

수정 Forman 모델을 이용한 고성능 강재의 피로균열전파와 피로수명평가[§]

최성원* · 강동환* · 이종관** · 김태원***†

* 한양대학교 자동차공학과, ** 포항산업과학연구원 강구조연구소, *** 한양대학교 기계공학부

Fatigue Crack Propagation and Fatigue Life Evaluation of High-Performance Steel using Modified Forman Model

Sung-Won Choi^{*}, Dong-Hwan Kang^{*}, Jong-Kwan Lee^{**} and Tae-Won Kim^{***†}

^{*} Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.,

^{**} Steel Structure Research Laboratory, Research Institute of Industrial Science & Technology,

^{***} School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received December 13, 2010 ; Revised August 30, 2011 ; Accepted September 7, 2011)

Key Words : Fatigue Crack Propagation(피로균열전파), Fatigue Life Evaluation(피로수명평가), Crack Closure Phenomenon(균열 닫힘 현상)

초록: 응력확대계수비와 하중 주파수가 각각 ‘R=0.1, f=0.1 Hz’, ‘R=0.3, f=0.3 Hz’ 및 ‘R=0.5, f=0.5 Hz’인 세 가지 하중 조건에서 피로균열전파 실험을 하였으며 이를 바탕으로 고성능 강재의 피로균열전파거동 분석과 피로수명평가를 수행하였다. 하중 조건에 따른 피로균열전파거동을 모사하기 위해 수정된 Forman 모델을 제안하였으며 제안된 모델은 하한 응력확대계수폭과 균열 닫힘 현상에 의한 유효 응력확대계수폭을 고려함으로써 거동의 전 영역을 모사할 수 있었다. 응력확대계수비와 하중 주파수가 0.1 인 경우, 균열이 약 5.0 mm 전파될 때 피로수명을 평가한 결과, Forman 모델은 8,814 cycles, 수정된 모델은 12,292 cycles 의 계산결과를 얻었으며, 이를 12,774 cycles 의 실제 실험결과와 비교할 때 수정된 Forman 모델이 실제 피로균열전파거동을 보다 효과적으로 모사하고 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract: Fatigue crack propagation behavior and the fatigue life in-high performance steel were investigated by means of fatigue crack propagation tests under constant loading conditions of ‘R=0.1 and f=0.1 Hz’, ‘R=0.3 and f=0.3 Hz’, and ‘R=0.5 and f=0.5 Hz’ for the load ratio and frequency, respectively. A modified Forman model was developed to describe the fatigue crack propagation behavior for the conditions. The modified Forman model is applicable to all fatigue crack propagation regions I, II, and III by implementing the threshold stress intensity factor range and the effective stress intensity factor range caused by crack closure. The results show that predicted fatigue lives of Forman and modified Forman models were 8,814 and 12,292 cycles, respectively when the crack propagated approximately 5.0 mm and the load ratio and frequency were both 0.1. Comparison of the test results indicates that the modified Forman model showed much more effective fatigue crack propagation behavior in high-performance steel.

- 기호설명 -

a : 균열길이(m)

da/dN : 균열전파속도(m/cycle)

f : 하중 주파수(Hz)

K : 응력확대계수($MPa \cdot \sqrt{m}$)

K_{crit} : 임계 응력확대계수($MPa \cdot \sqrt{m}$)

N : 하중반복 수(cycles)

R : 응력확대계수비

U : 유효 응력확대계수비

ΔK : 응력확대계수폭($MPa \cdot \sqrt{m}$)

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, twkim@hanyang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

ΔK_{eff} : 유효 응력확대계수폭 ($MPa \cdot \sqrt{m}$)
 ΔK_{th} : 하한 응력확대계수폭 ($MPa \cdot \sqrt{m}$)

1. 서론

피로균열전파거동 실험은 동일한 시편 형상과 하중조건에도 불구하고 재료의 불균질성 및 초기 손상상태의 정도 등에 의해 많은 변동성이 존재하며, 이는 응력비, 환경 등의 영향을 받는다고 보고되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 따라서 보다 신뢰성 있는 구조물 및 재료의 피로수명 예측을 위해서 피로균열전파거동을 정확히 모사할 수 있는 모델이 필요하다.

Paris 와 Erdogan⁽⁴⁾은 균열전파거동의 제 II 영역에서 응력확대계수폭과 균열전파속도 사이의 선형적인 관계를 밝혀내고, 이를 멱함수(power-law function)의 형태로 표현하였다. 하지만 Paris 모델은 균열전파에 영향을 미치는 인자로서 응력확대계수폭만을 고려함으로써 명확한 거동모사에 한계를 지니고 있다고 볼 수 있다. Walker⁽⁵⁾는 Paris 모델을 기반으로 응력비의 영향을 고려하여 제 II 영역의 균열전파거동을 모사하는 모델을 제안하였다. 아울러 이들 외에 McEvily,⁽⁶⁾ 그리고 Dowling 과 Begley⁽⁷⁾ 등에 의해 균열전파거동에 대한 많은 경험식이 제안되어 왔다.

본 논문에서는 이상과 같은 기존의 연구들을 기반으로 고성능 강재인 HSB800 의 피로균열전파거동을 모사할 수 있는 모델을 구축하기 위해 세 가지 하중 조건에서 피로균열전파 실험을 수행한 후 피로균열전파거동을 고찰하였다. 이를 바탕으로 수정된 Forman 모델을 제안하였으며, 제안된 모델

을 이용하여 임의의 균열길이에 이르는 시편의 피로수명을 평가한 후 실험결과와 비교, 분석하였다.

2. 피로균열전파거동 및 모델

2.1 피로균열전파거동

작용응력 σ 와 균열 치수에 의해 결정되는 응력확대계수, K 는 균열 선단 부근 응력장의 세기를 나타내는 계수로써, 피로균열전파거동을 설명하기 위해서 사이클 당 응력확대계수의 최대값과 최소값의 차이인 응력확대계수폭, ΔK 가 주로 사용된다. Fig. 1은 금속재료에서의 전형적인 피로균열전파거동을 나타내는 $\Delta K - da/dN$ 의 대수선도이다. 이와 같은 S 자형의 곡선은 ΔK 의 변화에 따른 da/dN 의 경향에 따라 I, II 및 III의 세 영역으로 구분된다. 제 II 영역에서 $\log(\Delta K)$ 와 $\log(da/dN)$ 는 선형적인 관계를 나타내는 반면, 제 I 영역과 제 III 영역에서는 선형적인 경향에서 벗어난다. 제 I 영역에서는 ΔK 가 재료 고유의 피로하한계와 균열 단합에 의해 결정되는 ΔK_{th} 에 가까워질수록 da/dN 이 0에 수렴하며, 제 III 영역에서는 K_{max} 가 K_{crit} 에 접근함으로써 da/dN 이 무한대로 가속된다.

균열전파속도가 멱법칙을 따르는 제 II 영역에서 균열전파속도는 상대적으로 미시구조와 인장특성에 둔감한 반면, 곡선의 양 끝단에서의 균열전파속도는 미시구조와 인장특성에 매우 민감하다⁽⁸⁾.

하한계 부근에서 형성된 피로 파면은 벽개(cleavage)와 유사한 단위 면을 가진 모양을 나타낸다⁽⁹⁾. 이 때, 균열은 특정한 결정면을 따라 전파하고, 입계와 같은 장애물을 만나면 진행 방향을 변경하게 된다. 따라서 제 I 영역에서 피로균열전파속도는 결정립 크기에 민감하며, 이는 큰 결정립(grain)을 가진 미시구조에 따른 거친 표면과 거칠기에 의한 균열 단합 현상에 그 원인이 있다. 또한 결정립계(grain boundary)가 슬립 밴드의 전파를 막는 장애물의 역할을 할 경우, 하한계가 발생할 수 있으며 따라서 입자의 크기는 고유 하한 응력확대계수폭에 영향을 미칠 수 있다.

제 II 영역에서 피로균열이 전파할 경우 파면상에 스트라이에이션(striation)을 생성시킨다. 스트라이에이션은 균열 전파 방향에 수직한 작은 용기선으로서, 국부 슬립의 집중에 의해 각 사이클에서 균열의 상/하면에 생성된다. 이 기구에 따르면, 각 스트라이에이션의 간격은 한 사이클당 균열전파량(da/dN)과 같다. 또 다른 관점은 손상누적기구이며, 이는 임계 손상량에 도달하기 위해 다수의 사이클 수가 필요하다는 것을 의미한다. 이 기구에 의하면 누적된 손상량이 임계값에 도달하였을 때 균열면에 하나의 스트라이에이션을 형성하며 균열

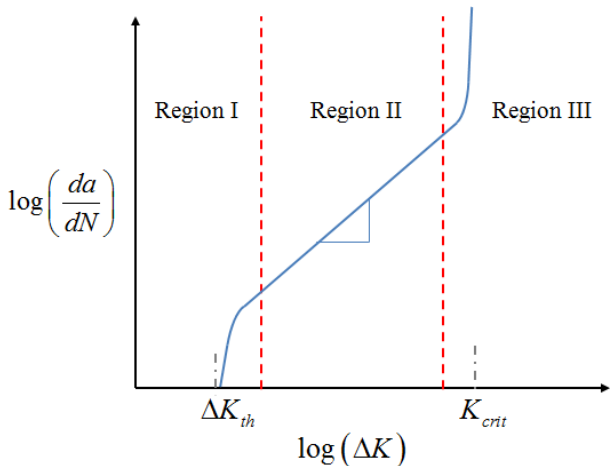


Fig. 1 A typical fatigue crack propagation behavior

이 전파되게 된다.⁽¹⁰⁾

제 III 영역에서의 균열전파속도는 피로와 파괴 기구 사이의 상호작용으로 인하여 가속된다. 이 영역에서의 파면은 전형적으로 피로 스트라이에이션, 미소공동합체(micro-void coalescence)와 벽개면이 혼합되어 있는 형태이다. 따라서 균열전파속도는 다양한 기구들의 영향을 중첩함으로써 평가될 수 있다. 전체 균열전파속도에 대한 피로의 상대적 기여도는 K_{max} 가 증가함에 따라 감소한다. 따라서 K_{crit} 부근에서 균열전파는 미소 공동 합체와 벽개 또는 이들 두 요인의 조합에 의해 지배된다고 할 수 있다.

일정진폭 응력확대계수에 의한 균열전파의 경우, 반복하중에 의하여 균열전단에 소성영역이 형성되며 전파하는 균열은 그에 따른 흔적을 남기게 된다. 이 때, Fig. 2 처럼 소성영역이 탄성 특이영역 내에 포함될 만큼 충분히 작다면, 균열전단의 상태는 현재의 K 값만으로 정의될 수 있으며, 균열전파속도는 K_{max} 와 K_{min} 에 따라 결정된다.

따라서, 균열전파거동은 다음과 같은 관계식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (1)$$

여기에서, 응력확대계수 폭 및 비는 각각 $\Delta K = K_{max} - K_{min}$, $R = K_{min}/K_{max}$ 이다. 소성영역의 크기는 오직 K_{max} 와 K_{min} 에 의존하므로, 균열성장 에 대한 소성영역과 소성 흔적의 영향 또한 식 (1)에 고려되어 있다.⁽⁸⁾

한편 피로수명은 식 (1)을 적분함으로써 계산될 수 있다. 초기균열길이 a_0 에서 a_f 까지 균열전파에 필요한 하중반복 수는 다음과 같이 계산된다.

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad (2)$$

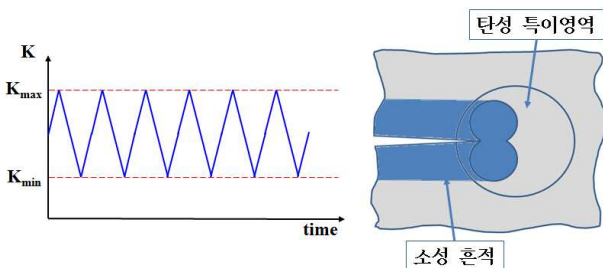


Fig. 2 Fatigue crack propagation on small scale yield under constant amplitude load⁽⁸⁾

2.2 경험적 피로균열전파 모델

Paris 모델과 Walker 모델은 제 III 영역에서 발생하는 균열전파의 불안정성을 설명할 수 없으며, 또한 피로균열전파거동의 전 영역 중 오직 제 II 영역만 모사 가능하다는 동일한 한계점이 존재한다. 한편 Forman⁽¹¹⁾은 R 의 영향을 고려함과 동시에 제 III 영역의 피로균열전파거동을 모사할 수 있는 새로운 모델을 발표하였다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_F \cdot (\Delta K)^{m_F}}{(1-R)(K_{crit} - K_{max})} \quad (3)$$

K_{crit} 는 재료와 시편의 두께에 따라 결정되는 파괴 인성이다. 식 (3)은 K_{max} 가 K_{crit} 에 접근할 때 da/dN 이 무한대로 발산하는 경향을 나타낸다. 따라서 Forman 모델은 안정적인 균열전파 양상을 보이는 제 II 영역과 da/dN 이 가속화되는 제 III 영역의 모사가 가능하다.

그러나 이와 같은 Forman 모델 또한 ΔK 가 상대적으로 낮은 제 I 영역에서의 균열전파거동 모사가 불가능하다. 따라서 Forman 모델에 ΔK_{th} 을 고려하여 피로균열전파거동이 전 영역에서 해석 가능하도록 Hartman과 Schijve⁽¹²⁾은 Forman 모델을 수정하여 다음과 같은 모델을 제안하였다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_{HS} \cdot (\Delta K - \Delta K_{th})^{m_{HS}}}{(1-R)K_{crit} - \Delta K} \quad (4)$$

여기서, 식 (4)는 ΔK 가 ΔK_{th} 와 K_{crit} 에 각각 접근할 때 급격한 경사를 가지는 da/dN 의 변화를 모사할 수 있다.

그 외에도 Forman 모델에 균열전단 전방의 소성영역에 의한 균열 전파 지연 효과를 고려한 Forman - Wheeler 모델과 균열전단의 압축잔류응력을 고려한 Forman - Willenborg 모델 등도 제안되었다.^(13, 14)

2.3 균열 닫힘 현상

Elber⁽¹⁵⁾는 균열 면의 접촉(균열 닫힘 현상)이 유효 응력확대계수폭을 저하시키며, 이로 인하여 피로균열전파속도가 감소한다고 가정하였다. Fig. 3에는 반복 하중에 따른 균열의 닫힘 현상을 A, B, C의 세 단계로 나타내었다. 이와 같이 시편이 K_{max} 와 K_{min} 사이의 반복 하중을 받을 경우, 균열이 열리는 K_{op} 을 기준으로 $K \leq K_{op}$ 인 상태에서 균열 면은 접촉한 상태가 되며, 이 구간에서는

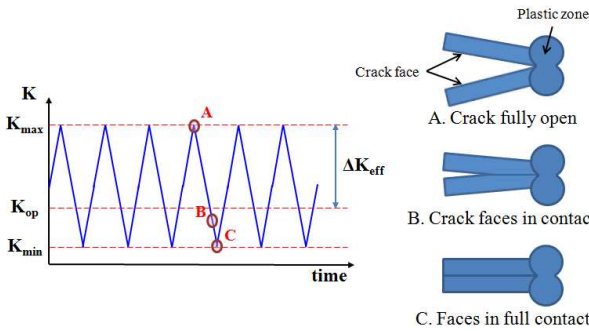


Fig. 3 The definition of effective stress intensity factor range⁽²⁰⁾

응력확대계수가 피로균열전파에 영향을 미치지 못한다. 따라서, 실제 균열전파를 유발하는 ΔK_{eff} 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = U \cdot \Delta K \quad (5)$$

여기에서 U 는 유효 응력확대계수비로서 전체 하중에 대한 유효 하중의 비율을 의미하며 ΔK_{eff} 와 ΔK 의 비로 정의된다. Gomez, Ernst, 그리고 Vazquez,⁽¹⁶⁾ Clerivet 와 Bathias⁽¹⁷⁾ 및 Schijve⁽¹⁸⁾ 등은 다양한 종류의 합금에 대한 U 의 경험적 관계식들을 발표하였으며, Lee⁽¹⁹⁾ 등은 균열 단합 현상을 고려하여 랜덤하중 하에서 균열전파수명을 예측하였다.

2.4 수정된 Forman 모델

본 연구에서는 피로균열전파거동의 전 영역을 모사할 수 있는 식 (4)에 균열 단합 현상을 고려한 ΔK_{eff} 을 도입함으로써, 다음과 같은 수정된 Forman 모델을 제안하였다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C [U(\Delta K - \Delta K_{th})]^{m_{MF}}}{U \cdot [(1-R)K_{crit} - \Delta K]} \quad (6)$$

여기에서 재료상수 C 와 m_{MF} , 그리고 ΔK_{th} , K_{crit} 과 같은 물리량은 피로균열전파실험을 통해 획득할 수 있다. 그리고 ΔK_{eff} 을 계산하기 위한 U 를 R 의 효과를 고려하여 다음과 같이 표현하였다.

$$U = a + b \cdot R \quad (7)$$

여기서 응력확대계수비 R 과 유효 응력확대계수비 U 의 상관관계를 정의하는 계수 a 와 b 는 실험결과에 의하여 결정된다.

본 연구에서 제안된 수정 Forman 모델은 균열 단합에 의한 균열 전파 지연 효과를 고려하고, 제

Table 1 Mechanical properties of HSB800

σ_y (MPa)	σ_{uts} (MPa)	E (GPa)	Elongation (%)
≥ 690	≥ 800	205	25

Table 2 Chemical composition of HSB800 (wt. %)

C	Si	Mn	P	S
≤ 0.10	≤ 0.55	≤ 2.20	≤ 0.015	≤ 0.006

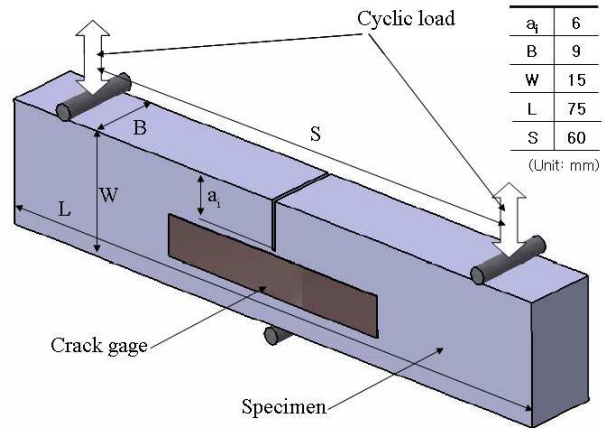


Fig. 4 Schematic diagram showing the test apparatus.

I 영역의 거동을 보다 적절히 모사함으로써 기존 모델에 비해 효과적인 피로균열전파거동의 모사 및 피로수명 평가가 가능하다.

3. 실험

3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 교량용 고성능 강재인 HSB800(KS D 3868)이며 이 재료의 기계적 성질 및 화학적 조성은 Table 1 과 Table 2 에 보이는 바와 같다.

Fig. 4 는 ISO 11782-2 와 ASTM E1820 에 따라 준비된 피로균열전파 시험용 3 점 굽힘 시험편(SEN3, 3-point single edge notch bend specimen)의 형상, 치수와 함께 성장하는 피로균열의 길이를 측정하기 위한 crack gage 의 부착 위치와 시험편에 하중을 작용하는 방식을 나타내고 있다.

3.2 균열전파실험

균열전파실험은 상온 대기 중에서 50 kN 용 만능시험기에 마이크로 컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하고, ASTM E647 의 규정에 따라 일정진폭 하중 하에서 수행하였다.

Table 3 Loading conditions for the test

Test conditions	Load		Periodic time (s)
	Max. (N)	Min. (N)	
R=0.1, f=0.1 Hz	6453	637	10.0
R=0.3, f=0.3 Hz	6354	1957	3.3
R=0.5, f=0.5 Hz	6470	3217	2.0

시편에는 길이 6 mm의 노치를 기계 가공한 후, 날카로운 피로균열의 생성을 위해 예비 피로균열 생성 절차를 수행하였다. 본 실험의 결과에 영향을 미치지 않기 위해 R=0.1의 응력확대계수비와 1 초당 하중 사이클의 반복수인 하중 주파수, f가 0.7 Hz인 하중조건으로 신속하게 예비 피로균열을 생성하였으며, 본 실험에서는 ‘R=0.1, f=0.1 Hz’, ‘R=0.3, f=0.3 Hz’, 그리고 ‘R=0.5, f=0.5 Hz’인 세 가지의 조건으로 실험을 진행하였다(Table 3 참조).

응력확대계수 K는 아래와 같은 식 (8)에 의해서 계산되며, 피로균열전파속도는 ASTM E647에 따라 증분다항식법으로 구하였다.

$$K = \left[\frac{P \cdot S}{B \cdot W^{3/2}} \right] f(a/W) \quad (8)$$

where, $f\left(\frac{a_i}{W}\right) =$

$$\frac{3\left(\frac{a_i}{W}\right)^{1/2} \left[1.99 - \left(\frac{a_i}{W}\right) \left(1 - \frac{a_i}{W}\right) \left(2.15 - 3.93\left(\frac{a_i}{W}\right) + 2.7\left(\frac{a_i}{W}\right)^2 \right) \right]}{2\left(1 + 2\frac{a_i}{W}\right) \left(1 - \frac{a_i}{W}\right)^{3/2}}$$

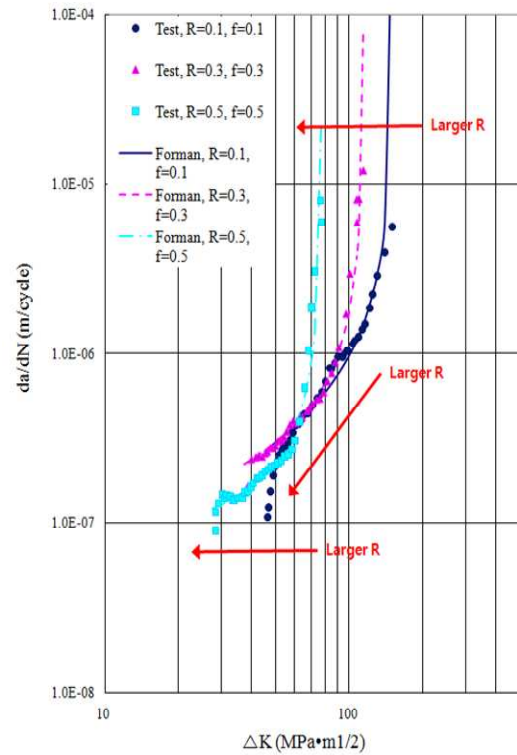
식 (8)에서 P는 인가되는 하중이며, S는 하중 점 사이의 거리, B는 시편의 두께, W는 시편의 폭을 의미한다.

4. 결과 및 고찰

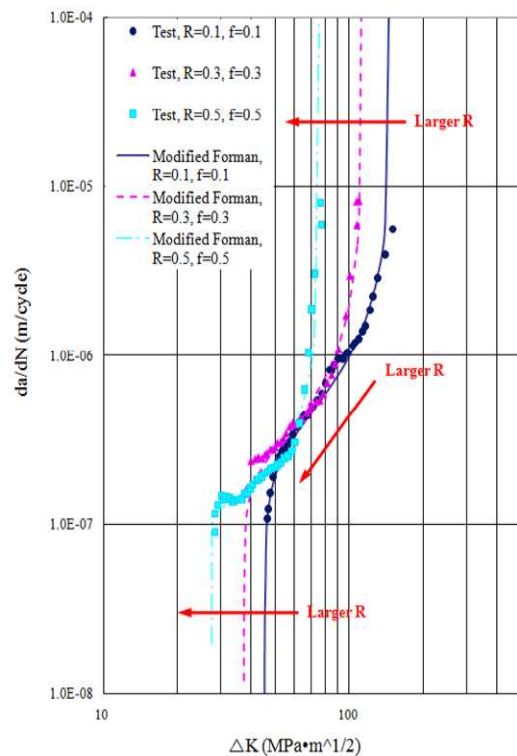
4.1 피로균열전파거동

피로균열전파실험을 통해 획득한 사이클당 하중 크기와 균열 길이 데이터로 ΔK와 da/dN을 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6은 실험 전, 후 시편의 사진이다.

실험결과, HSB800의 균열전파 곡선 양 끝 단에서 R이 증가함에 따라 ΔK가 감소하는 양상을 보였다. 따라서, 제 I 영역의 ΔK_{th}와 제 III 영역의



(a)



(b)

Fig. 5 Relation between the crack propagation rate and stress intensity factor range of HSB800: (a) Forman, and (b) modified Forman models

Table 4 Parameters of FCP models

FCP model		C	m_{MF}	ΔK_{th}	K_{crit}
R=0.1, f=0.1 Hz	Forman	1.86E-06	0.71	-	166.86
	Modified Forman	7.01E-06	0.38	45.38	166.86
R=0.3, f=0.3 Hz	Forman	4.16E-06	0.40	-	158.75
	Modified Forman	6.01E-06	0.29	37.30	158.75
R=0.5, f=0.5 Hz	Forman	4.94E-06	0.06	-	153.43
	Modified Forman	3.82E-06	0.03	27.64	153.43

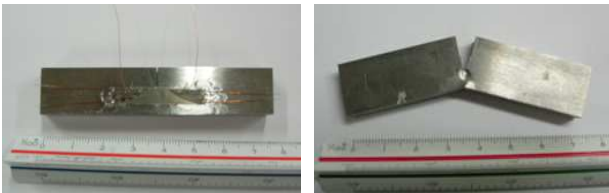


Fig. 6 Specimens: (a) before, and (b) after the test.

K_{crit} 는 R 에 의존함을 확인 할 수 있다. 또한 제 II 영역에서는 R 이 증가함에 따라 균열전파 곡선이 유사한 기울기 값을 가지며 그래프의 좌측 하단으로 이동하는 경향을 보였고, 이는 평균 하중이 높을수록 낮은 ΔK 에서 균열의 전파가 시작됨을 의미한다.

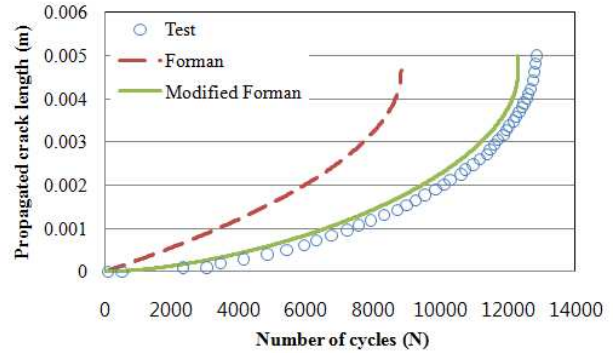
실험결과를 바탕으로 수정된 Forman 모델(식 (6))의 계수를 계산하여 Table 4 에 정리하였다. 이때, U 의 R 에 대한 의존성이 다음과 같은 관계로 나타나는 것을 확인 하였으며 따라서 식 (9)를 식 (5)와 식 (6)에 반영하였다.

$$U = 0.46 + 0.40R \tag{9}$$

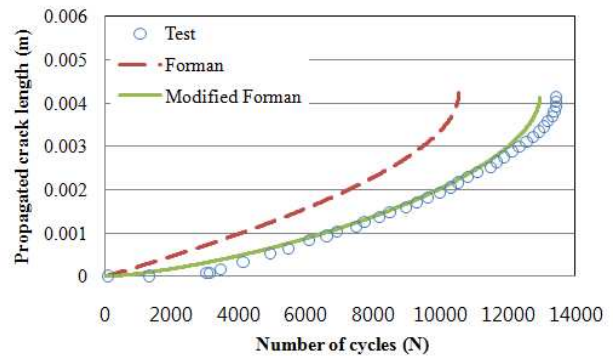
산출한 계수와 ΔK_{eff} 를 이용하여 Forman 모델과 수정된 Forman 모델의 피로균열전파거동 해석 결과를 각 하중 조건 별로 실험 결과와 함께 Fig. 5 에 나타내었다.

4.2 실험결과와 평가수명의 비교

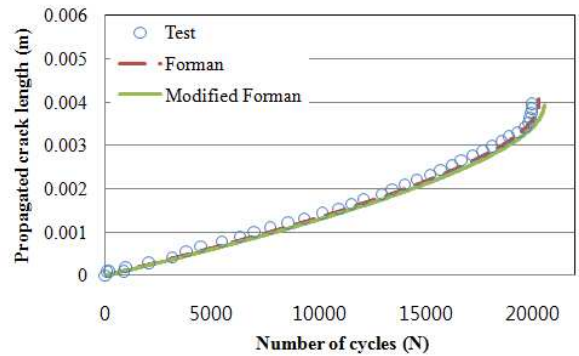
기존의 Forman 모델과 수정된 Forman 모델을 통해 평가한 피로수명을 실험결과와 각각 비교함



(a) $R = 0.1, f = 0.1 \text{ Hz}$



(b) $R = 0.3, f = 0.3 \text{ Hz}$



(c) $R = 0.5, f = 0.5 \text{ Hz}$

Fig. 7 Number of cycles against crack length: test, Forman, and modified Forman models.

으로써 모델의 균열전파거동 모사 적합성을 평가하고자 하였다. 피로수명 평가는 각 모델을 code화 한 후, MATLAB 을 이용하여 수행하였다. Fig. 7 은 실험 결과와 각 모델의 하중반복 수에 대한 균열길이의 관계를 나타내고 있다.

‘ $R=0.1, f=0.1 \text{ Hz}$ ’ 과 ‘ $R=0.3, f=0.3 \text{ Hz}$ ’ 의 두 조건에서는 수정된 Forman 모델에 있어 임의의 균열길이에 대한 피로수명이 실제 균열길이와 하중반복 수를 잘 예측하고 있는 반면, ‘ $R=0.5, f=0.5 \text{ Hz}$ ’ 에서는 Forman 모델이 제안

Table 5 Results of fatigue life evaluation

Test conditions	Test result (N)	Forman		Modified Forman	
		Fatigue life (N)	Error (%)	Fatigue life (N)	Error (%)
R=0.1, f=0.1 Hz	12,774	8,814	31.0	12,292	3.9
R=0.3, f=0.3 Hz	13,424	10,528	21.6	12,949	3.5
R=0.5, f=0.5 Hz	19,979	20,261	1.4	20,541	2.8

된 모델에 비해 피로수명을 보다 정확하게 평가하고 있다. 그 이유는 제 II 영역과 제 III 영역만을 모사하는 기존 모델이 높은 평균 하중으로 인해 제 I 영역이 거의 나타나지 않은 ‘ $R=0.5$, $f=0.5$ Hz’ 조건에 적합한 모델이었기 때문으로 판단된다. 하지만 기존 모델의 ‘ $R=0.5$, $f=0.5$ Hz’ 결과 오차에 비해 ‘ $R=0.1$, $f=0.1$ Hz’ 과 ‘ $R=0.3$, $f=0.3$ Hz’ 의 결과는 큰 오차를 나타내며, 두 조건에서 제안된 모델이 기존 모델에 비해 피로수명을 각각 3,478 cycles 와 2,421 cycles 더 정확하게 평가하고 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 수정된 Forman 모델이 실제 실험결과를 더욱 효과적으로 모사하고 있음을 확인 할 수 있다.

Table 5 는 실험 결과와 각 모델의 피로수명 및 오차를 나타내고 있다.

5. 결론

피로균열전파 실험을 통해 각 하중조건에 따른 HSB800 강재의 균열전파거동을 고찰하였다. 또한, 균열전파거동 전 영역의 모사가 가능하고 균열 닫힘 현상을 고려한 수정된 Forman 모델을 제안하였으며, 이를 이용하여 임의의 균열길이에 이르는 피로수명을 평가하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 균열전파곡선이 제 I 영역과 제 III 영역에서 응력확대계수비에 의존하는 경향을 확인하였다. 응력확대계수비가 0.1 에서 0.5 로 증가할 때, 하한 응력확대계수폭과 임계 응력확대계수가 각각 약 $17 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 감소함을 알 수 있다.

(2) 평균 하중이 커질수록 낮은 응력확대계수에서 균열의 전파가 시작되었으며, 제 II 영역에서 균열전파 곡선의 기울기는 실험조건에 의존하지

않고 모두 유사한 값을 나타내었다.

(3) 균열 닫힘 현상에 의한 유효 응력확대계수폭이 반영된 수정된 Forman 모델을 제안하였으며, 제안된 모델은 피로균열전파거동을 잘 모사하고 있음을 확인하였다.

(4) 수정된 Forman 모델에 의한 피로수명은 오차가 2.8%~3.9%로 실험결과와 잘 일치하고 있으며, 이를 바탕으로 임의의 균열길이에 대한 피로수명이 효과적으로 예측될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 포항산업과학연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Yoon, J. H., and Yang, Y. S., 1994, "Stochastic Fatigue Crack Propagation," *Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures 1*, Elsevier, Amsterdam, pp. 515~549.
- (2) Yang, J. N., Salivar, G. C. and Annis, Jr., C. G., 1983, "Statistical Modeling of Fatigue Crack Growth in a Nickel-Based Super alloy," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 18, No. 2, pp. 257~270.
- (3) Shim, D. S., and Kim, J. K., 1998, "A stochastic Analysis on Variation of Fatigue Crack Propagation due to Thickness Effect," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 22, No. 8, pp. 1523~1532.
- (4) Paris, P. C., and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Journal of Basic Engineering: Transaction, Series D*, Vol. 85, pp. 528~534.
- (5) Walker, E. K., 1970, "The Effect of Stress Ratio during Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7076-T6 Aluminum. In: Effect of Environment and Complex Load History on Fatigue Life," *ASTM STP 462*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 1~14.
- (6) McEvily, A. J., 1974, "Phenomenological and Microstructural Aspects of Fatigue," *Transaction of the Third International Conference on the Strength of Metals and Alloys*, Vol. 6, pp. 204~213.
- (7) Dowling, N. E., and Begley, J. A., 1976, "Fatigue Crack Growth during Gross Plasticity and the J-Integral. Mechanics of Crack Growth," *ASTM STP 590*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 82~105.
- (8) Anderson, T. L., 1995, "Fracture Mechanics," CRC Press, Inc., Florida, pp. 513~528.
- (9) Hertzberg, R. W., 1989, "Deformation and Fracture

- of Engineering Metals,*" John Wiley and Sons, New York, pp. 102~118.
- (10) Starke, E. A., and Williams, J. C., 1989, "Microstructure and the Fracture Mechanics of Fatigue Crack Propagation," *ASTM STP 1020*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 184~205.
- (11) Forman, R. G., 1972, "Study of Fatigue Crack initiation from Flaws using Fracture Mechanics Theory," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 4, No. 2, pp. 333~345.
- (12) Hartman, A., and Schijve, J., 1970, "The Effects of Environment and Load Frequency on the Crack Propagation Law for Macro Fatigue Crack Growth in Aluminum Alloys," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 1, No. 4, pp. 615~631.
- (13) Wheeler, O.E., 1972, "Spectrum Loading and Crack Growth," *J. Basic Eng., Trans. ASME*, Vol. D94, No. 1, pp. 181~186.
- (14) Willenborg, J., Engle, R.M., Wood, H.A., 1971, "A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept," *AFFDL TM-71-1-FBR*, January.
- (15) Elber, W., 1970, "Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 2, pp. 37~45.
- (16) Gomez, M. P., Ernst, H., and Vazquez, J., 1976, "On the Validity of Elber's Results on Fatigue Crack Closure for 2024-T3 Aluminum," *International Journal of Fracture*, Vol. 12, pp. 178~180.
- (17) Clerivet, A., and Bathias, C., 1979, "Study of Crack Tip Opening under Cyclic Loading Taking into Account the Environment and R Ratio," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 12, pp. 599~611.
- (18) Schijve, J., 1981, "Some Formulas for the Crack Opening Stress Level," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 14, pp. 461~465.
- (19) Lee, H. J., Kang, J. Y., Choi, B. I., Kim, J. Y., 2003, "A Comparative Study of Methods to Predict Fatigue Crack Growth under Random Loading," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 10, pp. 1785~1792.
- (20) Bannantine, J. A., Comer, J. J., and Handrock, J. L., 1990, "*Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*," Prentice Hall, Inc., New Jersey, p. 112.