

## 전동차용 대차프레임 피로균열 평가법 연구

## A study on the fatigue crack evaluation method of EMU bogie frame

\*전현규<sup>1</sup>, 서정원<sup>1</sup>, 이동형<sup>1</sup>, 김형진<sup>2</sup>\*H.K.Jun(hkjun@krii.re.kr)<sup>1</sup>, J.W.Seo<sup>1</sup>, D.H.Lee<sup>1</sup>, H.J.Kim<sup>2</sup><sup>1</sup> 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실, <sup>2</sup> 한국철도기술연구원 철도구조연구실

Key words : Railway bogie frame, Crack growth analysis, Tolerable crack size

## 1. 서론

용접대차는 제작과정 중 발생하는 용입부족 및 기공 등의 초기결함, 용접부 불연속, 잔류응력, HAZ부 재료의 국부적 강도저하 등 다양한 결함요인이 잠재되어 있다<sup>(1,2)</sup>. 그러나 현재의 용접기술로는 구조물에 발생하는 결함을 원천적으로 방지할 수 없기 때문에 사용기간 중 안전성을 확보하기 위하여 정기적인 검사프로그램이 수행되고 있다. 현재 현장에서는 검사를 통해 균열 또는 손상부위가 발견되면 보수작업만 수행될 뿐, 균열의 발생원인, 균열로 인한 건전성 저하 등에 대한 평가는 이루어지지 않고 있다. 한편 비파괴검사방법의 한계로 인하여 충분한 크기의 균열이 발견되지 않을 수도 있으나, 이러한 균열의 존재로 인하여 구조물의 안전성이나 기능이 상실될 가능성이 없는지에 대한 평가는 이루어지지 않고 있다. 또한 균열이 성장하여 정기검사기간 이전에 불안정균열성장이 시작되는 임계균열크기에 도달할 수 있는지에 대해서도 평가할 필요가 있다<sup>(3)</sup>.

현재 국내에서의 대차구조강도평가<sup>(4,5)</sup>는 설계단계에서 내구성을 평가하기 위한 목적으로 수행되고 있을 뿐, 사용 중에 발견된 균열에 의한 내구성의 저하 등에 대한 연구는 아직까지 찾기 힘들다. 국내에서 운용중인 전동차의 노후화가 진행됨에 따라 균열의 발생가능성은 점차 높아지고 있으므로 균열의 위치, 크기, 작용하중 등에 대한 손상을 정량적으로 평가할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

이러한 이유로 본 논문에서는 대차틀에서 발생하고 있는 균열의 건전성 평가를 위한 평가법을 제시하였으며, 영업노선에서의 운전하중을 측정하여 균열의 성장가능성을 평가하고 수용 가능한 균열크기를 산정하였다.

## 2. 대차를 피로균열평가 모델

## 2.1 피로균열평가절차

파괴역학(fracture mechanics)은 균열이 존재하는 구조물의 건전성을 평가하기 위한 것으로 선형탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics)에서 균열이 급속도로 전파되는 불안정 균열성장(unstable crack growth)이 일어나는 조건<sup>(3)</sup>은 다음과 같다.

$$K \geq K_c \quad (1)$$

여기서 응력확대계수(stress intensity factor, SIF),  $K$ 는 구조물의 기하학적 형상, 작용하중, 균열크기 및 위치의 함수로 수치해석 및 유한요소해석(finite element analysis)으로 계산할 수 있다. 한편,  $K_c$ 는 소재의 파괴인성(fracture toughness)으로 재료시험을 통해 측정한다. 구조물에 발생된 균열은 반복적인 작용하중에 따라 성장하므로 Fig. 1과 같이 매 하중주기에 대해 균열성장량을 계산하여 평가해야 한다. 따라서 대차틀에 존재하는 균열의 구조 건전성을 평가하기 위해서는 초기균열길이,  $a_0$ 에 대해 하중이력에 의한 균열성장량,  $\Delta a$ 를 계산하고 성장된 균열크기,  $a$ 를 이용하여 최대 응력확대계수,  $K_{max}$ 를 계산한 후 식 (1)의 조건이 만족되는지 확인하는 작업을 모든 하중주기에 대해 반복적으로 수행해야 한다. 한편, 노후된 대차틀에서는 Fig. 2와 같이 사이드프레임과 트랜스 연결부(①, ②), 사이드프레임 굴곡부(③), 대차구성품 부착을 위한 브라켓(④, ⑤)에서 균열이 주로 발생되고 있다.

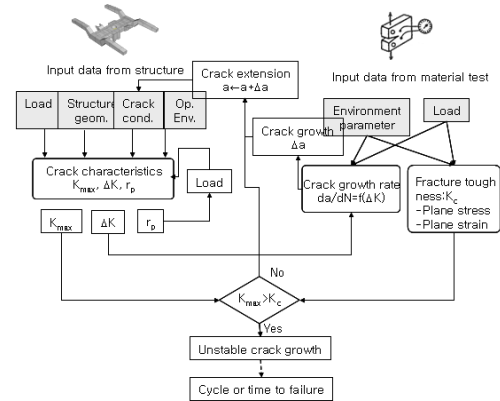


Fig. 1 Integrity evaluation procedure of a cracked structure

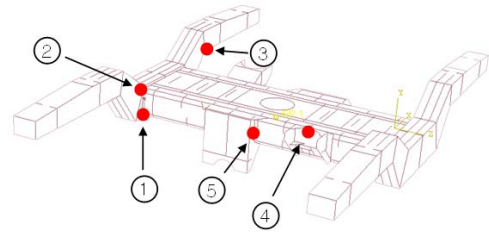


Fig. 2 Crack locations found from the aged railway bogie frames which have 20 years commercial operation histories

## 2.2 하중이력 측정

대차틀에 생성된 균열이 운행 중 임계균열로 성장하지 않기 위한 수용 가능한 균열크기를 계산하기 위하여 운행 중 하중이력을 측정하고 균열성장해석을 수행하였다. 이를 위하여 대차틀 취약부에 스트레인게이지(strain gauge)를 붙이고 실제 영업노선에서의 운행 중 하중이력을 측정하였다. 하중이력은 차체 및 대차의 하중을 지지하는 위치(①, ② 및 ③)에서 측정하였다. ①, ② 위치에서는 주응력방향을 미리 예측할 수 없어 3축 게이지를 부착하였으며, ③ 위치에서는 주응력이 예측되는 방향으로 1축 게이지를 부착하였다.

Fig. 3(a)는 영업노선을 1회 운행하며 측정한 ③위치에서의 변형률 이력이다. 또한 불규칙한 하중이력을 일정진폭의 하중이력으로 변환하기 위하여 레인플로우(rain flow) 방법을 이용하여 응력진폭에 따른 발생횟수를 계산하였다. Fig. 3(b)는 하중이력을 사이클카운팅한 것으로 최대 진폭과 최소 진폭의 간격은 32구간으로 하였으며, 각각의 구간에서의 발생횟수를 산출하였다.

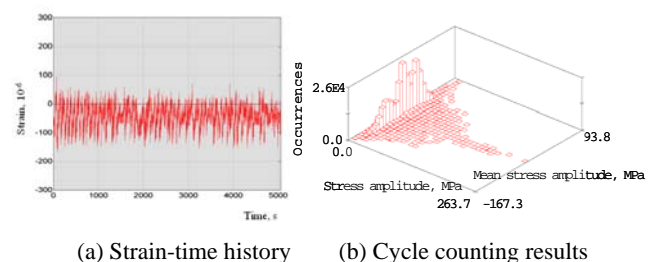


Fig. 3 Strain histories measured at point ③ during commercial line operation

### 2.3 피로균열성장 해석

응력확대계수,  $K$ 는 작용응력,  $\sigma$ , 균열길이,  $a$  및 구조물 형상,  $f(\theta)$ 의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(\theta) \quad (2)$$

여기서,  $f(\theta)$ 는 구조물 및 균열길이에 따른 함수로써 수치해석 및 유한요소법으로 계산할 수 있으나, 대차틀에서의 균열성장해석과 같이 균열길이,  $a$ 의 성장에 따라 수많은 반복계산이 필요한 경우에는 현실적으로 적용이 불가능하다. 이러한 경우 Paris 법칙<sup>(6)</sup>이 이용되고 있다. 본 연구에서는 보수적인 해석을 위해 균열의 진전방향이 주응력방향에 수직한 방향이라고 가정하여 균열열림(Mode I)방향의 응력확대계수를 계산하였으며, 대차틀에서 발생한 균열의 크기가 대차틀의 형상에 비해 상대적으로 작은 것에 착안하여 대차틀에서의 균열을 무한평판에서의 균열로 가정하고  $f(\theta)=1.12$ 를 사용하여 해석을 단순화 하였다.

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \cdot 1.12 \quad (3)$$

따라서 응력진폭 및 그때의 균열크기를 알고 있으면 Paris법칙을 이용하여 하중이력에 따른 균열성장량을 계산할 수 있다.

$$da/dN = C(\Delta K_I)^m \quad (4)$$

균열성장량을 예측하기 위해서 문헌연구<sup>(6)</sup>를 통해 대차소재로 사용되고 있는 SM490A 소재의 균열성장곡선(crack growth curve)을 구하였으며, 균열의 발생위치가 용접부임을 감안하여 열영향부(HAZ)의 균열성장곡선을 이용하였다. 해석에 사용된 응력비에 따른 균열성장곡선은 다음과 같다.

$$da/dN = 1.54^{-9} (\Delta K_I)^{3.78}, R = 0.1 \quad (5)$$

$$da/dN = 1.04^{-9} (\Delta K_I)^{3.62}, R = 0.3$$

$$da/dN = 1.84^{-9} (\Delta K_I)^{3.48}, R = 0.5$$

한편, 용접열영향부의 하한계 응력확대계수 진폭,  $\Delta K_{TH}$ 는  $R=0.1$ 일 경우  $14.75 \text{ MPa} \sqrt{m}$ ,  $R=0.3$ 일 경우  $15.30 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 로 이 값보다 응력확대계수 진폭이 작을 경우에는 균열이 성장하지 않는 것으로 가정하였다.

수용 가능한 균열크기를 계산하기 위하여 ①, ② 및 ③위치에 가상의 초기균열을 모델링하고 전동차 운행 중 피로하중에 의한 균열성장을 시뮬레이션 하였다. 균열성장량을 계산하기 위해서 취약부위에서 측정된 하중이력(load transient)을 이용하여 하중진폭의 크기에 따라 배열하고 이중 하나의 하중진폭을 선택하여 응력진폭,  $\Delta \sigma$  및 응력확대계수 진폭,  $\Delta K$ 를 계산하고 하한계 응력확대계수진폭,  $\Delta K_{TH}$ 과 비교하여  $\Delta K < \Delta K_{TH}$ 이면 균열성장이 발생되지 않는다고 가정하고 다음 하중이력에 대해 해석을 수행하였으며,  $\Delta K \geq \Delta K_{TH}$ 이면 Paris 법칙에 의해 균열성장량을 계산하였다. 이러한 과정은 1회 반복횟수(repeated number)에 대해 수 만번 반복해야 하므로 이를 위하여 C++ 언어를 이용한 프로그램을 개발하였다.

Fig. 4는 ①, ② 및 ③위치에서의 사이클 수에 따른 균열성장곡선으로 ①위치에서는 초기균열길이,  $a_0=37.0 \text{ mm}$ 일 경우에는 모

든 하중에 대해  $\Delta K < \Delta K_{TH}$ 의 조건이 만족되어 균열이 성장하지 않았으며,  $a_0=38.0 \text{ mm}$ 일 경우에는 하중조건 중  $\Delta K \geq \Delta K_{TH}$ 의 조건이 만족되는 경우가 있어 초기에는 균열이 천천히 진전하다가 반복횟수 약 180 이상의 구간에서는 급속하게 진전하는 것으로 평가되었다. ②위치에서는 초기균열길이,  $a_0=55.0 \text{ mm}$ 일 경우에는 모든 하중에 대해 균열이 성장하지 않았으며,  $a_0=56.0 \text{ mm}$ 일 경우에는 반복횟수 약 170 이상의 구간에서 급속하게 진전하는 것으로 평가되었다. ③위치에서는 초기균열길이,  $a_0=39.0 \text{ mm}$ 일 경우에는 모든 하중에 대해 균열이 성장하지 않았으며,  $a_0=40.0 \text{ mm}$ 일 경우에는 반복횟수 약 140 이상의 구간에서 급속하게 진전하는 것으로 평가되었다. ①, ② 및 ③ 위치에서 작용한 하중의 크기가 다르기 때문에 급속한 균열성장이 일어나는 균열의 크기는 각각 다르게 나타났다. 급속한 균열성장이 일어나는 길이를 정확히 정의하기는 어려우나 Fig. 4에 따르면 ①위치에서는 대략 100 mm, ②에서는 120 mm, ③에서는 70 mm에서 균열성장속도가 급속히 빨라지는 것으로 판단된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 균열이 존재하는 대차틀의 구조건전성을 평가하기 위하여 균열성장해석을 위한 평가법을 제시하였다. 또한 영업노선에서의 실동응력을 측정하여 취약위치에서의 수용 가능한 균열크기를 계산하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 사이드프레임과 트랜슘이 만나는 윗면 및 아랫면, 사이드프레임 굴곡부 위치에서 자주 균열이 발생한다.
- 2) 영업노선에서 측정한 운행 하중이력하에서 수용 가능한 균열 길이는 ①, ② 및 ③위치에서 각각 37 mm, 55 mm 및 39 mm였다.
- 3) 급속한 균열성장이 일어나는 균열길이는 ①위치에서는 100 mm, ②에서는 120 mm, ③에서는 70 mm였다.

균열길이는 하중조건에 따라 달라지므로 운행조건의 변경에 따라 하중조건이 달라지면 다시 계산할 필요가 있다.

### 참고문헌

1. 강성원, "용접결함의 허용한계 평가방법", 대한용접학회지 제 9권 제 3호, pp.10-16, 1991.
2. BS 7608, "Code of practice for fatigue design and assessment of steel structure", British standard, 1993.
3. D. Broek, "The practical use of fracture mechanics", Kluwer academic publisher, pp.443-484, 1998.
4. 김정석, 김남포, 박병화, "UIC 기준에 근거한 틸팅 대차프레임의 피로강도평가", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 2004.
5. 최성규 외, "표준전동차 주행장치틀 피로강도평가", 한국철도기술연구원, 99도시철도차량 표준화 국산화 연구개발보고서, 1999.
6. 여인호 외, "유지보수 성능향상 기술연구-철도차량구조물의 잔존수명 평가기술 개발", 한국철도기술연구원, pp.65-80, 2006.

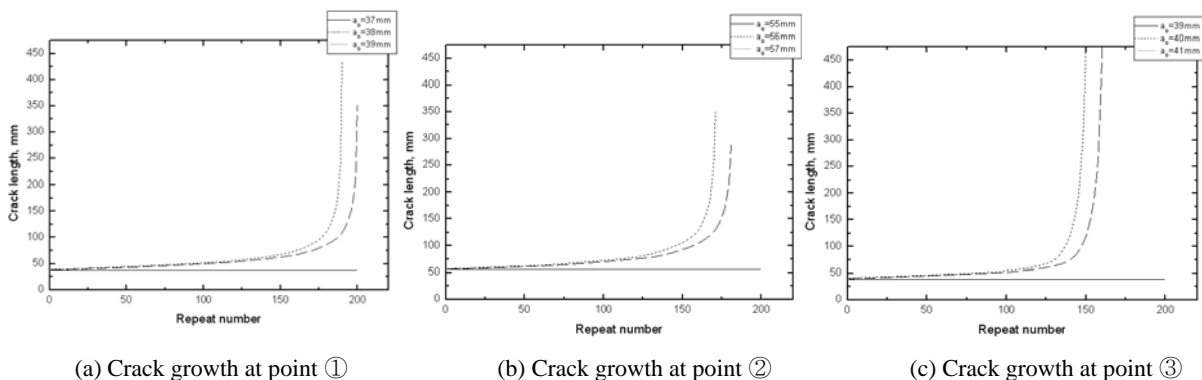


Fig. 4 Crack growth analysis results