

단섬유/입자 혼합 금속복합재료의 피로균열진전 거동

오광환* · 장준호* · 한경섭**

Fatigue Crack Growth Behavior of Short fiber/Particle Hybrid Metal Matrix Composites

K.H. Oh, J.H. Jang and K.S. Han

Key Words : 금속복합재료(MMCs), 혼합보강(Hybrid Reinforcement), 피로균열진전(Fatigue Crack Growth)

ABSTRACT

The effects of short fiber and particle hybrid reinforcement on fatigue crack propagation behaviors in aluminum matrix composites have been investigated. Single and hybrid reinforced 6061 aluminum containing same 20 Al₂O₃ volume% with four different constituent ratios of short fibers and particles were prepared by squeeze casting method and tested to check the near-threshold and stable crack growth behavior. The fatigue threshold of the composites increased with portion of particle contents and showed the improved crack resistance especially in low stress intensity range. Addition of particle instead of short fiber also increased fracture toughness due to increase of inter-reinforcement distance. These increase in both fatigue threshold and fracture toughness eventually affected the fatigue crack growth behavior such that the crack growth curve shift low to high stress intensity factor value. Overall experimental results were shown that particle reinforcement was enhanced the fatigue crack resistance over the whole stress intensity factor range.

1. 서 론

금속복합재료(MMCs)는 기지금속(Matrix)을 세라믹의 단섬유(Short fiber)나 입자(Particle)로 분산 보강시킨 재료것으로써 탄성계수와 항복 및 인장강도의 향상이 우수하고 뛰어난 마모특성과 열적안정성 등의 장점을 지니고 있다⁽¹⁾. 특히 알루미늄 합금을 보강한 복합재료는 비중이 낮기 때문에 비강도, 비강성, 경량성이 요구되는 항공기나 자동차의 구조용재료로 적용될 높은 잠재력이 있다. 이러한 구조용재료에 요구되는 중요한 기계적 성질으로써 파괴인성이나 피로균열진전특성을 들 수 있다. 금속복합재료의 경우에 이와 같은 특성은 기지재료

다 오히려 우수하지 못한 것으로 보고되어 있으며 그 주요원인은 세라믹의 첨가로 인해 기지재료보다 연신율이 낮아지는 것 때문이라 할 수 있다⁽²⁾. 그럼에도 불구하고 복합재료의 강점을 충분히 활용할 수 있는 구조재 적용을 위해 기지재료의 종류와 보강재의 크기, 배향, 보강재의 부피분율등과 같은 미세구조의 영향에 따른 균열진전특성을 규명하고 이를 통해 피로특성을 개선하려는 연구가 꾸준히 진행되어왔다. 금속복합재료의 피로균열진전 특성에 대해 특기할 사항은 하한응력확대계수값(ΔK_{th})가 기지재료에 비해 높은 값을 가지는 반면 파괴인성치(K_{Ic})의 감소로 인해 좁은 응력확대계수 범위를 보이는 것이다⁽³⁾. 이러한 손상허용특성의 저하에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 보강재의 부피분율로써 부피분율이 높을수록 이 같은 거동이 두드러진다고 보고되었다. 또한 피로균열진전 특성

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

은 보강재의 크기(size)나 분산(dispersion)과 같은 미세구조의 차이에 의해서도 영향을 받는 것으로 나타났다^(2, 4). 본 연구에서는 보강재의 형태에 따른 피로균열진전 특성을 알아보고자 단섬유형과 입자형을 각기 다른 비율로 보강한 복합재료로 피로균열진전시험을 실시하고 그 거동의 특징을 살펴보았다.

2. 시험재료 및 방법

2.1 시험재료

복합재료의 기지재는 강도와 부식성, 연성이 좋은 Al6061 알루미늄 합금을 사용하였다. 보강재(reinforcement)의 성분은 알루미늄(Al_2O_3)이며, 부피분율은 20%로 통일하였다. 실험변수로서 섬유와 입자간의 보강부피비율을 Table 2에 제시한 것과 같이 다르게하여 혼합비에 따른 차이점을 살펴보고자 하였다. 부피비율이 1:0은 단섬유를 사용한 단일 보강된 복합재료이며 나머지는 혼합보강된 복합재료이다. 입자로만 보강된 복합재료는 가압주조법의 제조특성상 제조가 불가능함을 밝혀둔다. 단섬유와 입자의 형상은 Fig. 1에 보는바와 같고, 각각의 기본적인 크기와 물성은 Table 1에 나타내었다. 복합재료의 제조는 가압주조법을 적용시켰다. 이와 같은 방법은 금속복합재료 제조에 널리 적용되는 방법으로, 세부적인 공정은 참고문헌에 잘 기술되어 있다⁽⁵⁾. 제조된 금속복합재료는 540°C에서 4시간동안 용체화 처리 후 담금질(water quenching)을 하였고, 그 다음 180°C에서 4~8시간동안 인공시효 시키고 공냉시켰다. 시험재료의 기본적인 기계적 성질과 파괴인성을 Table 3에 정리하여 나타내었다.

2.2 시험방법

피로균열진전실험은 W=50.8mm, B=8mm의 CT시편을 사용하였으며, CMOD를 측정하기 위해 5mm 나이프 에지를 내었다. 피로시험은 MTS-810 유압시험기를 이용하여 하중비 0.1의 사인파의 하중형태로 상온에서 실시하였다. 하중반복주기는 균열진전율이 1×10^{-8} m/cycle 이상에서는 10Hz의 일정진폭 하중으로 응력확대계수 증가시험을 하였고, 그 이하의 범위에서는 40Hz의 주파수로 하중비를 유지하면서 하중진폭을 줄여나가는 응력확대계수 감소시험을 실시하였다. 피로하중이 무한히 가해지더라도 균열이 더 이상 진전하지 않는 점인 하한계 응력확대계수값(Fatigue threshold, ΔK_{th})은 1×10^{-11} m/cycle의 균열진전율로 설정하였다. 이것은 보강재의 최대 길이인 단섬유 150 μ m가 균열진전 경로에 평행하게 놓여있을 경우, 이 길이를 진전할 때 피로강도의 싸이클 수인 10^7 cycle를 상회하는 균열진전율이다. 균열길이는 분해능이 0.01mm

인 이동형 CCD 카메라와 모니터로 측정하고 부차적으로 CMOD 게이지를 통해 킴플라이언스 방법을 병행하여 사용하였다.

Table 1. Specification of reinforcement

	Al_2O_3 Short fiber	Al_2O_3 Particle
Density [g/cm^3]	3.30	3.95
Diameter [μm]	3.0	45
Length [μm]	150	-
Tensile strength [GPa]	2.0	-
Modulus [GPa]	310	380

Table 2. Classification of tested materials

Notation	Total Volume Percent [%]	Fiber Volume Percent [%]	Particle Volume Percent [%]	Fiber / Particle Ratio
F20	20	20	-	1:0
F13P7	20	13.3	6.7	2:1
F10P10	20	10	10	1:1
F7P13	20	6.7	13.3	1:2

Table 3. Tensile properties and fracture toughness of single and hybrid composites

Notation	σ_y MPa	σ_u MPa	ϵ_f %	E GPa	K_{IC} MPa \sqrt{m}
MATRIX	206	287	11.5	68.0	29.5
F20	316	398	3.14	86.3	16.2
F13P7	313	397	2.1	94.8	18.4
F10P10	323	410	2.17	94.9	18.6
F7P13	333	408	1.8	95.0	19.9

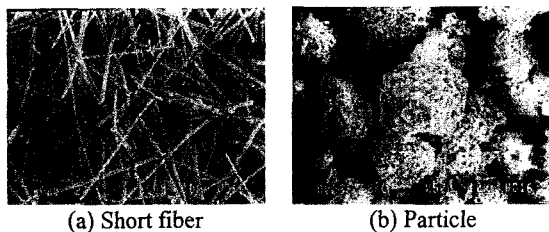


Fig. 1 SEM photograph of reinforcement (x500)

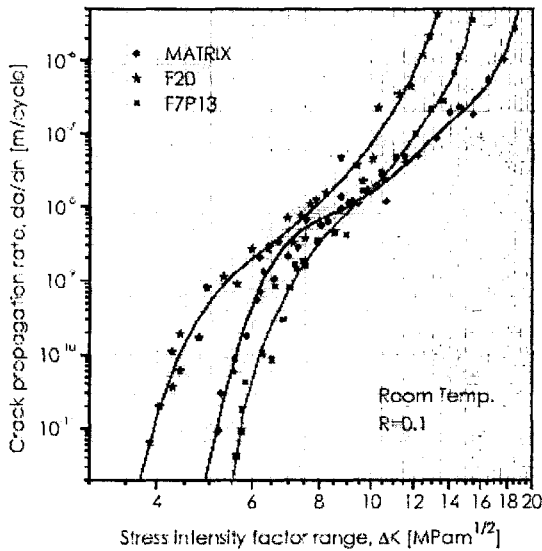


Fig. 2 Fatigue crack propagation behavior of matrix alloy and composites

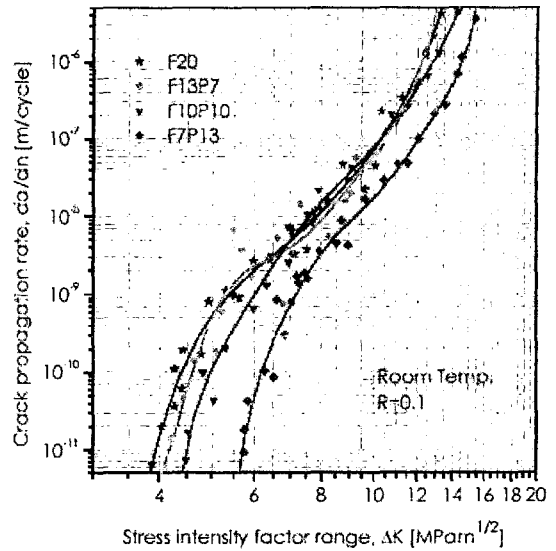


Fig. 3 Fatigue crack propagation rate properties of single and hybrid composites

3. 실험결과 및 고찰

3.1 응력확대계수에 따른 균열진전을

Fig.2 는 피로균열 진전시험의 결과로 기지재와 복합재(F20, F7P13)의 응력확대계수에 따른 균열진전의 관계를 보여주고있다. F7P13 의 경우, 기지재보다 하한 응력확대계수값(ΔK_{th})이 높아 균열진전이 늦게 개시가 되고 또한 저응력확대계수에서 기지재보다 향상된 균열진전율을 보인다. 하지만 이러한 차이는 응력확대계수가 높아질수록 줄어들어 $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이상의 응력확대계수에서는 기지재보다 빠른 균열진전율을 보이고 있다. 이러한 거동은 일반적인 복합재의 균열진전특성과 동일한 경향을 보이고 있다⁽³⁾. 그러나 F20 의 경우에는 응력확대계수 전구간에서 기지재보다 균열진전율이 높게 나타나는 결과를 나타내며 F7P13 과는 다른 거동을 보이고있다.

Fig.3 은 혼합비율이 각기 다른 복합재의 균열진전율을 서로 비교한 것이다. 입자비율이 증가할수록 하한 응력확대계수가 높아지며 낮은 응력확대계수범위에서 향상된 피로균열진전특성을 보이고 있다. 이 구간은 미세구조(microstructure)에 민감한 부분으로 단섬유와 입자의 혼합보강에 따른 미세구조의 차이를 잘 반영해주고 있다. 균열이 안정적으로 진전하는 $1 \times 10^{-8} \text{ m/cycle}$ 이상의 Paris 구간에서는 혼합보강에 따른 차이가 크게 나타나지 않으므로 역시 미세구조에는 민감하지 않은 이 구간의 일반적인 특성을 잘 나타내주고 있다. 실험결과를 살펴보면 전체적으로 입자의 비율이 높아질수록 균열진전에 대한 저항성이 높아짐을 알 수 있다.

3.2 파괴인성과 하한응력확대계수의 증가

재료내의 균열은 하한 응력확대계수값(ΔK_{th})에서 진전이 시작되어 반복하중에 따라 균열길이가 지속적으로 성장, 결국 파괴인성치(K_{IC})에 다다를 때 파괴가 일어나게 된다. 이때 피로균열진전율은 하한 응력세기계수값과 파괴인성치 사이에서 응력확대계수와 대응이 된다. 따라서 전체적인 피로균열진전거동은 이 두 값에 의해 크게 좌우된다고 할 수 있다. Table 3 에 나타난 파괴인성치를 확인하여 보면 하한응력확대계수와 마찬가지로 입자의 비율이 높아질수록 그 값이 증가함을 알 수 있다. Kamat 등에 의하면 파괴인성은 보강재 사이간격에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났고, 그 간격이 넓을 수록 파괴인성이 증가된다고 보고되었다⁽⁶⁾. 이런 관점에서 볼때 단섬유에 비해 비교적 지름이 크고 종횡비가 낮은 입자보강재의 첨가는 보강재 사이의 간격을 넓히는데 효과적이며 이러한 점이 파괴인성의 증가에 영향을 미친것으로 생각된다.

하한계 응력확대계수값의 증가도 이와같은 미세구조의 영향이 크다고 할 수있다. 일반적으로 하한계응력확대계수는 탄성계수와 균열진전경로의 거칠기에 의해 결정이 된다는 연구결과가 있다⁽⁷⁾. Table.2 에 나타난 복합재료의 탄성계수는 입자의 첨가로 인해 조금씩 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 입자는 단섬유보다 균열진전경로의 거칠기를 더욱 유발시킨다고 할 수 있다. 그 이유는 Fig.1 에서 보는 바와 같이 입자는 단섬유보다 지름이 크기 때문에 하한계 부근에서의 낮은 응력확

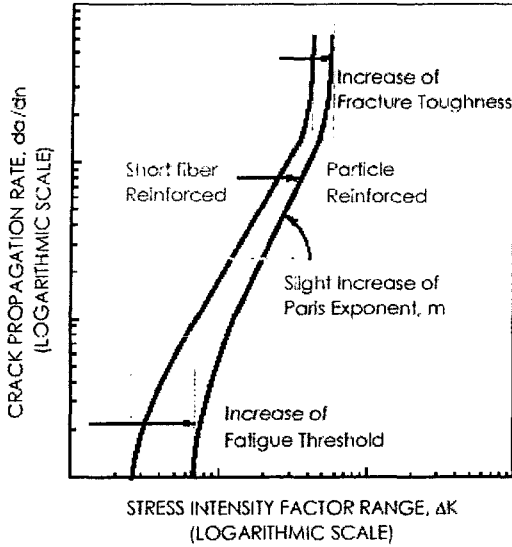


Fig. 4 Schematic diagram of the relationship between crack growth rate and SIFR in MMCs

대계수에서는 균열이 입자를 파괴하지 못하고 우회하여 지나갈 수 밖에 없기 때문이다. 따라서 입자의 첨가는 탄성계수와 균열진전 경로의 거칠기에 모두 유리한 영향을 끼치므로 이와 같은 하한계 응력확대계수값의 증가를 가져온 것으로 사료된다. 이러한 입자첨가에 따른 파괴인성치와 하한계 응력확대계수값의 증가는 피로균열진전시험에 있어 응력확대계수 전구간에서 향상된 특성으로 나타나게 된다고 볼 수 있다. 그 결과 Fig.4 에 보는바와 같이 균열진전곡선이 우측으로 이동하는 거동으로 결론 지어질 수 있다. 그림에서 거동의 변화는 저응력확대계수범위에서 보다 뚜렷하게 나타나는 것을 Fig. 3 을 통하여 확인할 수 있는데, 이 점은 저응력확대계수에서의 균열진전은 미세구조에 매우 민감하기 때문이다. 입자첨가에 따른 이와같은 거동은 Fig. 2 와 Fig. 5 에서 기지재와 다른 거동을 보이는 두 복합재료의 차이점을 잘 설명해 준다.

4. 결론

가압주조법을 통하여 알루미늄 6061 합금을 알루미늄 단섬유로 단일보강한 복합재료와 단섬유와 입자를 혼합보강한 복합재료를 제조하고, 피로균열진전시험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 섬유/입자로 혼합 보강된 복합재료는 입자의 첨가비율이 증가할수록 하한응력확대계수(ΔK_{th})가 높아졌고 균열진전율이 매우 낮은 저응력 확대계수범위에서 좋은 피로특성을 보였다.

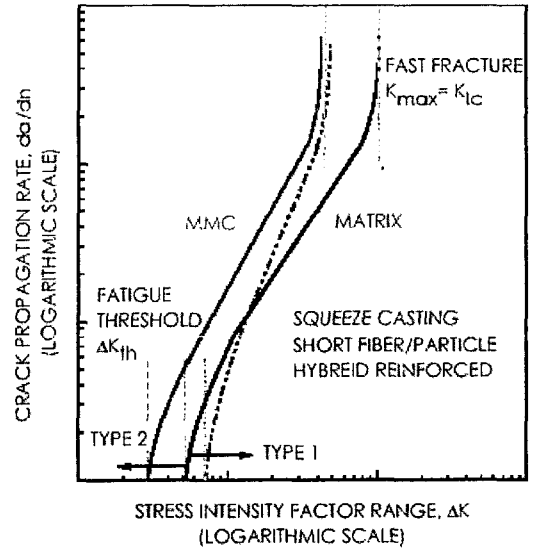


Fig. 5 Schematic diagram of fatigue crack growth behavior of matrix alloy and MMCs

(2) 입자의 첨가비율이 높아질수록 파괴인성치 또한 증가되는 경향을 보였으며 균열진전곡선은 응력세기계수가 높은쪽으로 이동하는 거동을 보였다.

(3) 입자의 첨가는 응력확대계수 전범위에서 균열진전율이 낮아지는 효과를 보임으로써, 단섬유보다는 입자로 보강하는 것이 균열진전의 저항성에 더욱 유리하다고 사료된다.

후 기

이 연구는 두뇌한국 21 사업의 지원에 의하여 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) T.W. Clyne and P.J. Withers, 1993, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (2) J.J. Lewandowski and C.Liu, 1989, Materials Science and Engineering, Vol.A107, pp.241~255.
- (3) J. Llorca, 2002, Progress in Materials Science, Vol.47, pp.283-353
- (4) J.K. Shang and R.O. Ritchie, 1989, Acta Metallurgica, Vol.37, No.8, pp.2267-2278
- (5) J.I. Song and K.S. Han, 1996, Journal of Material Science, Vol. 31, pp. 2615~2621
- (6) S.V. Kamat, J.P. Hirth and R. Mehrabian, 1989, Acta Metallurgica, Vol.37, No.9, pp.2395~2402
- (7) J. Wasen and E.Heier, 1998, International Journal of Fatigue, Vol.10, pp.737~742