

응력비의 영향을 고려한 표면피로균열의 균열성장식

강 용 구* · 김 대 석**

(97년 8월 26일 접수)

Fatigue Crack Growth Equation considered the Effect of Stress Ratio

Yong-Goo Kang* · Dea-Suk Kim**

Key Words : Stress Ratio(응력비), Critical Crack Length(임계균열길이), Dependence of Stress Ratio(응력비 의존성), Aspect Ratio(형상비), Crack Growth Equation(균열성장식), Modified Stress Intensity Factor Range(수정응력확대계수범위)

Abstract

In this work, fatigue tests by axial loading were carried out to investigate the effect of stress ratio on the growth behaviors of surface fatigue crack for SM45C steel and Al 2024-T4 alloy. The growth behaviors of surface crack have been monitored during fatigue process by measuring system attached CCTV and monitor. When the growth rates of surface crack were investigate by the concept of LEFM based on Newman-Raju's ΔK , the dependence of stress ratio appears both SM45C steel and Al 2024-T4 alloy.

Therefore, modified stress intensity factor range, $\Delta K^* [(1+R)^n \Delta K]$ are introduced to eliminate the dependence of stress ratio.

Using ΔK^* , it is found that the dependence of stress ratio disappears both SM45C steel and Al 2024-T4 alloy.

1. 서 론

기기 부재의 파손은 표면에 존재하는 작은 표면 결함이나, 형상불연속부 등에 응력이 집중되어 피로 균열이 발생하고, 이 피로균열이 서서히 증가하여 임계균열길이를 넘어서는 순간 급격히 파괴를 일으키게 된다.¹⁾ 특히, 항공기 산업의 경우에는 경

제적 측면에서 안전율을 낮게 설정하기 때문에 부재의 파손은 피할 수 없다. 따라서 파괴역학적 개념에 의한 각종 기기의 설계, 보수, 검사 및 안전성 평가를 위해서는 작은 표면결합재의 피로균열성장 특성에 대한 연구의 필요성이 대두되어 많은 연구가 수행되어오고 있다.²⁾⁻⁶⁾

피로균열의 균열성장속도를 파괴역학적 인자인

* 정회원, 금오공과 대학교 기계설계공학과

** 한국파워트레인(주) 종합기술연구소

응력확대계수범위로 정리한 최초의 연구는 Paris⁷⁾ 등에 의해 수행되었다. 이 연구에서 균열성장속도를 응력확대계수범위로 정리하면 균열이 안정적으로 성장하는 균열성장 제 II 단계에서는 작용응력 차이에는 무관하게 동일재질의 경우에는 양 로그 그래프 상에서 균열성장 데이터들이 하나의 직선 상에 모인다. 그러나, 응력비가 다른 경우 작용응력비에 따라 이들 관계는 여러개의 직선 상에 모이는 경향을 나타낸다. 따라서 응력비의 영향을 고려하여 Paris 식을 수정한 Foreman 식⁸⁾, Pearson 식⁹⁾ 및 Robert & Erdogan 식¹⁰⁾ 등이 제안되어 균열성장 제 II 단계 및 제 III 단계까지로 균열성장식을 확장한 식들이 제안된바 있다.

그러나, 이들 연구들은 응력비가 변화하는 경우 각각의 응력비에서 예상되는 Paris 식에서의 C 값을 예측하기 위한 연구들이다. 형상과 재질이 동일한 균열재를 여러 가지 응력비에서 피로시험을 수행하여 이들 연구 방법을 사용하여 균열 성장 데이터들을 균열성장속도와 응력확대계수범위로 정리하면 작용응력비에 따라 여러 개의 평행한 직선들로 나타나 통일적 정리가 곤란하다. 이와같은 현상은 실제 균열 성장에 영향을 미치는 응력범위는 균열선단이 완전개구되는 유효응력범위이므로 Elber¹¹⁾가 제안한 유효응력확대계수범위(Effective stress intensity

factor range, ΔK_{eff}) 를 사용하면 응력비에 따른 균열성장속도의 통일적인 정리가 가능함이 보고되고 있다¹³⁾.

본 연구에서는 새로운 간편한 파괴역학적인자를 사용하여 응력비에 따른 균열성장속도의 통일적정리를 시도하기 위하여 작은 표면결함을 가공한 Al 2024-T4합금재 및 SM45C재를 사용하여 세 가지 응력비 (R=0.05, R=0.3 및 R=0.6) 에서 피로시험을 실시하였다. 응력비가 균열성장 거동에 미치는 영향을 조사하고 각 응력비에서의 균열성장속도를 Newman-Raju가 제안한 응력확대계수 범위 (ΔK) 를 사용하여 정리하였다. 또한 균열성장 제II영역에서의 균열성장 데이터들이 여러 개의 평행한 직선들로 나타나는 응력비 의존성을 제거할 수 있는 간편한 수정응력확대계수범위, ΔK 을 제안하고 이를 사용하여 파괴역학적 정리를 수행하였다.

2. 시험편, 시험장치 및 시험방법

본 실험에 사용된 시험재료는 일반구조용강재로 널리 사용되는 SM45C재와 항공기 구조용재인 Al 2024-T4 합금재이다. 실험재료의 화학조성과 기계적 성질은 Table 1, 및 Table 2 에 나타낸 바와 같다.

피로시험편은 Fig. 1 과 같은 크기와 형상으로 기

Table 1 Chemical composition of the specimens. (wt. %)

Material	C	Si	Mn	Cu	Mg	Zn	Cr	Al	P	S	Fe
SM45C	0.44	0.28	0.71	-	-	-	-	-	0.014	0.09	Re.
Al 2024-T4	-	0.5	0.6	4.3	1.5	0.25	0.1	Re.	-	-	0.5

Table 2 Mechanical properties of the specimens

Material	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
SM45C	689	340.5	203.5
Al 2024-T4	470.4	323.4	72.6

Table 3 Testing condition for SM45C steel and Al 2024-T4 alloy

Material	Stress range, $\Delta\sigma$ (MPa)		
	R = 0.05	R = 0.3	R = 0.6
SM45C	353.8	301.8	207.1
	325.8	281.6	199.9
	297.9	206.8	192.1
Al 2024-T4	205.8	176.4	137.2
	186.2	156.8	117.6
	166.6	137.2	98

계가공한 후 SM45C재의 경우는 기계가공에 의한 잔류응력을 제거하기 위하여 어닐링(Annealing) 열처리를 실시하였다. 가공이 끝난 두가지 재료 시험편들은 다이얼 게이지가 부착된 소형 드릴링머신을 사용하여 시험편 표면 중앙에 작은 피트형 인공결함(직경 0.5 mm, 깊이 0.5 mm)을 가공한 다음 연마지(#1000~1200)를 사용하여 재연마 시킨 후 산화크롬분말로 버핑 작업을 하였다. 본 실험에 사용된 피로 시험기는 전기유압 서어브식 피로시험기(Instron Model 1350, 10 ton)이다.

두 가지 종류의 시험편에 대하여 피로균열의 성장특성에 미치는 응력비의 영향을 검토하기 위하여 상온 하에서 응력비, $R = 0.05, 0.3$ 및 0.6 에서 Table 3에 나타난 응력레벨에 대하여 인장축하중 피로시험을 실시하였다. 피로시험중 표면균열의 발생과 성장거동은 CCTV와 Monitor 가 부착된 원거리 균열측정장치(Quester QM-1, QRMS-M/652)를 사용하여 계속적으로 관찰하였다.

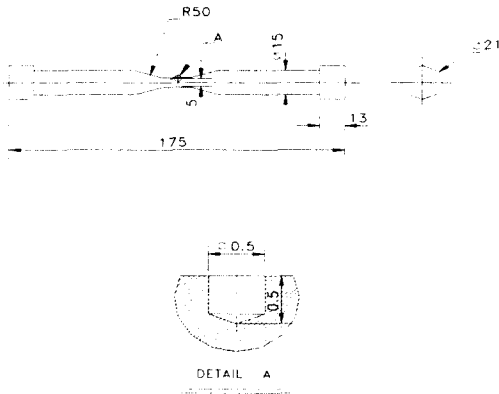


Fig. 1 Configuration of specimen and pit.

표면균열길이(2a)는 보다 정확한 측정을 위하여 예상파단 반복수의 5~7%단계마다 시험기를 일시 중지시키고 인공표면결함부를 포함하는 시험편 평활중심부상의 일정면적에 대하여 표면 레프리카를 채취하고 이 레프리카를 마이크로메타가 부착된 광학현미경을 사용하여 고정밀도로 균열길이를 측정하였다. 균열의 성장에 따른 이차원적 균열면 형상을 나타내는 균열면 형상비의 변화와 균열깊이(b)는 각각의 응력비에서 비치마크(Beach mark)법

을 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 $\Delta\sigma - N_f$ 특성

Fig. 2는 상온 하에서 직경 0.5 mm 깊이 0.5 mm 의 작은 인공표면 결함을 가공한 SM45C재 및 Al 2024-T4 합금재에 대하여 주파수는 10Hz로 하고 각각 세 가지 응력비, $R = 0.05, 0.3$ 및 0.6 의 인장축 피로시험에서 얻은 작용응력범위 ($\Delta\sigma$)와 파단반복수 (N_f)의 관계선도이다.

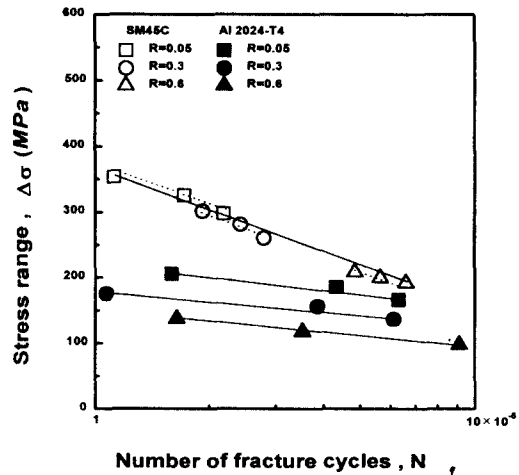


Fig. 2 S-N Curves for SM45C steel and Al 2024-T4 alloy.

Fig. 2에서 SM45C재의 데이터중 $R=0.05$ 는 □, $R=0.3$ 은 ○, $R=0.6$ 은 △형으로 Al 2024-T4재는 각각 ■, ●, ▲ 로 나타내었다.

여기서 SM45C재의 경우는 일정응력비에서의 $\Delta\sigma - N_f$ 관계 데이터들은 하나에 직선 상에 모여 선형적인 관계가 잘 성립함을 알 수 있다. 또한 응력비가 다른 경우에도 데이터들의 분산밴드폭이 작아 응력비에 관계없이 선형적인 관계가 성립함을 알 수 있다. 그러나 Al 2024-T4 합금재의 경우에는 일정응력비에서는 $\Delta\sigma$ 와 N_f 관계 데이터들은 선형적인 관계가 잘 성립하나 응력비가 다른 경우

에는 데이터들이 평행한 여러 개의 직선 상에 모여 $\Delta\sigma-N$, 관계선도의 데이터 분산밴드의 폭이 커진다. 이와 같은 현상은 실험 시험편의 수에 크게 의존한다고 볼 수 있다. 일반적으로 SM45C재보다 비철재료인 Al 2024-T4 합금재의 피로실험 데이터들의 분산(Scattering) 현상이 심하게 일어난다. 그러나, 분산밴드의 폭이 작은 SM45C재의 경우도 많은 실험을 한다면 분산밴드의 폭이 증가할 것으로 판단된다.

3.2 균열의 성장에 따른 균열면 형상비 (c/a)의 변화

두 가지 실험재에 대하여 균열의 성장에 따른 이차원적 균열면 형상비(c/a)의 변화를 비치마크(Beach mark)법을 사용하여 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 a 는 균열반길이, c 는 균열깊이, t 는 시험편두께이다. 세 가지 응력비 ($R = 0.05, 0.3$ 및 0.6)의 피로시험에서 SM45C재의 균열면 형상 변화데이터는 응력비에 따라 각각 ■, ● 및 ▲로 나타내었다. 또한 Al 2024-T4 합금재의 데이터는 각각 □, ○ 및 △로 나타내었다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 두 가지 실험재 모두 균열 성장에 따른 균열면 형상비(c/a)는 응력비와 작용응력범위의 차이에도 불구하고 거의 동일한 값을 가지며 반 타원형의 균열로 성장한다. 그러나 재질에 따른 형상비의 변화는 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 즉 SM45C재는 c/a 가 표면 결함 초기 조건인 2.0에서 균열이 성장함에 따라 점차 감소하여 ■는 0.9, ● 및 ▲는 0.8에 수렴하는데 반하여 Al 2024-T4 합금재는 c/a 가 표면결함 초기조건인 2.0에서 균열이 성장함에 따라 점차 감소하여 약 0.5에 수렴함을 알 수 있다.

이와 같은 특성은 균열이 성장함에 따라 균열면이 이차원적인 반타원형 균열로 성장할 때 시험편 표면방향과 깊이방향으로의 성장속도차이에 기인한다. 즉 Al 2024-T4 합금재에서의 표면방향으로의 균열의 성장이 SM45C재의 경우보다 빠르게 진행된 결과이며, 이는 재질의 차이 및 시험편 가공으로 인하여 형성된 표면 인장잔류응력에 기인한 것으로 사료된다.

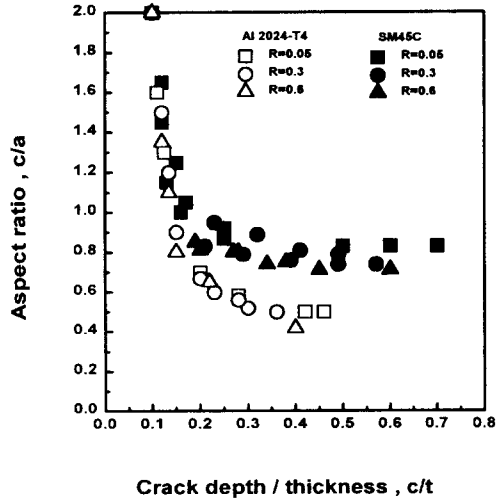


Fig. 3 Relation of aspect ratio with the ratio of crack depth versus the thickness of specimen.

3.3 균열길기와 반복수의 관계

두 가지 실험재에 대하여 작은 표면결함 (직경 0.5 mm, 깊이 0.5 mm)에서 발생하여 반복수 증가에 따라 성장하는 작은 표면균열의 균열성장특성을 균열반길이 (a)와 반복수 (N)의 관계로 나타낸

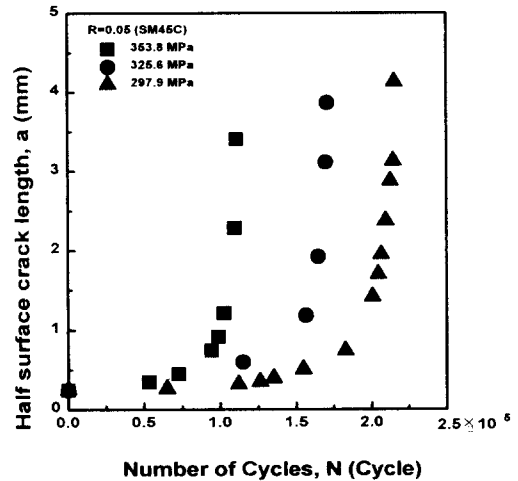


Fig. 4 Relation between half crack length and number of cycles for SM45C steel, $R=0.05$

다. Fig. 4는 SM45C재의 응력비 $R=0.05$ 의 인장축 하중 피로시험시 $\Delta\sigma=353.8\text{MPa}$, 325.6MPa 및 297.9MPa 의 세 가지 서로 다른 작용응력범위에 따른 $a-N$ 관계선도이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 피로균열은 각각의 작용응력 범위에서 피로수명 초기단계에서 발생하여 피로수명 후반부로 갈수록 급격히 성장하여 최종 파단한다. 또한 작용응력범위 ($\Delta\sigma$)가 클수록 파단반복수 (N_f)는 점차 감소한다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 SM45C재 응력비 $R = 0.3$ 및 $R = 0.6$ 의 $a-N$ 관계선도이다. 작용응력범위 ($\Delta\sigma$)에 따른 균열반길이 (a)는 Fig. 4의 $R=0.05$ 의 $a-N$ 선도와 같이 피로수명 초기단계에서 발생하여 서서히 성장하다가 피로수명 후반부에서는 급격히 성장하여 인장 파단됨을 알 수 있다.

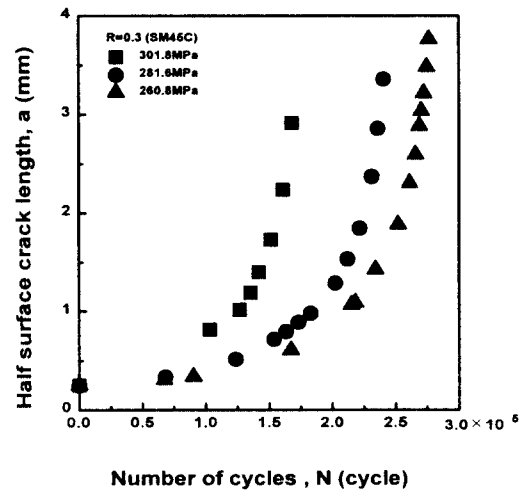


Fig. 5 Relation between half crack length and number of cycles for SM45C steel, $R=0.3$

피로균열이 발생하여 서서히 성장하다가 최종 인장파단된 파단면의 형상을 $R=0.3$, $\Delta\sigma=281.6\text{MPa}$ 작용시에 한하여 Photo. 1에 나타내었다. 사진상에서 파단면은 피로균열이 성장한 반타원형의 영역과 인장파단된 영역으로 명확하게 구별된다. 이 반타원형 영역의 시험편표면에서의 길이인 임계균열길이 (a_f)를 파단면 조직사진으로 조사해보면 $R=0.05$ 의 경

우는 약 3.8 mm , $R = 0.3$ 의 경우는 약 3.3 mm 및 $R=0.6$ 경우는 약 2.0 mm 이다. 이와 같은 현상은 응력비가 증가할수록 임계균열길이가 감소함을 나타낸다.

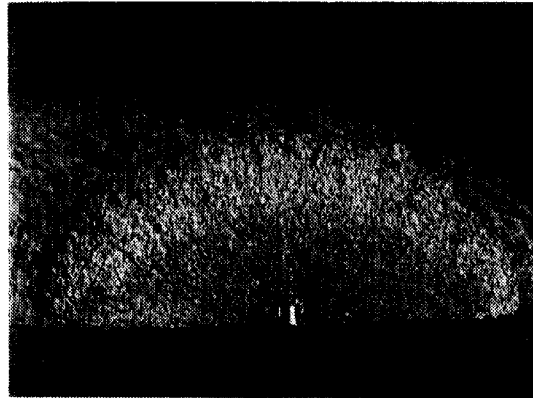


Photo. 1 Macro photograph of fracture surface for SM45C steel, at $R=0.3$, $\Delta\sigma=281.6\text{MPa}$

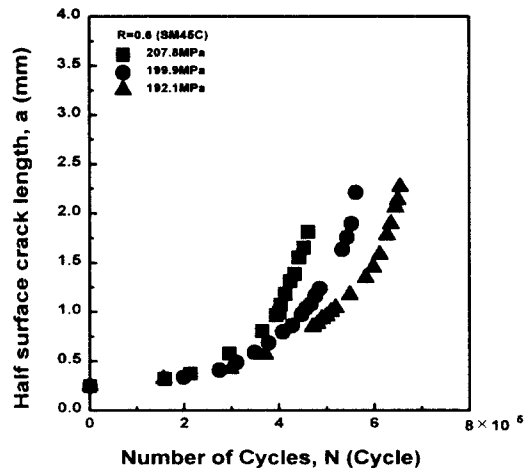


Fig. 6 Relation between half crack length and number of cycles for SM45C steel, $R=0.6$

Fig. 7은 Al 2024-T4 합금재의 $R=0.05$ 의 인장축 하중 피로시험시 세 가지 서로 다른 작용응력범위에 따른 $a-N$ 관계선도이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 피로균열은 각각의 작용응력 범위에서 피로수명 초기단계에서는 피로균열이 발생하지 않고 중기

단계에서 발생하여 피로수명 후반부로 갈수록 급격하게 성장하여 최종 인장파단됨을 알 수 있다.

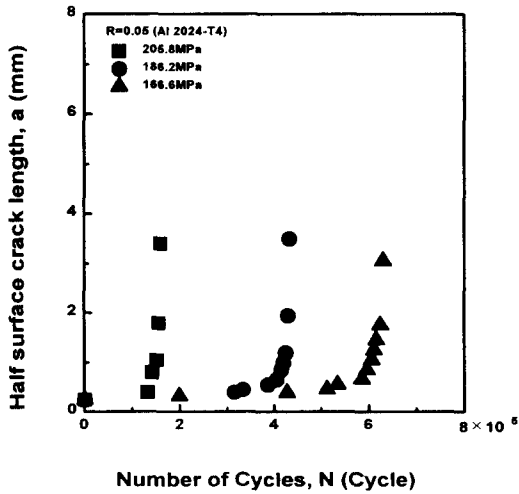


Fig. 7 Relation between half crack length and number of cycles for Al 2024-T4 alloy, R=0.05

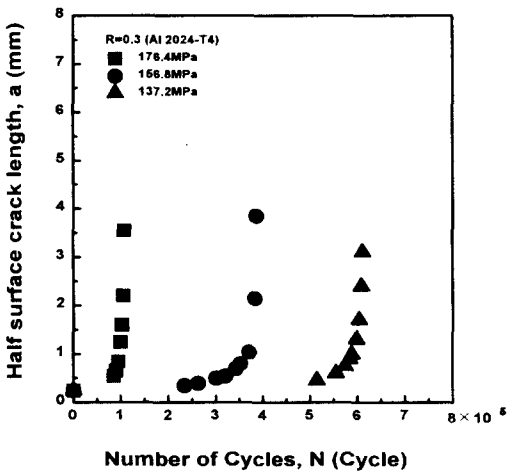


Fig. 8 Relation between half crack length and number of cycles for Al 2024-T4 alloy, R=0.3

Fig. 8 및 Fig. 9는 Al 2024-T4 합금재의 R=0.3 및 R=0.6의 인장축하중 피로시험의 $a-N$ 관계선도

이다. 피로균열의 발생과 성장거동을 살펴보면, Fig. 7의 R=0.05의 $a-N$ 선도에서와 같이 피로수명 초기단계에서는 피로균열이 발생하지 않고 피로수명 중기단계에서 피로균열이 발생하여 피로수명 후반부로 갈수록 급격히 성장하여 최종 인장파단됨을 알 수 있다.

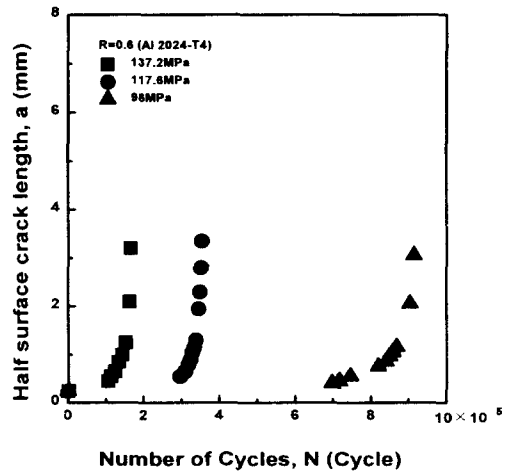


Fig. 9 Relation between half crack length and number of cycles for Al 2024-T4 alloy, R=0.6

피로수명 중기단계에서 발생한 피로균열이 피로수명 후반부에서 급격히 성장하여 인장파단될때까지의 임계균열길이(a_f)는 작용응력범위에 따라 차이를 보이나 작용응력범위중 중간 응력범위 작용시에 대하여 SM45C재에서와 같이 파단면 조직사진으로 조사해보면 R=0.05의 경우는 약 0.6mm, R=0.3의 경우는 약 0.5mm, R=0.6의 경우는 약 0.4mm로 나타나며 SM45C재와 같이 응력비가 증가할수록 임계균열 길이가 감소함을 알 수 있다. 또한 두 시험재를 서로 비교하면 Al 2024-T4 합금재의 임계균열길이가 SM45C재보다 큼을 알 수 있다

4. 표면균열 성장속도의 파괴역학적정리

4.1 응력확대계수

균열성장속도와 응력확대계수범위의 관계선도에

서 선형적 관계가 성립되는 균열성장 제II영역에서 적용되는 파괴역학적인자인 응력확대계수는 균열길이 2a의 중앙관통균열이 존재하는 무한평판재에 인장응력σ가 작용하는 경우는 다음과 같이 주어진다.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

그러나 본 연구에서와 같이 유한크기의 평판에 작은 피트형 인공결함으로부터 반타원형균열면을 가진 이차원적 균열성장거동을 나타내는 균열에 대해서는, 응력확대계수를 시험편 크기, 형상 및 균열면형상에 대해 수정한 Newman-Raju의 수정식¹⁴⁾이 일반적으로 사용된다. 표면균열길이와 균열 깊이에 상호 관련되는 Newman-Raju식은 다음과 같다

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi \cdot c/Q} \cdot F_s(c/a, c/t, a/w) \quad (2)$$

$$Q = 1 + 1.464(c/a)^{1.65}$$

$$F_s = [M_1 + M_2(c/t)^2 + M_3(c/t)^4] f_\phi \cdot g \cdot f_w$$

$$g = 1 + [0.1 + 0.35(c/t)^2] (1 - \sin\phi)^2$$

$$f_\phi = [(c/a)^2 \cos^2\phi + \sin^2\phi]^{1/4}$$

$$f_w = [\sec(\pi \cdot a/2 \cdot w \cdot \pi \cdot c/t)]^{1/2}$$

1) $c/a \leq 1$ 인 경우

$$M_1 = 1.13 - 0.09(c/a)$$

$$M_2 = -0.54 + [0.89 / (0.2 + (c/a))]$$

$$M_3 = 0.5 - [1.0 / (0.65 + (c/a))] + 14(1.0 - c/a)^{24}$$

2) $c/a \geq 1$ 인 경우

$$M_1 = \sqrt{a/c} (1 + 0.04 \cdot a/c)$$

$$M_2 = 0.2 + (c/a)^4$$

$$M_3 = -0.11(c/a)^4$$

여기서

- Δσ : 인장응력범위(Tensile stress range)
- a : 균열반길이(Half-length of surface crack)
- c : 균열깊이(Depth of crack)
- w : 균열판의 폭 또는 반폭(Width or half width of cracked plate)
- F : 경계수정계수(Boundary-correction factor)
- f_w : 유한폭 수정계수(Finite-width correction factor)
- f_φ : 타원형 균열해에서 유도된 각함수(Angular function derived from elliptical crack solution)

Q : 타원형균열에 대한 형상계수(Shape factor for an elliptical crack)

φ : 타원형의 임의각(Parametric angle of the ellipse)

M_i : 곡선근사함수(Curve fitting functions)

4.2 피로균열성장속도와 응력확대계수범위의 관계

시험재 인공표면결함에서 시험편 표면방향으로 성장하는 표면균열의 성장속도(da/dN)를 Newman-Raju의 응력확대계수범위(ΔK)를 사용하여 파괴역학적으로 정리한 결과를 Fig. 10 과 Fig. 11에 나타내었다. 여기서 ΔK는 Newman-Raju의 ΔK식에서 φ=0일 때의 ΔK 값이다.

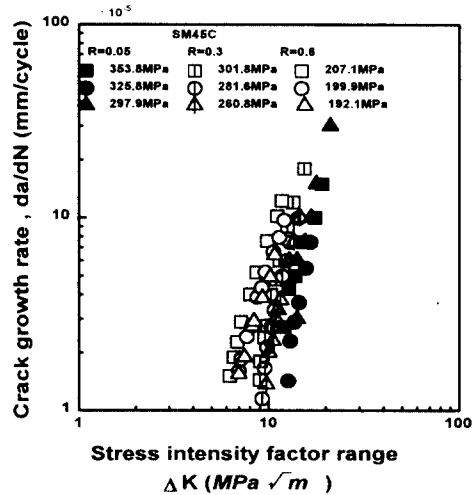


Fig. 10 Fatigue crack growth rate(da/dN) versus stress intensity factor range (ΔK) for SM45C steel

Fig. 10은 SM45C재의 표면균열 데이터로서 균열성장속도와 응력확대계수범위와의 관계는 서로 평행한 직선관계로 나타남을 알 수 있다. 그림에서 동일한응력비에서의 균열성장속도와 응력확대계수 범위와의 관계데이터들은 작용응력범위에 따라 좁은 밴드내에 모인다. 일반적으로 좁은밴드의 좌측에 작용응력범위가 큰 균열성장데이터들이 우측에 작용응력범위가 작은 균열성장데이터들이 위치한다. 그러나 재질에따라 약간의 변화는 수반할 수 있

다. 균열성장과정중 균열성장지연현상이 발생할 수도 있고 a-N관계데이터들을 평활곡선화함에 따라 위치가 바뀔 수도 있다. 그러나 동일한 응력비에서는 데이터의 분산밴드의 폭은 작아야한다. 또한 동일한 균열성장속도에서 가장 큰 ΔK 값을 갖는 데이터는 R=0.05의 데이터이다. 이는 R=0.05의 실험응력이 작용최대응력(σ_{max})은 R=0.3 또는 R=0.6의 실험응력보다 낮지만 작용최소응력(σ_{min})도 낮아 작용응력범위($\sigma_{max} - \sigma_{min}$)로 나타내면 가장 큰 값을 갖기 때문이다.

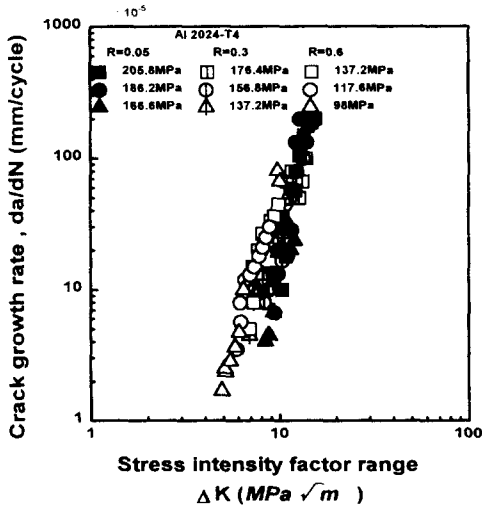


Fig. 11 Fatigue crack growth rate(da/dN) versus stress intensity factor range (ΔK) for Al 2024-T4 alloy

Fig. 11은 Al 2024-T4 합금재의 표면균열 데이터로서 균열성장속도와 응력확대계수범위와의 관계는 SM45C재와 마찬가지로 응력비에 따라 서로 평행한 직선관계로 나타난다. Fig. 10 및 Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 응력비가 동일하면 표면방향으로의 균열성장속도 데이터들은 응력범위의 차이에도 불구하고 좁은 직선밴드내에 모여 균열성장속도와 응력확대계수범위와의 관계는 양로그 그래프 상에서 선형적으로 나타난다. 이들 관계를 Paris식으로 나타내면 다음과 같다.

SM45C재의 경우 :

$$R=0.05 : da/dN = 4.93 \times 10^{-10} \Delta K^{4.4}$$

$$R=0.3 : da/dN = 9.42 \times 10^{-10} \Delta K^{4.4}$$

$$R=0.6 : da/dN = 2.55 \times 10^{-9} \Delta K^{4.4}$$

Al 2024-T4 합금재의 경우 :

$$R=0.05 : da/dN = 1.09 \times 10^{-8} \Delta K^{4.2}$$

$$R=0.3 : da/dN = 2.59 \times 10^{-8} \Delta K^{4.2}$$

$$R=0.6 : da/dN = 3.94 \times 10^{-8} \Delta K^{4.2}$$

그러나 두 가지 시험재 모두 균열성장속도와 응력확대계수범위와의 관계는 응력비에 따라 서로 평행한 직선관계로 나타나는 응력비 의존성이 심하게 나타나 표면균열의 성장속도를 ΔK 로서는 통일적 정리가 곤란함을 알 수 있다.

4.3 피로균열성장속도와 수정응력확대계수범위의 관계

1) 수정응력확대계수범위 ($\Delta K'$)

응력비가 다른 경우 피로균열의 성장속도를 응력확대계수범위 (ΔK)로 정리하면 4.2절에서 정리된 바와 같이 응력비 의존성이 발생하여 통일적인 파괴역학적 정리가 곤란하다.

따라서 응력비의 영향을 고려하여 파괴역학적 정리를 수행한 연구들을 살펴보면 Foreman 등⁸⁾은 응력비가 다른 경우 균열성장식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_C - \Delta K} \tag{3}$$

pearson⁹⁾은 다음과 같은 균열성장식을 제안하였다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{((1-R)K_C - \Delta K)^{1/2}} \tag{4}$$

이들 식은 응력비의 영향과 불안정 성장거동을 나타내는 균열성장 제 III영역까지 균열성장식을 확장한 식이다.

그러나 본 논문에서와 같이 이차원적 균열면을 가지는 균열체의 ΔK 는 Newman-Raju식에서 알 수 있는 바와 같이 대단히 복잡하다. 이들 식을 사용하여 파괴역학적으로 수명을 예측하는 경우에는 이들 식을 적분하여야 하나 ΔK 의 항이 분모, 분자에 동시에 들어있어 적용하기가 곤란하다.

균열이 안정적 성장거동을 보이는 균열성장 제

II영역에 대하여 Robert & Erdogan¹⁰⁾은 다음과 같은 균열성장식을 제안하였다.

$$\frac{da}{dN} = C \frac{1}{(1-R)^n} (\Delta K)^m \quad (5)$$

이상에서 언급한 연구들은 대부분 응력비가 변화하는 경우 각각의 응력비에서 예상되는 C값을 예측하기 위한 연구들이다. 형상과 재질이 동일한 균열재를 여러 가지 응력비에서 피로시험을 실시하는 경우, 이들 연구방법을 사용하면 응력비가 달라지는 경우에 대해 C값은 예측 가능하나 그 결과를 da/dN ~ ΔK관계 선도로 나타내면 여러 개의 선도로 나타난다.

따라서 본 연구에서는 균열이 안정적으로 성장하는 균열성장 제II영역에서의 da/dN ~ ΔK 관계 선도가 응력비에 따라 평행한 직선들로 나타난다는 사실과 동일한 균열성장속도에서는 응력비가 커질수록 ΔK의 값이 작아진다는 사실에 착안하여 응력비의 크기와 관계없이 재질과 시험조건만 동일하면 동일한 ΔK 값을 갖도록 다음과 같이 응력확대계수범위를 수정하였다.

$$\Delta K' = (1+R)^n \Delta K \quad (6)$$

여기서 n은 시험재료에 따른 상수이다.

본 실험에 사용한 두 가지 시험재에 대해 n값을 구해보면 다음과 같다.

SM45C재 : n = 0.7

Al 2024-T4 합금재 : n = 1.25

이 수정응력확대계수범위, ΔK'을 사용하여 균열성장식을 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C' (\Delta K')^m \quad (7)$$

이식을 ΔK를 사용하여 정리해보면 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\frac{da}{dN} = C' ((1+R)^n (\Delta K))^m = C' (1+R)^{nm} \Delta K^m \quad (8)$$

본 연구에서 제안한 수정 ΔK'를 사용한 균열성장식의 상수 C'과 Paris식의 상수 C와의 관계는 다음과 같다.

$$C' = \frac{1}{(1+R)^{nm}} C \quad (9)$$

2) da/dN 와 ΔK'의 관계 특성

본 실험에 사용한 두 가지 시험재의 인공표면 결함에서 발생, 성장하는 표면 균열의 성장속도를 본 연구에서 제안한 수정응력확대계수범위 ΔK'의 사용하여 정리해본다.

Fig. 12는 SM45C재의 da/dN ~ ΔK'관계 선도로서 그림에서 알 수 있는 바와 같이 수정응력확대계수범위 ΔK'를 사용하여 균열성장속도를 정리하면 Fig. 10에서 발생한 응력비에 따라 서로 평행한 직선으로 나타나는 응력비 의존성이 소멸되어 하나의 직선 상에 데이터들이 모여짐을 알 수 있다. 이들 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = 2.48 \times 10^{-10} \Delta K'^{4.4} \quad (10)$$

Fig. 13은 Al 2024-T4 합금재의 da/dN ~ ΔK'의 관계선도이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 수정응력확대계수범위 ΔK'를 사용하여 균열성장속도를 정리하면 SM45C재에서와 같이 응력비 의존성이 소멸되어 통일적 정리가 가능해진다. 이들 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = 8.19 \times 10^{-8} \Delta K'^{4.2} \quad (11)$$

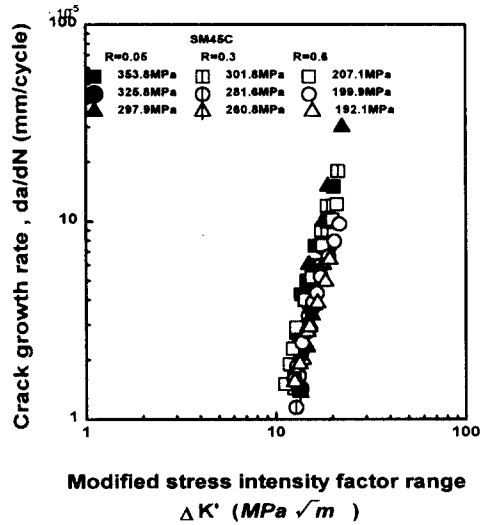


Fig. 12 Fatigue crack growth rate(da/dN) versus modified stress intensity factor range (ΔK') for SM45C steel

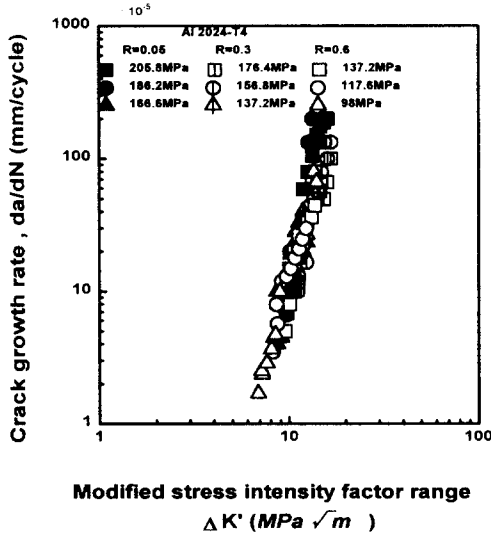


Fig. 13 Fatigue crack growth rate(da/dN) versus modified stress intensity factor range ($\Delta K'$) for Al 2024-T4 alloy

5. 결 론

SM45C재 및 Al 2024-T4 합금재의 두 가지 종류의 시험편에 작은 인공결함(직경0.5mm, 깊이0.5mm)을 가공하여 상온에서 주파수 10Hz, 응력비R=0.05, R=0.3 및 R=0.6의 인장축하중 피로 시험을 실시하여 표면균열의 성장거동에 미치는 응력비의 영향을 조사하였다. 또한 각 응력비에서 발생, 성장하는 표면균열에 대해 응력비의 의존성을 제거할 수 있는 새로운 수정응력확대계수범위, $\Delta K'$ 을 제안하여 표면균열의 성장특성을 파괴역학적으로 정리한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 응력비가 증가할수록 급작스런 파괴를 일으키는 임계피로균열길이(a_r)가 작아진다. 이 a_r 은 SM45C재의 경우 R=0.05일때 3.8mm, R=0.3일때 3.3mm, R=0.6일때 2.0mm이며, Al 2024-T4 합금재는 R= 0.05일때 6mm, R=0.3일때 5 mm, R=0.6일때 4 mm이다.
2. 피로과징중 균열면 형상비 (c/a)는 응력비의 크기에 관계없이 초기2.0의 값에서 균열이 성장함에 따라 SM45C재의 경우에는 약 0.8-0.9,

Al 2024-T4 합금재는 약 0.5의 반타원형의 값을 갖는다.

3. SM45C재 및 Al 2024-T4 합금재에 대하여 작은표면결함에서 발생, 성장하는 표면균열의 균열성장속도를 응력확대계수범위를 사용하여 파괴역학적으로 정리하면 두 가지 시험재 모두 응력비 의존성이 발생하여 통일적정리가 곤란하므로 본 연구에서 제안한 수정응력확대계수범위, $\Delta K' [= (1+R)^n \Delta K]$ 를 사용하여 균열성장속도를 정리하면 SM45C재 및 Al 2024-T4 합금재 모두 응력비의 차이에도 불구하고 응력비의존성이 소멸되어 통일적인 파괴역학적정리가 가능하다.
4. 본 연구에서 제안한 수정확대계수범위 $\Delta K'$ 를 사용할 때 재료상수 n은 다음과 같다.

SM45C재 : $n=0.7$

Al 2024-T4 합금재 : $n=1.25$

참 고 문 헌

- 1) D. Thomas and Clifford, A. Kelto, "Fatigue in Machines and Structure - Aircraft" ASM Material Science Seminar., pp.29-56, 1979
- 2) 서창민, 강용구, "회전굽힘응력하의 탄소강재의 표면피로균열의 성장특성" 대한기계학회논문집 제15권 제4호 p.1195-1203, 1991
- 3) 서창민, 강용구, "2 1/4Cr-1Mo鋼의 작은 表面 균열의 成長에 관한 基礎的 研究" 한국해양공학회 제1권 제1호 p.104-110, 1987
- 4) 강용구, 서창민, 이종식, "표면결합재에 관한 탄소성 파괴역학에 의한 피로수명 예측" 한국해양공학회 제9권 제2호 p.112-122, 1995
- 5) Kitakawa, H., Yuuki, R. and Suh, C.M., "Growth Behaviors of Fatigue Surface Crack initiated at a Small Artificial Notch", Preprint of Soc. of Mater. Science Japan, pp.26-30. 1980
- 6) Suh, C.M. and Kim, G.N., "A Study on the Initiation and Growth Behaviors of Surface Crack in Type 304 Stainless Steel at Room

- Temperature", Trans. of KSME, Vol. 8, pp.195-200. 1984
- 7) Paris, P.C. and F.Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws." Trans. Asme, J. Basic Eng., Vol.85, No.4, p.528, 1963
 - 8) Forman, R.G., Kearney, V.E. and Engle, R.M., "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclically Loaded Structure," J. Bas. Engng. 89, p. 3, 1967
 - 9) Pearson, S, Eng. Fract. Mech. Vol.4, P.9, 1972
 - 10) Roberts, R. Erdogan, F., "The Effect of Mean Stress on Fatigue Crack Propagation in Plates Under Extension and Bending" Trans. ASME, Ser. D, 80-4 P. 885, 1967
 - 11) Elber, W., "Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 2, pp. 37-45, 1970
 - 12) Rice, J.R " A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks" Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, pp.379-386, 1968
 - 13) Tanaka, K., "Mechanics and Micromechanics of Fatigue Crack Propagation" ASTM STP1020, pp.151-183, 1989
 - 14) Newman, J.C. Jr. and Raju, I.S., "Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies", Vol. 1 ASTM STP 791, pp. 1238-1265, 1983