

〈논 문〉

체적비가 SiC_p/Al 복합재료의 기계적 및 피로균열진전 특성에 미치는 영향

권재도* · 안정주** · 문윤배**

(1995년 10월 10일 접수)

Effect of Volume Fraction on Mechanical and Fatigue Crack Growth Properties of SiC Particle Reinforced Al Alloy Composites

Jae-Do Kwon, Jeong-Ju Aan and Yun-Bae Moon

Key Words : SiC_p/Al Composites(SiC_p 입자보강 Al 복합재료), Volume Fraction(체적비), Tensile Test(인장시험), Hardness Test(경도시험), Fatigue Crack Growth Test(피로균열진전시험), X-Ray Mapping(X-Ray 매핑), SEM Observation(전자현미경 관찰)

Abstract

In order to save the energy and protect the environment, it were studied about ecomaterials with the developed countries as central figure. In the Metal Matrix Composites(MMCs), this trends appeared the development of the MMCs which had excellent mechanical properties in spite of the low volume fraction of reinforcement. Therefore, in this study, fatigue crack growth test, tensile and hardness test were conducted in order to investigate the mechanical and fatigue properties of 5%, 7.5% and 10% SiC_p/Al composites. As the results, in the tensile and hardness test, tensile strength and hardness increased but fatigue crack growth rate decreased with SiC_p/Al volume fraction. And in the view of fatigue failed surface through the SEM, fatigue crack initiated around the SiC particle and in low ΔK regions, fatigue crack detoured the SiC particle but crack propagated through the SiC particle in the high ΔK regions.

1. 서 론

가혹한 환경속에서 사용되는 기계 구조물을 설계하기 위해서는, 먼저 이런 환경속에서도 사용할 수 있는 기계적 특성이 뛰어난 소재의 개발이 필요하다. 이와 같은 목적으로 개발되어진 소재가 복합재료(composite materials)이며, 복합재료에 대한 연구 추세는 차세대 재료로 각광을 받고 있는 금속기지 복합재료 및 세라믹기지 복합재료에 대한 연구

들로 발전되고 있다. 특히 금속기지 복합재료는 보강재의 보강효과와 더불어 기지가 지닌 기계적 특성도 함께 나타낼 수 있기 때문에 이들 재료의 실용화를 위한 연구^(8,9)들이 진행되고 있다.

특히 본 연구에서 사용한 SiC_p/Al 복합재료에 대한 기존의 연구 결과들로는 저자⁽¹⁾들이 기발표한 6% SiC 입자보강 Al 복합재료의 피로특성에 관한 연구에서 저 ΔK 영역에서는 균열이 입자를 우회해서 진전하나, ΔK 가 커질수록 피로균열은 입자들을 통과해서 진전하는 것으로 관찰되었다. 이와 유사한 결과는 Shang⁽²⁾의 피로균열진전에 미치는 SiC 입자의 영향에 관한 연구에서도 찾아볼 수 있

*회원, 영남대학교 기계공학과

**영남대학교 대학원 기계공학과

었다. Masuda 등^(3,4)의 SiC 휘스커 및 입자의 체적비가 10% 및 20%로 함유된 Al 기지 복합재료에 있어서 복합재료의 피로강도에 미치는 체적비의 영향에 관한 연구, Kumai 등⁽⁵⁾의 5wt% SiC_p/Al 2014 복합재료의 피로균열발생 및 성장거동에 관한 연구 등이 있다.

그러나 재활용을 고려한 재료(ecomaterial)로서 체적비 10% 미만의 SiC 입자보강 복합재료에 있어서, 체적비에 따른 피로특성의 변화에 관한 연구결과들은 그다지 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Al 모재와 체적비가 5%, 7.5% 및 10% SiC_p/Al 의 세 종류의 재료에 대한 기계적 성질 및 피로균열진전 특성을 비교해 보았다. 아울러 X-ray mapping법을 이용하여 피로 특성에 미치는 실질 체적비의 영향을 조사하였으며, 또한 체적비에 따라 피로 파단면에 나타나는 諸 특성들을 주사전자현미경으로 관찰해 보았다.

2. 시험용 재료

본 시험에 사용한 시험용 재료는 미쓰비시(三菱)알루미늄(주)에서 제작한 5% SiC_p/Al6061 복합재료(5-SiC_p/Al), 7.5% SiC_p/Al6061 복합재료(7.5-SiC_p/Al), 10% SiC_p/Al6061 복합재료(10-SiC_p/Al) 및 Al 모재를 사용하였다. 이들 복합재료는 먼저 SiC입자로 프리폼을 만든 후 Al 용탕을 고압하에서 프리폼속으로 밀어 넣어서 복합재료를 만드는 고압침법(high pressure infiltration method)을 사용하여 200 mm 빌렛을 만들었다. 그 후, 한 변이 52 mm가 되도록 고온압출을 행하였다. 이렇게 해서 만들어진 세 종류의 복합재료는 용체화처리 및 인

공시효처리인 T6 열처리를 하였다. 또한 세 종류의 SiC_p/Al 복합재료에는 직경이 6 μm에서 30 μm 정도의 SiC 입자가 사용되었으며, Fig. 1에는 세 종류 SiC_p/Al 복합재료의 미세조직 사진을 나타내었다.

3. 인장 및 경도시험

이들 세 재료에 대한 기계적 특성을 알아보기 위해 인장 및 경도시험을 수행하였다. 인장시험편은 Fig. 2와 같이 KS B 0801의 5호 시험편을 5분의 1로 축소해서 사용하였다. 시험편의 표점 및 평행부의 거리는 각각 10 mm 및 14 mm로 하였다. 인장시험은 Shimadzu의 인장시험기(autograph AG-5000E)를 사용하여 0.5 mm/min의 인장속도로 시험을 수행하였다.

본 시험에 사용한 시험편의 채취방향은 모두 압출방향으로 하였으며, 이들 세 재료에 대한 기계적 특성을 시험한 결과들을 Table 1에 나타내었으며, 또한 Fig. 3은 체적비에 따른 응력 σ와 변형률 ε의 선도로, 저자들이 기발표⁽⁶⁾한 25% SiC_w/Al 복합재료의 인장강도도 함께 나타내었다.

Table 1 및 Fig. 3의 인장시험 결과에서 알 수 있는 바와 같이, SiC_p/Al 복합재료의 인장강도는 Al 모재보다 크게 나타났으나, SiC_w/Al 복합재료보다는 적은 값을 갖는다.

또한 보강재의 함유에 따른 경도변화를 알아보기 위한 경도시험은 Matsuzawa Seiki사의 경도측정기(DVK-5S)를 사용하였다. 경도시험은 가압하중 20 kgf, 가압속도 100 μm/sec 및 가압유지시간 15 sec로 하여 무작위로 20군데에서 측정된 비커스 경

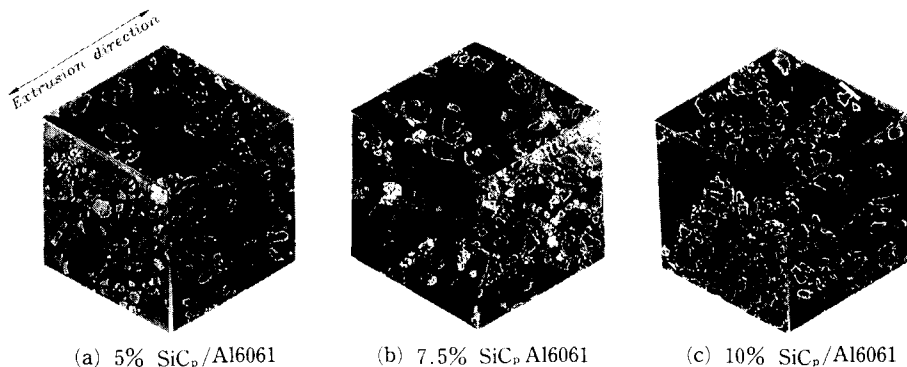


Fig. 1 Microstructure of SiC_p/Al6061 with the various volume fraction

Table 1 Mechanical properties of Al matrix, 25% SiC_w/Al & three kinds of SiC_p/Al composites in the longitudinal direction

Materials	Hardness Hv	Young's modulus (GPa)	0.2% Proof strength(MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Al matrix	111	51	290	317	13.7
5-SiC _p /Al	127	45	340	358	9.8
7.5-SiC _p /Al	127	55	360	380	9.4
10-SiC _p /Al	130	71	353	380	8.4
25-SiC _w /Al	146	110	420	543	4.8

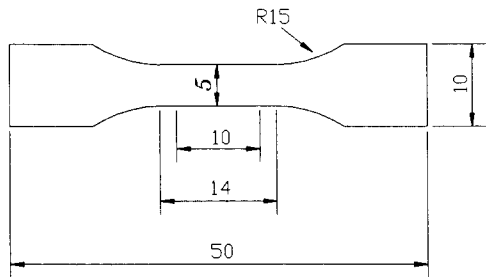


Fig. 2 Tensile test specimen

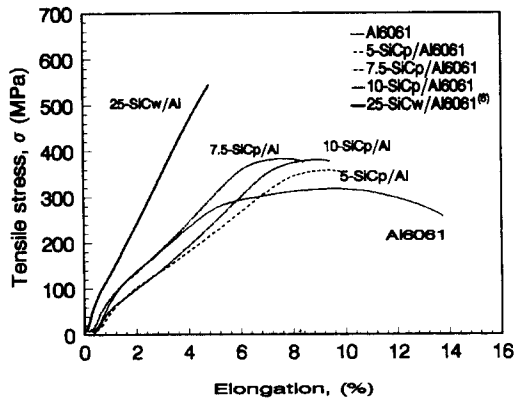


Fig. 3 Stress vs. elongation curve in the SiC_p/Al6061 composites with the various volume fraction as well as Al6061 matrix

도치(Hv)의 평균값을 그 재료의 경도값으로 하였다. Fig. 4에는 체적비에 따른 경도의 변화를 나타내었으며, ○표는 측정된 경도치의 평균을 나타내며 아울러 분산의 범위도 함께 표시하였다. 동 그림에서 알 수 있는 바와 같이 입자의 체적비가 증가할수록 경도는 증가하였으나, 증가폭은 그다지

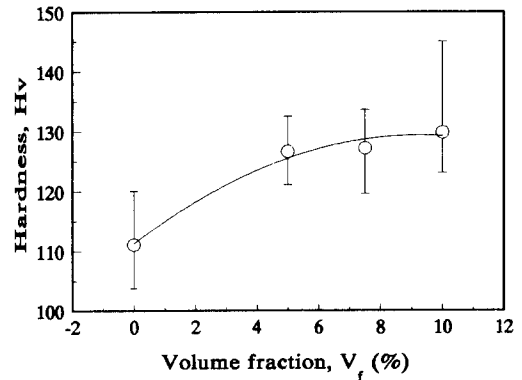


Fig. 4 Hardness in the SiC/Al6061 composites with the various volume fraction as well as Al6061 matrix

크지 않았다.

4. 피로균열진전시험

4.1 피로시험편 및 시험방법

이들 세 종류의 SiC_p/Al 복합재료에 대한 피로균열진전 특성 파악을 위해 Fig. 5와 같이 노치곡률 반경 ρ가 0.25 mm, 노치길이 2a가 5 mm인 중앙균열 인장시험편(center cracked tensile specimen; CCT)을 와이어 커터로 제작하여 피로균열진전시험에 사용하였다. 한편 피로시험편은 #800에서 #1500의 사포를 사용하여 표면을 연마한 후, 피로시험편으로 사용하였다.

피로균열진전시험은 Shimadzu사의 유압서보 피로시험기(EHF-ED10-20L)를 사용하였으며, 세 종류 SiC_p/Al 복합재료 공히 응력진폭범위 Δσ는 52.

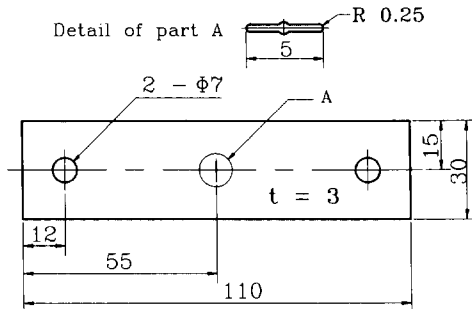


Fig. 5 Fatigue test specimen

43 MPa로 시험이 종료될 때까지 일정하게 유지시켰다. 또한 하중제어모드는 정현파의 인장-인장 하중방식이며 응력주파수 f 는 10Hz로 하고 상온, 대기 상태에서 피로균열진전시험을 수행하였다. 피로균열의 측정은 레프리카법을 사용하였습니다.

4.2 ΔK - da/dN 선도

Fig. 6에는 Al 모재 및 5-SiC_p/Al, 7.5-SiC_p/Al, 10-SiC_p/Al 복합재료의 ΔK - da/dN 관계를 나타내었다. ΔK 의 계산은 Tada의 식을, da/dN 계산은 Secant 방법을 사용하였다. 아울러 동 그림에는 25% SiC_w/Al 복합재료의 ΔK - da/dN 의 관계⁽⁶⁾를 실선으로 같이 나타내었다.

또한 일반적으로 피로균열진전 특성은 다음과 같은 Paris 식으로 나타낼 수 있다.

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)^M$$

여기서, M 은 피로균열진전지수이며, C 는 피로균열진전 상수이다.

따라서 동 그림에 나타낸 5 종류 재료에 대한 Paris 식에서의 M 과 C 를 최소자승법으로 구하여 Table 2에 나타내어 보았다.

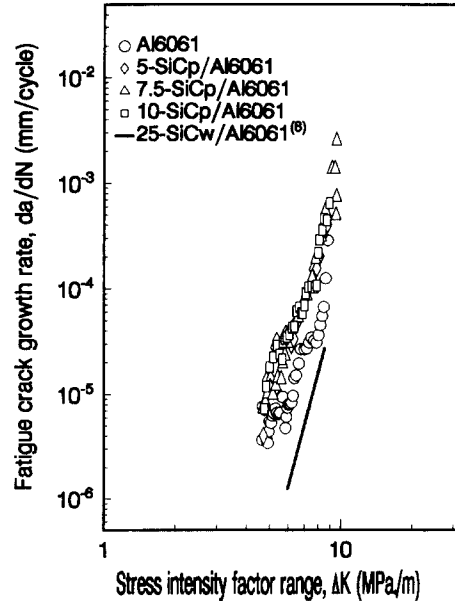


Fig. 6 Relationship between stress intensity factor range and fatigue crack growth rate in the SiC_p/Al6061 composite with the various V_v, Al6061 matrix and 25% SiC_w/Al6061 composite

Fig. 6에 나타낸 ΔK - da/dN 관계에서 체적비가 서로 다른 세 종류 SiC_p/Al 복합재료의 피로균열진전속도 da/dN 를 비교해 본 결과, 이들 입자 보강 복합재료의 피로균열진전속도는 Al 모재 및 SiC_w/Al에 비해서는 빨랐으나, 체적비에 따른 피로균열진전속도의 변화는 뚜렷이 나타나지는 않았다. 이는 세 재료의 체적비의 차이가 크지 않기 때문인 것으로 사료되어진다. 그러나 5%와 10%를 비교하면 피로균열발생 초기에는 10%의 피로균열진전속도가 느렸으나, 피로균열이 성장할수록 10%의 피

Table 2 Comparison of Paris' crack growth exponent m & coefficient C in the SiC_p/Al composite & Al matrix

Materials	m	C
Al matrix	4.75	2.06E-9
5-SiC _p /Al	5.12	3.82E-9
7.5-SiC _p /Al	6.74	1.79E-10
10-SiC _p /Al	8.26	2.56E-13

로균열진전속도가 빨라져 ΔK 가 약 $6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이 후부터는 5%보다 더 빠른 피로균열진전속도를 보였다.

이상으로부터 체적비가 증가할수록 피로균열의 발생을 억제하는 효과는 큰 것으로 보이나, 입자 주위에서 발생하는 2차 균열들, 또는 입자들과 입자들이 무리지어 있는 경우, 입자들 사이에 존재하는 공간(void)들이 피로균열 진전을 가속시켜 주기 때문에, 피로균열의 진전속도는 균열이 성장할수록 점점 빨라지는 것으로 사료되어진다.

한편 본 연구에서 사용한, 체적비가 5%, 7.5% 및 10%인 세 종류의 SiC_p/Al 복합재료의 피로균열 진전지수 m 과 상수 C 사이의 관계를 알아보기 위해, m 및 C 를 반대수(semi-log) 선도상에 나타내어 본 결과, Fig. 7과 같이 이들 사이에는 선형의 관계가 존재하여 $C = A \times B^m$ 의 식으로 나타낼 수 있었다. 여기서, 상수 A 및 B 는 각각 $6.09\text{E-}5$ 및 0.15 임을 알 수 있었다.

한편 Fig. 8은 세 종류의 SiC_p/Al 복합재료를 사용해 피로균열진전시험을 수행한 후, 얻은 피로파단시의 응력확대계수범위 (ΔK_f)를 체적비에 따라 나타낸 것으로 파단시의 응력확대계수범위는 Al 모재에 비해 증가하였으나, 체적비에 따라서는 큰 변

화를 보이지 않았다.

4.3 피로균열발생 및 진전과 피로수명과의 관계
복합재료인 경우, 전편⁽⁶⁾에서 언급한 것 같이 피로균열 발생의 지연 또는 피로균열진전에 대한 보강재의 큰 저항으로 인해 일반적으로 기지재보다 긴 피로수명을 나타낸다. 물론 보강재의 종류, 크기 및 형상 등이 복합재료의 피로수명에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 사용되어진 Al 모재 및 5-SiC_p/Al, 7.5-SiC_p/Al, 10-SiC_p/Al 복합재료에 대한 피로균열의 발생 및 진전특성을 알아보기 위해 $\Delta a - N/N_f$ 의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 아울러 동 그림에는 25% SiC_w/Al 복합재료의 $\Delta a - N/N_f$ 의 관계를 같이 나타내었다.

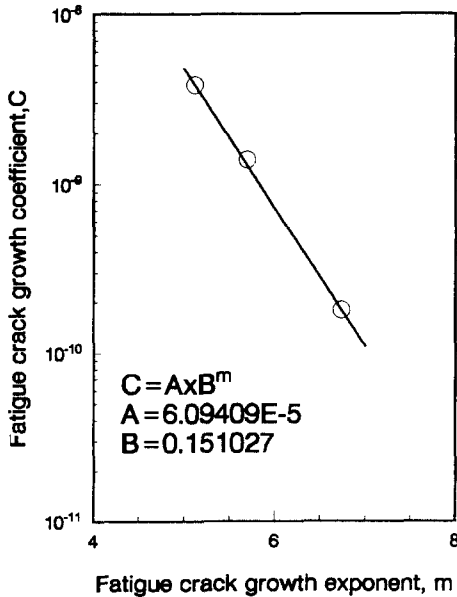


Fig. 7 Relationship between fatigue crack growth exponent m and coefficient C in the 5%, 7.5% & 10% SiC_p/Al6061 composites

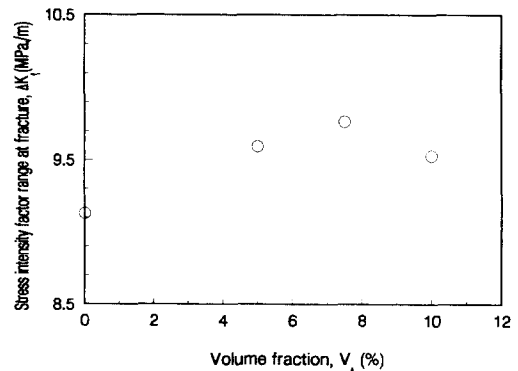


Fig. 8 Stress intensity factor range at fracture in the SiC_p/Al6061 composites with the various volume fraction

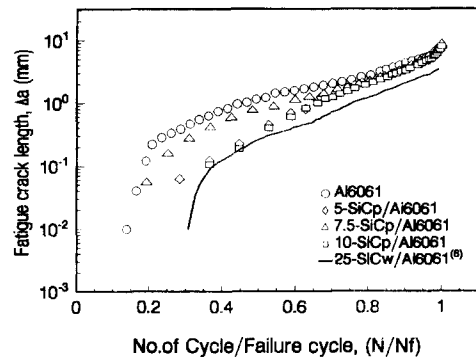


Fig. 9 Relationship between fatigue crack length and cycle/failure cycle in the SiC_p/Al composite with the various volume fraction as well as Al6061 matrix

동 그림으로부터 균열이 0.1 mm까지 진전하였을 때의 하중반복회수를 0.1 mm 피로균열의 발생수명 ($0.1N_f$)으로 정의한다면 Al 모재 및 5-SiC_p/Al, 7.5-SiC_p/Al 및 10-SiC_p/Al 복합재료 각각에 대해 0.1 mm 피로균열의 발생수명은 파단수명의 20%, 33.6%, 21.9% 및 35.9%이었다. 아울러 25-SiC_w/Al 복합재료⁽⁶⁾인 경우는 파단수명의 35%이었다. 그러나 SS41강에 있어서는, 본 연구에 사용된 것과 같은 CCT 시험편을 사용하여 유사한 하중조건으로 피로균열진전시험을 수행한 경우, 0.1 mm 피로균열발생수명이 파단수명의 10%~15% 정도라는 연구결과⁽⁷⁾가 있다.

따라서 세 종류 SiC_p/Al 복합재료인 경우, 0.1 mm 피로균열발생수명이 전체피로파단수명에 차지 비율이 Al 모재 및 SS41강보다는 크다는 것을 알 수 있었다. 이상으로부터 본 연구에 사용된 세 종류의 SiC_p/Al 복합재료인 경우, 피로균열의 발생을 지연시키는 능력이 있음을 알 수 있었다.

한편 입자보강 복합재료에서는 피로균열이 진전할수록 입자를 관통해서 진전하는 경우가 증가하기 때문에 입자보강 효과는 피로균열이 성장할수록 적어진다라는 연구 결과⁽²⁻⁵⁾들이 있는데 본 연구에서도 이러한 경향을 찾아볼 수 있었으며, 특히 3 mm 이후부터는 세 종류 SiC_p/Al 복합재료의 피로균열진전 양상이 거의 하나의 선으로 일치되었다. 따라서 피로균열이 성장에 감에 따라 체적비의 영향은 감소한다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 시험편 폭에 대한 피로균열길이의 비 ($2a/W$)가 약 0.4 이후부터는 체적비의 차이에도 불구하고, 세 재료가 거의 유사한 양상으로 진전하여 파단수명의 80% 이상에서는 피로균열진전에 미치는 체적비의 영향을 구분하기가 어려웠다.

5. 피로파단면의 관찰

5.1 X-ray mapping법에 의한 파단면 관찰

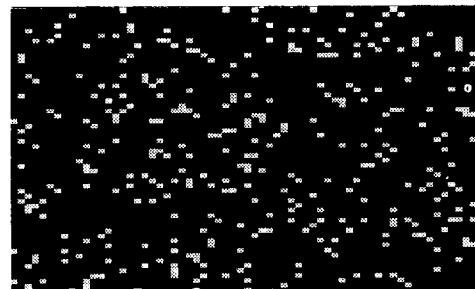
앞절에서 언급한 5-SiC_p/Al 복합재료가 7.5-SiC_p/Al 복합재료보다 더 낮은 0.1 mm 피로균열발생수명을 나타내었는데, 이는 복합재료인 경우 공칭 체적비(nominal volume fraction)와 위치에 따른 복합재료 내부의 실질체적비(actual volume fraction)와의 차이로 인해 5-SiC_p/Al가 7.5-SiC_p/Al보다 피로균열발생이 느린 것으로 추측되어진다.

따라서 실제 SiC의 분포상태를 확인하기 위해 X

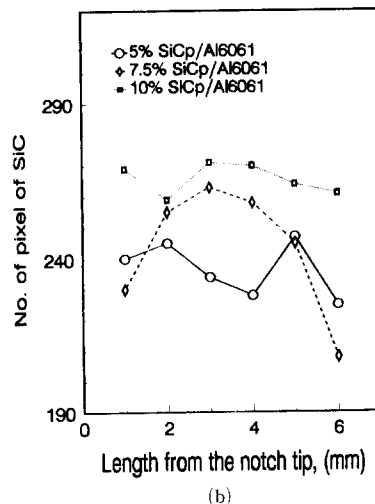
-ray mapping법으로 세 재료 공칭 노치선단으로부터 1 mm간격으로 6 mm까지 보강재의 함유량을 측정해 보았다.

Fig. 10은 세 종류의 SiC_p/Al 복합재료의 위치에 따른 X-ray mapping 결과를 나타낸 것으로 (a)는 5-SiC_p/Al 복합재료인 경우, 노치선단에서부터 1 mm까지 X-ray mapping으로 측정된 결과이다. 그림에서 흰점으로 나타나는 부분이 SiC 입자가 있는 위치를 나타낸다. 또한 x-ray mapping을 수행한 면적은 동일함으로 흰점이 많으면, 그 부분에 SiC 입자의 실질체적비가 높다고 할 수 있을 것이다. 또한 (b)는 세 종류 SiC_p/Al 복합재료의 피로파단면을 X-ray mapping을 한 후, 흰점의 수와 체적비와의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 10의 (b)에서 알 수 있는 것과 같이 노치선단으로부터 2 mm 까지는 5-SiC_p/Al 복합재료가 7.5 SiC_p/Al보다 더 많은 SiC 입자를 함유하고 있었



(a)



(b)

Fig. 10 X-ray mapping results in the 5%, 7.5% & 10% SiC_p/Al6061 composites

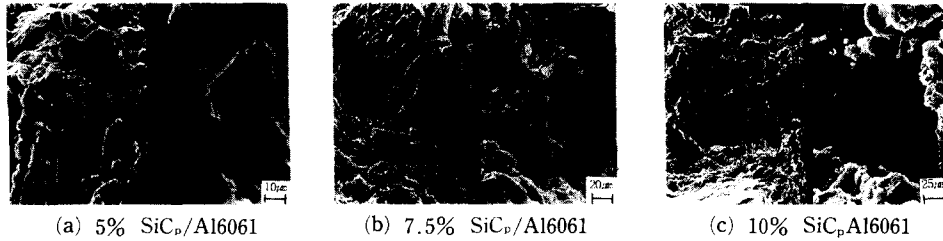


Fig. 11 Fractographics of SiC_p/Al6061 with the various volume fraction at about 2 mm from notch tip

기 때문에, 5-SiC_p/Al 복합재료에 있어서 0.1 mm 피로균열발생수명이 7.5-SiC_p/Al 복합재료의 0.1 mm 피로균열발생수명보다 길게 나타난 것으로 생각된다.

이상의 ΔK -da/dN, Δa -N/N_f 및 X-ray mapping 결과들을 종합하여 볼 때, SiC_p/Al 복합재료의 피로균열진전속도는 저응력확대계수 범위에서는 체적비가 클수록, 즉 실질체적비가 클수록 느려지지만 고응력확대계수 범위에서는 체적비에 영향이 적어짐을 알 수 있었다.

5.2 전자현미경에 의한 파단면 관찰

Fig. 11은 5-SiC_p/Al, 7.5-SiC_p/Al 및 10-SiC_p/Al 복합재료의 피로균열진전시험 후, 얻어진 피로파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 현미경 사진들이다.

세 종류 SiC_p/Al 복합재료를 저배율로 관찰한 결과 체적비가 증가함에 따라 피로파단면은 거칠어짐을 알 수 있었다. 즉, 5-SiC_p/Al 복합재료의 피로파단면은 전반적으로 緩慢한 반면 7.5-SiC_p/Al 및 10-SiC_p/Al 복합재료는 거친 파단면을 나타내었는데 이와 같은 양상은 균열이 성장해 갈수록 심하였다.

Fig. 10의 (a)는 5-SiC_p/Al, (b)는 7.5-SiC_p/Al 및 (c)는 10-SiC_p/Al 복합재료의 노치선단 근처에서 촬영한 전자현미경 사진으로, 세 재료 모두 SiC 입자가 피로균열발생의 기점이 되었는데, 이는 입자가 존재하는 부분이 다른 곳보다 결함이 존재할 확률이 많기 때문으로 사료된다.

6. 결 론

Al 모재 및 5-SiC_p/Al, 7.5-SiC_p/Al, 10-SiC_p/Al

복합재료를 사용하여 체적비가 기계적 및 피로균열진전특성에 미치는 영향을 파악하기 위해서 인장, 경도 및 피로균열진전시험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① Al 모재 및 체적비가 5%, 7.5% 및 10% SiC_p/Al 복합재료를 사용하여 인장 및 경도시험을 한 결과, 체적비의 증가와 더불어 인장강도 및 경도치는 증가하는 경향이 관찰되었다.

② 체적비가 다른 세 종류 SiC_p/Al 복합재료인 경우 Al 모재보다 피로균열진전속도가 빨랐으며, 또한 체적비의 증가에 따른 피로균열진전속도의 변화는 뚜렷하게 나타나지는 않았으나, 다소 빠르게 진전하는 경향을 나타내었다.

③ 피로균열진전시험 결과, 균열이 0.1 mm 피로균열발생수명이 파단수명 의 22%~35% 정도로 Al 모재 및 SS41강보다 0.1 mm 피로균열발생수명이 전체 피로파단수명에서 차지하는 비율이 큼을 알 수 있었다. 따라서 SiC_p/Al 복합재료의 경우, 피로균열의 발생을 효과적으로 지연시킨다는 것을 알 수 있었다.

④ 한편 노치선단 부근에 대해서 X-ray mapping 및 Δa -N/N_f 결과로부터 피로균열의 진전은 복합재료의 공칭체적비보다는 피로균열선단 부위에서의 실질체적비에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 권재도, 문윤배, 김상태, 1995, "SiC 입자보강 Al 복합재료의 피로균열진전거동," 대한기계학회논문집, 제19권, 제1호, pp. 122~131.
- (2) Jian Ku Shang, Weikang Yu, and Ritchie, R. O., 1988, "Role of Silicon Carbide Particles in Fatigue Crack Growth in SiC Particulate

- Reinforced Aluminum Alloy Composites," *Mater. Sci. and Eng. A*, 102, pp. 181~192.
- (3) Masuda, C., Tanaka, Y., Yamamoto, M. and Fukazawa, M., 1991, "Effect of Volume Fraction on Fatigue Strength of SiC Whisker or SiC Particle Reinforced Aluminum Composites" 일본 복합재료학회집, 제17권, 제2호, pp. 66~73
- (4) Masuda, C., Tanaka, Y., Yamamoto, M. and Fukazawa, M., 1994, "Fatigue Crack Propagation Mechanism for SiC Whisker or SiC Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites," *Adv. Composite Mater.*, Vol. 3, No. 4, pp. 319~339.
- (5) Kumai, S., King, J. E. and Knott, J. F., 1990, "Fatigue Crack Growth SiC Particulate Reinforced Aluminum Alloys," *Conference of Fatigue* 90, pp 869~874.
- (6) 권재도, 안정주, 김상태, 1994, "SiC 휘스커 보강 Al 복합재료의 피로균열진전 특성에 관한 기초연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제9호, pp. 2374~2385.
- (7) 권재도, 최선호, 황재석, 1991, "신뢰성 공학적 피로균열발생 진전수명평가 및 예측에 관한 연구(II)," 대한기계학회논문집, 제15권, 제3호, pp. 907~915.
- (8) 김영환, 이상학, 이두영, 한경섭, 1990, "분말 야금법에 의한 Al-SiC_w 복합재료의 제조 연구," 한국복합재료학회지, 제3권, 제1호, pp. 10~22.
- (9) 김영환, 이상학, 김낙준, 이두영, 1990, "SiC 휘스커 보강 Al 복합재료와 기계적 특성에 관한 연구," 대한금속학회지, 제28권, 제7호, pp. 640~647.