

단일 및 혼합모드 하중하에서의 레일강의 파괴조건 및 피로균열진전거동

김정규* · 이종선** · 김철수**
(1998년 11월 27일 접수)

Fracture Criterion and Fatigue Crack Growth Behavior of Rail Steel Under Mode I & Mixed Mode Loading

Jung-Kyu Kim, Jong-Sun Lee and Chul-Soo Kim

Key Words: Rail Steel(레일강), Mixed Mode(혼합모드), Fatigue Crack Growth Behavior(피로균열진전거동), Finite Element Analysis(유한요소해석), CTS Specimen (Compact Tension & Shear 시험편)

Abstract

It is necessary to evaluate the fatigue behavior of rail steel under the multi-axial stress state to assure the railway vehicle's safety. For this purpose, the stress analysis to investigate the crack initiation criteria, static failure and fatigue behavior under mixed-mode are performed. The stress analysis results show that the initiation of the transverse fissure depends on the maximum shear stress below the surface. For the mixed mode, the fatigue crack growth behavior which is represented by the projection crack length and comparative S.I.F, ΔK_V , shows the more conservative results. Also, its rate is lower than that of the case of the mode I, and this difference decreases with increasing the stress ratio, R .

다양하며, 이중에서도 차량운행에 수직인 횡방향 균열이 가장 위험한 손상상이 보고되고 있다.⁽⁴⁾

1. 서 론

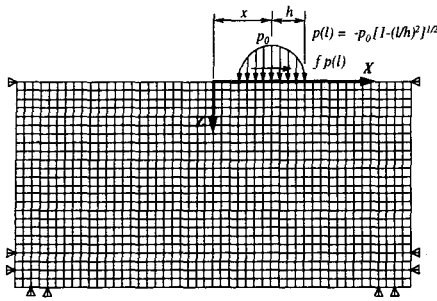
실제 기계구조물에서의 응력상태는 대부분의 경우 다축응력 상태이므로, 피로균열의 생성 및 진전 거동문제에 있어서는 혼합모드 상태하에서 이들의 특성을 검토함이 대단히 중요하다. 혼합모드 하중하에서의 파괴조건 및 피로거동에 대한 연구로는 최대원주응력조건,⁽¹⁾ J -적분에 의한 이론⁽²⁾ 및 주변형률조건⁽³⁾등에 의한 이론적 및 실험적 연구가 많이 수행되어 왔다. 한편 레일의 손상은 마모현상 및 반복하중으로 인하여 암점(dark spot), 수평방향균열(horizontal crack) 및 횡방향 균열(transverse fissure)등

레일의 피로파손에 의한 안전사고의 발생빈도는 상대적으로 적으나 사고 발생시 대형사고로 연결되는 경향이 있으므로 레일의 피로손상 및 수명평가의 수송의 절대적인 안전성 확보를 위해서 매우 중요하다. 레일등과 같이 접촉하중을 받는 부재에서의 연구로서는 마모분야, 미소균열의 발생·천이 거동 및 혼합모드하의 피로거동 등을 중심으로 수행되고 있다.^(5~11) 그러나 이들 연구는 체계적이지 못하고 단편적인 연구에 머물러 있는 실정이다. 예를 들면 Martin,⁽⁵⁾ Keer⁽⁶⁾ 등은 각각 균열의 발생조건과 균열의 천이거동을 평가하였으며 혼합모드에서의 정적파괴조건 및 피로균열진전 거동 등은 Richard⁽⁷⁾ 및 Kitagawa⁽⁸⁾ 등에 의해 수행되었다. 한편 국내의 연구현황을 살펴보면 접촉하중을 받는 단성체의 응력해석⁽⁹⁾ 및 혼합모드 파괴인성 평가

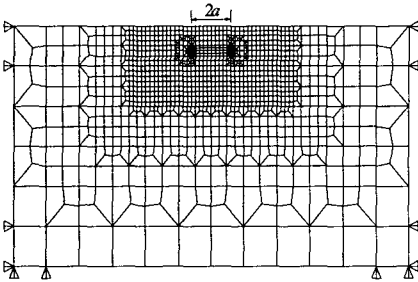
* 회원, 한양대학교 기계공학부

** 한양대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과



(a) FE model of a non-cracked body



(b) FE model of a cracked body

Fig. 1 FE model of each body.

법⁽¹⁰⁾ 및 피로균열성장 특성⁽¹¹⁾등에 대한 연구 등이 수행되고 있으나 대단히 미미한 실정이다. 따라서 레일의 피로파손에 대한 체계적인 연구를 위해서는 접촉에 의한 균열의 발생 조건과 천이거동 및 혼합모드 하중하에서의 피로거동에 대한 평가 등이 요구된다.

본 연구에서는 횡방향 균열로 대표되는 레일의 피로파손에 대한 연구의 일환으로 균열의 발생 및 천이거동 평가를 위한 유한요소해석과 단일 및 혼합모드 하중에서의 피로균열진전 시험을 수행하여 국산 레일강의 피로균열진전특성을 규명하였다.

2. 실험방법

2.1 이론해석

레일과 차륜의 구름접촉에 의한 초기 균열발생 조건과 이의 진전 및 천이거동은 균열이 없는 레일 내부의 응력분포와 표면하중균열 선단의 응력 확대계수비로부터 평가하였다. 이의 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Ver 5.2⁽¹²⁾를 이용하였다.

Fig. 1은 두 종류의 해석모델을 나타낸 것으로서

해석의 간편성을 위하여 레일을 탄성 반평면(elastic half-space)로 가정하였다. 이 때의 하중조건은 식 (1)의 탄성 Hertz 접촉하중을 이용하였다.

$$p(l) = -p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{l}{h}\right)^2} \quad (1)$$

여기서 p_0 는 최대접촉압력이며 h 는 접촉압력폭을 나타낸다.

특히 Fig. 1(b)에서 균열면의 접촉상황과 균열선단의 특이성을 구현하기 위해 균열선단요소의 중간절점을 균열선단으로부터 1/4지점에 위치시켰으며, 균열면에는 계면요소를 사용하였다. 이때, 균열선단에서의 모드 I 및 모드 II 응력확대계수는 균열선단 부근 절점의 상대변위 즉, 수평상대변위 ΔU_x 와 수직상대변위 ΔU_z 그리고 균열선단요소길이 $L \rightarrow 0$ 의 외삽법을 이용하여 구하였다.⁽¹³⁾ 이의 수식은 식 (2)와 같다.

$$K_I = \frac{2\pi G \Delta U_z}{(3-4\nu)\sqrt{2\pi L}}$$

$$K_{II} = \frac{\pi G \Delta U_x}{2(1-\nu)\sqrt{2\pi L}} \quad (2)$$

여기서 G 는 전단계수, ν 는 푸아송비 그리고 L 은 균열선단요소의 길이이다.

한편 혼합모드 하중하의 파괴 및 균열성장은 모드 I과 모드 II의 영향을 모두 받으므로 이를 고려한 조건들이 제안되고 있다. 이 중 대표적인 것이 균열선단의 응력장을 고려한 최대원주응력(maximum tangential stress) 파괴조건이다.⁽¹⁾

이 파괴조건은 혼합모드에서의 균열성장이 원주방향의 최대 인장응력과 직각인 방향으로 일어난다고 가정한 것으로 이로부터 피로균열성장각도를 산출할 수 있다. 균열선단의 응력장을 극 좌표계로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left\{ K_I \left(1 + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right\}$$

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left\{ K_I \left(1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2K_{II} \tan \frac{\theta}{2} \right\}$$

$$\tau_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \{K_I \sin \theta + K_{II}(3\cos \theta - 1)\} \quad (3)$$

이때 균열은 식 (4)의 조건을 만족하는 방향인 $\sigma_{\theta\theta}$ 가 최대가 되는 방향으로 진전한다.

$$\sigma_{\theta\theta} < 0, \quad \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} < 0 \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에 의하여 $\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta}$ 는 다음과 같다.

$$K_I \sin \theta_m + K_{II}(3\cos \theta_m - 1) = 0 \quad (5)$$

또한 식 (5)는 2배각 삼각함수 공식을 이용하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$2K_{II} \tan^2 \frac{\theta_m}{2} - K_I \tan \frac{\theta_m}{2} - K_{II} = 0 \quad (6)$$

따라서 혼합모드 하중하에서의 균열성장 각도 θ_m 는 $\frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} < 0$ 을 만족하는 조건에서 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\left(\tan \frac{\theta_m}{2} \right)_{1,2} = \frac{K_I}{4K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \quad (7)$$

2.2 재료 및 시험편

본 연구에서 사용한 재료는 50kgN급 레일강이다. 이의 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1 및 2와 같다. 시험편은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 CT(Compact Tension) 및 CTS(Compact Tension & Shear) 형이며 이의 채취방향은 Fig. 3과 같이 횡방향 균열의 방향과 동일한 L-T 방향이다.

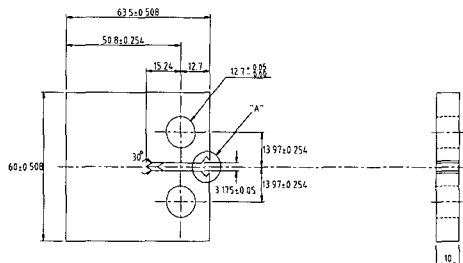
2.3 피로시험

피로균열 진전시험은 상온의 대기 중에서 25ton 용 유압서어보식 피로시험기에 마이크로컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하고, 응력비 $R=0.1$ 과 $R=0.5$ 의 일정진폭하에서 모드 I과 혼합모드 시험으로 구분하여 수행하였다. 모드 I시험은 CT 시험편을 대상으로 ASTM E647-93⁽¹⁴⁾의 규정에 따라 행하였다.

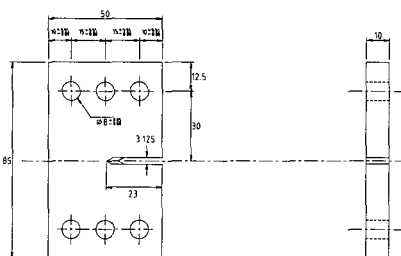
혼합모드 정적파괴 및 피로시험은 표준화된 시

Table 1 Chemical composition of material (wt-%).

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.721	0.873	0.0124	0.005	0.256	0.032	0.053	0.011



(a) Configuration of CT specimen



(b) Configuration of CTS specimen

Fig. 2 Configuration of test specimens.

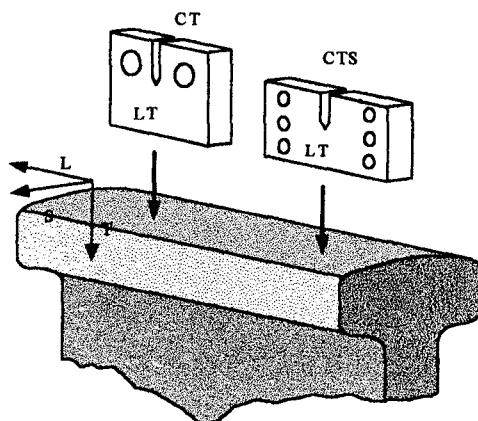


Fig. 3 Schematic of CT and CTS specimens extracted from rail steel.

험방법이 없으므로 본 연구에서는 Richard⁽¹⁵⁾가 제안한 하중장치를 응용하여, 하중 방향의 변화가 용이하도록 15° 간격으로 편 구멍을 뚫어 단축 인장 피로시험기에 체결시킴으로써 K_I/K_{II} 의 조절이 편리하도록 하였다. 이의 전체적인 형상은 Fig. 4와

Table 2 Material properties of material.

Young's modulus	Yield strength	Tensile strength	Elongation	Hardness	K_c
212.8(GPa)	481.2(MPa)	887.1(MPa)	14.5(%)	257.5(Hv)	46.5(MPa \cdot m ^{1/2})

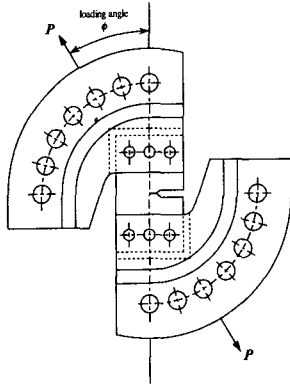


Fig. 4 Schematic diagram of mixed-mode apparatus.

같다.

한편 혼합모드 하중상태에서의 균열성장은 모드 I과 달리 초기 균열방향으로 성장하지 않으므로 이의 조건을 검토함에는 모드 I과 모드 II가 함께 고려된 상당응력확대계수(comparative S.I.F, K_V)가 필요하게 된다.

혼합모드 하중에서의 균열성장 또는 파손은 식 (8)과 같이 상당응력확대계수 K_V 값이 파괴인성값을 만족할 때 일어난다고 할 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$K_V(K_I, K_{II}) = K_{Ic} \quad (8)$$

식 (8)에서 K_V 는 Richard⁽¹⁵⁾가 수정한 파괴 경계 곡선식 (9)와의 관계로부터 식 (10)과 같이 나타내어진다.

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right) + \left(\xi \cdot \frac{K_{II}}{K_{Ic}}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

$$K_V = \frac{1}{2} K_I + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 4(\xi K_{II})^2} \quad (10)$$

여기서 ξ 는 파괴인성비(fracture toughness ratio)로서 K_{Ic}/K_{IIc} 이다.

한편 식 (10)에서 CTS 시험편의 K_I, K_{II} 값은 Richard⁽¹⁵⁾의 식을 응용하여 사용하였으며 이의 수식은 식 (11)과 같다.

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{WB} \frac{\cos \psi}{1 - \frac{a}{W}} \sqrt{\frac{0.26 + 2.65 \frac{a}{W-a}}{1 + 0.55 \frac{a}{W-a} - 0.08 \left(\frac{a}{W-a}\right)^2}}$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{WB} \frac{\sin \psi}{1 - \frac{a}{W}} \sqrt{\frac{-0.23 + 1.40 \frac{a}{W-a}}{1 - 0.67 \frac{a}{W-a} + 2.08 \left(\frac{a}{W-a}\right)^2}} \quad (11)$$

여기서 B 는 시험편 두께, ψ 는 작용하중각도이다. 이의 적용범위는 $0.5 \leq a/W \leq 0.7$ 이다.

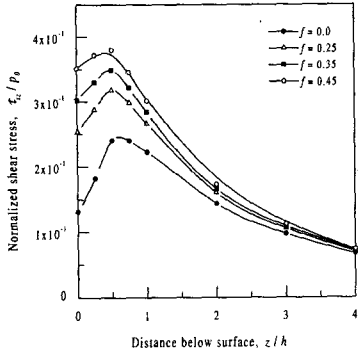
균열길이의 측정은 컴플라이언스법을 이용하였으며 균열진전속도는 7점 증분다항법으로 평가하였다. 또한 혼합모드 시험은 CTS 시험편을 대상으로 하중각 30° 및 60°의 일정진폭하중하에서 수행하였으며 균열길이는 0.1mm 해상도의 크랙 게이지와 배율 50배의 이동형 현미경을 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

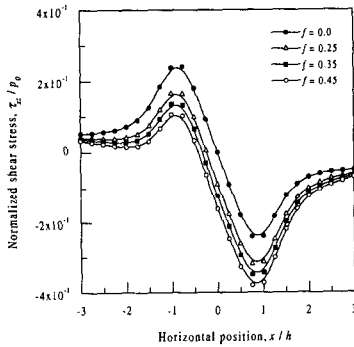
3.1 균열발생 및 천이조건

차륜과 접촉하는 레일내부에는 수직응력과 전단응력이 동시에 존재하고 있지만, 수평균열의 발생 원인이 되는 소성유동의 거동은 전단응력이 가장 큰 영향을 미친다고 보고되고 있다.⁽¹⁶⁾ 따라서 레일의 균열발생조건을 평가를 위해서는 전단응력 분포를 검토하는 것이 타당하다고 판단된다.

Fig. 5는 레일표면에서의 깊이 및 길이방향에 대한 전단응력의 분포를 나타낸 유한요소해석의 결과이다. 그림에서 마찰계수, f 를 변화시켜도 최대 전단응력은 표면으로부터 접촉압력폭의 약 50%지점에서 발생하지만, 깊이가 증가할수록 이의 분포는 일정하게 나타났다. 또한 전단응력이 최대로 발생하는 깊이에서 길이방향의 전단응력 분포는 Fig. 5(b)와 같이 마찰계수의 크기에 관계없이 길이방향에 대하여 좌우대칭적임을 알 수 있다. 이는 삼차원 유한요소해석을 수행한 Kaneta 등⁽¹⁷⁾의 보고와 일치한다. 또한 Martin 등⁽⁵⁾은 최대전단응력이 발생하는 위치에서 국부적인 변형 밴드(deformation



(a) $z/h - \tau_{xz}/P_0$



(b) $x/h - \tau_{xz}/P_0$

Fig. 5 Distribution of τ_{xz} due to a Hertzian contact pressure.

band)가 생성되고, 이로 인한 수평균열의 발생 가능성을 보고하였다. 이러한 균열은 일정크기까지 성장한 후, 수직방향으로 천이·진전하는 경향을 나타냄이 보고⁽¹⁸⁾되고 있으므로 이를 평가하기 위하여 Fig. 1(b)의 모델을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6은 레일의 표면하중에 형성된 수평방향 균열과 차륜에 의한 작용하중의 상대적인 위치 및 기하학적 조건($1.8 \leq 2a/h \leq 3.0$)을 나타낸 것이다. 그림에서 선행균열선단(leading tip)과 후행균열선단(trailing tip)은 작용하중과 먼저 접촉하는 균열선단과 후에 접촉하는 균열선단을 의미한다.

Fig. 7은 차륜의 작용하중위치에 대한 균열선단의 K_I/K_{II} 의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 하중이 선행균열선단쪽으로 접근함에 따라 이의 단함으로 인해 K_I/K_{II} 가 0을 나타내지만, 후행균

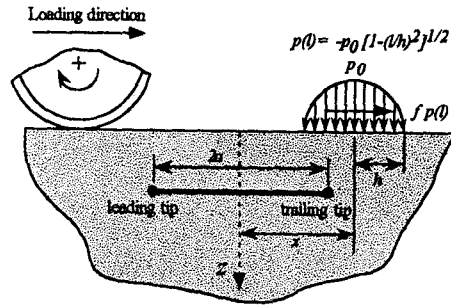


Fig. 6 Schematic representation of subsurface crack and loading condition.

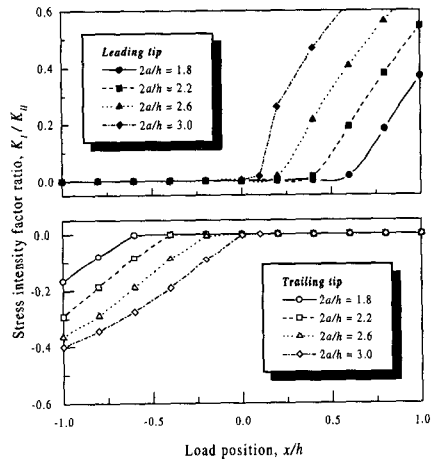


Fig. 7 Stress intensity factor ratio according to crack length.

열선단은 전단응력으로 인한 미끄럼 작용으로 인해 음의 값을 나타낸다. 그러나 하중이 균열중앙에서 작용할 경우, 각 균열선단은 단함으로 인하여 K_I/K_{II} 값이 0을 갖는다. 그리고 하중이 후행균열선단을 지나서 작용할 경우, 앞의 상황과는 반대로 선행균열선단은 미끄럼 작용으로 인해 K_I/K_{II} 값이 양의 값을 나타내며, 후행균열선단은 단함으로 인하여 0을 나타낸다. 또한 동일한 작용 하중위치에서는 균열길이가 증가함에 따라 K_I/K_{II} 값이 커짐을 알 수 있다. 이는 모드 II 하중이 작용할 경우라도 균열이 커짐에 따라 인장모드로 천이될 가능성이 높아진다는 Scutti,⁽¹⁸⁾ Otsuka⁽¹⁹⁾ 등의 결과와 일치한다. 따라서 수평방향 균열은 성장함에 따라 모드 I의 증가로 인하여 레일손상의 주요한 요인인 횡방향균열로의 천이 가능성이 크다고 할 수 있다.

3.2 모드 I 피로균열 진전거동

모드 II에서 혼합모드로의 천이되는 거동을 평가하기 위하여 먼저 모드 I하에서 응력비를 고려한 피로균열진전시험을 수행하였다. Fig. 8은 응력비 0.1과 0.5에 대한 이의 결과를 나타낸 것이다. 저탄소강의 경우 낮은 ΔK 영역에서는 응력비의 변화에 따라 da/dN 의 차이가 현저함이 보고되고 있으나⁽²⁰⁾ 레일강은 그림에서와 같이 응력비의 변화에 따라 평행 이동한 결과를 보이고 있다.

Fig. 9는 이러한 응력비의 효과를 고려하기 위하여 식 (12)의 Walker 식⁽²¹⁾에 의한 평가 결과를 나타낸 것이다.

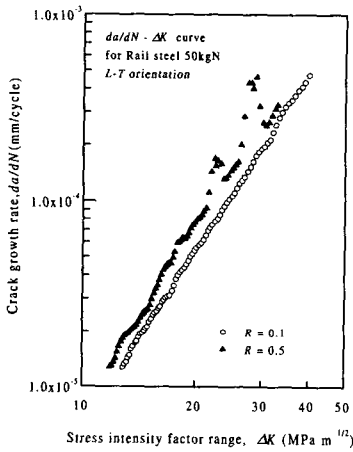


Fig. 8 Fatigue crack growth rate for rail steel in mode I loading.

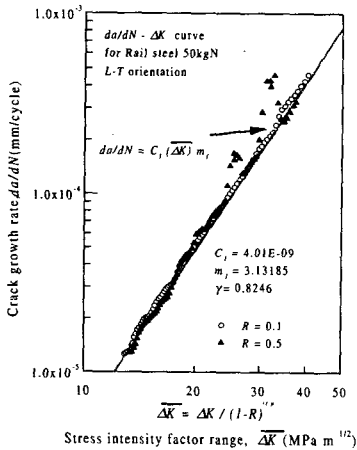


Fig. 9 Fatigue crack growth rate for rail steel in mode I loading.

$$da/dN = \frac{c(\Delta K)^m}{(1-R)^{(1-\gamma)}} \quad (12)$$

여기서 γ 는 응력비의 효과를 나타내는 상수이며, 1에 근접할수록 그 효과가 작아짐을 의미한다.

그림에서 레일강의 피로균열진전속도에 미치는 응력비의 영향은 Walker 식에 의해 잘 평가되고 있다. 또한 레일강의 γ 는 0.82인 반면에 알루미늄 합금과 AISI 4340 강은 각각 0.64, 0.42로 보고되고 있다.^(22,23) 따라서 레일강에 대한 응력비의 영향은 저탄소강 등의 기타재료에 비하여 적게 나타남을 알 수 있다.

3.3 혼합모드 피로균열 진전거동

혼합모드하의 피로균열은 초기균열의 형상과 동일하게 진전하지 않고, K_I/K_{II} 의 비에 따라 분기(branch)하여 임의의 각으로 진전하는 거동을 한다. 따라서 작용 하중각 즉, K_I/K_{II} 비에 따른 균열의 분기각에 대한 평가가 필요하다.

Fig. 10은 CTS 시험편의 하중각도 ψ 의 변화에 대한 $K_I/(K_I+K_{II})$ 값의 변화를 예비균열길이의 크기에 따라 나타낸 그림이다. 여기서 K_I, K_{II} 는 식 (11)을 이용하여 구하였다. 그림에서 $K_I/(K_I+K_{II})$ 값과 하중각간에는 일정한 관계가 있음을 알 수 있으며, 이에 대한 피로균열 진전거동을 평가하기 위하여 하중각도 $\psi = 30^\circ$ 와 60° 에 대해 Fig. 11과 같은 균열성장 경로를 구하였다. 그림에서 작용 하중각도 30° 일 경우 초기 균열 분기각은 약 25° 이었고, 60° 일 경우에는 약 49° 임을 알 수 있다.

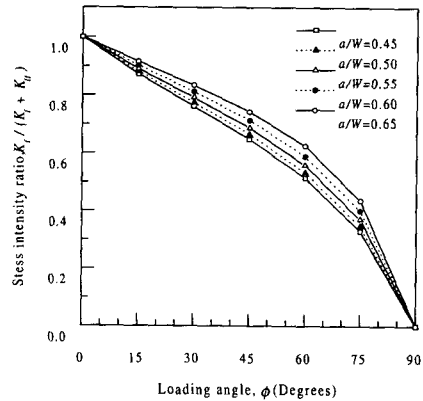


Fig. 10 $K_I/(K_I+K_{II})$ ratio with loading angle ψ .

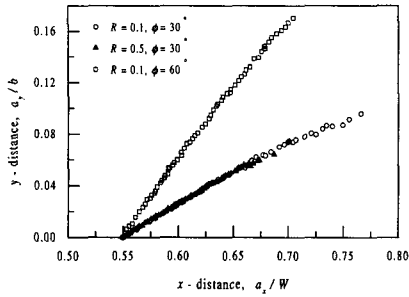


Fig. 11 F.C.G. path in mixed mode loading.

따라서 혼합모드하에서 균열발생각도는 작용하중 각도와 동일하지 않으며, 이는 식 (11)의 K_I 및 K_{II} 평가에 있어서 반드시 고려하여야 할 사항이라고 생각된다.

한편 혼합모드 하중하에서의 피로균열진전속도는 Paris 법칙에 의하여 평가될 수 있음이 보고되고 있지만 하중각에 따른 K_{II} 의 영향이 커질 경우, 이를 무시할 수 없다고 판단되므로 K_I 및 K_{II} 를 고려한 식 (10)의 ΔK_V 로 평가하였다. K_V 산출에 있어서는 파괴인성비 $\zeta = K_{Ic}/K_{IIc}$ 의 값이 필요하므로 혼합모드 파괴를 고려한 식 (9)의 파괴경계조건식을 도입하였다. Fig. 12는 이의 결과로서 레일강의 혼합모드 파괴에 대한 저항값은 저탄소강 등의 타재료보다 높게 나타났다. 이 그림에서 평면변형을 파괴인성 K_{Ic} 는 레일 Web의 최대두께가 15mm로서 이의 평가가 용이하지 않으므로 75% 사이드 그르부로 가공한 시험편의 시험조건⁽²⁷⁾에 의해 평가된 K_c 로 대체하였다. 또한 ζ 값은 K_I/K_c 에 대한 K_{II}/K_c 의 이론값이 실험값과의 차이가 최소가 되도록 시행착오법을 도입하여 구하였으며, 이의 값은 0.9로 평가되었다.

Fig. 13은 실제 균열길이와 정사영 투영길이로 구분하여 작용하중각(ψ)과 이들 균열의 분기각(θ)의 차이, 즉 $\psi - \theta$ 를 고려하여 ΔK_V 를 구한 후, 이를 균열진전속도 da/dN 에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 낮은 ΔK_V 영역에서는 투영균열길이와 실제균열길이에 대한 균열진전속도가 비슷하지만 높은 ΔK_V 영역에서는 투영균열길이의 경우가 실제균열길이의 경우보다 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 혼합모드 하중하의 피로균열 진전거동

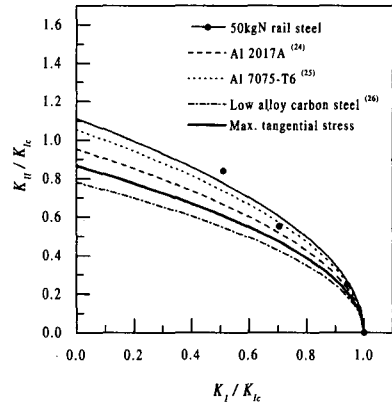


Fig. 12 Comparison of the MTS criterion with experimental.

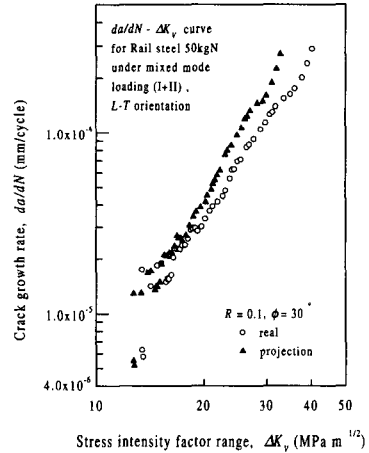
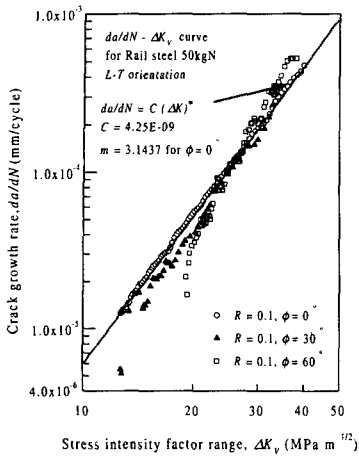


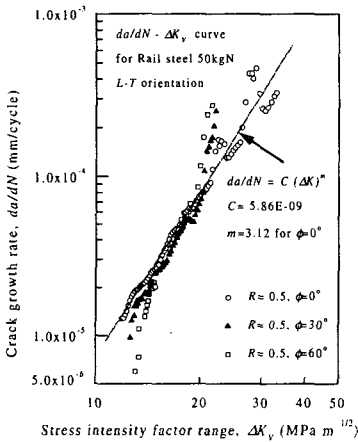
Fig. 13 $da/dN - \Delta K_V$ with crack length.

평가는 모드 I과 모드 II를 모두 고려한 ΔK_V 와 투영균열길이를 평가하는 것이 구조물의 안전성 측면에서 보다 바람직하다고 할 수 있다.

Fig. 14는 이상에서 평가된 혼합모드하의 피로균열진전속도를 모드 I과 비교한 것이다. 그림에서 낮은 ΔK 영역일수록 혼합모드에서의 피로균열성장속도가 모드 I에 비해 진전속도가 떨어지며 이의 차이는 응력비가 낮을수록 현저하다. 또한 동일한 응력비에서는 하중각이 증가함에 따라 진전속도가 크게 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 응력비가 낮을수록, 그리고 하중각도가 증가할수록 혼합모드 하에서는 K_{II} 의 영향으로 인한 균열단합의 영향이 크



(a) $\Delta K_V - da/dN$ ($R=0.1$)



(b) $\Delta K_V - da/dN$ ($R=0.5$)

Fig. 14 $da/dN - \Delta K_V$ with loading mode by projection length.

지만⁽²⁸⁾ 응력비가 높을 경우 이의 영향이 감소하기 때문에 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 국산 레일강의 균열발생·천이거동과 혼합모드 하중하에서의 피로균열진전거동을 평가하기 위하여 유한요소해석과 피로균열진전시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수평방향 균열은 최대전단응력에 의해 발생하며 이의 위치는 접촉압력폭의 약 50% 지점으로 평가되었다.
- 2) 수평방향 균열이 커질수록 K_I 이 증가하는 경향이 나타났으며 이로 인하여 수평방향 균열은 횡방향 균열로 천이거동을 한다고 판단된다.
- 3) 응력비의 변화에 따른 모드 I하의 피로균열진전속도는 Paris 법칙의 지수 m 이 일정한 결과를 보였으며 이의 영향은 Walker 식에 의해 잘 평가되었다.
- 4) 혼합모드하의 피로균열진전속도를 K_I, K_{II} 를 고려한 ΔK_V 로 평가한 결과, 투영균열길이를 평가한 da/dN 은 실제균열길이를 평가한 것에 비하여 과대평가되었다.
- 5) 혼합모드하의 피로균열진전속도는 낮은 ΔK_V 영역에서는 모드 I의 경우보다 낮게 평가되었으며 이의 정도는 ΔK_V 및 응력비의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Erdogan, F. and Sih, G. C., 1963, "On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear," *J. of Basic Engineering*, Vol. 85, pp. 519~525.
- (2) Yu. B. Y., 1982, "A Discussion on the Mixed Mode J -integral Fracture Criterion," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 16, p. 156.
- (3) Fisher, K., Goldner, H., 1981, "On the Formulation of a Principal Strain Criterion in Crack Fatigue Mechanics," *Int. J. of Fracture*, Vol. 17, pp. R3~R6.
- (4) Sampath, S. G., Johns, T. G., McGuire, P. M., and Davies, K. B., 1978, "Stresses Around Transverse Fissure Flaws in Rails due to Service Loads," *ASTM STP 644*, pp. 330~341.

- (5) Martin, J. A. and Eberhardt, A. D., 1967, "Identification of Potential Failure Nuclei in Rolling Contact Fatigue," *J. of Basic Engineering, Trans. ASME, Series D*, Dec., Vol. 89, pp. 392~942.
- (6) Keer, L. M., Bryant, M.D. and Haritos, G.K., 1982, "Subsurface and Surface Cracking due to Hertzian Contact," *ASME J. of Lubrication Technology*, Vol. 104, pp. 347~351.
- (7) Richard, H. A., 1987, "Crack Problems Under Complex Loading," *Role of Fracture Mechanics in Modern Technology*, pp. 577~588.
- (8) Kitagawa, H., Yuuki, R. and Toshiaki, A., 1987, "Crack-Morphological Aspects in Fracture Mechanics," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 515~529.
- (9) 이강용, 김준엽, 1997, "구름 및 미끄럼 접촉하의 중공원판의 표면하층균열에 대한 J -적분," 대한기계학회논문집(A), 제 21권, 제 7호, pp. 1149~1155.
- (10) 강기주, 홍기주, 1996, "혼합모드 하중을 받는 CTS 시험편에서 K_I , K_{II} 와 J -적분의 측정방법," 대한기계학회논문집(A), 제 20권, 제 11호, pp. 3498~3506.
- (11) 웅장우, 진근찬, 이성근, 김종배, 1989, "5083-H1115 알루미늄 합금의 혼합모우드 피로균열 성장 특성," 대한기계학회논문집, 제 13권, 제 3호, pp. 461~471.
- (12) Swanson Analysis Systems Inc., 1996, *ANSYS - Users Manual*.
- (13) Salehizadeh, H., and Saka, N., 1992, "Crack Propagation in Rolling Line Contacts," *ASME J. of Tribology*, Oct., Vol. 114, pp. 690~697.
- (14) "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," *ASTM E647-93*.
- (15) Richard, H. A., 1985, "Bruchvorhersagen bei überlagerter Normal- und Schubbeanspruchung von Rissen," *VDI Forschungsheft 631*, pp. 1~60.
- (16) Suh, N. P., 1973, "The Delamination Theory of Wear," *Wear*, Vol. 25, pp. 111~124.
- (17) Kaneta, M., Murakami, Y. and Okazaki, T., 1986, "Growth Mechanism of Subsurface Crack due to Hertzian Contact," *ASME, J. of Tribology*, Jan. Vol. 108, pp. 134~139.
- (18) Scutti, J.J., Pelloux, R.M. and Fuquen-Moleno, R., 1984, "Fatigue Behavior of a Rail Steel," *Fatigue of Engineering Materials & Structures*, Vol. 7, no. 2, pp. 121~135.
- (19) Otsuka, A., Mori, K. and Miyata, T., 1975, "The Condition of Fatigue Crack Growth in Mixed Mode Condition," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 429~439.
- (20) Tanaka, K., 1989, "Mechanics and Micromechanics of Fatigue Crack Propagation," *ASTM STP 1020*, pp. 151~183.
- (21) Walker, K., 1970, "The Effect of Stress Ratio During Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum," *ASTM STP 462*, pp. 1~14.
- (22) Hudson, C. M., 1969, "Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth in 7075-T6 and 2024-T3 Aluminum Alloy Specimens," *NASA TN D-5390*, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Hampton, Va.
- (23) Dennis, K. R., 1986, "Fatigue Crack Growth of Gun Tube Steel Under Spectrum Loading," *MS Thesis*, Engineering Science and Mechanics Dept., Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va.
- (24) Tenhaeff, D., Richard, H. A. and Hahn, H. G., 1985, "Untersuchungen Zum Bruchverhalten Von Rissen unter Mixed-Mode-Beanspruchung," *DFG-Report*, Institute of Technical Mechanics, Univ. of Kaiserslautern.
- (25) Tracy, P. G., Rich, T. P., Browser, R. and Tramontozzi, L. R., 1982, "On the Statistical Nature of Fracture," *Int. J. Fracture*, Vol. 18, pp. 253~277.
- (26) Yokobori, T., Yokobori, A. T., Sato, K. and Omotani, M., 1983, "The Effects of Ferrite Grain Size on Fracture of Low Carbon Steel Under Mixed Modes I and II," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 17, pp. 75~85.
- (27) "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," *ASTM E399-90*
- (28) Srinivas, V., Vasudevan, P., 1993, "Studies of Mixed Mode Crack Propagation in D16AT Aluminum Alloy," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 45, pp. 415~430.