX-산천 차량의 모터 감속기 고정대에 대한 피로 설계 측면에서의 안전성을 평가하기 위해 UIC 566 에서 제시하고 있는 피로 하중을 적용하여 구조해석을 실시하여 높은 응력 부위 및 피로평가 관심 부위를 선정하는 것이 중요하다.

이를 위해 유한요소 해석 상용프로그램인 I - DEAS Master 16.1 으로 해석 한 결과가 Fig. 2 와 같이 나타났다. 해석 결과 Fig. 2 와 같이 용접부 최대 응력은 약 225 MPa 로 해석되었다. 해석 결

과는 Table 3 에서 용접부 허용응력 값 $\sigma_p \leq 291$ MPa 보다 작음을 알 수 있다. 하지만, 모터 감속기 고정대 특성상 KTX-산천 차량이 운행 중 부가되는 여러 요인(선로조건, 운행속도, 운행패턴 등)에 의해 실제 작용하는 응력 값은 다를 수 있다.

따라서, Fig. 2 에서 가장 큰 응력이 나타나고 있는 부위를 중심으로 실제 KTX-산천 차량 모터 감속기 고정대에 스트레인 게이지 취부 위치를 선정하였다.

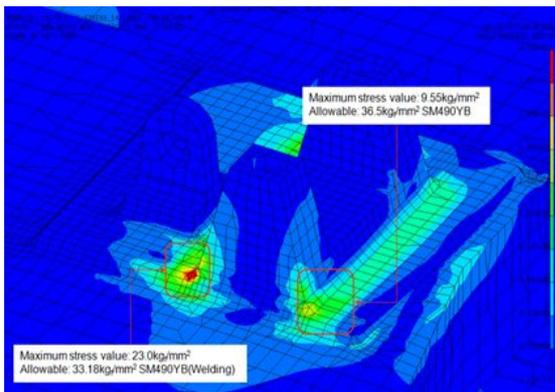


Fig. 2 Stress distribution of motor block bracket units for FE analysis

3.2 모터 감속기 고정대 스트레인 게이지 취부 위치 선정 및 게이지 취부 방법

KTX-산천 차량의 모터 감속기 고정대 안전성 평가를 위한 동응력 측정을 위한 스트레인 게이지 취부 위치는 철도차량 구조체의 용접부 피로강도 관련 스트레인 게이지 취부 위치를 제시해 주고 있는 「ERRI B 12/RP 60-2nd(2001)⁷ Fig. B. 1」에 따랐다. 「ERRI B 12/RP 60-2nd(2001)⁷ Fig. B. 1」에서는 용접 비이드 면으로 부터 스트레인 게이지 그리드 위치는 $S_L \geq 3$ mm 이어야 하고, 통상적으로 10 mm 정도 떨어져 붙이도록 되어 있다.

Fig. 3 은 모터 감속기 고정대의 스트레인 게이지 취부 위치와 스트레인 게이지 그리드가 용접부 비이드 면으로 약 10 mm 정도 떨어져 있는 모습을 보여주고 있어서, ERRI B 12/RP 60-2nd(2001)⁷ 에서 제시하는 기준에 적정하게 붙여 있음을 보여주고 있다.



(a) position of the strain gauge



(b) position of the strain gauge grid $S_L \geq 3$ mm

Fig. 3 Fatigue strength of welds as shown by dynamic service stress measurements

3.3 실차 동응력 계측 시스템 구성

KTX-산천 차량의 모터 감속기 고정대의 실차 동응력 측정을 위한 실차 시험 차량 편성은 KTX-산천 #2 편성 차량의 동력차 2 호(PC 2) 차량 후부 대차에서 실시하였다.

Fig. 4 는 시험 열차 편성 및 시험 위치를 보여 주고 있다. 실차 동응력 측정을 위한 계측 시스템은 Fig. 5 와 같다. Fig. 5 에서 보는 바와 같이 차체 하부 언더프레임에 설치되어 있는 모터 감속기 고정대 용접부에 스트레인 게이지 5 개소를 취부하였다. 취부된 스트레인 게이지 5 개 전체를 브리지 박스를 통해 상용화 된 DAQ(MGC plus) 시스템을 구성하여 계측 시스템을 구축하였다.

본 실험에서는 데이터 계측 시스템 구동 전원으로 배터리를 사용함으로써 구동원에 의한 noise 를 최소화 되도록 하였다.



Fig. 4 Test train sets

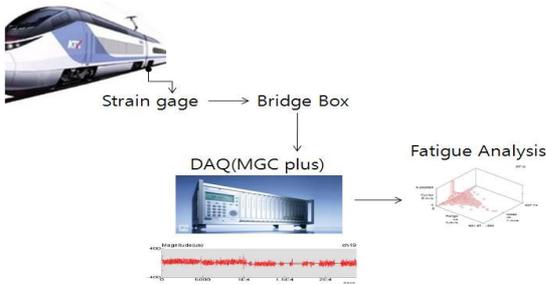


Fig. 5 Measuring system of dynamic service stress measurements

3.4 실차 동응력 시험 구간 및 조건

실차 동응력 시험 관련 국내외 시험 기준으로 특별히 규정되어 있는 것은 없다. 하지만, 실차 동응력 시험을 실시하는 경우에는 주행 구간에 따라 동응력 크기 빈도가 다르게 나타나므로 실차 동응력 시험은 실제 운행 구간에서 영업 운전 조건으로 실행하는 것이 바람직하다 할 수 있다. 따라서 KTX-산천 차량의 주요 운행 노선이 고속 선로와 기존선로 이루어진 경부선, 기존선구간인 호남선, 경전선, 전라선을 운행하고 있으므로 본 연구에서는 시험 구간으로 경부선 및 경전선 구간을 포함하고 있는 「마산 - 동대구 - 대전 - 서울(420 km)」 구간으로 설정하여 시험하였다.

3.5 실차 동응력 측정 결과 및 분석방법

KTX-산천 차량의 모터 감속기 고정대에 대한 실차 동응력 시험에서 측정된 데이터를 rain-flow counting 방식에 의한 BS 7608⁸의 S-N : Class F(파손 확률 2.3%)을 적용하여 누적 손상을 계산하였다. 본 시험에서 모터 감속기 고정대에 설치된 스트레인 게이지 #1 번 ~ #5 까지는 용접 비이드면으로부터 10mm 정도 떨어진 모재부에 설치되었다.

모터 감속기 고정대의 맞대기 용접 형상은 「BS 7608⁸」 맞대기 용접부의 F 등급에 해당된다. 철도차량 주요 용접 부재의 누적 손상 평가는 시험 차량이 운행 구간을 1 회 주행할 때 발생하는

실동응력 값에 따른 손상 값을 가지고, 누적 손상 값이 1(unity) 보다 작아야 함을 차량 설계 수명인 30 년 주행거리인 18,000,000 km 로 환산하여 평가하게 된다. Fig. 6 은 BS 7608 의 S-N 선도이며 BS 7608 의 Class 별 피로 한도를 보여주고 있다.

Fig. 7 은 KTX-산천 #2 편성 시험 열차 스트레인 게이지 #2 마산 → 서울 구간에서 측정되어진 실차 동 응력 측정 예를 보여 주고 있다.

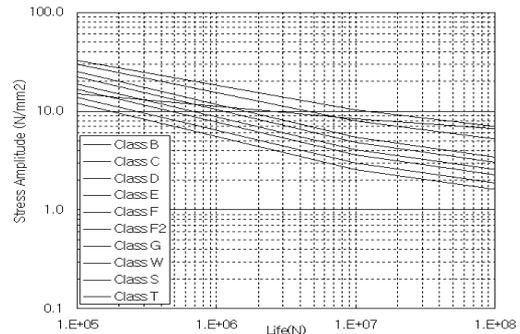


Fig. 6 S-N diagram of BS 7608

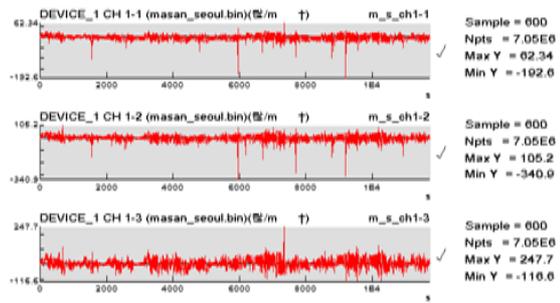


Fig. 7 Test results of dynamic service stress : strain gauge #2

3.6 피로수명 평가

KTX-산천 차량 모터 감속기 고정대의 설계 피로수명 평가는 실차 동 응력 시험 결과를 스트레인 게이지별 cycle histogram 분석을 통해 연간 운행거리 600,000 km 및 설계 수명 30 년을 고려한 설계수명 대비 안전계수를 평가하여 실시하였다. Fig. 8 은 모터 감속기 고정대에 취부 된 스트레인 게이지 #2 의 cycle histogram 분석 예를 보여 주고 있다.

또한 Table 3 은 실차 동응력을 서울 → 마산 구간 420 km 구간을 반복하여 운행할 수 있는 누

적 손상도를 스트레인 게이지 #1 ~ #5 에 대하여 실동응력 값을 계산한 후, 설계수명거리 18,000,000 km 로 나누어 누적 손상으로 피로 수명을 평가한 결과이다. Table 3 에서 스트레인 게이지 취부 위치 #3 가 가장 취약하지만, 설계 수명 기준으로 평가할 경우 1.46 으로 안전함을 알 수 있다. 이는 KTX-산천 차량 모터 감속기 고정대의 설계 피로 수명은 실동응력 값에 비교하여 안전하게 설계되었음을 알 수 있다.

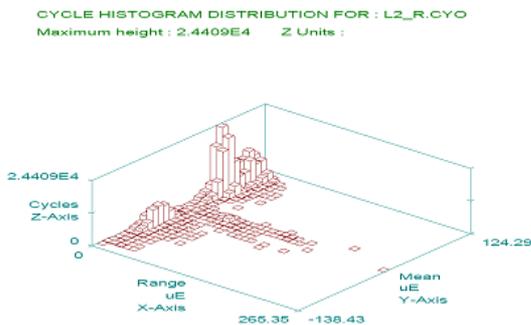


Fig. 8 Cycle histograms ; strain gauge #2

Table 3 Dynamic service stress on fatigue life assessment

| Gage no. | Fatigue life(A) (Masan->Seoul repeats) | Estimated operating distance(km) | Safety factor |
|----------|--|----------------------------------|---------------|
| #1 | ∞ | ∞ | ∞ |
| #2 | 1.182 e5 | 49,644,000 | 2.76 |
| #3 | 6.257 e4 | 26,280,000 | 1.46 |
| #4 | ∞ | ∞ | ∞ |
| #5 | 1.261 e5 | 52,962,000 | 2.94 |

4. 결론

본 연구에서는 KTX-산천 차량의 주요 구조 및 장치에 해당하는 모터 감속기 고정대의 설계 기준에 따라 적정하게 설계 되었는지와 실제 운용 선로에서의 피로 수명 평가를 실차 동응력 시험을 통해 평가해 보았다. 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, KTX-산천 차량의 모터 감속기 고정대는 철도안전법 제 26 조 기준에 적합하게 설계되었고, 단계별 설계 적정성 분석을 통해 피로 설계가 적합하게 되었음을 알 수 있었다.

둘째, 차체-대차 연결장치에 해당하는 모터 감

속기 고정대의 피로 설계 수명은 현재의 KTX-산천 차량 운행 조건 하에서 설계 기준인 연간 주행거리 600,000 km/year 로 30 년 운용하는 것을 기준으로 피로 설계 수명은 1.46 배로 안전하게 설계되었음을 확인하였다.

참고문헌

1. Jun, H. K., Seo, J. W., Lee, D. H., and Kim, H. J., "A Study on the Fatigue Crack Evaluation Method of Railway Bogie Frame," Journal of the Society for Railway, Vol. 14, No. 6, pp. 16-24, 2009.
2. Jun, H. K., Seo, J. W., Lee, D. H., and Kim, H. J., "A Study on the Fatigue Crack Evaluation Method of EMU Bogie Frame," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 983-984, 2008.
3. Ham, Y. S., Seo, J. W., Kwon, S. J., and Lee, D. H., "Evaluation of Running Safety for Depressed Center Flat Car of 3-axle Bogie," Journal of KSPE, Vol. 28, No. 5, pp. 559-564, 2011.
4. Oda, Y., Yagi, T., Okino, T., and Ishiduka, H., "Fatigue Life Estimation of Welds on Truck Frames for Rolling Stock Based on Stress Frequency Distribution Caused by Service Loads," RTRI Report, Vol. 23, No. 4, pp. 17-22, 2009.
5. UIC 566, "Loadings of coach bodies and their components," 2012.
6. ERRI Report B 12/RP17, "Programme of tests to be carried out on wagons with steel underframe and body structure and on their cast steel frame bogies," 1997.
7. ERRI B 12/RP 60-2nd, "Tests to demonstrate the strength of railway vehicles," 2001.
8. BS 7608, "Fatigue design and assessment of steel structures," 1993.