122 大韓機械學會論文集 第19卷 第1號, pp. 122~131, 1995

〈論 文〉

SiC 입자 보강 Al 복합재료의 피로균열 진전거동

권재도* · 문윤배** · 김상태*

(1994년 6월 9일 접수)

The Fatigue Crack Growth Behavior of Silicon Carbide Particles Reinforced Aluminun Metal Matrix Composites

Jae-Do Kwon, Yun-Bae Moon and Sang-Tae Kim

Key Words: SiCp/Al Composites(SiC 입자 보강 Al 복합재료), Al6061(알루미늄 모재), Fatigue Crack Growth Behavior(피로균열 진전거동), Fatigue Crack Growth Model(피로균열진전 모델), Fractographic(파면사진), Fracture Mechanism(파괴기구)

Abstract

The research trends for metal matrix composites have been on basic mechanical properties, fatigue behavior after aging and fractographic observations. In this study, the fatigue crack initiation as well as the fatigue crack growth behavior and the fracture mechanism were investigated through observations of the fracture surface on silicon carbide particles reinforced aluminum metal matrix composites(SiCp/Al). Based on the fractographic study done by scanning electron microscope and replica, crack growth path model and fracture mechanism are presented. The mechanical properties, such as the tensile strength, yield strength and elongation of SiCp/Al composites are improved in a longitudinal direction, however, the fatigue life is shorter than the basic Al6061 alloys. From fractographic observations, it is found that the failure mode is ductile in basic Al6061 alloys. And because some SiC particles were pulled out from the matrix and a few SiC particles could be seen on the fracture surface of SiCp/Al, crack growth paths are believed to follow the interface of the matrix and its particles.

1. 서 론

근래 현대 공업의 다양성과 첨단 기술의 발달에 따라 이에 요구되는 많은 재료들이 개발되고 발전되어 왔다. 따라서 설계시 재료의 선택 문제와 요구 조건들은 더욱더 까다로워지고 있는 상황이다. 이 시점에서 복합재료(composite materials)의 개발은 이러한 문제점 해결의 한 방향을 제시하게 되었다.

복합재료는 플라스틱기 복합재료(fiber reinforced plastics; FRP)와 금속기 복합재료(metal matrix composites; MMC)로 대별할 수 있는데, 이 중에서도 금속기 복합재료는 상온에서의 기계적 성질을 고온에서도 유지시킬 수 있는 점과 제조시에 그 온도가 고온이라는 점이 플라스틱기 복합재료와 다른

*정회원, 영남대학교 기계공학과
**영남대학교 대학원

점이다. 따라서 고온의 구조용 재료로도 그 응용이 확대되고 있는 실정이다. 그러나 연성과 인성의 감소 등과 같은 문제점[1]이 지적되고 있지만, 재료의 경량화를 이룰 수 있어 우주항공 분야까지도 사용영역을 넓혀가고 있다.

특히, 세라믹계 강화 소재중 고강도, 고탄성의 SiC 보강 Al 복합재료는 비강도, 비강성, 내열성 및 내마모성이 우수하고, 우주항공 및 자동차 등의 고온 경량화 구조재로서 관심의 대상이 되고 있다. 또한 보강 소재를 형태에 따라 섬유(fiber)형, 휘스커(whisker)형, 입자(particle)형으로 분류할 수 있는데, SiC 입자 보강 Al 복합재료(이하 SiCp/Al로 표기)는 장섬유 혹은 휘스커 보강 복합재료와 같은 기계적 성질의 향상을 기대하기 어렵지만, 등방성이고 제조가 용이하며 제조 단가가 저렴하고, 기존의 금속학적 성형가공법의 적용[2~4]이 가능하다는 이유 등으로 크게 주목받고 있다.

이와 같은 SiCp/Al에 대한 지금까지의 연구 동향들은 재료의 제조법과 기계적 성질,[5] 인공노치에서 미소피로균열특성,[6] 피로거동,[7] 보강재의 체적비 차이에 의한 피로거동 및 균열진전 관찰,[8,9] 시효처리에 한 피로거동 및 파면의 전자현미경 관찰[10,11] 등으로 대별되나, 하중반복시 피로균열의 진전거동 등을 명확히 밝힐 필요성을 느낀다.

따라서 본 연구에서는 SiCp/Al의 신뢰성있는 복합재료의 설계와 실제 구조물의 응용 가능성에 입각하여, SiCp/Al 및 Al 6061 두가지 재료로 제작된 시험편으로 피로실험을 수행하여 두 재료에 대한 피로균열 발생 및 진전거동, 피로균열진전 형상 등을 비교 검토하고, 또한 피로균열진전 모델을 제시하고 피로파면의 전자현미경을 통한 파괴기구 등을 규명하여 보고자 한다.

2. 실험재료, 시험편 및 실험방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용한 재료는 Mitsubish 알루미늄에서 제조된 것으로, 고압용침법(high pressure infiltration method)으로 직경 200 mm의 빌레트(billets)을 제조해서 한변이 57 mm가 되는 사각봉 형태로 열간 압출하여 제조한 다음 T6 조건으로 열처리한 Al 6061과 이 재료를 모재로하여 체적비가 6%가 되도록 SiC 입자(직경 4~8 μm)를 보강하여 같은 방법으로 제조된 복합재료이다. Fig. 1은 SiC

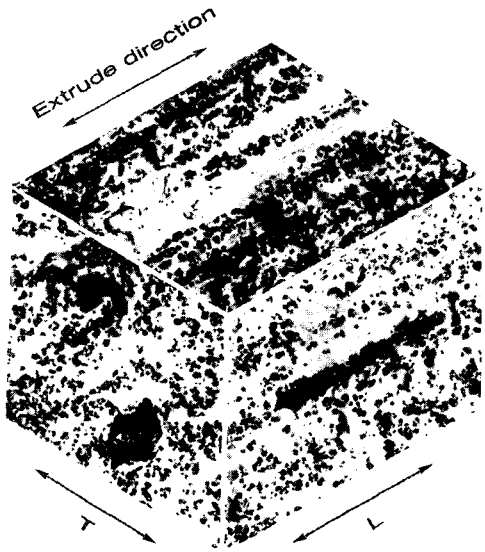


Fig. 1 Optical microscope micrograph of microstructure of extruded SiCp/Al (x100)

Table 1 Chemical composition of the Al 6061-T 6 alloy

	Composition, wt.%					
	Al	Si	Cu	Mg	Cr	Mn, Zn
Al 6061	97.9	0.6	0.28	1.0	0.2	0.02

입자가 보강된 Al 복합재료(SiCp/Al)의 미세구조(microstructure)사진으로서 SiC 입자들이 압출방향으로 배열되어 있음을 알 수 있고, 분포 상태가 다소 불균일하여 SiC 입자 덩어리(cluster)들이 관찰되었다.

Table 1은 Al 6061 모재의 화학성분을 나타내고, Table 2는 Al 6061 모재와 SiCp/Al의 기계적 성질을 나타낸 것으로, SiCp/Al이 모재에 비해 길이 방향(longitudinal direction ; L)에서 기계적 성질이 다소 향상된 경향이 나타났다.

2.2 시험편

Fig. 2는 본 피로균열진전 실험에 사용된 시험편(specimen)의 형상을 나타낸 것이며, 시험편의 가공은 인장시험에서 길이방향에서 다소 우수한 기계적성질이 나타났으므로, Fig. 3과 같이 열간 압출된 사각 봉에서 중앙균열(center cracked tension ; CCT) 시험편을 길이(L)-가로(T) 방향, 즉 압출

Table 2 Mechanical properties of the SiCp/Al composite and Al 6061

Material	Orientation	Proof stress (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Elongation(%)
SiCp/Al	L	287	331	10.5
	T	274	301	8.5
Al6061	L	280	316	9.6
	T	267	305	10.5

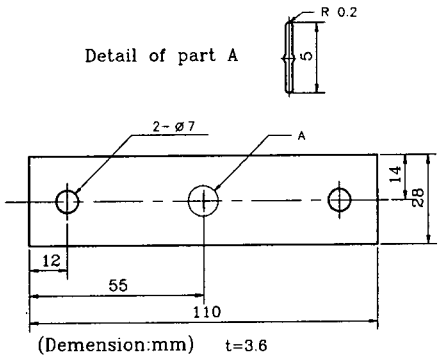


Fig. 2 Geometry of specimen

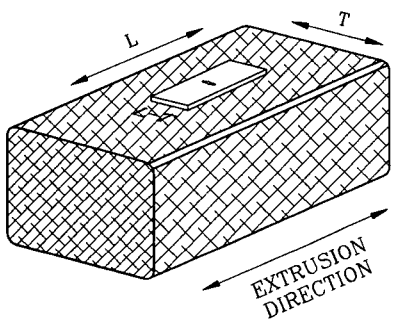


Fig. 3 Specimen orientation identification for extruded bar

방향이 길이가 되고 중앙 노치(notch)가 압출방향의 직각이 되도록 방전가공(electro discharge machining ; EDM)으로 가공하였다.

시험편에서 중앙 노치선단의 형상은 피로균열발생 특성에 미치는 영향을 최소화하기 위해서, 우선 센터드릴로 중앙에 홀(holl)을 뚫은 후 EDM으로 $2a=5$ mm, $\rho=0.2$ mm로 일정하게 가공하였으며, 피로균열(fatigue crack)길이의 정확한 측정과 레프리카(replica)의 채취를 위하여 시험편의 표면을 #200에서 #1200까지의 에머리 페이퍼(emery paper)로 연마후, 최종적으로 산화알루미늄 연마제로 마무리 연마를 하여 본 실험에 사용하였다.

2.3 피로균열진전 실험

본 실험에 사용된 피로시험기는 Instron사 제품의 유압 서보 피로시험기(hydraulic-servo fatigue test machine : model 1332)로 최대 용량은 20 ton이고, 실험조건은 하중비(R) 0.05의 싸인파형(sine wave), 인장-인장 하중형태를 채택하였고, 주파수는 10 Hz로 일정하게 하고, 상온에서 습도 50±5%, 응력레벨은 $\Delta\sigma=52.5$ MPa($2a=5$ mm, $\Delta K=4.65$ MPa$\sqrt{\text{m}}$)의 일정범위 하에서 피로균열진전 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 피로균열의 발생, 진전 및 수명평가를 위해 일정 사이클(cycle)마다 정확한 균열길이를 측정하여야 하는데 재료의 특성상 이동식 광학 현미경으로는 재료 표면의 균열을 정확히 읽기가 어려울 뿐만 아니라 Al 6061 및 SiCp/Al 복합재료에서 압출의 방향과 보강된 보강재의 영향으로 균열 발생 및 진전의 불균일성이 예상되어 표면 레프리카법을 이용하여 시험편의 4부분 즉, 시험편의 중심선을 기점으로 전면의 좌·우측과, 후면의 좌·우측에 대해 레프리카를 채취하여 500배까지 확대가능한 광학현미경에서 1/1000 mm까지 측정가능한 OSM(optical scale meter)을 이용하여 균열길이를 측정하였다.

시험편의 중앙을 기점으로 초기 인공노치를 포함한 균열길이의 증가분을 Δa라 정의하고, Al 6061 모재와 SiCp/Al 각각 6개 시험편에 대해 균열길이(a)와 하중반복회수(N)의 데이터로부터 a-N 선도 및 da/dN-ΔK 선도 등 피로균열진전 특성을 규명하여 보았다.

3. 피로균열 진전거동 해석

3.1 균열길이(a)와 반복하중회수(N)의 관계

Al 6061 모재와 SiCp/Al 복합재료 각각 6개의 시험편에 대해 피로균열진전 실험을 행한 후 얻은 데이터들 중에서 Al 6061과 SiCp/Al 각 시험편의 대표적인 시험편 1개(Al 6061 : No. 2, SiCp/Al : No. 1)에 대해서 전면의 좌·우측, 후면의 좌·우측 4부분에서의 균열길이(a)와 하중반복회수(N)사이의 관계를 플로트(plote)한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이들 그래프 상에서 알 수 있듯이 한 시편에서도 전 후면에 대한 좌·우측 균열의 진전 양상과 파단되기 전까지의 균열길이도 각기 다름을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 각각 6개의 시험편에 대해서 공통적으로 나타난 현상이었으며, 파단전 균열 길이의 차이는 SiCp/Al인 경우 0.4~3.6 mm 범위이고, Al 6061의 경우 0.05~1.82 mm의 범위로 SiCp/Al이 Al 6061보다도 다소 크게 나타났다.

그리고 시험편의 전·후면에 대한 좌·우측 균열을 평균낸 균열길이 a와 하중반복회수 N의 관계를 Al 6061 및 SiCp/Al 각각 6개의 시험편에 대해 한 그래프 상에 모두 플로트한 결과는 Fig. 5 및 6에 나타내었다. 여기서 인공노치(2a=5 mm)를 제외한 균열길이가 0.1 mm 증가시 하중반복회수를 피로균열발생 수명으로 정의할 경우, Al 6061 모재의 0.1 mm 피로균열 발생 수명은 52,150 cycle ~220,000 cycle 범위이고, SiCp/Al의 0.1 mm 피로균열 발생수명은 52,500 cycle~156,000 cycle 범위로 나타났다. 파단수명은 Al 6061의 경우 447,800 cycle~830,000 cycle 범위이고, SiCp/Al는 361,800 cycle~509,500 cycle 범위로, 오히려 SiCp/Al의 피로수명이 평균 30% 정도 짧게 나타났다.

기존의 연구 결과에서는 SiCp/Al가 보강재에 의해 모재보다도 피로수명면에서도 향상이 있었다는 보고[8,12]와 저하되었다는 보고[7,10]가 있었다. 여기서 주목해야 할 사항은 본 실험에서는 오히려 보강재의 영향으로 피로수명이 짧게 나타났다는 것이다. 이에 대한 원인분석 및 고찰은 4.2절에서 살펴보기로 하겠다.

3.2 균열진전속도와 응력확대계수 범위의 관계

이상과 같이 구한 a−N 관계에서 피로균열진전속도(da/dN)는 시컨트법(secant method)[13]을 이용하여 구하였고, 응력확대계수 범위(ΔK)는 다음과 같은 Tada의 식[14]을 사용하여 구하였다.

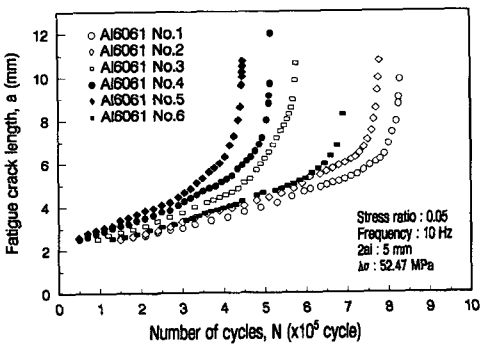


Fig. 5 The relation between fatigue crack length, a versus number of cycles, N for Al 6061

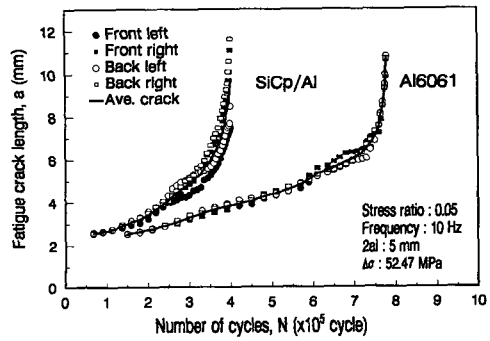


Fig. 4 The relation between fatigue crack growth length, a versus number of cycles, N at 4 parts for Al 6061 and SiCp/Al

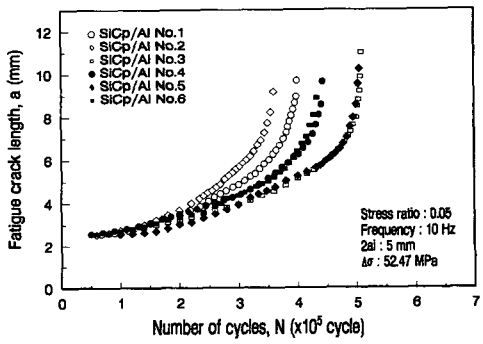


Fig. 6 The relation between fatigue crack length, a versus number of cycles, N for SiCp/Al

$$K=\sigma\sqrt{\pi a}F(\alpha)^*$$

$$F(\alpha)^*=(1-0.025\alpha^2+0.06\alpha^4)\sqrt{\sec\ (\alpha\pi/2)}$$

여기서, α=2a/W이고 W는 시험편 폭을 나타낸다.

실험후 얻은 균열길이(a)와 하중반복회수(N)을 이용하여 Al 6061 및 SiCp/Al 각각 6개의 시험편에서 전면 및 후면의 좌·우측 4부분에서의 피로균열진 전속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)의 관계들 중 1개(Al 6061 : No. 2, SiCp/Al : No. 1)의 시험편에 대한 결과를 양대수(log-log) 그래프상에 플로트한 것을 Fig. 7 및 8에 나타내었다. Al 6061 모재와 SiCp/Al의 피로균열 진전속도와 그

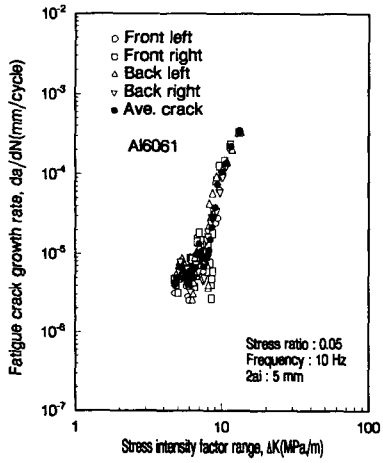


Fig. 7 The relation between fatigue crack growth rate, da/dN versus stress intensity factor range, ΔK at 4 parts for Al 6061

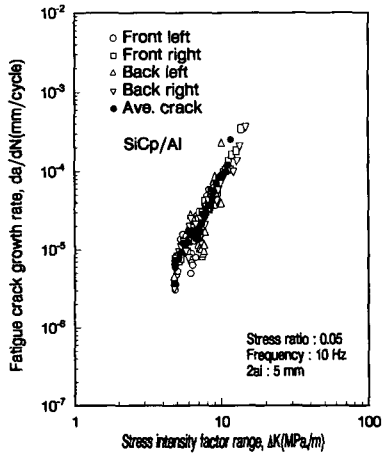


Fig. 8 The relation between fatigue crack growth rate, da/dN versus stress intensity factor range, ΔK at 4 parts for SiC/Al

형태가 흡사한 양상으로 나타났다. 그러나 동일 ΔK상에서 da/dN의 분산이 다소 있음을 알 수 있다. 특히, 그 분산 정도는 Al 6061의 경우 더욱더 심하게 나타났으며, 이 현상은 다른 시험편에서도 공통된 상황이었다. 그 원인은 재료를 제조하는 과정에서 압출의 영향 및 SiCp/Al에서 보강재(SiC 입자)의 영향으로 사료된다.

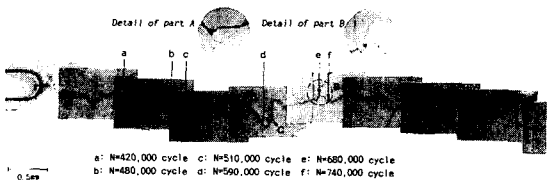
따라서 이러한 분산의 현상들로 보아 보다 신뢰성을 기하기 위해서는 데이터의 통계적 처리가 바람직하다고 생각된다.

궁극적으로 Al 6061의 경우 SiCp/Al에 비해 전 응력확대계수 범위 ΔK에 걸쳐서, 규칙적인 비율의 진전속도의 증감이 나타나지 않은 것으로, 이것은 균열진전 과정중 균열의 지연 및 균열진전형상의 불규칙 등에 의해 일어난 현상으로 사료되어, 이에 대한 자세한 고찰은 4. 1절에서 살펴보기로 하겠다.

4. ΔK-da/dN 선도에서의 분산, SiCp/Al의 피로수명 단축 원인 및 고찰

4.1 ΔK-da/dN 선도에서의 분산

Fig. 9는 Al 6061 및 SiCp/Al의 대표적인 각각 1개(Al 6061 : No. 2, SiCp/Al : No. 1)의 시험편에서 피로균열진전 과정을 가시화하기 위하여 실험중 파단 되기 전 사이클에서 채취한 레프리카 필름을 광학 현미경에서 100배로 확대하여 촬영한 사진을 단계별로 겹쳐서 나타낸 것으로 Al 6061의 경우 전면의 우측, SiCp/Al의 경우 전면의 좌측에 해당되며 전 시험편에 걸쳐서 비슷한 형상으로 피로균열은 진전하였다. Fig. 9의 (a)는 Al 6061, (b)는



(a) Al 6061

(b) SiCp/Al

Fig. 9 Appearance of the fatigue crack growth in Al 6061 and SiCp/Al

SiCp/Al에 대한 것으로 Al 6061의 피로균열진전 양상이 SiCp/Al에 비해 매우 거칠게 진전하였음을 알 수 있다. 이처럼 피로균열진전 양상이 매우 거칠게 진전하였다는 것은 간접적으로 피로균열 진전속도(da/dN)에 영향을 줄 수 있음을 시사한다.

피로균열진전 양상이 피로균열 진전속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여, Fig. 10은 Fig. 7에서 가장 분산이 심한 데이터, 즉 Al 6061의 전면의 우측 피로균열진전 과정에서 얻은 ΔK-da/dN 관계를 플로팅한 것으로, 특히 분산 영역(scatter zone) 부분은 약 $\Delta K=6.3\,\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ 부분에서 da/dN이 $3.83\times10^{-6}\sim8.83\times10^{-6}$에 이르는 분산과 약 $\Delta K=8.5\,\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ 부근에서 da/dN이 $2.67\times10^{-6}\sim3.45\times10^{-5}$에 이르는 불규칙한 진전 특성이 나타났다. 이러한 특성은 Al 6061에서 두드러진 현상이었다. 분산정도는 Al 6061 6개의 시험편 전체를 볼 때 평균 ΔK가 $6\,\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}\sim7.6\,\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ 사이에서 가장 분산이 심하였고, 그 이후의 ΔK 범위에서는 균열의 형태와는 관계없이 균일한 피로균열진전속도를 나타내었다.

이런 불규칙한 특이성을 규명하기 위하여, Fig. 10에서 분산이 심한 부분은 Fig. 9의 (a)에서 표시된 a~f, 즉 420,000~740,000 cycle 사이의 과정으로, 그 구간에서 피로균열은 *C* 부분처럼 균열의 지연현상이나 A, B 부분과 같이 분기되는 부분을 찾아볼 수 있다. 이러한 현상들은 피로균열 진전속도에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

한편, 다른 관점에서 ΔK-da/dN선도의 분산 원인을 찾기 위해 Fig. 10에서 분산 영역 부분의 균열진전 거동을 고려할 경우, da/dN 값의 변동폭이 심한 대표적인 점 ①, ② 및 ③은 Fig. 9(a)의 b, d 및 *e* 지점을 균열이 진전하는 경우에 상당한다.

이러한 지점까지 균열이 진전한 경우에 비선형형태의 균열에 대한 Chatterjee식[15]을 이용하여 K값을 구하여 보았다.

우선, Fig. 11의 (a)는 Fig. 9(a)의 e 지점까지 Al6061의 피로균열진전 경로를 복사한 것으로서, 측정하고자 하는 점의 균열진전 경로상에 대한 접선과 노치선단을 연결하여 두 직선 사이가 이루는 각을 굴절각이라고 정의하였다. 이와같이 하여 *b* 지점까지의 피로균열 형상을 모델링한 것이 Fig. 11의 (b)이며 이때 균열선단(crack tip)에서의 응력확대계수 범위 $\Delta K=5.44\,\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$가 되고, Fig.

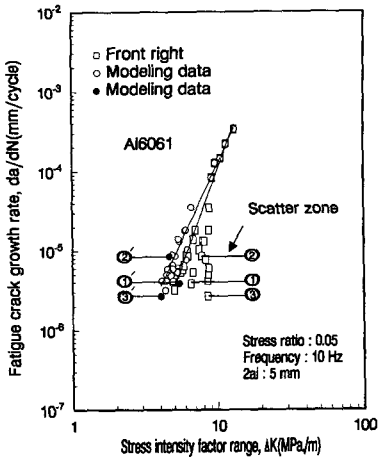


Fig. 10 The relation between fatigue crack growth rate, da/dN versus stress intensity factor range, ΔK at front right parts for Al 6061

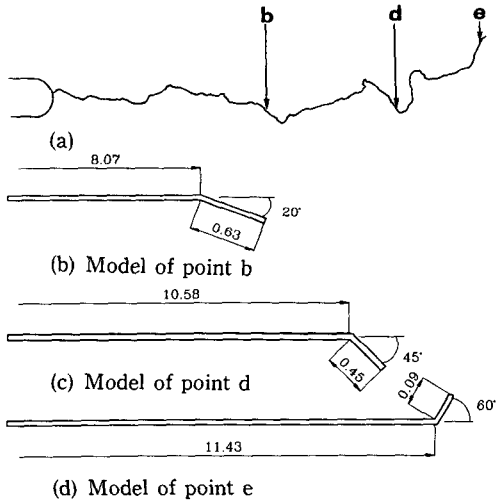


Fig. 11 The model of nonlinear shaped cracks

11의 (a)에서 d 지점까지의 피로균열형상을 모델링한 것이 Fig. 11의 (c)이며 이때 균열선단에서 응력확대계수 범위 $\Delta K=4.63\,\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$가 된다. 또한 Fig. 11(a)의 e 지점까지의 피로균열형상을 Fig. 11의 (d)와 같이 모델링하면 균열선단에서의 응력확대계수 범위 $\Delta K=4.04\,\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$가 된다.

이 비선형 형태의 균열에 대한 ΔK값들을 ΔK-da/dN 선도 상에 표시하면 Fig. 10에서 ●로 표시된 ①′, ②′ 및 ③′에 해당하는 것이다. 이와 같은 형식으로 Fig. 10의 모든 데이터(□)를 모델링

후 Chatterjee식을 이용하여 계산된 값들을 ○로 표시하여 보았다. 여기서 알 수 있듯이 ○로 표시된 데이터들이 균열진전 초기의 분산 정도가 감소됨을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 균열길이의 측정은 투영길이를 측정한 것으로 기울기를 가지며 진전하는 균열길이는 수평 균열보다도 투영길이로 측정하기 때문에 균열길이는 짧을 수밖에 없다는 사실과, 균열의 지연 및 분기는 da/dN에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 이러한 현상의 반복으로 Al 6061 모재 6개의 시험편 전체를 볼 때 응력확대계수 범위 ΔK가 $6\,MPa\sqrt{m}$~$7.6\,MPa\sqrt{m}$ 사이에서 피로균열 진전속도는 빨라졌다 느려졌다 하는 경향이 있어, ΔK-da/dN 선도에 다소의 분산이 나타난 하나의 원인으로 사료된다. 아울러 균열의 닫힘현상도 분산의 또 다른 원인으로 작용했을 것으로 생각된다.

4.2 SiCp/Al의 피로수명 단축 원인 및 피로균열 진전 모델

Fig. 12의 (a)와 (b)는 SiCp/Al 복합재료의 피로균열진전 과정을 가시화하기 위하여 피로균열진전실험중 일정 사이클에서 시험편의 전면에서 레프리카를 채취한 것을 광학현미경에서 100배로 확대하여 촬영한 사진을 단계별로 겹쳐서 복사한 것이다. Fig. 12의 (a)와 같이 주 균열이 진전해 가는 중 이에 앞서서 취약한 부분에서 또다른 미소균열이 발생하여 진전해 가다가 결국에는 두 균열이 합쳐지는 현상과, Fig. 12의 (b)처럼 노치 선단에서 균열이 진전하다가 또다른 미소균열이 생성되고 초기의 균열은 정체되고, 미소균열이 진전하여 노치 선단으로 이어지면서 주 균열이 진전해 나가는 이런 특이한 형상들이 실험중 빈번히 발생하였다.

이런 경우 균열길이는 주 균열에 앞서 발생하는 미소균열 발생지점까지의 길이로 정의하였다.

그리고 Fig. 13에서 (a)는 SiCp/Al의 표면을 전

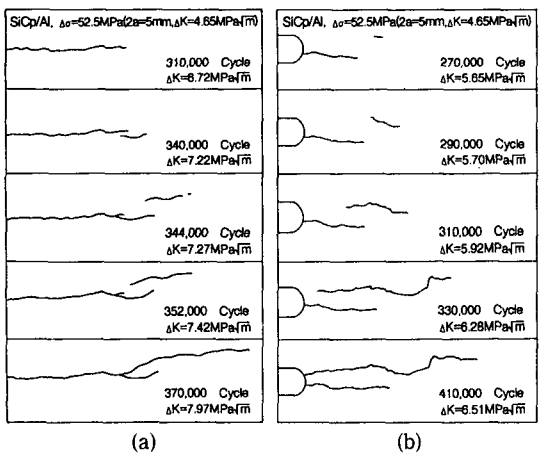


Fig. 12 Process of the fatigue crack growth for SiCp/Al

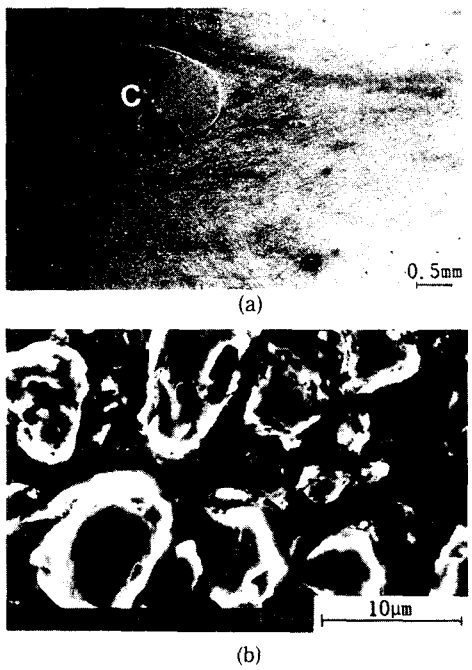


Fig. 13 Scanning electron microscope micrographs of surface of SiCp/Al

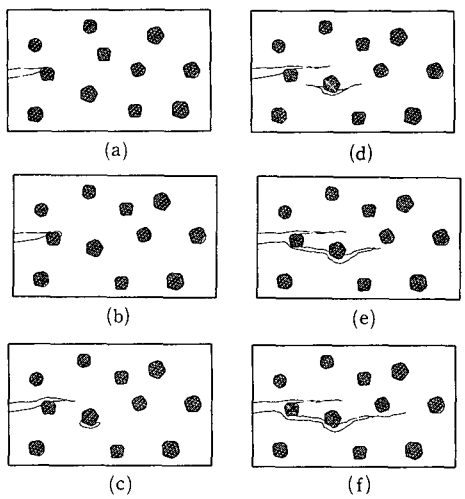
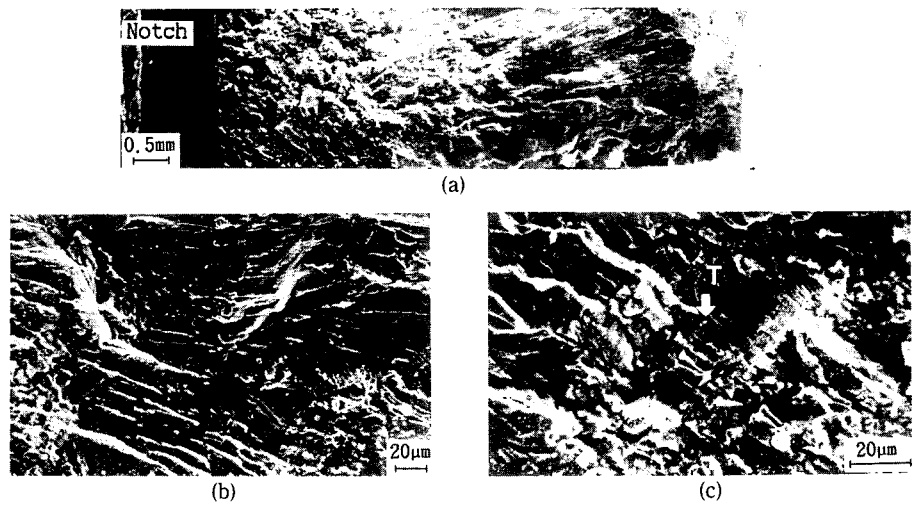


Fig. 14 The fatigue crack growth model for SiCp/Al composite

자 현미경으로 관찰한 것으로 C부분은 SiC입자가 밀집된 부분(rich zone)에서 관찰된 SiC 덩어리(cluster)로서 이 부분을 미세하게 관찰한 결과는 Fig. 13의 (b)와 같다. 여기서 알 수 있듯이 SiC입자들 사이에 모재와의 젖음성이 좋지 못한 부분이 형성되어 있고, 기지(matrix)와 접합성 및 입자들의 분산 상태가 좋지 않음을 알 수 있다. 따라서 이 부분은 피로균열진전시 이미 생성되어 있는 미소균열로서 작용할 수 있다. 이러한 현상들로 미루어 보아 SiC 입자와 기지 사이의 취약한 부분인 계면을 따라 균열이 진전하였으며, Fig. 1의 미세조직 사진에서 나타난 바와 같이 빈번히 산재해 있는 SiC 입자들이 뭉쳐져 있는 덩어리들을 재료 내부에서 만나게 되면 그 부분이 취약부가 될 것으로 사료된다.

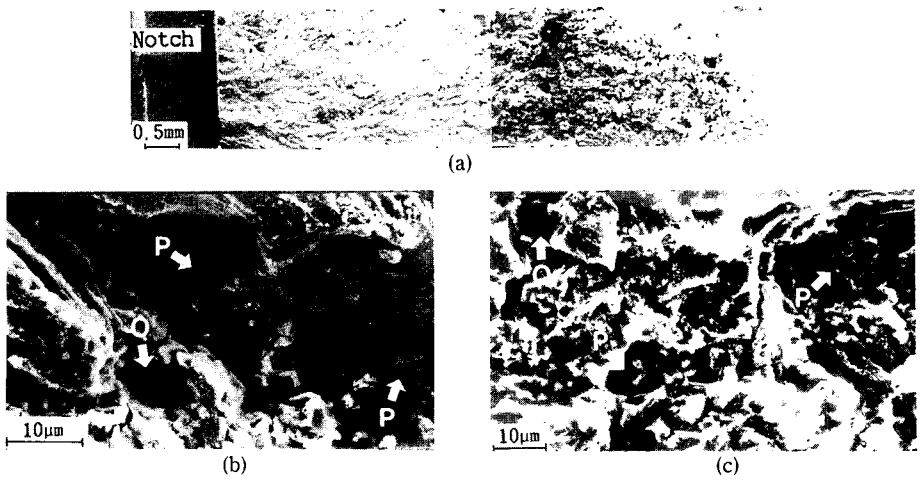
결국, 주 균열에 앞서 SiCp/matrix 계면에서 미소균열이 발생되어 합체되어 가는 과정에서 피로균열이 다소 빠르게 진전하여 파단에 이를 것으로 사료된다.

Fig. 12에 나타낸 SiCp/Al의 피로균열진전 과



Al 6061

Fig. 15 Scanning electron microscope micrographs of fracture surface of Al 6061



SiCp/Al

Fig. 16 Scanning electron microscope micrographs of fracture surface of SiCp/Al

정, Fig. 13에 나타낸 표면사진 및 Fig. 15 및 16의 파면사진을 토대로 하여 SiCp/Al의 피로균열진전과정을 모델링하여 Fig. 14에 제시하여 보았다.

즉, Fig. 14에 나타낸 바와 같이 SiCp/Al의 피로균열전전은 다음과 같은 단계로 구분될 수 있다.

1 단계 : (a)처럼 주 균열이 발생하여 성장하여 진전해 가는 단계

2 단계 : (b)와 같이 기지와 SiC 입자 사이의 젖음성이 좋지 못하여 미소 균열이 생성되는 단계

3 단계 : (c)와 (d)처럼 주 균열은 다소 지체되고, 미소 균열이 SiC 입자와 기지의 계면을 따라서 진전해 나가는 단계

4 단계 : (e)와 (f)에서처럼 미소 균열이 계속 성장하여 주 균열과 합체되어 진전해 가는 단계등으로 나눌 수 있다.

이상과 같이 SiCp/Al은 대략 4단계를 거쳐서 피로균열이 진전하였을 것으로 사료된다.

5. 파면의 관찰 및 고찰

피로시험 후 파단된 시험편의 파면에서 재료의 성질과 파단시 그 과정이 기록된다. 그러므로 주사전자현미경(scanning electron microscope ; SEM)으로 관찰후 사진 촬영을 행하여 파면의 조직을 관찰하고, 피로균열생성 기구 등에 관해 알아보았다.

Al 6061 모재와 SiCp/Al 각 2재료에 대해 피로균열진전 실험을 실행한 후 파단된 파면을 SEM으로 관찰한 파면 사진을 Fig. 15 및 16에 나타내었다.

Fig. 15은 Al 6061의 파면을 전자현미경에서 관찰한 사진으로, (a)는 파단면의 전체를 거시적으로 관찰한 것으로서 요철의 심한 정도를 보아 연성 파면을 나타냄을 알 수 있고, (b)에서는 연성 피로파면에서 볼 수 있는 규칙적인 스트라이에이션(striation)과는 다르지만 스트라이에이션과 흡사한 모양(quasi-striation pattern)이 나타남을 알 수 있다. 또한 (c)에서는 T부분처럼 파면의 석출물 등의 돌기에 의해 반복하여 눌린 자국인 타이어트랙(tire track)을 찾아볼 수 있다.

Fig. 16은 SiCp/Al 파면을 전자현미경에서 관찰한 사진을 나타낸 것으로 (a)에서 파면을 거시적으로 보면 Al6061에 비해 보강재인 SiC의 영향으로 다소 취성적인 파면의 양상이 나타났고, (b)와 (c)에서 나타난 바와 같이 파면내에 *P*부분처럼 SiC입자들이 자체적으로 남아 있는 것과 *O*부분같이 빠져나간 부분을 발견할 수 있는 것으로 보아 주 균열이 기지와 입자들의 계면을 따라 진행했음을 알 수 있다.

그런데 중요한 것은 실험결과에서 SiCp/Al이 오히려 Al모재 보다도 다소 피로수명이 짧은 것으로 보아, Fig. 1의 미세구조 사진에서 보듯이 SiC 입자들의 분포상태가 불균일 하여 SiC 입자 덩어리들을 볼 수 있었고, Fig. 12에서 나타난 균열전전과정과 Fig. 13의 표면사진을 미루어 보아 matrix/SiC 입자간의 젖음성(wettability) 즉, 접합강도(bonding strength)가 약하여 균열진전중 주 균열에 앞서 matrix/SiC 입자사이에 미소균열(micro-crack)의 생성으로 주 균열이 쉽게 진전할 수 있었을 것으로 사료된다.

6. 결 론

이상과 같이 Al 6061 및 SiCp/Al 복합재료에 대해 피로균열진전 실험과 파면관찰을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) SiCp/Al 복합재료는 Al 6061 모재보다도 길이방향에서 인장강도, 항복강도, 연신율은 다소 향상된 반면에 피로수명은 모재에 비해 약 30% 감소하였다.

(2) Al 6061의 ΔK-da/dN 선도에서의 분산 원인은 레프리카 사진에서 나타난 것처럼 피로균열이 지그재그(zig-zag)형으로 진전함과 피로균열의 지연 및 분기에 의한 것으로 사료되고, SiCp/Al이 Al6061보다 피로수명이 단축된 것은 SiC 입자 분포의 불균일성으로 인한 SiC 입자 덩어리들과, 피로균열진전과정으로 미루어 보아 피로균열진전중 주 균열에 앞서 미소균열의 생성으로 인해 주균열이 다소 쉽게 진전한 결과로 사료된다.

(3) 파면의 관찰에서 Al 6061 모재는 연성파괴임을 알 수 있었고, SiCp/Al은 SiC 입자들의 영향으로 다소 취성적인 파면을 띄고, SiC 입자 그 자체가 남아 있는 것과 빠져나간 부분을 발견할 수 있는 것으로 보아 주 균열이 취약 부분인 기지/입자의 계면을 따라 진전했음을 알 수 있다.

후 기

이 연구는 1992년도 한국과학재단 연구비 지원

(과제번호 921-0900-083-2)에 의해 이루어졌으며, 이에 대해 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) King, J. E., 1989, "Failure in Composite materials," *Metals and Materials*, pp. 720~726.

(2) Nair, S. V., Tien, J. K. and Bates, R. C., 1985, "Sic-reinforced Aluminum Metal Matrix Composites," *International Metals Reviews*, Vol. 30, No. 6, pp. 275~296.

(3) Logsdon, W. A. and Liaw, P. K., 1986, "Tensile, Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Rate Properties of Siclicon Carbide Whisker and Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 24, No. 5, pp. 737~751.

(4) Bonnen, J. J., Allison, J. E. and Jones, J. W., 1991, "Fatigue Behavior of a 2xxx Series Aluminum Alloy Reinforced with 15 Vol. Pct. SiCp," *Metallugical Transactions A*, Vol. 22A, pp. 1007~1019.

(5) Kim, Y. H., Lee, C. S. and Han, K. S., 1992, "Fabrication and Mechanical Properties of Aluminum Matrix Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 1062~1084.

(6) Biner, S. B., 1990, "Characterization of Short Fatigue Crack at Notches in SiC Particulate Al Composite," *Fundamental Relatonship Between Microstracture & Mechanical Properties MMCs*, pp. 825~837.

(7) Ishii, H. and Tohgo, K., 1991, "Fatigue Behavior of SiC/Al Composite Materials," 組織構造分科會資料/CM 6 論文.

(8) Yu Weicheng and Yuan Jincai, 1990, "Fatigue Behaviour of SiCp/Al6061 Composite," *FATIGUE* 90', pp. 899~904.

(9) Wu, S. B. and Arsenault, R. J. 1990, "Crack Propagation in SiC/Al Composites," *Fundamental Relatonship Between Microstracture & Mechanical Properties MMCs*, pp. 241~253.

(10) Knowles, D. M. and King, J. E., 1990, "Fatigue of an Aluminium SiC Composit," *FATIGUE 90'*, pp. 641~646.

(11) Doong, S. H., Lee, T. C. and Robertson, I. M., 1990, "An In-situ TEM Study of the Fracture Mechanisms of SiCp/Al Composites," *Fundamental Relatonship Between Microstracture & Mechanical Properties MMCs*, pp. 300~311.

(12) Levin, M., Karlsson, B. and Wasen, J., 1990, "The Fatigue Crack Growth Characteristics and its Relation to the Quantitative Fractographic Appearance in a Particulate SiC/Al 6061 Composite Material," *Fundamental Relatonship Between Microstracture & Mechanical Properties MMCs*, pp. 421~439.

(13) 1991, "Standard Test Mehod for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," *ASTM E647~88a.*

(14) Murakami, Y., *Stress Intensity Factors Handbook*, Vol. I, p. 3.

(15) Murakami, Y., *Stress Intensity Factors Handbook*, Vol. I, p. 354.