

SiC 휘스커 강화 알루미늄 복합재료의 미소 표면 피로균열의 발생 및 진전거동

최영근* · 이택순** · 김상태** · 서창민*** · 이문환*
(1999년 7월 28일 접수)

Initiation and Growth Behavior of Small Surface Fatigue Cracks on SiC Whisker Reinforced Aluminum Composite

Young-Geun Choi, Taik-Soon Lee, Sang-Tae Kim,
Chang-Min Suh and Moon-Hwan Lee

Key Words: Crack Initiation(균열발생), Small Surface Crack(미소표면균열), SiC Whisker Reinforced Aluminum Matrix Composite(SiC 휘스커 알루미늄 복합재료), Bending Fatigue Test(굽힘피로시험), Stress Intensity Factor Range(응력확대 계수 범위)

Abstract

Reversed plane bending fatigue tests were conducted on SiC whisker reinforced aluminum composite which were consolidated by squeeze casting process. Initiation and growth of small surface fatigue cracks were investigated by means of a plastic replica technique. The fatigue crack initiated in the vicinity of SiC whisker/matrix interface. It was found that a fatigue crack deflected along SiC whisker and grew in a zig-zag manner microscopically, although the crack propagated along the direction normal to the loading axis macroscopically. The coalescence of micro-cracks was observed in the tests conducted at high stress levels, but were not evident in tests in which lower levels of stress were applied. Due to the coalescence, a higher crack growth rate of small cracks rather than those of long cracks was recognized in $da/dn - \Delta K$ relationship.

1. 서 론

현재 기계구조물은 보다 가혹한 조건에서 사용이 요구되고 있고, 이러한 조건에 필요한 신소재의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 신소재의 하나로 금속기 복합재료(MMC)가 있다.

금속기 MMC는 모재금속에 입자나 섬유 등을 강화재로 첨가해서 비강도, 비강성 등의 특성을 높이는데 있다. MMC는 야금학적으로는 다양한 연구가 이루어지고 있고, 기계적 특성과 정적강도에 대해서도 충분한 연구가 이루어지고 있다.(1) 그러나 실제 문제점으로 지적되고 있는 장기신뢰성, 특히 피로특성 등의 검토는 충분히 이루어지지 않고 있는 실정이다. 현재 실용화 단계에 있는 MMC가 구조용 재료로서 각광 받기 위해서는 피로특성, 내환경성, 내식성, 열사이클 특성등이 양호해야 하며(2,3) 특히 피로특성이 우수해야 한다. Shang 등의 입자강화 복합재료($SiCp/Al$)을 이용한 연구에 의하면 긴 피로균열에서는 균열굴곡에 의한

* 회원, 구미1대학 차량기계과

E-mail : ygchoi@kumi.ac.kr

TEL : (0546)440-1272 FAX : (0546)440-1270

** 회원, 영남대학교 기계공학부

*** 회원, 경북대학교 기계공학부

파면조대 유기 균열단합에 의한 균열선단의 실딩(shielding)이 발생해서, 조대한 SiC입자를 포함하는 재료가 균열단합 레벨이 높게 되고, ΔK 에 대한 균열 진전저항도 향상된다. 그러나 균열단합의 영향을 고려한 ΔK_{eff} 에서는 미세한 SiC입자를 포함하는 재료에서 균열진전저항이 높게 나타나는 것으로 보고하고 있다.^(4,5) 또한, 고바야시 등은 SiC입자강화 MMC를 이용해서 제하탄성 컴플라이언스법으로 균열 개폐 거동을 조사한 결과 ΔK 가 감소해서 하한계 응력 확대계수범위 ΔK_{th} 에 접근하는 동안 균열단합 수준이 높아지고 균열진전저항이 커지는 것은, 고 ΔK 영역에서는 소성역 유기균열단합 때문이고 저 ΔK 영역에서는 파면조대유기 균열단합 및 산화물에 의한 균열단합이 피로균열 단합을 지배하기 때문으로 보고하고 있다.⁽⁶⁾ 이외에도 MMC의 긴(Long)피로균열의 진전거동에 대한 보고도 있다.^(7,8)

S.Kumai등의 SiC 입자강화 알루미늄 합금을 이용한 표면 미소 피로균열의 발생 및 진전거동에 관한 연구에 의하면 균열은 SiC입자와 모재의 계면분리로 부터 발생, 진전하고 저 ΔK 영역에서는 균열선단이 SiC 입자를 만나서 정류하지만 고 ΔK 에서는 정류가 일어나지 않는다고 보고하고 있다.⁽⁹⁾ MMC의 피로균열 발생 및 미소 균열 진전거동에 관한 최근 약간의 연구결과가 발표되고 있지만 피로특성의 데이터 부족으로 인해 명확한 연구결과는 없다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

이것은 같은 강화재와 모재의 결합에서도 균열 발생, 균열진전양상 및 균열진전속도 등의 결과가 전혀 다른 경우가 많으므로 반드시 해결되어야 할 문제이다. 특히 MMC는 내피로특성과 내환경성의 데이터가 부족하므로 장기신뢰성이 떨어지므로 이에 관한 데이터를 축적해 가는 것과 함께, MMC의 피로파괴를 통괄해서 이해하고 피로파괴기구와 피로파괴를 지배하는 인자의 파악이 시급하다.

본 연구에서는 용탕 주조법으로 제조된 SiC 휘스커 강화 알루미늄기 복합재료를 이용해서 평면 굽힘피로시험을 행하고 래프리카법을 이용한 균열의 연속관찰 및 주사전자현미경에 의한 파면관

찰을 통해 미소 표면 균열의 발생 및 초기진전 거동을 규명한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편 및 실험기기

본 실험에 사용된 재료는 일본 (주)미쯔비시 알루미늄에서 개발한 SiC 휘스커를 체적율 25% 함유시킨 Al6061-T6 알루미늄기 복합재료이다. 사용된 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1 과 Table 2에 나타내었다.

Fig. 1은 시험편 표면을 주사전자현미경(SEM)으로 촬영한 조직사진으로 압출방향(L방향)에서 입자상의 SiC가 관찰되었다.

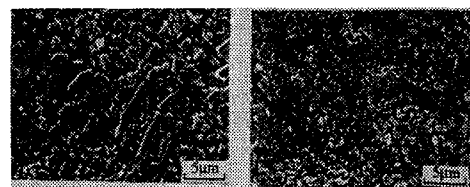
이것은 여러개의 SiC 휘스커가 모여 덩어리 형태로 되어있는 것이다. 그림에서 SiC 휘스커의 길이는 평균 5 μ m 정도이고, 최대는 약 10 μ m이다. 이것은 길이 약 100 μ m의 SiC 휘스커가 열간 압출시에 짧게 부러졌기 때문이다.

Table 1 The chemical composition of matrix material(wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
0.4-0.8	≤0.7	0.15-0.4	≤0.15	0.8-1.2	≤0.25	0.15-0.35	≤0.15	bal.

Table 2 The mechanical properties of matrix and composite materials

Materials	2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_b (MPa)	Elongation δ (%)	E(GPa)
Al6061-T6	346	365	16.0	66.9
SiCw/Al6061-T6	441	539	2.2	118



(a) L direction (b) C direction

Fig. 1 SEM photographs of specimen surface

시험편의 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 사용된 시험기는 소형의 평면굽힘 피로시험기이다.

2.2 실험방법

피로시험은 소형진동형 평면굽힘 피로시험기를 사용해서 반복속도 40Hz의 양진 일정진폭하중으로 행했다. 표면미소 피로균열의 발생 및 진전 거동을 연속해서 추적하기 위해 일정사이클마다 시험기를 일시 정지시키고 노치부 근방의 약4mm × 8mm의 부분에 대해서 레프리카(replica)를 채취한후 광학현미경을 이용해서 관찰했다. 균열길이는 5μm단위로 측정했고, 파면관찰을 위해서 주사전자현미경(SEM)을 사용했다. 본 실험에 있어서 균열발생수명 N_f 는 균열 전체길이 $2a=0.2mm$, 파단수명 N_f 를 $2a=2.0mm$ 로 정의했다. 응력확대계수 K 는 하중축 직각방향에 투영한 균열길이를 이용해서 Newman-Raju⁽¹³⁾ 식으로 구했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 S - N 곡선

Fig. 3은 균열발생수명과 파단수명을 유한요소

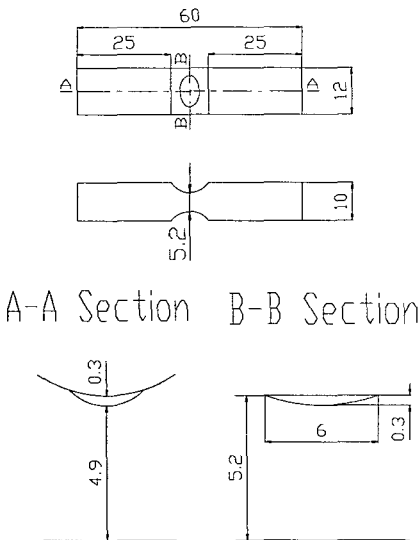


Fig. 2 Test specimen configuration(unit : mm)

해석(FEM) 결과로부터 얻은 노치부의 응력집중계수 1.67을 고려한 노치뿌리의 응력진폭 σ_a 로 정리한 S-N 곡선이다. 그림 중에서 0 가 균열발생수명, ● 가 파단수명이며 다소의 분산폭(scattering band)이 생겼다. 또한 비교 데이터로서 그림중에는 모재인 Al6061-T6의 균열발생 수명을 Δ , 파단수명을 \blacktriangle 으로 표시했다. 그림으로부터 SiC 휘스커를 강화한 MMC가 모재에 비해서 피로강도가 현저히 향상되었음을 알 수 있고 175MPa에서 약10배의 증가율을 나타내고 있다.

3.2 피로 균열 발생 양상

Fig. 4는 Fig. 2의 시험편 상에서 피로균열의 관찰위치 A, B, C를 나타내었다. Fig. 5는 고응력레벨 $\sigma_a = 240MPa$, 파단 반복수 1.9×10^4 사이클의 노치부 상의 관찰위치 A에서의 SEM 관찰 예를 나타낸다.

그림으로부터 수십μm ~ 수백μm 정도의 균열이 발생함을 알 수 있다.

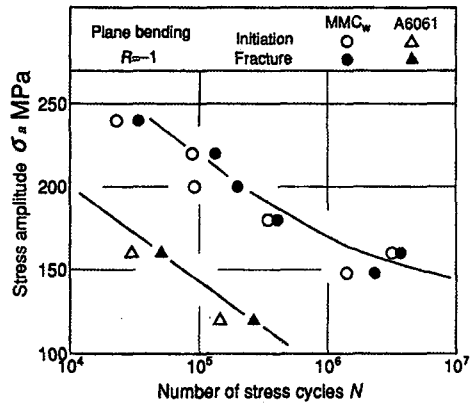


Fig. 3 S-N curves

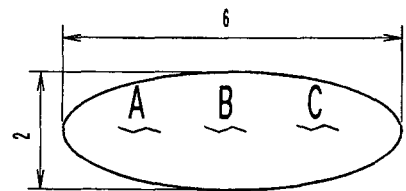


Fig. 4 Observation site of crack initiation

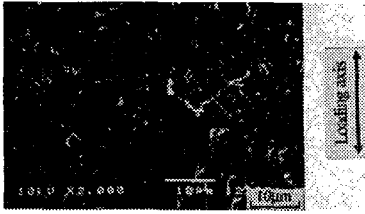


Fig. 5 An example of SEM photograph on specimen surface after crack initiation

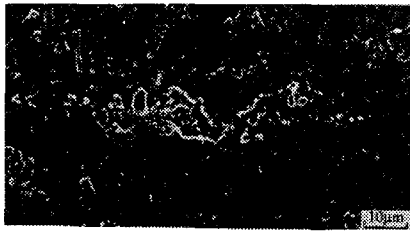


Fig. 6 An example of SEM photograph on specimen surface after crack initiation

본 실험에서 고응력 레벨에서는 노치저부 전체에서 균열이 발생했다. Fig. 6은 저응력 레벨 $\sigma_a = 160\text{MPa}$ 파단 반복수 3.17×10^6 사이클에서 노치저부의 관찰예이며 시험편의 수명을 좌우하는 주균열과는 다르게 발생 후 정지한 균열의 관찰예이다. 이 균열은 발생 후 길이가 약 $50\mu\text{m}$ 까지 진전하다가 정지해 있었다. 그림에서 화살표로 표시한 위치가 균열기점이고, 균열은 SiC 휘스커가 떨어져나간 결함으로부터 발생하였다. 이 균열은 발생위치가 주균열 진전경로상이기 때문에 시험편이 파단 할 때 주균열과 합체하였으며 이러한 현상은 강제에서 생기는 미소 균열의 경우에도 보고되고 있다.^(14~16)

Fig.1에 표시한 조직사진에서 처럼, SiC휘스커는 제조공정에서 덩어리 형태로 된 것이 많이 존재하고 있다. 이것은 여러 개의 SiC 휘스커가 모여서 덩어리 형태로 되었다고 생각된다.

균열의 발생은 없었지만 피로균열 기점 부근에 SiC휘스커의 결함은 노치저부에 여러 곳 관찰되었다. 이상으로부터 미시적으로는 응력레벨에 관계없이 노치부 전체에서 균열은 여러 개 발생했다. 다음에 균열기점 근방의 파면관찰을 행했다.

Fig. 7에 $\sigma_a = 160\text{MPa}$ 에서 균열기점의 한쌍의 파면관찰 예를 나타내었다.

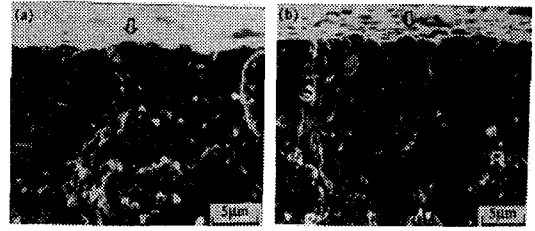


Fig. 7 SEM micrographs near crack origin ($\sigma_a = 160\text{MPa}$)

균열은 화살표로 표시한 위치로부터 발생했다. 그림(a)에서는 균열기점에 덩어리형태의 SiC가 관찰되었다. 그림(b)에서는 균열기점이凹凸형태의 파면으로 되어 있다. 균열은 이 SiC와 모재의 계면으로부터 발생했다. 다른 응력레벨에서의 관찰에는 생략하지만 피로균열은 응력레벨에 관계없이 SiC 휘스커와 모재의 계면으로부터 발생하는 것을 알았다.

그러나 Al6061-T6 모재 상의 피로균열 기점은 비교적 평탄한 파면이며 기점부로부터 방사선 형태로 성장한 파면의 특징을 나타내었다.

휘스커 강화 MMC재는 SiC 휘스커를 기점으로 균열이 발생하지만 Al합금 모재에 SiC 휘스커를 첨가함으로써, MMC재는 모재에서 소성변형이 억제되고 결과적으로 균열발생 저항이 높아진다.

또한 응력 레벨에 관계없이 여러 개의 미소균열이 발생하는 것을 관찰했다. 한편 고응력레벨에서는 여러 개의 균열이, 저응력 레벨에서는 1~2개의 균열이 발생했다.

3.3 균열진전 특성

Fig. 8에 고응력 레벨 $\sigma_a = 240\text{MPa}$ 의 레프리카 법에 의한 연속 관찰 예이다. 진술한 것처럼 $\sigma_a = 240\text{MPa}$ 에서는 그림(a)에 균열이 3군데에서 발생했다. 그 후 각각의 균열이 진전하고 균열은 합체해서 2개의 균열로 되어 진전하다가 최종적으로 2개의 균열이 합체하고, 1개의 균열로 되고 파단에 이르렀다. 그림에서 발생한 전 균열은 미시적으로는 미소한 굴곡을 다수 반복하고 있지만, 거시적으로는 하중 축 직각방향으로 진전했다. 이처럼 고응력 레벨에서는 균열은 여러 개가 동시에 진전하고, 진전 경로 면에 가까

운 경우는 합체하고 진전 경로 면이 크게 다른 경우에는 균열선단이 겹쳐진 후 그 선단은 정지한다.

Fig. 9에 $\sigma_a = 160MPa$ 의 연속 관찰 예에서는 그림(a)에서처럼 균열은 2군데 발생했다. 그 후 이 2개의 균열이 진전하고 그림(c)에서 합체했다. 이처럼 저응력 레벨에서도 여러개의 균열이 진전하지만, 그 수는 고응력 레벨보다 적다.

Fig. 10, 11에 피로 균열진전특성을 나타내었다. 또한 균열길이 2a는 하중축 직각방향으로의 투영길이이고, 그림 중의 파선은 균열의 합체를 표시하고 있다. Fig. 10에 $\sigma_a = 240MPa$ 의 피로 균열 진전곡선을 나타내었다. 고응력 레벨에서는 앞서서도 서술했듯이 균열은 여러 개가 발생, 진전하고, 합체하는 것이 관찰되었다.



(a) 1.90×10^4 cycles



(b) 2.70×10^4 cycles



(c) 3.40×10^4 cycles

Fig. 8 Successive observation of crack growth behavior($\sigma_a=240MPa$)



(a) 3.17×10^6 cycles



(b) 3.40×10^6 cycles



(c) 3.17×10^6 cycles

Fig. 9 Successive observation of crack growth behavior($\sigma_a=160MPa$)

$\sigma_a = 240MPa$ 에서는 3개의 균열이 관찰되었지만, 여기서는 비교적 균열길이가 큰 2개의 균열에 대한 진전곡선을 표시했다.

그림에서 2개의 균열 진전을 각각 \blacklozenge 와 \blacklozenge 로 표시하였고, 균열진전이 불연속임을 알 수 있다.

더욱이 합체 직후는 표면상의 균열진전 속도가 오히려 지연되는 것도 있다.

이것은 표면상의 합체 후 균열은 시험편 내부로 성장하면서 진전하기 때문에 표면에서 관찰되는 균열은 그다지 진전하지 않기 때문이다. 이러한 합체거동은 다른 보고에서도 관찰되고 있다.⁽¹⁷⁾

Fig. 11의 저응력 레벨인 $\sigma_a=160MPa$ 에서는 \blacktriangledown 와 \blacktriangledown 으로 표시된 2개의 균열이 발생 진전하다가 합체했다. 이 때문에 그림 중 균열 진전곡선이 불연속으로 되어 있다. 그러나 그 후 꽤 느린 균열진전 곡선이 되었다.

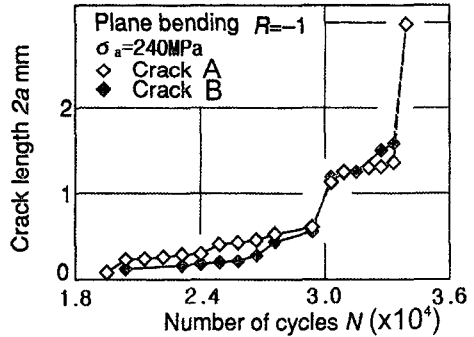


Fig. 10 Crack growth curve

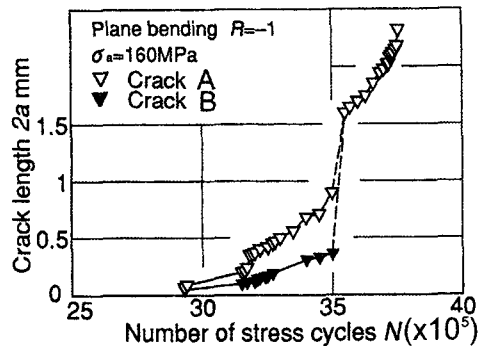


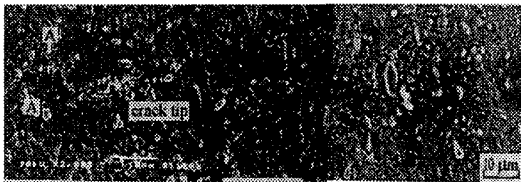
Fig. 11 Crack growth curve

3.4 SEM에 의한 미시적 균열진전양상

주사형 전자현미경(SEM)을 이용해서 시험편 표면에서 균열 진전 경로를 상세히 관찰했다.

Fig. 12에 $\sigma_a = 160MPa$ 에서 저 K_{max} 영역 ($K_{max} = 1.73 \sim 1.93MPa\sqrt{m}$)의 피로균열 선단에 대한 진전관찰 예를 나타내었다.

그림(a)에서 화살표 A로 표시한 것처럼 균열은 SiC 휘스커와 모재의 계면 및 모재 가운데를 진전한다. 그림(b)에서 균열선단은 SiC 휘스커에 도달하지만 정지하지 않고 SiC 휘스커와 모재의



(a) $N=3.22 \times 10^6$ cycles, $2a=0.40$ mm, $K_{max}=1.73 MPa\sqrt{m}$



(b) $N=3.25 \times 10^6$ cycles, $2a=0.42$ mm, $K_{max}=1.77 MPa\sqrt{m}$



(c) $N=3.27 \times 10^6$ cycles, $2a=0.45$ mm, $K_{max}=1.84 MPa\sqrt{m}$



(d) $N=3.30 \times 10^6$ cycles, $2a=0.50$ mm, $K_{max}=1.93 MPa\sqrt{m}$

Fig. 12 The details of fatigue crack growth path ($\sigma_a=160MPa$)

계면을 따라 진전하고 있다. 또한 그림(c)에서는 주균열 선단으로부터 약 $15\mu m$ 떨어진 위치에 미소균열이 보인다.

이 균열은 SiC 휘스커와 모재의 계면으로부터 발생하여 정지하고 있는 것으로 판단된다. 그 후 주균열과 합체했다. 그림(d)는 합체 후의 균열이다.

Fig. 13에 $\sigma_a = 160MPa$ 의 고 K_{max} 영역 ($K_{max} = 3.79 \sim 3.98MPa\sqrt{m}$)의 피로균열 선단에서 진전 관찰예를 나타내었다.

그림(a)에서 화살표 A로 표시하고 있는 것처럼, 고 K_{max} 영역에서도 균열은 SiC 휘스커 및 모재를 진전하고 있다. 더욱이 주균열 선단 앞쪽 수백 μm 의 위치에 미소균열이 관찰되었다.

이 균열은 그후 거의 진전하지 않지만 주균열 진전 경로상에 위치하기 때문에 그림(d)에 표시한 것처럼 주균열과 합체한다. 또한 그림(a)에서 화살표 B로 표시한 것처럼 SiC 휘스커에는 초기결합이 존재하고 있고, 균열은 이처럼 SiC 휘스커를 분리하고 진전한다.

그림(b)에 있어서 주균열 선단 전방 약 $30\mu m$ 의 위치에 미소균열이 존재하고 있다.

이것은 SiC 휘스커의 분리로부터 발생한 미소균열이고, 10000 cycles 후의 그림(c)에서 주균열과 합체한 후 진전을 계속했다.

이 미소균열의 기점이 되는 SiC 휘스커는 그림(a)에서 이미 분리되어 있고, 이곳으로부터 이 균열은 반복하중에 의해 발생, 정지하고 있는 균열이라고 생각된다.

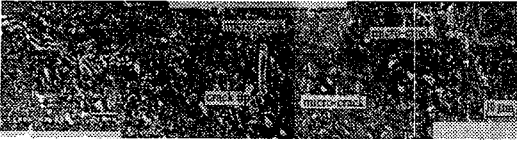
앞에서 기술한 것처럼 저 K_{max} 영역에서는 주균열 선단으로부터 $15\mu m$ 떨어진 위치에 미소균열이 관찰되었다. 고 K_{max} 영역에서는 균열선단으로부터 $30\mu m$ 의 위치에 미소균열이 관찰되었다. 이와 같은 크기는 소성역 크기 $1.04\mu m$ 와 비교할 때 수십 배이다.

3.5 파면 면상의 관찰

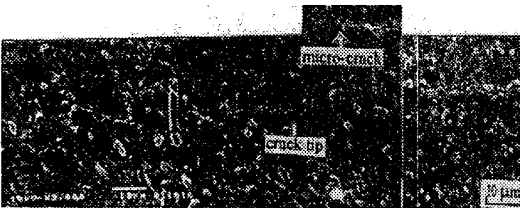
Fig. 14에 고응력 레벨인 $\sigma_a = 240 MPa$ 의 거시적인 균열파면 관찰사진을 표시했다. 그림 중 2개의 피로균열이 겹쳐 합쳐진 피로파면으로 되어 있고, 각각의 파면은 반타원 형상을 나타내고 있



(a) $N=3.70 \times 10^6$ cycles, $2a=1.98$ mm, $K_{max}=3.79 MPa\sqrt{m}$



(b) $N=3.72 \times 10^6$ cycles, $2a=2.03$ mm, $K_{max}=3.84 MPa\sqrt{m}$



(c) $N=3.73 \times 10^6$ cycles, $2a=2.09$ mm, $K_{max}=3.89 MPa\sqrt{m}$



(d) $N=3.755 \times 10^6$ cycles, $2a=2.19$ mm, $K_{max}=3.98 MPa\sqrt{m}$

Fig. 13 The details of fatigue crack growth path ($\sigma_a=160$ MPa)



Fig. 14 SEM photograph of fracture surface ($\sigma_a=240$ MPa)

다. 또한 파면중 화살표로 표시한 위치에 상당히 큰 단차가 2군데 관찰되었다. 이것은 3개의 균열이 각각 합체 또는 겹쳐진 것이 원인이다. 이것은 $\sigma_a=240 MPa$ 에서 균열의 합체 회수와 일치한다.

또한 비교하기 위해서 모재인 Al6061-T6의

$\sigma_a=120MPa$ 에서 거시적 파면을 Fig.15에 나타내었다. 이 응력 레벨에서는 균열은 2개 발생, 진전했다. 이 때문에 2개의 피로균열이 겹쳐서 합체한 파면으로 되어 있다. 그러나 각각의 파면은 반원형상을 나타내고 있고 aspect ratio $\lambda(=c/a)$ 는 양파면 모두 약 0.56이다. 여기서 a는 표면균열의 반지름, c는 깊이방향의 균열 길이이다.

또한 미시적인 파면관찰 결과를 Fig.16, 17에 표시했다. Fig.16은 시험편 표면부근, Fig.17은 내부의 파면이다. Fig16에서 파면상에 다수의 SiC 휘스커가 관찰되었다. 또한 덩어리 형태의 SiC(화살표A) 및 떨어져 나간 흔적(화살표B)으로 생각되는 부분도 보인다.

Fig.17에서도 똑같은 SiC 휘스커가 관찰되었다. 이상의 관찰로부터 균열은 SiC 휘스커와 모재의 계면을 따라 진전하고 있는 것으로 판단된다.

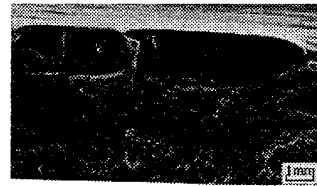


Fig. 15 Fracture surface of matrix ($\sigma_a=120$ MPa)

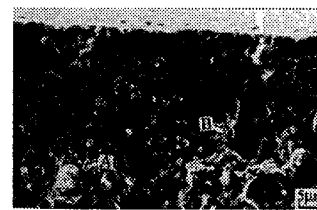


Fig. 16 SEM fractograph of near specimen surface ($\sigma_a=240$ MPa)



Fig. 17 SEM fractograph of inside of specimen ($\sigma_a=240$ MPa)

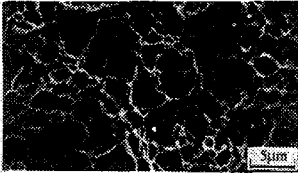


Fig. 18 SEM fractograph of static fracture surface($\sigma = 240\text{MPa}$)

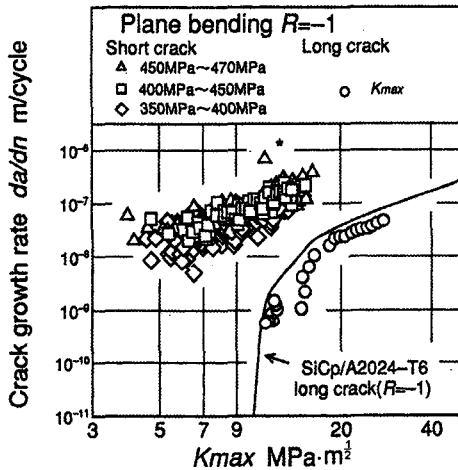


Fig. 19 da/dn - K_{max} relation

비교하기 위해 정적파면을 Fig. 18에 나타내었다.

정적파면은 피로파면과 다른 연성적인 파면이다. 정적파면에 있어서도 다수의 SiC 휘스커와 인발 등이 관찰된 것으로부터 정적파괴에서도 균열은 SiC 휘스커와 모재 계면을 따라 균열이 시발됨을 알 수 있다.

3.6 da/dn - K_{max} 관계

Fig. 19에 미소 표면 피로균열의 da/dn - K_{max} 관계를 표시했다. 앞에서 서술한 것처럼 고응력 레벨에서는 여러개의 균열이 진전, 합체등이 일어나는 것으로부터 진전속도는 꽤 분산 폭이 심하다. 한편 저응력 레벨에서는 비교적 분산 폭이 적게 나타났다. 그래서 균열의 합체에 의해 나타난 진전속도의 증가, 합체후의 진전속도의 저하 등의 영향을 제외했다.

또한 모재의 데이터를 직선으로, 본 연구에 사용된 금속기 복합재료의 관통균열 데이터($R=0.05$)를 파선으로 병행해서 나타내었다.

표면 미소 피로 균열의 데이터의 분산폭이 비교적 적어서고, 1개의 띠로 표시하는 것이 가능하다. 또한 모재의 진전속도와 비교할 때, 휘스커 강화 MMC 쪽이 모재보다 진전속도가 느리다. 특히 저응력 레벨에서는 확실히 모재보다 진전속도가 느리다.

결국 비교적 합체의 영향이 적은 저응력 레벨에서는 SiC 휘스커에 의한 균열 진전저항의 영향이 현저히 나타나고 있다.

특히 관통균열의 진전속도와 비교할 때 미소균열은 관통균열 보다 빠르게 진전했다. 이러한 성장특성은 다른 연구에서도 발표되고 있다.^(14,17)

4. 결론

고압주조법에 의해 제조된 SiC 휘스커 강화 알루미늄 합금을 이용해서 평면굽힘 피로시험을 행하고, 표면 미소피로 균열의 레프리카법을 이용한 연속관찰과 주사전자 현미경에 의한 상세관찰로부터 피로강도, 미소피로균열의 발생 및 초기 진전 거동을 규명하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) SiC 휘스커 강화재의 S - N곡선은 모재인 Al6061 - T6의 데이터와 비교할 때, 피로강도가 약 10배정도 향상되었다.

(2) 피로균열은 응력레벨에 관계없이 노치저부 전체에서 여러개의 균열이 발생했다. 발생기점으로는 SiC 휘스커가 덩어리로 된 부분의 SiC 휘스커와 모재의 계면, 혹은 SiC 휘스커가 떨어져 나간 결합부분, SiC 휘스커가 부서진 곳이 균열발생 기점이 되었다. 그러나 고응력 레벨에서는 여러개의 균열이 발생, 진전한 것에 비해, 저응력레벨에서는 1~2개의 균열만이 발생, 진전했다.

(3) 피로균열은 모재 또는 SiC 휘스커와 모재 계면을 따라 진전했다. 또한 주균열은 진전경로 상에 존재하는 미소균열과 합체를 반복하면서 진전했다. 이 미소균열은 주균열 선단의 고응력장과는 무관하게 반복하중에 의해 발생, 정지하고 있는 균열이다.

(4) da/dn - K_{max} 관계에서는 균열의 합체로 균열진전속도에 분산폭이 심했다. 그러나 합체의 영향이 적은 저응력 레벨에서는 분산폭이 적고,

거의 1개의 띠로 표현되었다. 또한 모재의 진전 속도와 비교할 때 휘스커 강화 MMC 쪽이 진전 속도가 느리다. 이것은 휘스커를 첨가함으로써 균열진전 저항이 상승했기 때문으로 판단된다.

후 기

본 논문은 1998년 구미1대학 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 대학 당국에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 福永秀春, 1991, "金屬基複合材料の現状と將來 (1)," *日本金屬學會會報*, 第30卷 第4號, pp. 276~288.
- (2) Paris, P. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Trans. ASME*, Ser. D, 85, pp. 528~533.
- (3) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," *ASTM, STP486*, pp. 230~242.
- (4) Shang, J. K. and Ritchie, R. O., 1989, "On the Particle-Size Dependence of Fatigue Crack Propagation Thresholds in SiC Particulate Reinforced Aluminum-Alloy Composites: Role of Crack Closure and Crack Trapping," *Acta Metall.*, Vol. 37, No. 8, pp. 2267~2278.
- (5) Choi, Y. G., Lee, T. S., and Lee, M. H., 1995, "Initiation and Growth Behavior of Small Surface Fatigue Cracks on SiC Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composites," *Transactions of the KSME*, Vol. 19, No. 11, pp. 2787~2796.
- (6) 小林俊郎, 1991, SiC 粒子強化 6061 アルミニウムの疲労亀裂傳播特性, *日本金屬學會誌*, 第 55卷, 第1號, pp. 72~78.
- (7) Whitehouse, A. F. and Clyne, T. W., 1993, "Cavity Formation During Tensile Stringing of Particulate and short Fiber Metal Matrix Composites," *Acta. Metall. Mater.*, Vol. 41, No. 6, pp. 1701~1711.
- (8) 小磯信重, 1989, "SiC 粒子強化 Al 合金の疲労特性", *材料*, Vol. 38, No. 433, pp. 1206~1211.
- (9) Kumai, S., King, J. E., and Knoot, J. F., 1990, "Fatigue Crack Growth in SiC Particulate Reinforced Aluminium Alloys," *Fatigue 90*, Vol. II, pp. 869~874.
- (10) Shang, J. K. and Ritchie, R. O., 1989, "Crack Bridging by uncracked Ligaments during Fatigue-Crack Growth in SiC-Reinforced Aluminum-Alloy Composites," *Metall. Trans. A*, Vol. 20A, pp. 897~908.
- (11) Kumai, S., King, J. E., and Knott, J. F., 1990, "Short and Long Fatigue Crack Growth in a SiC Reinforced Aluminium Alloy," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol.13, No.5, pp.511~524.
- (12) 増田千利, 1989, "SiC ウィスカ-強化及び SiC 粒子分散 複合材料の疲労破壊 機構," *鐵と鋼*, Vol. 75, No. 9, pp.1753~1760.
- (13) Newman, J. C. and Raju, I. S., 1983, "Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies," *ASTM STP 791*, pp. 238~265.
- (14) Kitagawa, H., Suh, C. M., 1979, "Quantitative Analysis of Fatigue Process Micro-Cracks and Slip Lines under Cyclic Strains," *ASTM STP 678*, pp. 420~449.
- (15) Suh, C.M., and Kitagawa, H., 1987, "Crack Growth Behavior of Fatigue Microcracks in Low Carbon Steels," *Fatigue Fract. Engng. Mater. struct.*, Vol. 9-6, pp. 409~424.
- (16) Suh, C.M., Ritchie, R.O. and Kang, Y.G., 1989, "Growth Behavior of Short Surface Fatigue Cracks in 2.25Cr-1Mo Steel," *KSME Journal*, Vol. 3-2, pp. 78~85.
- (17) 서창민, 1985, "인장 축하중 피로에 의한 미소 표면 균열의 발생·성장 거동," *대한기계학 회논문집* 제 9권, 제 1호, pp. 1~9.