

일정 및 변동하중하의 레일강의 피로특성

김철수* · 김정규*

(2000년 8월 31일 접수, 2001년 1월 16일 심사완료)

Fatigue Properties of Rail Steel Under Constant Amplitude Loading and Variable Amplitude Loading

Chul-Su Kim and Jung-Kyu Kim

Key Words: Detail Fracture(횡방향 파괴), 2-Parameter Weibull Distribution(2-모수 와이블 분포), Cumulative Distribution Function(누적분포함수), Fatigue Notch Factor(피로노치계수)

Abstract

In this study, fatigue growth behavior of the transverse crack, which was the most dangerous damage among the various types of rail defects, was investigated using the notched keyhole specimen under constant amplitude and variable amplitude loadings. Fatigue limit of smooth specimen in rail steel at $R=0$ was 110MPa, and the fatigue crack initiation life in the region of the low stress amplitude (ie. long life) occupied the major portion of the total fatigue life. The fatigue strength under variable amplitude loading was converted to the equivalent fatigue strength based upon Miner's rule, which was estimated approximately 9% lower than that under constant amplitude loading. Also, in the low ΔK_{ms} region ($\leq 21\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$), fatigue crack growth rate (da/dN) under constant amplitude loading was higher than that under variable amplitude loading, whereas the tendency was reversed in the high ΔK_{ms} region. It is believed that this behavior is due to the transition of fracture appearance.

1. 서론

차량의 전 하중을 지지하고 있는 레일은 차륜 접촉에 의한 마멸과 함께 반복하중으로 인한 피로에 의하여 손상이 발생하는 경우가 많다. 레일의 피로파손은 레일 이음부에서 나타나는 볼트홀 균열(bolt hole crack), 레일내의 개재물로부터 손상이 시작되는 버티컬 스플릿 헤드(vertical split head), 곡선레일에서 발생하는 경사균열인 헤드 체크(head check) 그리고 차륜의 이동방향에 수직으로 성장하는 횡방향 균열(transverse fissure or detail fracture) 등으로서 보고되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 레일의 파손들은 차량의 안전에 커다란 영향을 미치며, 특히 횡

방향 균열은 레일 두부에서 셸링(shelling)으로 발생하여 차량의 운행방향에 수직으로 진전하므로 가장 위험한 손상으로 보고되고 있다.⁽²⁾ 그러므로 궤도차량의 안전성 향상을 위해서는 이의 균열발생 및 진전 거동에 대한 체계적인 연구가 매우 필요하다.

횡방향균열의 발생에 대한 최근 연구들^(3~5)은 국외에서는 유한요소해석을 이용한 해석적인 방법과 실험적인 방법으로 수행되고 있다.^(1,2,6~10) Chau-Cho 등⁽³⁾은 레일의 피로균열발생에 관한 잔류응력의 영향을 평가하였고, Ringsberg 등⁽⁴⁾은 접촉하중에 의한 레일 두부의 균열발생조건을 평가였다. 또한 Jablonski 등⁽²⁾, Journet 등⁽⁶⁾과 Tang 등⁽⁸⁾은 스펙트럼하중하에서 실험실내의 소형시험편에 의한 횡방향균열의 진전수명을 평가하였다. 이와같이 국외에서는 일정 진폭 및 변동하중하에서 레일강의 균열발생 및 진전에 대하여 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나

* 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : kimj@email.hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0442 FAX : (02)2291-6707
* 회원, 한양대학교 대학원

국내의 연구현황^(9,10)을 살펴보면, 단일 및 혼합모드 하중하에서 레일강의 파괴조건 및 균열진전거동⁽⁹⁾에 관한 연구가 보고되고 있으나 이 밖의 연구는 대단히 미미한 실정이다. 특히 레일의 운전조건을 고려한 변동하중하에서 레일강의 피로특성에 관련된 연구는 행하지 않고 있다.

본 연구에서는 궤도차량용 구조물의 안전성의 확보를 위하여 레일강의 피로파손에 대한 연구의 일환으로 일정진폭 및 실제 하중이력에 준한 변동하중하에서 국산 레일강의 피로수명 및 이의 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 60kg급 레일강으로서 이의 화학성분과 기계적 성분은 Table 1 및 2와 같다.

시험편은 Fig. 1에서 나타낸 바 같이 키홀 시험편(keyhole specimen)⁽¹¹⁾이며, 이 시험편은 피로균열 발생 및 진전수명을 동시에 평가할 수 있는 장점을 갖고 있다. 키홀 시험편에 대한 응력집중계수, k_t 는 유한요소 해석을 수행하여 약 4.18을 얻었다. 그리고 시험편의 공칭응력은 식 (1)⁽¹¹⁾에 의하여 계산될 수 있다.

$$\sigma_N = \left(\frac{3(W+L)}{W-L} + 1 \right) \frac{P}{B(W-L)} \quad (1)$$

여기서, P 는 키홀 시험편에 부하되는 하중이고 B 는 시험편의 두께, W 는 리가멘트 길이, σ_N 은 공칭응력, L 은 중앙의 홀 중심부터 노치 선단까지의 길이이다. 레일에서의 횡방향 균열은 레일 두부에서 쉘링으로 발생하여 동전형태(penny-shaped)로 차량의 운행방향에 수직으로 진전하는 것이다. 따라서, 시험편은 이를 상사하기 위해 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 차량의 운행방향에 수직으로 레일의 두부에서 복부까지 채취하였다.^(2,6-9)

2.2 피로시험

피로시험은 상온의 대기 중에서 유압서어보식 피로시험기에 마이크로 컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하여 일정진폭 및 변동하중하에서 하중제어로 수행하였다. 이때 작용하중은 응력비 $R=0$

에서 정현파로 4~8Hz로 부하되었다.

Table 1 Chemical composition of material (wt.%)

C	Cr	Si	Mn	Ni	P	S
0.721	0.053	0.258	0.873	0.032	0.0124	0.005

Table 2 Mechanical properties of material

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	K_{Ic}^* (MPa \sqrt{m})
481	887	14.5	46.6

* : Fracture toughness⁽⁹⁾

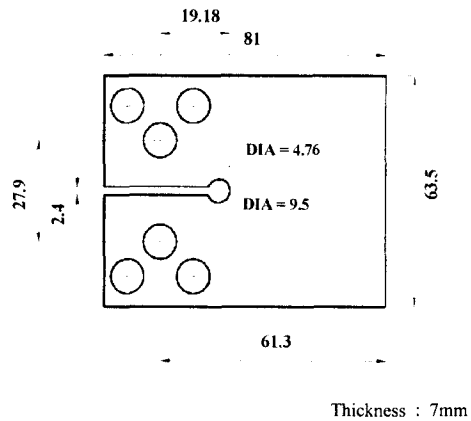


Fig. 1 Configuration of keyhole specimen($k_t \approx 4.18$)

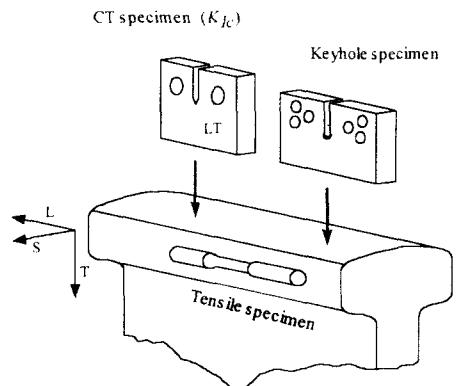


Fig. 2 Schematic representation of tensile, CT and keyhole specimen extracted from rail

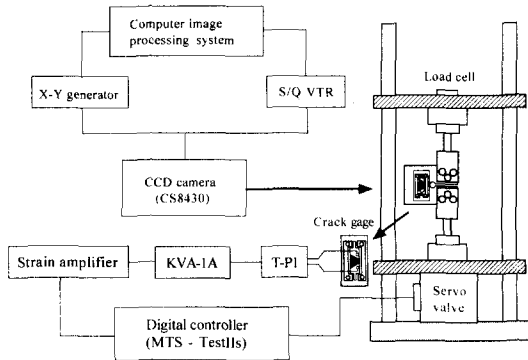


Fig. 3 Experimental apparatus for constant and variable amplitude load test

Fig. 3은 일정 및 변동하중에서 사용된 균열길이측정시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 균열 길이는 두 가지 방법을 함께 사용하여 측정하였다. 먼저 피로균열 발생시 정확한 사이클수의 확인을 위하여 시험편 한쪽 면의 노치선단에 크랙게이지(KYOWA KV-25B)를 부착하였다. 그리고 다른 쪽면은 경면처리한 후, 균열발생에서 파단까지 화상처리 시스템(computerized image processing system)을 이용하여 균열선단의 경로 및 길이를 직접 확인하였다.

한편 변동하중시험의 경우 시험편에 변동하중을 정확히 전달하기 어려우므로 모노볼그립⁽¹¹⁾(monoball grip)을 이용하였다. 이는 Stephen⁽¹¹⁾이 제안한 지그로서 실제 레일의 하중이력을 그대로 시험편에 전달할 수 있고 부하의 얼라인먼트를 쉽게 맞추므로 변동하중 피로시험에 매우 적합하다고 할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 일정진폭하중하의 피로수명 평가

실제 하중하의 피로수명을 평가하기 위해서는 일정진폭하의 피로수명에 대한 자료는 매우 중요하다.

Fig. 4는 응력비 $R=0$ 의 일정진폭하중하에서 응력진폭과 반복수의 관계를 나타낸 것이며, 피로한도에 대한 무한수명은 $N_f = 2 \times 10^6$ 사이클수로 정의하였다. 이 그림에서 증설점은 화학적 조성이 유사한 평활시험편에 대한 Takao⁽¹²⁾ 등의 시험결과이며, 일점쇄선은 키홀시험편의 피로강도를 Neuber⁽¹³⁾

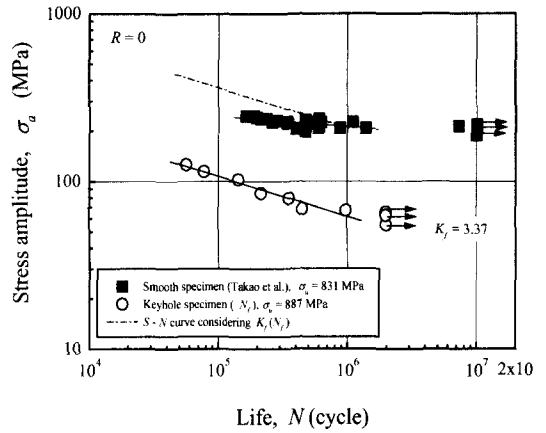


Fig. 4 S - N curves of 60kg rail steel in Korea and Japan

가 제안한 피로노치계수, $k_f (\approx 3.37)$ 를 고려하여 평활재의 데이터로 환산한 것이다. 키홀 시험편의 피로한도는 약 59 MPa로 평가되었으며, 응력 진폭, σ_a 에 대한 파손수명, N_f 에 대한 관계는 식 (2)와 같다.

$$\sigma_a = 1708.56 N_f^{-0.24} \quad (2)$$

또한 k_f 를 고려하여 평활재의 데이터로 환산된 본 시험편의 결과는 Takao의 시험결과⁽¹²⁾와 매우 유사한 경향을 나타내고 있다. 이 때의 피로한도는 110 MPa로써 노치로 인한 피로한도는 약 53%감소 되었음을 알 수 있다.

한편 기계구조물의 피로수명, N_f 는 균열 발생수명, N_i 와 균열 전파수명, N_p 로 나눌 수 있으며, 이는 피로수명을 고려한 설계에 있어서 매우 중요한 자료가 될 수 있다. 먼저 이들 수명을 평가하기 위해서는 균열발생수명에 대한 균열발생 길이의 정의가 매우 중요하다. 시험편 노치선단에서의 균열발생 길이에 대한 정의는 미시 및 거시적 관점에서 여러 연구자들⁽¹⁴⁻¹⁶⁾에 의하여 보고되고 있지만, 이의 정의는 아직 확립되어 있지 않은 상태이다.⁽¹⁶⁾ 본 연구에서 균열발생길이, a_i 는 육안으로 식별이 가능하며 미소균열(short crack)의 거동에서 긴 균열(long crack)의 거동으로 천이 되는 균열길이를 정의하였다. 이는 시험편 노치선단에서 많이 사용되는 것⁽¹¹⁾으로서 Smith와 Miller⁽¹³⁾가 제안한 식

(3)으로 정의된다.

$$a_i = 0.13\sqrt{D\rho} \quad (\text{unit: mm}) \quad (3)$$

여기서, D 는 노치깊이, ρ 는 노치선단의 반지름 이고, 본 시험편의 a_i 값은 약 1.3mm로 평가되었다. Fig. 5는 일정 및 실제 하중이력하에서 화상처리 시스템을 통해 얻은 균열발생길이를 나타낸 사진의 일례이다. 또한 Fig. 6은 임의의 피로강도에 대한 균열발생수명을 진수명에 대하여 무차원화하여 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 응력진폭이 낮을수록 수명영역에서는 균열발생 수명이 지배적이지만, 응력진폭이 높은 저 수명영역에서는 이의 발생수명이 감소됨을 알 수 있다.

3.2 실제하중에 준한 변동하중하의 피로수명 평가

실제 하중하에서의 레일의 피로수명을 평가하기 위해서는 레일이 받는 실제 하중이력을 구축할 필요가 있다. Fig. 7은 실제 하중이력을 검출하기 위한 측정시스템의 구성을 나타낸 것이다. 레일의 하중이력을 구축하기 위하여 레일에 변형률 게이지를 부착하여 열차 통과시 변형률을 얻었다. 이때의 부착위치와 방향은 그림에서 보는 바와 같이 침목 사이에 웹(web)의 상단부에서 차량의 진행하는 방향으로 부착하였다.⁽¹⁷⁾

Fig. 8은 경부선 성환-천안 구간에서 48시간동안 객차 및 화차 30대의 열차 통과시에 얻어진 볼테지(voltage)이력을 시간에 대하여 필터링(filtering)하여 나타낸 것이다.⁽¹⁷⁾ 이 그림에서 큰 파형은 기관차 대차의 윤축이 스트레인 게이지가 부착된 레일의 상부를 통과 할 때 발생된 것으로 우측 상단에 나타낸 상세도는 아의 일례이다. 이 그림으로부터

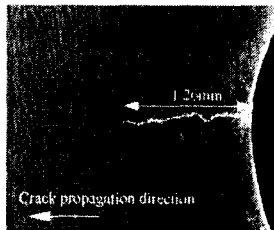


Fig. 5 Photo derived from computerized image processing system

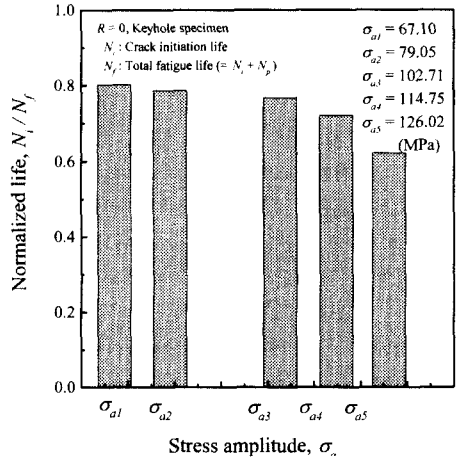


Fig. 6 Normalized life(crack initiation life / total fatigue life) with fatigue strength

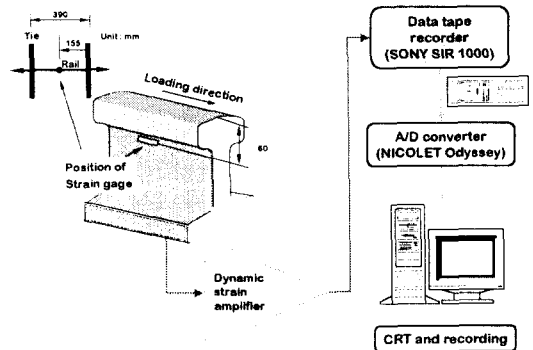


Fig. 7 Schematic representation of system for measuring load history in rail

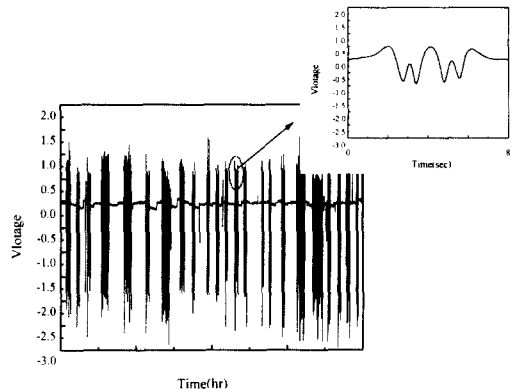


Fig. 8 Actual voltage history detected in rail

다음과 같은 과정에 의하여 하중이력을 구축하였다. 레일 손상의 대부분은 인장응력에서 발생되므로^(1,4,18) Fig. 8에서 먼저 음(negative)의 볼테지를 소거하였으며, 선행열차 통과 후부터 다음 열차 전까지의 무부하상태에서 형성된 작은 볼테지는 피크 사이클 카운팅법(peak cycle counting method)을 수행하여 제거하였다. 그리고 볼테지로부터 얻어진 최대변형률은 2.68×10^{-4} mm/mm 이하로서 탄성한도내의 값이므로 Hooke's law에 의하여 레일이 받는 응력값을 산출하였다. Fig. 9는 측정된 볼테지 이력으로부터 상기의 과정에 의하여 구축된 실제 최대응력 이력을 항복강도로 무차원화하여 리버설 수(number of reversals)에 대하여 나타낸 것이다.

변동하중에 의한 결과를 일정진폭하중하의 피로 거동과 비교 및 평가하기 위해서는 변동하중에 대한 일정진폭으로의 등가응력 평가가 필요하다. 변동하중하에서 Miner 법칙을 기본으로 한 등가응력 평가는 피로수명예측에 유용함이 보고⁽¹⁹⁾되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 실제하중이력으로부터 피크 사이클 카운팅하여 얻어진 변동 응력의 이력을 연속 확률분포를 도입한 2-모수 와이블확률분포 함수로 가정하여 등가응력을 평가하였다. Fig. 10은 Fig. 9의 응력이력의 일례를 누적분포함수로 나타낸 것이다. 이는 Fig. 9의 응력이력으로부터 식 (4)와 같은 2-모수 와이블 누적분포함수(cumulative distribution function)⁽²⁰⁾로 근사화하여 형상 및 척도계수를 구할 수 있다.

$$F_p(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{\theta}\right)^\lambda\right\} \quad (4)$$

여기서, $F_p(\sigma)$ 는 누적분포함수, λ 는 형상계수(shape factor), θ 는 척도계수(scale factor)이다. 이와 같이 실제 하중이력에 준한 변동응력 이력에서 얻은 λ 및 θ , 그리고 $S-N$ 곡선 ($\sigma^m N_f = C$)에 있어서 재료 상수 m 으로부터 얻어진 등가응력은 식 (5)⁽¹⁹⁾와 같이 Gamma함수, $\Gamma(\cdot)$ 형태로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{eq} = \theta \left\{ \Gamma\left(\frac{m}{\lambda} + 1\right) \right\}^{1/m} \quad (5)$$

Fig. 11은 실제 하중이력으로부터 얻어진 변동응력 이력의 등가응력에 대한 피로수명과 일정진폭

하의 피로수명을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 각각의 등가응력 수준은 실제하중이력으로부터 하중계수(loading scale factor)를 곱한 것이다. 여기서, 하중계수값은 원하는 수준의 등가응력을 식 (5)에 의하여 얻어진 등가응력으로 나누어 결정된다. Fig. 11에서 변동하중하의 피로강도는 일정진폭 하중하의 피로강도보다 약 9%정도 과소 평가됨을 알 수 있다. 이의 원인은 Fig. 12에서 보는 바와 같이 과대하중 사이의 발생빈도(occurrence ratio)가 매우 짧고, 또한 미소균열(short crack)의 경우에는 과대하중에 의한 균열 지연이 없기 때문⁽²¹⁾이라고 사료된다.

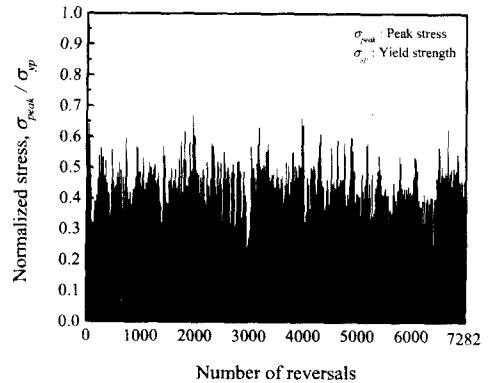


Fig. 9 Reconstructed peak stress history in rail

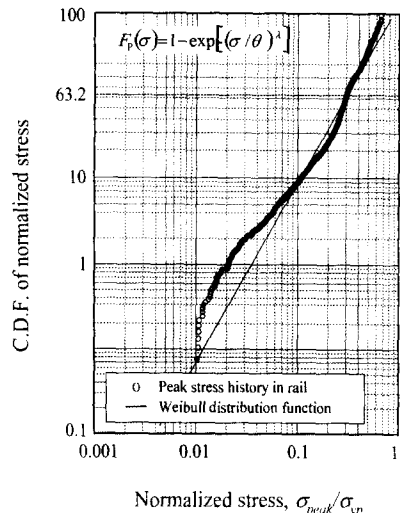


Fig. 10 The Weibull C.D.F. of peak stress

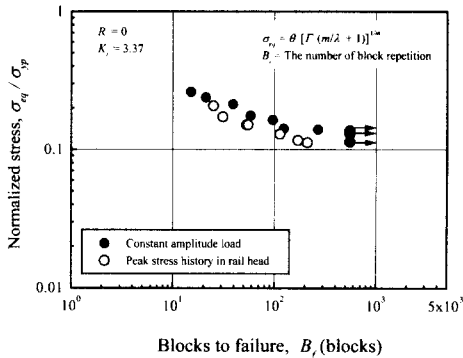


Fig. 11 Relation between calculated equivalent stress amplitude and fatigue life

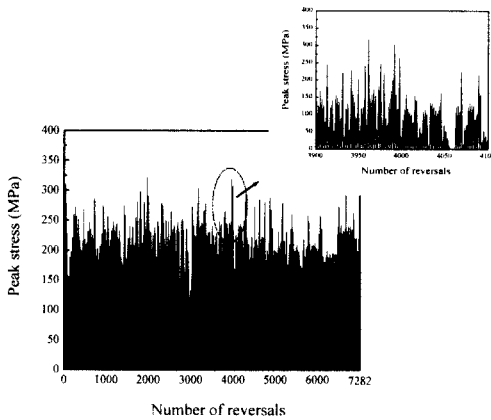


Fig. 12 Overload occurrence ratio of stress history in rail head

3.3 피로균열진전특성

피로수명을 평가함에 있어서는 균열발생 뿐만 아니라 균열전파수명에 대한 평가도 동시에 고려해야되므로, 일정 및 실제 하중에 준한 변동하중하에서 피로균열진전시험을 수행하였다.

Fig. 13은 일정진폭하중하의 다양한 응력비 (R) 0, 0.1, 0.5에서 CT시험편으로 얻은 시험결과⁽⁹⁾와 R=0에서 키홀시험편의 결과를 함께 나타낸 것이다. 여기서, 키홀시험편의 경우 $a_i = 1.3\text{mm}$ 로부터 파단시까지 피로균열진전특성을 검토하였다. R=0에서 두 시험편의 피로균열진전거동을 살펴보면, 낮은 ΔK 에서 약간의 차이가 있지만 전체적으로 매우 유사함을 보이고 있다.

Fig. 14는 일정진폭 및 실제하중하의 R=0에서 피로균열진전거동을 나타낸 것이다. 여기서, 응력

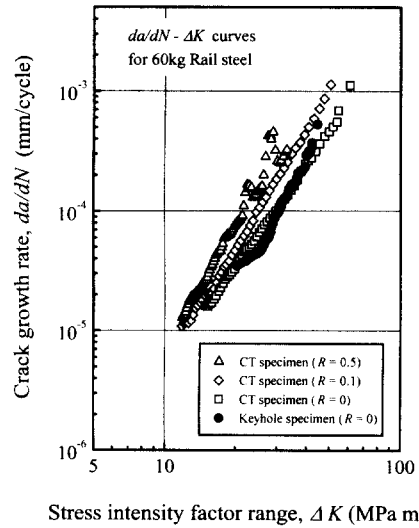


Fig. 13 Comparison of $da/dN - \Delta K$ curves using CT and keyhole specimen under constant amplitude load

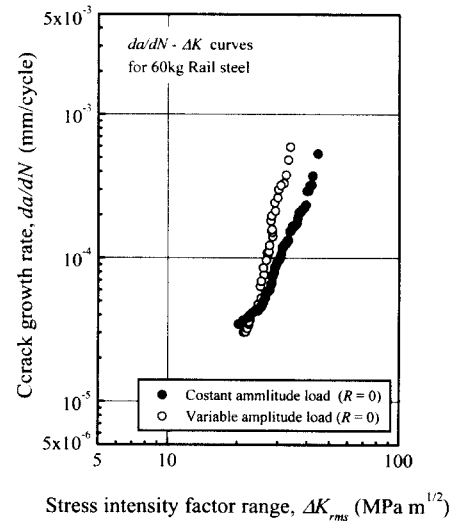


Fig. 14 Fatigue crack growth behavior of rail steel under constant and variable amplitude load

확계수범위는 Barsom⁽²²⁾과 Hudson⁽²³⁾이 제안한 RMS법(root mean square)을 이용한 특성 응력확대 계수범위, ΔK_{rms} 을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 낮은 ΔK 영역($\leq 21 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)에서는 실제하중보다 일정진폭 하중의 피로균열진전속도(da/dN)

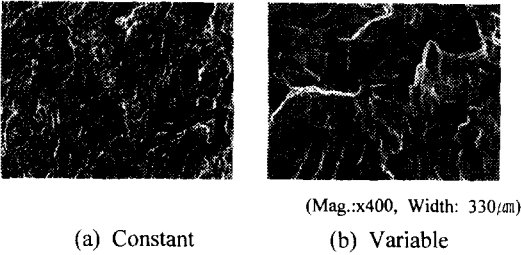


Fig. 15 SEM micrographs of fatigue fracture surface for rail steel ($\Delta K \approx 32\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

가 빠른 경향을 나타내지만, 높은 ΔK 영역일 수록 실제하중의 da/dN 이 커지므로 보다 빨리 불안정 파괴로 천이 됨을 보여주고 있다. 이의 양상은 각각의 하중 조건에서 파면해석을 통하여 알 수 있다. Fig. 15는 $\Delta K \approx 32\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 부근에서 파면양상을 나타낸 것이다. 높은 ΔK 영역($\Delta K \geq 25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)에서 실제하중의 파면양상은 일정진폭의 파면양상과 달리 정적파괴에서의 전형적인 벽개파괴의 양상이 부분적으로 나타나고 있다. 따라서, 실제하중하에서 피로균열진전 속도가 일정진폭의 경우보다 빠른 것은 파괴기구의 변화에 기인한다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 국산 60kg레일강의 피로특성을 평가하기 위하여 일정진폭 및 실제하중이력으로부터 근사시킨 변동하중하의 피로시험을 행하였다. 이의 결과는 다음과 같다.

(1) 일정진폭하의 피로시험으로부터 $R=0$ 에서 레일강의 피로강도는 110MPa로 평가되었다. 또한 노치로 인해 키홀 시험편의 피로강도는 평활재 시험편의 피로강도에 비해 약 53% 감소하였다.

(2) 키홀 시험편의 피로수명을 균열발생 및 전파수명으로 나누어 검토하면, 응력진폭이 낮은 고수명영역에서 균열발생 수명이 지배적이지만, 응력진폭이 높은 저수명영역에서는 이의 발생수명이 감소하였다.

(3) 실제하중이력부터 모사된 변동하중하의 피로강도는 일정진폭하중하의 피로강도보다 약 9% 감소 평가 되었다.

(4) 낮은 ΔK 영역($\leq 21\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)에서는 실제하중보다 일정진폭 하중의 피로균열진전속도(da/dN)

가 빠른 경향이 있지만, 높은 ΔK 영역($\geq 25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)에서는 파괴기구의 변화로 인하여 실제하중의 da/dN 이 높은 값을 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Orringer, O. and Morris, J. M., 1984, "Applied Research on Rail Fatigue and Fracture in the United States," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 1, pp. 23~49.
- (2) Jablonski, D., Tang Y. H. and Pelloux, R. M., 1987, "Simulation of Railroad Crack Growth Life Using Laboratory Specimen," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 19~22.
- (3) Chau-Cho, Y., Keer L. M. and Steele, R. K., 1997, "Three-Dimensional Residual Stress Effects on the Fatigue Crack Initiation in Rails," *Trans. of ASME Jour. of Tribology*, Vol. 119, pp. 660~666.
- (4) Rinsberg, J. W., Josefson, B. L., 1999, "Assessment of Conditions for Initiation of Cracks in the Heads of Railway Rails Due to Rolling Contact Fatigue," *Fatigue 99*, pp. 2597~2601.
- (5) Sih, G. C. and Tzou D. Y., 1984, "Three Dimensional Transverse Fatigue Crack Growth in Rail Head," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 1, pp. 103~115.
- (6) Journet, B. G. and Pelloux, R. M., 1987, "A Direct Method for Laboratory Spectrum Crack Growth Testing," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 19~22.
- (7) Journet, B. G. and Pelloux, R. M., 1987, "A Methodology for Studying Fatigue Crack Propagation under Spectrum Loading: Application to Rail Steel," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 8, pp. 117~123.
- (8) Tang, Y. H., Perlman, A. B., Orringer, O. and Jablonski, D. A., 1991, "Comparison of two crack

- growth rate models with laboratory spectrum and field tests on rail steel," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 15, pp. 1~9.
- (9) 김정규, 이종선, 김철수, 1999, "단일 및 혼합 모드 하중하에서의 레일강의 파괴조건 및 피로 균열진전거동," 대한기계학회논문집(A), 제23권, 제6호, pp. 1039~1047.
- (10) 성기득, 양원호, 조명래, 허성필, 2000, "철도 차량용 휠과 레일의 접촉특성 해석 및 형상 설계에 관한 연구(2)," 대한기계학회논문집(A), 제24권, 제5호, pp. 1238~1245.
- (11) Lease, K. B. and Stephens, R. I., 1991, "Verification of Variable Amplitude Fatigue Life Methodologies for a Cast Aluminum Alloy," *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, February-March 1, NO. 910163.
- (12) Takao N. and Syoichi K., 1984, "Effect of Small Material Defects on Fatigue Fracture of Carbon Steel Rail and Its Gas Pressure Weld," *RTRI Report 669.14.018294.2:621.791.011:539.43 (in Japanese)*, pp. 1~57.
- (13) Dowling, N. E., 1993, *Mechanical Behavior of Materials, Prentice-Hall International Editions*, pp. 422~426.
- (14) Smith, R. A. and Miller, K. J., 1977, "Fatigue Cracks at Notch," *Int. J. Fatigue*, Vol. 19, pp. 11~22.
- (15) Dowling, N. E., 1979, "Fatigue at Notch and the Local Strain and Fracture Mechanics Approaches," *ASTM STP 677*, pp. 247~273.
- (16) Shang D. G., Yao, W. X and Wang. D. J., 1998, "A New Approach to the Determination of Fatigue Crack Initiation Size," *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No. 9, pp. 683~687.
- (17) 한국철도연구원, 1998, 레일용접부의 특성에 관한 연구, 시설연구부, 연구98-35
- (18) Orringer, O., 1996, "Crack Propagation And Fracture in Contacting Bodies," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 19., No. 11, pp. 1329~1338.
- (19) Amijima S., Tanimoto T. and Matsuoka T., 1984, "Fatigue Life Estimation of FRP under Random Loading," *J. Soc. of Mat. Sci. (in Japanese)*, Vol. 34, No. 378, pp. 293~299.
- (20) Weibull, W., 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 18, pp. 293~297.
- (21) Sadananda, K. and Vasudevant, A. K., 1997, "Short Crack Growth and Internal Stresses," *Int. J. Fatigue*, Vol. 19, No. 1, pp. S99~S108.
- (22) Barsom, J., 1976, "Fatigue Crack Growth Under Variable-Amplitude Loading in Various Bridge Steel," *ASTM STP 595*, pp. 217~235.
- (23) Hudson, C. M., 1981, "A Root-Mean-Square Approach for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading," *ASTM STP 748*, pp. 41~52.