

(論 文)

SiC 휘스커 보강 Al 6061 복합재료의 피로균열진전 특성에 관한 기초 연구

권재도* · 안정주** · 김상태*

(1994년 3월 14일 접수)

The Basic Study on Fatigue Crack Growth Behavior of SiC Whisker Reinforced Aluminium 6061 Composite Material

Jae-Do Kwon, Jeong-Ju Ahn and Sang-Tae Kim

Key Words : Al6061(알루미늄 6061), SiCw/Al 6061 Composite(SiC 휘스커 보강 Al 6061 복합재료), Crack Growth Path Morphology(균열진전 형상), Fatigue Crack Growth Test(피로균열진전 시험), Δk -da/dN Diagram(Δk -da/dN 선도), Fractography(파면관찰)

Abstract

SiCw/Al composite material is especially attractive because of their superior specific strength, specific stiffness, corrosion fatigue resistance, creep resistance, and wear resistance compared with the corresponding wrought Al alloy. In this study, Fatigue crack growth behavior and fatigue crack path morphology (FCPM) of SiC whisker reinforced Al 6061 alloy with 25% SiC volume fraction and Al 6061 alloy were performed. Result of the fatigue crack growth test showed that fatigue crack growth rate of SiCw/Al 6061 composite was slower than that of Al 6061 matrix therefore it was confirmed that SiC whisker have a excellent fatigue resistance. And Al 6061 matrix had only FCPM perpendicular to loading direction. On the other hand SiCw/Al 6061 composite had three types in fatigue crack path morphology. First type is that both sides FCPM of artificial notch are perpendicular to loading direction. Second type is that a FCPM in artificial notch has slant angle to loading direction and the other side FCPM is perpendicular to loading direction. Third type is that both sides FCPM of notch have slant angle to loading direction. It was considered that this kinds of phenomena were due to non-uniform distribution of SiC whisker and confirmed by SEM observation for fracture mechanism study.

1. 서 론

차세대 재료로 각광을 받고 있는 금속기지 복합 재료(metal matrix composite: MMC)는 기존의

*정회원, 영남대학교 기계공학과

**영남대학교 대학원 기계설계공학과

구조용 재료와는 달리 뛰어난 특성⁽¹⁻³⁾으로 인해 관심의 대상이 되어오고 있다. 이와 같은 금속기지 보강 복합재료는 중량이 중요한 설계인자로 대두되는 우주항공분야 및 군수분야를 비롯해서 건축 구조물, 의공학분야 그리고 자동차 및 운동 용구등에 이르기까지 여러 산업 분야로 그 응용의 폭을 넓혀 가고 있다. 특히 금속기지 복합재료 중 보강재료

휘스커를 사용한 휘스커 보강 복합재료는 입자 보강 복합재료보다 보강효과가 뛰어나며 또한 단섬유 보강재의 단점인 보강재 길이에 대한 직경의 비, 즉 아스펙비(aspect ratio)가 커 섬유 끝단에서의 응력 집중효과를 완화시키는 등 많은 장점을 지닌 금속기지 복합재료이다. 그러나 휘스커 보강 복합재료인 경우 휘스커를 보강함으로 인해 연성이 감소하며 또한 가공성이 입자 보강 복합재료보다 떨어지는 등 단점도 지니고 있다. 그러나 휘스커 보강 복합재료는 앞서도 언급한 것 같이 기존의 구조용 재료로는 한계가 있는 첨단 기술개발을 위한 재료로 사용될 수 있기 때문에 휘스커 보강 복합재료에 대한 많은 연구들이 진행되어지고 있다. 따라서 최근 몇년간 휘스커 보강 복합재료의 제작기법의 확립 및 기계적 특성,⁽⁴⁻⁶⁾ 피로균열진전 특성 및 균열형상⁽⁹⁻¹⁵⁾에 관한 연구들이 활발히 발표되어지고 있다.

특히 휘스커 보강 복합재료의 피로 특성에 관한 기존의 연구들은 피로균열진전 특성에 관한 연구와 피로균열진전경로 형상에 관한 연구로 나누어 볼 수 있다. 그러나 휘스커 보강 복합재료에서는 보강재인 휘스커의 분포 정도에 따라 기계적 특성의 변동이 일반 재료보다 심하기 때문에 휘스커 보강 복합재료의 피로균열진전 특성을 명확히 파악하기 위해서는 피로균열진전 특성과 피로균열의 진전경로 형상(fatigue crack path morphology)이 병행해서 연구되어야 한다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 T6 처리를 한 체적비가 25%인 SiC 휘스커 보강 Al 6061 복합재료와 Al 6061

모재를 사용해 피로균열진전실험을 수행한 후 이들 두 재료의 피로균열진전 특성과 피로 균열진전 실험 도중 적당한 사이클마다 표면 레프리카법(replica method)을 통해서 얻은 피로균열진전 형상을 함께 고려해 보고자 한다. 아울러 두 재료의 피로 파단면을 주사 전자현미경으로 관찰하여 SiC 휘스커 보강 Al6061 복합재료의 피로균열진전 기구를 규명해 보고자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험용 재료 및 시험편

실험용 재료는 미쯔비시(Mitsubishi) 제품인 Al 6061 모재와 SiC 휘스커 보강 Al 6061 복합재료를 사용하였다. SiC 휘스커 보강 Al 6061 복합재료는 고압 용침법(high pressure infiltration method)으로 직경 200 mm인 빌렛(billet)을 제작해서, 한 변이 57 mm인 각봉이 되게 열간압출(hot extrusion)하고 T6 처리를 하였다. SiC 휘스커의 체적률(V)은 25%이며 입자의 방향으로 향해 있던 직경 0.5~1 μm , 길이 10~20 μm 으로 아스펙비가 10~40인 휘스커는 압출에 의해 압출방향으로 향하도록 하였다. 그리고 Al 6061 모재의 경우도 SiC 휘스커 보강 복합재료와 같은 방법으로 압출을 한 후 T6 처리한 것을 사용하였다. Fig. 1은 2차 가공인 압출을 행한 후, SiC 휘스커 보강 Al 6061 복합재료(a)와 Al6061 모재(b)의 미시조직 사진이다. Fig. 1의 (a)에서 볼 수 있는 것과 같이 SiC 휘스커는 압출에 의해 대부분이 압출방향을 향하고 있었으며 잔

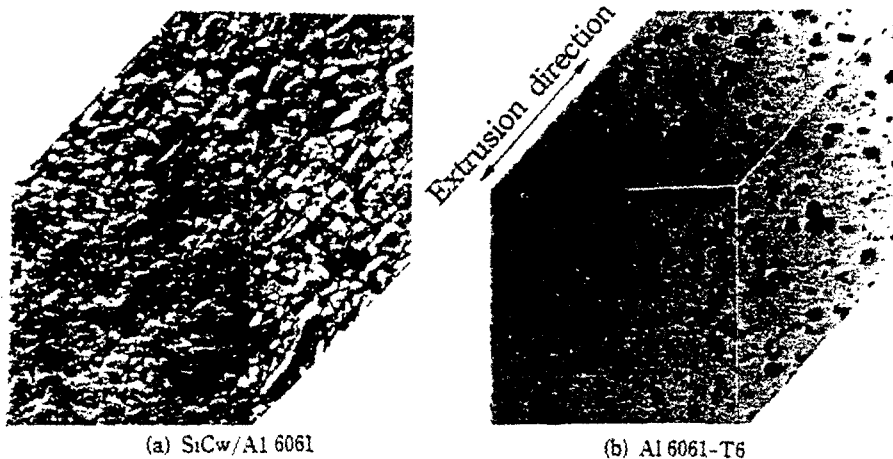


Fig. 1 Microstructure after extruded

Table 1 Mechanical properties of SiCw/Al6061 composite and Al6061-T6 matrix

Material	Orientation	Young's modulus (GPa)	0.2% P.S (MPa)	U.T.S (MPa)	Elongation (%)
SiCw/Al6061	Longitudinal	97.8	400	603	2.2
	Transverse	82.2	292	373	1.7
Al6061-T6	Longitudinal	63.4	280	316	9.6
	Transverse	52.4	267	305	10.5

* p.s=proof strength, U.T.S=ultimate tensile strength

혹, 부서진 휘스커들도 관찰할 수 있었는데 이는 고압 용침시 높은 가압력때문에 생긴 것으로 사료되어진다. Table 1은 직경 7 mm, 표점거리(gauge length) 15 mm인 환봉 인장시험편을 사용해서 얻은 SiCw/Al 6061 복합재료와 Al 6061 모재의 기계적 성질을 표로 나타낸 것이다. Table 1에서 알 수 있듯이 SiC 휘스커 보강 Al 6061 복합재료인 경우 휘스커를 보강함으로 인해 기계적 성질은 Al 6061 모재보다 상당히 향상되었으나 연성은 Al 6061 모재에 비해 많이 감소되었다.

또한 SiCw/Al6061 복합재료 및 Al 6061 모재의 압출방향에서의 기계적 성질이 압출에 직각방향보다 우수하므로, 본 연구에서는 두 재료의 압출 방향에 대해서만 피로균열진전실험을 수행코저 한다.

피로시험편 형상은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 중앙 노치 시험편(center cracked tension specimen: CCT)을 사용하였으며 인공노치는 곡률반경(ρ)이 0.25 mm, 길이(2a)가 5 mm가 되게 와이어 커터로 가공하였다. 이 때 노치의 방향과 시험편의 압출방향(휘스커 배향)이 직각이 되도록 하였다. 또한 시험편 표면의 연마는 #600~#1500번의 사포(emery paper)를 사용하여 최종의 연마면을 얻었다.

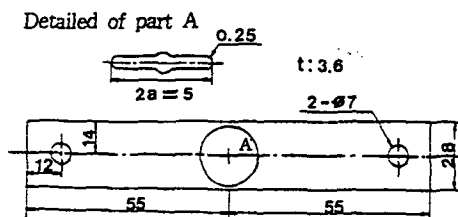


Fig. 2 Fatigue specimen schema

2.2 피로균열진전 실험방법

피로균열진전실험에는 Instron사의 최대 용량 25 kN (5500 lb)인 유압 서보 피로시험기(hydraulic-servo fatigue test machine: model 1332)를 사용하였다. 피로균열진전실험은 상온에서, 응력비(R) 0.05, 주파수(f) 10 Hz 및 정현파의 인장-인장 하중제어방식으로 수행하였으며, Al 6061 모재에서는 응력범위 $\Delta\sigma=52.47$ MPa 하에서, SiC 휘스커 보강 Al6061 복합재료에서는 $\Delta\sigma=66.49$ MPa 하에서 중앙 노치시험편을 사용해서 피로균열진전실험을 수행하였다.

피로균열길이 측정을 위해서 표면 레프리카법(replica method)을 사용하였다. 표면 레프리카의 채취 방법 및 채취회수는 피로균열진전실험 도중 적당 사이클마다 하중 반복을 일시 중단하여, 평균 응력 레벨상태에서 시험편 앞뒤면의 균열주위로부터 표면 레프리카를 채취하는 방법으로 시험편이 파단될 때까지 수십회 정도 반복하였다. 이렇게 채취된 레프리카를 최고 배율이 500배인 광학현미경(olimpus model: BH2-UMA)에서 1/100 mm까지 측정할 수 있는 OSM(optical scale meter)을 사용해 피로균열길이 증가분(Δa)을 측정하였다. 피로균열길이, a는 초기 인공노치길이와 광학현미경으로 측정된 피로균열길이 증가분(Δa)을 더한 값으로 정의하였다.

응력확대계수 K는 Tada⁽¹⁷⁾의 식에 의해서 계산하였으며 피로균열진전속도 da/dN 는 secant⁽¹⁸⁾법으로 구하였다. 또한 두 재료의 균열진전경로 형상을 관찰하기 위해서 피로균열진전실험 도중 채취한 레프리카를 광학현미경으로 관찰하였으며 피로파괴기구 파악을 위해 SiCw/Al 6061 복합재료 및 Al 6061 모재의 피로파괴면을 주사전자현미경으로 관찰하였다.

3. 피로균열진전 특성

3.1 피로균열의 진전 형상

SiCw/Al 6061 복합재료 및 Al 6061 모재를 각각 응력진폭 $\Delta\sigma=66.49$ MPa 및 $\Delta\sigma=52.47$ MPa 하에서 중앙 노치시험편을 사용해 피로균열진전 실험을 수행한 후의 시험편 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 여기서, (a)는 Al 6061 모재이고 (b), (c) 및 (d)에는 SiCw/Al 6061 복합재료이다.

Al 6061 모재의 경우, 하중방향에 수직으로 피로균열이 진전하였다. 또한 SiCw/Al 6061 복합재료에서는 나타나지 않은 현상인 necking 현상이 나타났으며, 전반적으로 double cup 형상의 외형을 나타내었다.

한편 25% 체적비를 지닌 SiCw/Al 6061 복합재료의 피로균열진전경로 형상은 3타입으로 나타났으며 본 연구에서는 SiCw/Al 6061 복합재료의 피로균열진전경로 형상을 편의상 다음과 같이 분류하였다. 즉, Fig. 3의 (b)와 같이 인공노치 양쪽의 균열이 모두 하중방향에 수직인 피로균열진전경로 형상을 A타입, (c)와 같이 한쪽 균열은 하중방향에 대해 임의의 각도를 갖으며 반대편 균열은 하중방

향에 수직인 경우를 B타입 그리고 (d)처럼 양쪽 균열이 모두 하중방향에 대해 임의의 각도를 갖는 피로균열진전경로 형상을 C타입이라 하였다.

본 실험에서는 총 6개의 SiCw/Al 6061 복합재료를 사용하였으며 이들을 세 타입으로 나누면 A타입이 3개, B타입이 2개 그리고 C타입 1개였다.

Al 6061 모재와는 달리 SiCw/Al 6061 복합재료인 경우, 이처럼 다양한 피로균열진전 경로 형상을 나타내는 원인은 복합재료 제조시 보강재의 분산과 밀접한 관련이 있는 것으로 여겨진다. 이에 대한 설명은 3.2절 현미경을 통한 관찰에서 언급하기로 한다.

Fig. 4는 SiCw/Al 6061 복합재료의 B타입과 C타입의 경사진 피로균열과 하중방향이 이루는 각도를 도식적으로 나타낸 것이다. B타입인 경우, 경사지게 진전한 피로균열은 하중 방향에 약 45도 기울기로 진전하였으며 양쪽 균열이 이루는 각도는 약 135도였다. C타입인 경우, 좌측의 경사진 피로균열은 하중방향에 대해 약 37도, 우측의 경사진 피로균열은 하중방향에 약 19도의 기울기를 갖고 진전하였으며 양쪽 균열은 약 195도의 기울기를 가졌다. 또한 B타입인 경우에는 2.66 mm까지 피로균열이 진전한 후 하중방향으로 경사지게 성장하였

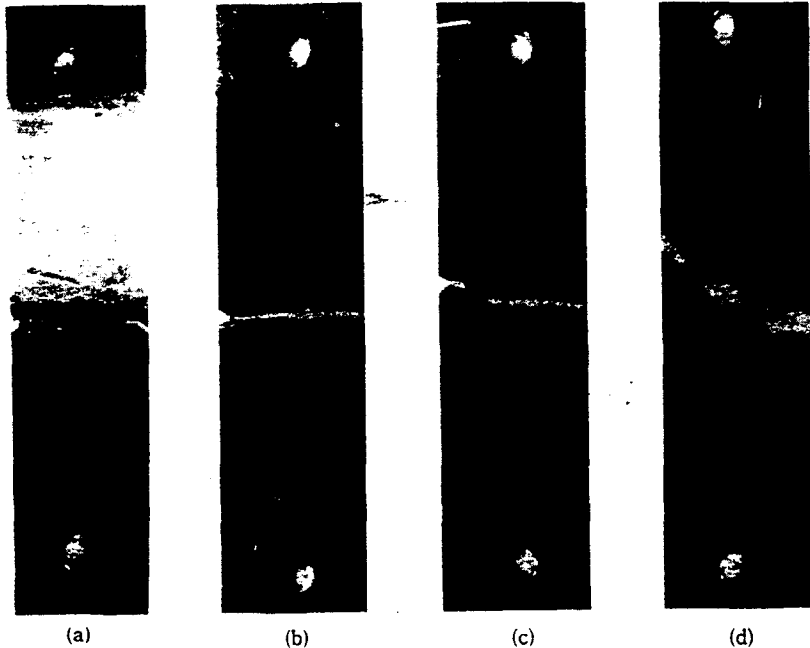


Fig. 3 Fatigue specimen photograph after. fatigue crack growth test

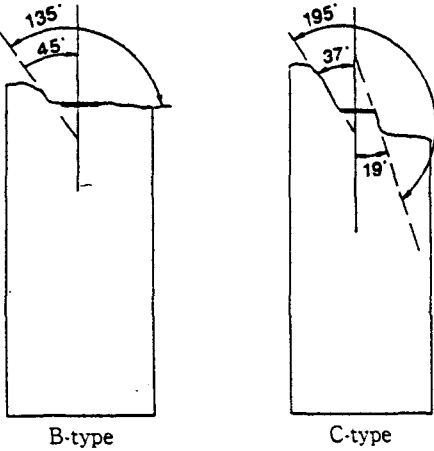


Fig. 4 Schematic diagram of angle between fatigue crack path morphology and loading direction in B and C type of SiCw/Al 6061 composites

다. 그러나 C타입인 경우에는 B타입과는 달리 피로균열이 인공노치에서 발생 직후부터 하중방향으로 경사지게 진전하였다. 한편 B 및 C타입 모두 시험편 폭(w)에 대한 피로균열길이(2a)의 비, 2a/W가 0.5~0.6인 영역에서부터 피로균열이 하중방향에 수직하게 진전하였으며 이 때의 응력확대계수 값을 계산해 본 결과 $7.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \sim 8.94 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 정도로 높은 값을 지녔다.

3.2 현미경을 통한 관찰

본 절에서는 세 타입의 SiCw/Al 6061 복합재료 및 Al 6061 도재의 피로균열진전경로 형상을 파악하기 위해 피로균열진전실험시 채취한 레프리카의 광학현미경을 통한 관찰과 이들 두 재료의 피로 파 단면을 전자현미경을 통해 관찰한 결과에 대해서 언급하기로 한다. Fig. 5는 Al 6061 도재의 피로균열진전경로 형상을 미시적으로 관찰하기 위해, 균열 주위로부터 채취한 표면 레프리카의 광학현미경 사진을 나타낸 것이며, Figs. 6, 7 및 8에는 SiCw/Al 6061 복합재료의 A, B 및 C 타입인 경우, 균열 주위로부터 채취한 표면 레프리카의 광학현미경 사진을 나타낸 것이다.

Fig. 5에 나타낸 Al 6061 도재인 경우, 피로균열은 발생 직후부터 지그재그(zigzag) 형태로 진전함을 알 수 있었으며 또한 주 균열앞에 발생해 있던 미소 2차 균열들의 급속한 성장으로 인해 주 균열과 미소 2차 균열이 합체된 것도 관찰할 수 있었다.

Fig. 6에 나타낸 A타입 SiCw/Al 6061 복합재료의 경우, 앞절에서 언급한 것과 같이 피로균열은 일반 구조용 재료와 유사한 형태로 하중방향에 수직하게 진전했음을 알 수 있었다.

Fig. 7의 B타입인 경우, 좌측 피로균열은 얼마간 성장한 후에 하중방향으로 기울어져 진전하였으며

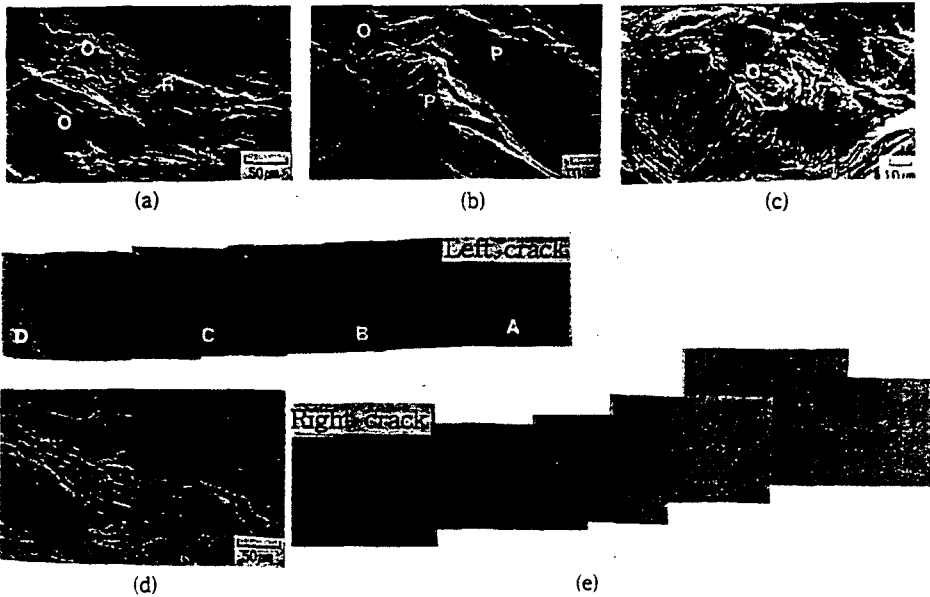


Fig. 5 Fractographs and replica photo of Al 6061-Tf matrix

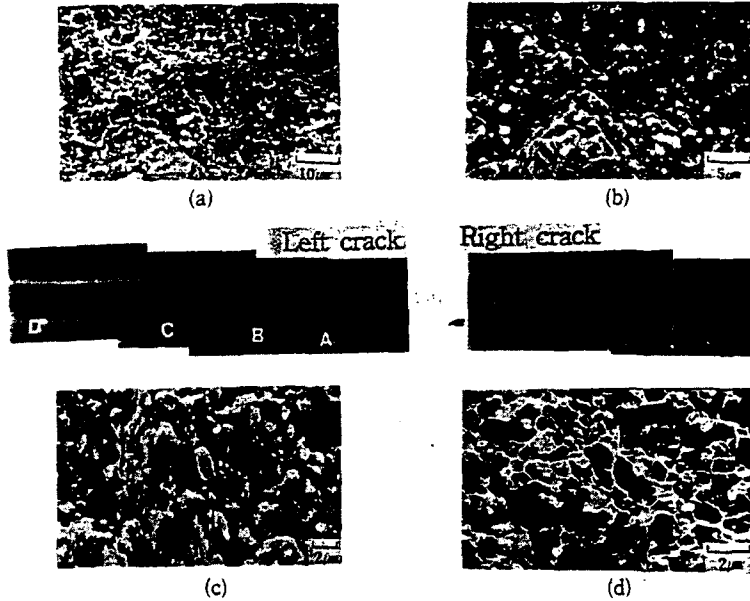


Fig. 6 Fractographs and replica photo of A type in the SiCw/Al 6061 composite

우측 균열은 발생 직후부터 하중방향에 대해 일정한 기울기를 갖고 선형적으로 진전하였다. 앞 절에서 언급한 것 같이 시험편 폭에 대한 피로균열길이의 비, $2a/W$ 가 0.5~0.6부터는 양측 균열이 모두 하중방향에 수직하게 진전하다 피로파괴 되었다.

Fig. 8의 C타입인 경우, B타입의 경사진 피로균열처럼 매끄럽게 진전하지 않고 좌우방향으로 지그재그로 진전해 피로균열진전에 대한 휘스커의 저항이 심하였음을 알 수 있었다. 또한 B타입의 경우와는 달리 피로균열이 인공노치에서 발생 직후부터 하중방향으로 경사지게 진전하였으며 C타입의 우측 피로균열은 좌측보다 급격하게 하중 방향으로 꺾였음을 관찰할 수 있었다.

한편 세 타입의 SiCw/Al 6061 복합재료와 Al 6061 모재의 피로 파단면을 주사전자현미경(scanning electron microscope : SEM)으로 관찰한 사진을 Figs. 5, 6, 7 및 8에 함께 나타내었다.

Fig. 5에 나타낸 Al 6061 모재인 경우, 피로 파단면을 전자빔에 대해 15도 기울여서 관찰하였다. 그 결과 피로균열 발생 초기에는 피로 파단면이 매우 거칠었으나 피로균열이 진전해 갈수록 파면의 거칠기는 약해져 관찰한 시험편 폭의 2/3이상에서는 거의 평평한 파면을 나타내었다. 또한 전자현미경 사진 (a), (b) 및 (c)의 O에서처럼 2차 균열들이 여러군데 산재해 있음을 관찰할 수 있었다. 이들 2차

균열들의 꺾임(kink)과 합체(coalescence)에 의해 Al 6061 모재의 피로균열이 지그재그로 진전한 것으로 여겨진다. 또한 Al 6061 모재는 전반적으로 연성 파면을 나타내었으며 국부적으로는 타이어 트랙(tire track, (a)의 R) 및 사행 미끄럼(serpentine glide, (b)의 P)과 같은 유사한 형태를 관찰할 수 있었다.

Figs. 6, 7 및 8에 나타낸 SiCw/Al 6061 복합재료에 있어서도 Al 6061 모재에서와 같이 피로 파단면을 15도~40도 경사를 준 상태에서 관찰하였다. 복합재료인 경우 피로균열의 발생은 기지재로 또는 보강재와 기지 계면에서 발생하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁶⁾ 세 타입 SiCw/Al 6061 복합재료의 전자현미경 관찰결과, A타입의 SiCw/Al 6061 복합재료인 경우, 노치선단에서는 뿔힌 휘스커(pull-out)들이 거의 관찰되지 않았으며 또한 압출방향이 아니 임의의 방향을 지닌 휘스커들도 관찰되어 피로균열은 기지 또는 휘스커 끝단부분에서 대부분 발생한 것으로 사료되어진다.

이에 반해 B타입의 SiCw/Al 6061 복합재료인 경우, Fig. 7의 (a)에서 보는 바와 같이 노치 선단 근방에서 뿔힌 휘스커들이 상당히 관찰되어 피로균열은 기지뿐 아니라 휘스커-기지 계면에서도 상당수 발생한 것으로 생각된다. 그리고 B타입인 경우 피로균열이 얼마간 하중방향에 수직하게 진전하다

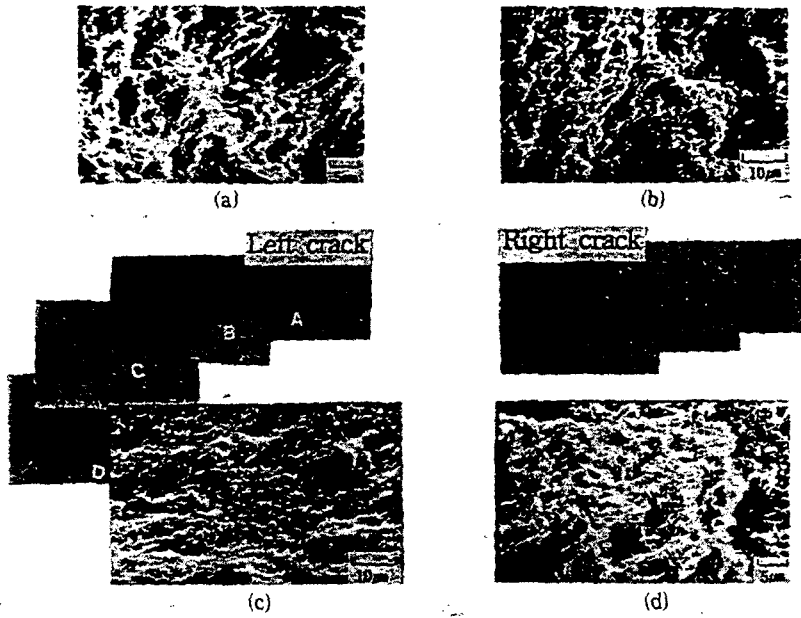


Fig. 7 Fractographs and replica photo of B type in the SiCw/Al 6061 composite

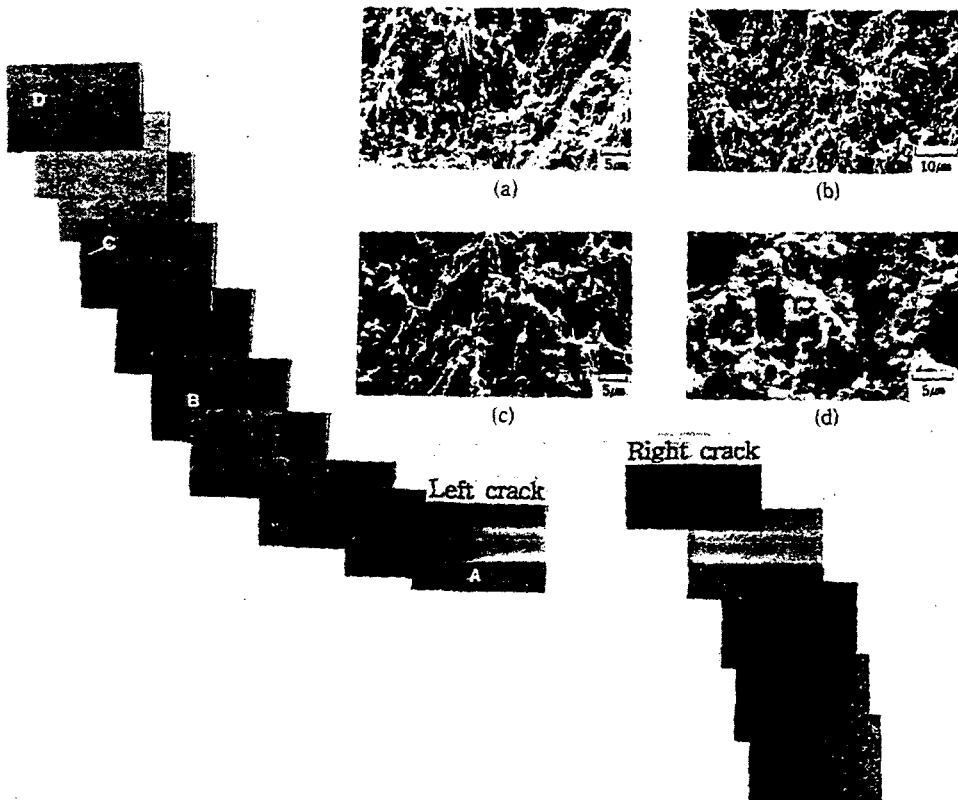


Fig. 8 Fractographs and replica photo of C type in the SiCw/Al 6061 composite

가 경사지게 진전한 것은 피로균열 선단 부근의 휘스커들의 밀집정도가 A타입보다는 심하였지만 C타입보다는 덜하기 때문에 나타난 현상으로 사료되어진다.

그러나 A 및 B타입보다 휘스커들의 밀집정도가 더 심한 C타입인 경우, Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 많은 휘스커들이 뿔혀 피로균열은 대부분이 휘스커-기지 계면에서 발생하였으며 발생 직후부터 하중방향쪽으로 진전해 간 것으로 보인다.

복합재료의 피로수명을 증가시키기 위해서는 보강재-기지 계면강도를 기지재보다 약하게 하여 피로균열이 기지에서 진전하지 않고 보강재-기지 계면을 따라 진전하도록 하는 것이 바람직하다는 보고가 있다.⁽¹⁶⁾ 따라서 이와 같은 것을 염두에 두고 피로균열들이 얼마간 진전한 뒤의 파면을 전자현미경으로 관찰하였다.

그 결과 A타입인 경우, Fig. 6의 (b) 및 (c)의 전자현미경 사진에 나타낸 것과 같이 휘스커들이 많이 관찰되지는 않았다. 이는 휘스커-기지 계면이 매우 양호하게 결합이 되어 대부분의 피로균열이 휘스커-기지 계면으로 진전하지 않고 기지를 통해 진전하였음을 의미한다. 기존 연구결과에^(16,19) 의하면 균열이 기지에 존재하며 보강재의 탄성률(SiCw $E_r=490$ GPa)에 대한 기지의 탄성률(Al $E_m=63.4$ GPa)비, E_m/E_r 가 1보다 작을 경우 균열이 보강재를 만나면 분기(splitting)가 되면서 보강재를 우회한다. 따라서 피로균열이 하중방향에 수직하게 진전한 A타입 SiCw/Al6061 복합재료인 경우 위와 같은 가정으로 설명될 수 있다.

Fig. 7의 (c) 및 Fig. 8의 (b), (c)에 나타낸 B 및 C타입의 하중방향으로 경사지게 진전한 경우는 앞에서도 언급한 것과 같이 두 타입 모두 A타입보다 휘스커들이 많이 밀집되어 있으므로 기지재가 보강재료의 확산이 A타입보다 힘들기 때문에 A타입과 같이 강한 계면 강도를 지니지 못할 것으로

사료되어진다. 따라서 피로균열들은 휘스커-기지 계면을 따라 진전했기 때문에 피로수명이 A타입보다 증가하는 것으로 사료된다. 또한 B 및 C타입과 같은 피로균열진전경로 형상이 나타나는 것은 휘스커의 밀집정도와, 휘스커들이 압출을 행한 뒤 얼마나 연속적으로 배열되었느냐에 의존하는 것으로 사료된다. 또한 이와 같은 관점에서 볼 때 C타입이 B타입보다 휘스커가 더 밀집되어 있으며 연속적으로 배열되어 있어 C타입의 경우 대부분의 피로균열이 휘스커-기지 계면을 따라 진전하였기 때문에 피로균열진전속도가 더 느리고 거칠게 진전한 것으로 여겨진다.

한편 Fig. 7 및 8의 (d)는 B와 C타입의 하중방향과 평행한 피로 파단면을 관찰한 결과, 두 타입 모두 등축딴플(equiaxed dimple) 파면을 나타내고 있으며 이는 과대하중이 파괴의 주된 원인을 의미한다. 이상에서 언급한 세 타입 SiCw/Al 6061 복합재료의 피로균열진전기구를 토대로 해서 A, B 및 C타입 SiCw/Al 6061 복합재료의 피로균열진전 모델을 Fig. 9의 (a), (b) 및 (c)에 나타내었다.

4. a-N 및 ΔK -da/dN 선도

Al 6061 모재와 세 타입의 SiCw/Al 6061 복합재료의 앞뒤좌우 4곳에서 측정한 균열길이로부터 얻은 a-N 선도를 Figs. 10, 11 및 12에 나타내었으며 아울러 앞뒤좌우 4곳에서의 균열길이를 평균해서 구한 평균 a-N관계를 실선으로 함께 나타내었다. 여기서 Fig. 10은 Al 6061 모재와 A타입 SiCw/

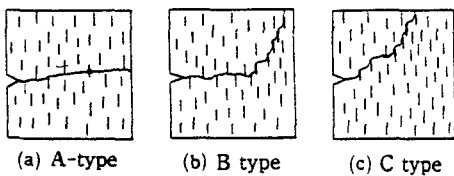


Fig. 9 Fatigue crack propagation model of three type in the SiCw/Al6061 composites

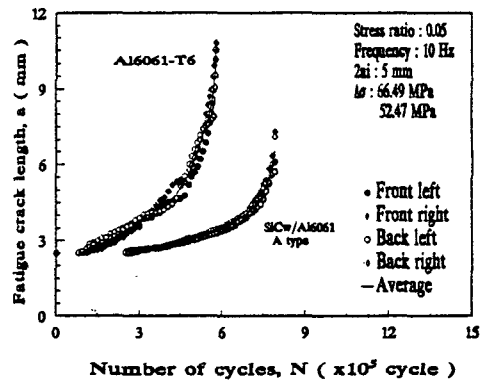


Fig. 10 Fatigue crack length vs number of cycles at 4 parts of SiCw/Al 6061 composite & Al 6061 matrix

Al 6061 복합재료의 a-N선도이며 Fig. 11 및 12에는 B 및 C타입 SiCw/Al 6061 복합재료의 a-N 선도를 각각 나타내었다.

피로균열진전 실험결과 Al 6061 모재의 경우 피로균열은 SiCw/Al 6061 복합재료보다 낮은 응력에서 피로균열진전 실험을 수행하였음에도 불구하고 세 타입의 SiCw/Al 6061 복합재료보다 빨리 발생하였다. 또한 피로파단수명도 SiCw/Al 6061 복합재료보다 짧아 SiC 휘스커가 피로균열에 상당한 저항으로 작용한다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10에 나타낸 Al 6061 모재와 SiCw/Al 6061 복합재료의 A 타입인 경우, 피로균열 진전량은 앞뒤좌우 위치에 따라 큰 차이는 나지 않았다. 그러나 Fig. 11 및 12의 SiCw/Al 6061 복합재료의 B 및 C타입인 경우, 앞뒤좌우 4곳에서의 피로균열 진전량의 차가 Al 6061 모재 및 A 타입보다 심하였다. 특히 C타입인 경우는 앞뒤좌우에서 피로균열 진전

량의 차이가 가장 심하게 나타났다. 또한 피로균열의 발생도 앞뒤좌우 4군데 위치에 따라 매우 큰 차이를 보였다. 이처럼 피로균열 발생의 조만(早晚)은 노치선단에 휘스커들의 수직배향 정도와 휘스커들의 분산정도에 따라 피로균열 발생 수명이 차이가 나는 것으로 생각된다.

한편 SiCw/Al 6061 복합재료에서 세 타입의 피로파단수명을 비교해 본 결과, C타입의 피로 파단수명이 A와 B타입보다 증가하였음을 알 수 있었다. 휘스커 보강 복합재료인 경우 피로수명의 장단(長短)은 파단될 때까지 피로균열이 휘스커를 우회해서 진전한 총길이에 의존한다. 따라서 C타입의 피로균열길이가 A 및 B타입보다 더 길게 관찰되었기 때문에 C타입의 피로 파단수명이 증가한 것으로 여겨진다.

Al 6061 모재와 세 타입의 SiCw/Al 6061 복합재료에서 파단수명(N_f)과 상대 반복회수(N)의 비와 피로균열길이(a)에 대한 관계를 Fig. 13에 나타내었다. Al 6061 모재인 경우가 SiCw/Al 6061 복합재료의 세 타입 중 어느 타입보다 피로균열 발생에 소모되는 시간이 짧음을 알 수 있었다. 0.1 mm까지 피로균열이 진전하는데 Al 6061 모재는 파단수명의 약 20%를, SiCw/Al 6061 복합재료인 경우 파단수명의 28%~35%를 소모시켜 큰 차이를 보였다. 또한 SiCw/Al 6061 복합재료의 세 타입 모두 파단수명의 약 80% 전후에서 피로균열길이가 1 mm까지 진전한 반면 Al 6061 모재인 경우 파단수명의 약 50% 전후에서 피로균열이 1 mm까지 진전하여 SiCw/Al 6061 복합재료와 큰 차(差)를 나타냈다. 일반적으로 피로수명을 증가시키기 위해서는

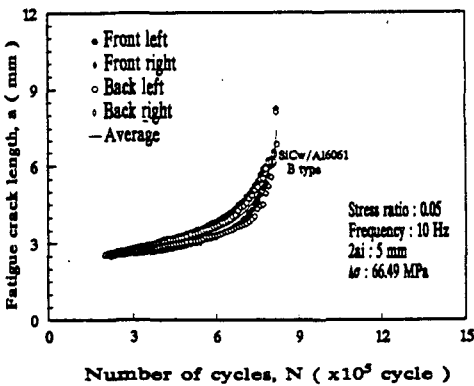


Fig. 11 Fatigue crack length vs number of cycles at 4 parts of SiCw/Al 6061 composite

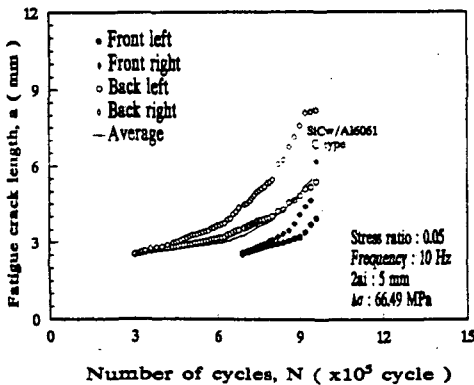


Fig. 12 Fatigue crack length vs number of cycles at 4 parts of SiCw/Al 6061 composite

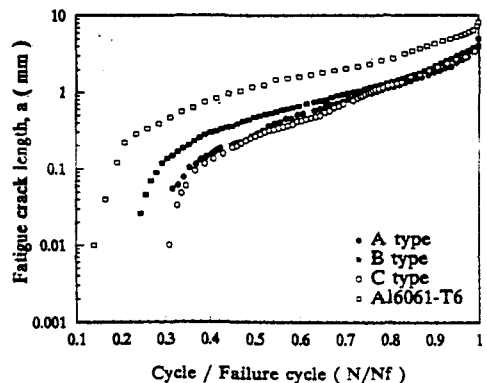


Fig. 13 Relationship between fatigue crack length and cycle/failure cycle in the SiCw/Al composite

피로균열의 발생을 지연시키는 것과 피로균열의 진전을 둔화시키는 방법이 있는데 SiCw/Al 6061 복합재료의 피로수명 향상은 피로균열 발생의 지연과 초기 1 mm까지의 피로균열의 진전이 지연되기 때문인 것으로 사료되어진다.

Al 6061 모재와 세 타입의 SiCw/Al 6061 복합재료에서의 응력확대계수 범위 (ΔK)와 피로균열진전 속도 (da/dN)와의 관계를 알아보기 위해 응력확대계수는 Tada⁽¹⁷⁾의 식을 사용하여 계산하였고, 피로균열진전 속도는 Secant 법⁽¹⁸⁾을 이용해 구하였다. 그 결과로부터 얻은 ΔK - da/dN 선도를 플로트한 것이 Fig. 14이다.

Al 6061 모재인 경우, 제2영역에서 분산이 다소 큰 것은 피로균열이 지그재그형태로 진전할 때의 ΔK 값을 정확하게 나타내지 못했기 때문으로 여겨진다.

한편 SiCw/Al 6061 복합재료에서는, C타입인 경우 피로균열속도가 느리게 진전하다가 갑자기 빨라지는 현상이 나타났다. 이는 C타입의 경우 피로균열이 발생 초기부터 경사지게 진전하였으나 본 연구에서는 경사진 균열길이의 X방향으로 투영된 길이를 측정하였기 때문에 나타난 현상으로 여겨진다. 그러나 B타입에서는 C타입과 같은 현상이 나타나지 않은 것은 B타입의 경우 한쪽 균열은 경사지게 진전하고 다른쪽은 하중 방향에 수직하게 진전하였으나 ΔK - da/dN 관계에는 이들 균열의 평균값을 사용하였기 때문인 것으로 사료되어진다.

Al 6061 모재와 SiCw/Al 6061 복합재료의 ΔK - da/dN 관계에 다음과 같은 Paris 피로균열진전법칙을 적용시켜 보았다.

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

$\Delta K = 6.3 \sim 7.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 범위에서 두 재료에 대한 피로균열진전 상수 C값과 피로균열진전 지수 m을

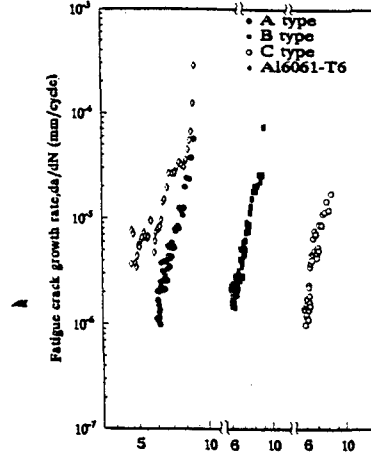


Fig. 14 Mean stress intensity factor range ΔK versus mean fatigue crack growth rate in the SiCw/Al 6061

최소자승법으로 구한 결과를 Table 2에 나타내었다.

이상의 m 및 C값의 계산결과로부터 동일 응력확대계수에서 피로균열진전속도는 Al 6061 모재가 SiCw/Al 6061 복합재료보다 빠름을 알 수 있다. 또한 SiCw/Al 6061 복합재료에서 세 타입의 피로균열진전속도만을 비교할 경우 A타입, B타입, C타입순으로 피로균열진전속도가 느려짐을 알 수 있었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 동일한 조건에서 휘스커 보강 복합재료를 제조한 후 피로시험편을 가공하여 피로균열진전 실험을 수행하였음에도 불구하고 서로 다른 세 타입의 피로균열진전 경로 형상이 나타났으며 또한 하나의 시험편인 경우에도 양쪽으로 진전한 피로균열의 형상이 달라 휘스커 보강 복합재료의 피로균열진전 특성은 휘스커 분포에 따라 상당한 차이를 나타낸다는 것을 확인할 수 있

Table 2 Crack growth coefficient, C & crack growth exponent, m of Paris' law in the Al 6061 matrix and SiCw/Al 6061 composites

Material	Crack growth exponent, m	Crack growth coefficient, C
Al 6061-T6	4.5	3.12E-9
SiCw/Al 6061 (A type)	7.1	5.73E-12
SiCw/Al 6061 (B type)	9.4	5.78E-14
SiCw/Al 6061 (C type)	10.1	4.04E-15

었다. 따라서 SiC 휘스커 보강 Al 6061 복합재료의 피로균열진전 특성을 신뢰성있게 평가하기 위해서는 통계적 관점에서 SiCw/Al 6061 복합재료의 피로 특성을 평가하는 것이 타당하리라 여겨진다.

5. 결 론

SiCw/Al 6061 복합재료와 Al 6061 모재에 대한 피로균열진전 실험을 수행한 후 피로균열진전 특성과 피로균열진전경로 형상을 검토한 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

(1) SiCw/Al 6061 복합재료의 피로균열진전 경로 형상은 양쪽 균열 모두 경사지게 진전한 경우, 한쪽 균열만 하중방향으로 경사지게 진전한 경우 그리고 양쪽 균열 모두 하중방향에 수직하게 진전한 경우 등 세 타입으로 나타낼 수 있었다. 그러나 Al 6061 모재의 피로균열진전경로 형상은 양쪽 균열이 모두 하중방향에 수직으로 진전하였다.

(2) SiCw/Al 6061 복합재료의 피로파단수명은 응력진폭 범위 $\Delta\sigma=52.47$ MPa 하에서 피로균열진전실험을 수행한 Al 6061 모재보다 높은 응력진폭 범위인 $\Delta\sigma=66.49$ MPa 하에서 피로균열진전실험을 수행하였음에도 불구하고 Al 6061 모재보다 증가하였으며 두 재료에 대해 Paris 균열진전법칙의 상수 및 지수인 C, m 값을 구해 비교해 본 결과 Al 6061 모재보다 SiCw/Al 6061 복합재료의 피로균열진전 속도가 느렸다.

(3) Al 6061 모재 및 세 타입 SiCw/Al 6061 복합재료의 피로균열진전경로 형상에 따른 피로 파단면을 전자현미경으로 관찰한 결과, Al 6061 모재의 파단면에서는 많은 미소균열들을 관찰할 수 있었다. 이러한 미소균열들로 인해 피로균열이 지그재그형태로 진전한 것으로 여겨진다. 한편 SiCw/Al 6061 복합재료에서는 A타입의 경우, 기지에서 피로균열이 발생해서 휘스커가 없는 기지에서만 진전하였으며 간혹 휘스커를 만나면 균열이 분기되어 휘스커를 우회하였다. 이에 반해 B타입인 경우는 균열이 기지와 휘스커-기지 계면에서, C타입인 경우에는 대부분 휘스커-기지 계면에서 발생한 것으로 사료되어진다. 이들 두 타입에서 피로균열은 휘스커-기지 계면으로 진전하였으나 B 타입에서는 피로균열이 하중방향에 수직하게 진전하다 밀집된 휘스커를 만나면 하중방향으로 기울어져 성장하였다.

(4) (3)에서 나타난 결론을 토대로 A, B 및 C 타입 SiCw/Al 6061 복합재료의 피로균열진전 모델을 나타내었다.

후 기

이 연구는 92/93년도 한국과학재단 연구비 지원(핵심전문연구 과제번호 921-0900-038-2)에 의해 수행된 것으로 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 日本機械學會 編, 1985, "新しい構造材料 -基礎と應用-", コロナ社, pp. 79~96.
- (2) Cho, K., Lee, S., Chang, Y. W. and Duffy, J., 1990, "Dynamic Fracture Behavior of SiC Whisker Reinforced Aluminium Alloys," *Metall. Trans. A*, 22A, pp. 367~375.
- (3) Kobayashi, T., Yosino, M., Iwanari, H., Niinomi, M. and Yamamoto, K., 1988, "Mechanical Properties of SiC Whisker Reinforced Aluminium Alloys Fabricated by Pressure Casting Method," '88 *World Materials Congress*, pp. 205~213.
- (4) 백경호, 이규창, 한경섭, 1990, "Al₂O₃-AC8A 복합재료의 가압력에 따른 미세조직과 인장강도," 한국복합재료학회지, 제3권, 제2호, pp. 49~56.
- (5) Fukaura, K., Sunada, H., Misawa, Y. and Izumi, H., 1990, "Powder Processing and Tensile Properties of SiC Whisker Reinforced Al Composite," *J. of Society of Mat. Sci., Japan*, Vol. 40, No. 451, pp. 424~430.
- (6) 김영환, 이상학, 이두영, 한경섭, 1990, "분말 야금법에 의한 Al-SiCw 복합재료의 제조 연구," 한국복합재료학회지, 제3권, 제1호, pp. 10~22.
- (7) 김영환, 이상학, 김낙준, 이두영, 1990, "SiC 휘스커 보강 Al 복합재료과 기계적 특성에 관한 연구," 대한금속학회지, 제28권, 제7호, pp. 640~647.
- (8) 홍순영, 이길근, 김진, 이상관, 1990, "Squeeze Casting에 의하여 제조된 Al₂O₃/Al-Si 금속복합재료의 고온강도와 계면반응," 대한금속학회지, 제28권, 제7호, pp. 615~622.

- (9) Ishii, H., Targo, K., Araki, H. and Aguspuji, P., 1993, "Fatigue of SiC Reinforced 6061 Aluminium Alloy at Elevated Temperature," *APCFS '93*, pp. 47~52.
- (10) Lee, Eun. U. 1990, "Crack Path Morphology in Silicon Carbide Whisker-Reinforced Aluminium Composite," *Metall. trans. A*, 21A, pp. 1783~1785.
- (11) Ma, Z. Y., Liu, J. and Yao, C. K., 1991, "Fracture Mechanism in SiCw-6061 Al Composite," *J. of Mat. Sci.* 26, pp. 1971~1976.
- (12) Tanaka, Y., Masuda, C. and Yamamoto, M., Fukazawa, M., 1990, "Fatigue Fracture Surface at High Temperature for SiC Whisker Reinforced Al2024 Matrix Composite," *J. of Society of Mat. Sci.*, Japan, Vol. 40, No. 453, pp. 94~100.
- (13) Hirano, K. and Takizawa, H., 1991, "Evaluation of Fatigue Crack Growth Characteristics of Whisker Reinforced Aluminium Alloy Matrix Composite," *JSME Inter. J.*, Vol. 34, No. 2, pp. 221~227.
- (14) 野口博司, 西谷弘信, 金 允海, 西澤彰夫, 1992, "SiC whisker 強化アルミニウム 合金の平滑材および 切欠材の疲労特性について," *日本機械學會論文集*, 제58卷, 제554號, pp. 1765~1771.
- (15) Lim, T., Lee, C. S., Kim, Y. H., Lee, K. C. and Han, K. S., 1990, "Fracture Behaviors and Mechanical Properties of Metal Matrix Composites," '90 *KSME-JSME Conference*, pp. 624~629.
- (16) 권숙인, 1988, "복합재료," 민음사, pp. 196~212.
- (17) Murakami, Y., 1987, "Stress Intensity Factors Handbook ." Vol. 1, p. 3.
- (18) ASTM, 1990, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Vol. 3, E647-88a, pp. 646~666.
- (19) Chen Dai-heng and Haruyama, S. 1993, "Interference Between Crack and Fiber," *JAME*, Vol. 59, No. 560, pp. 903~909.