

MMC의 피로수명과 피로균열전파거동에 관한 연구

허선철*, 박원조*, 최용범**

A Study on Fatigue Life and Fatigue Crack Propagation Behavior of MMC

Sun Chul Huh*, Won Jo Park* and Yong Bum Choi**

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate fatigue life and fatigue crack propagation behavior. The experiment of fatigue life for MMC have been carried out for the stress ratio $R=0.1$ at 20Hz. Fatigue life limit of AC4CH alloy is about 70 MPa and Fatigue limit of MMC has been increment to 120 MPa, therefore, fatigue limits of MMC is about 71 % higher than that of AC4CH alloy. Crack propagation tests on half-size CT specimen of thickness 12.5mm were conducted by using sinusoidal waveform. The crack length was monitored by compliance method. Test conditions were at 0.1 and 0.05 of load ratio at 10Hz of loading frequency and test load was 2.3kN. The effects of stress ratio on the fatigue crack propagation behavior for MMC was discussed within the Paris law. As the results of this study, Fatigue crack propagation increased with increasing the load ratio.

Key Words : Metal matrix composite (금속기 복합재료), Fatigue life (피로수명), Fatigue crack propagation (피로균열전진), Sinusoidal waveform(정현파)

1. 서론

최근 차세대 첨단재료로서 기존의 금속재료에 비해 월등한 성질을 갖는 새로운 제조기술 및 재료개발에 대한 요구가 점차 증가됨에 따라 복합재료에 관한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다. 기존의 금속재료로는 경량화, 고강도, 고강성이 한계에 이르렀으며, 금속이 근본적으로 가지고 있는 높은 밀도, 부식성 및 제품생산에 필요한 고 에너지 요구 등의 문제 때문에 복합재료의 사용이 증가하고 있는 추세이다.¹⁾

복합재료 활용이 가능하게 된 것은 화학분야의 고분자계 신소재가 개발되면서 기존 건설재료와 혼합 병용하여 강도, 내부식성, 내마모성, 내충격성, 절연성, 단열성, 경량화, 미려한 외관 등의 특성으로 시설물의 내구성과 안전성 등을 확보할 수 있기 때문이다. 선진 산업국에서는 이미 자동차 엔진 부품 중 피스톤헤드헤드, 커넥팅 로드, 피스톤 핀, 로커 암, 푸쉬 로드 등을 금속복합재료로 대체하는데 성공하였고, 우주왕복선 및 미사일 등의 부품에 그 응용이 시도되고 있다.²⁾

이와 같이 성능이 향상된 강화섬유와 기지재가

... 2002년 5월 3일 접수

* 경상대학교 수송기계공학부 해양산업연구소

** 경상대학교 수송기계공학부 대학원

개발되어 더욱 더 고기능성을 가진 복합소재가 연구되고 있으며 경제적인 성형, 제작기법에 대한 연구가 많은 관심을 끌고 있다.³⁾ 복합재료 중 금속기 복합재료는 금속성질과 세라믹 성질을 조합한 것으로 비강도, 내식성, 내마모성과 비탄성이 높고 열팽창계수가 낮으며 고온성질이 우수하여 항공기 및 자동차 부품 등의 여러 분야에서 크게 주목을 받고 있다. 또한, 복합재료 제조법 중 고압응고주조법(squeeze casting)은 강화재를 예비성형체로 제조한 후, 용융기지재를 함침(infiltration)시켜 성형하는 방법으로 주조와 단조를 동시에 병행할 수 있고 제조방법이 간단하며 단시간에 정밀정형부품을 제조할 수 있을 뿐만 아니라 가압력에 의해 강화재와 기지재간의 결합력을 향상시켜 치밀한 미세조직을 얻을 수 있어 기계적 특성을 크게 개선시킬 수 있다.⁴⁾

따라서, 본 연구에서는 알루미늄 보레이트 휘스커($9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$)를 강화재로 하고 Al-Si-Mg계인 AC4CH를 기지재로 하여 스퀴즈캐스팅법에 의해 금속기 복합재료를 제작하고 기지재와 MMC복합재료의 피로수명특성 및 피로균열진전 거동에 대하여 평가하였다. 여기에 서론을 입력하시오. 여기에 서론을 입력하시오.

2. 시험재료 및 실험방법

2.1 재료

본 연구에서 사용한 강화재로는 알루미늄 보레이트 휘스커를 사용하였으며, 구조는 Al_2O_3 - SiO_3 계의 화합물로 되어 있다. 복합재료에서 휘스커만을 추출한 SEM사진을 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 휘스커는 서로 엉켜 있으며 휘스커의 표면은 비교적 매끈하다는 것을 알 수 있다.

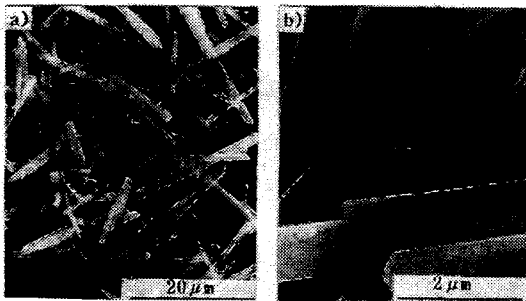


Fig. 1 SEM photographs of aluminum borate whiskers

기지재의 화학적 조성을 Table 1에, 그리고 휘스커의 물성치를 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of AC4CH aluminum alloy (Wt. %)

Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
0.20	7.5	0.45	0.10	0.20	0.10	0.05	0.20	0.05	0.05	0.05	Balance

Table 2 Properties of aluminum borate whisker

Chemical composition	$9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$
Crystal structure	Orthorhombic
Lattice constant(A°)	
a axis	7.69
b axis	15.0
c axis	5.56
Whisker axis	c axis
Length (μm)	10 ~ 30
Diameter (μm)	0.5 ~ 1.0
Melting point (°C)	1420 ~ 1460
Density (g/cm ³)	2.93
Young's Modulus (GPa)	400
Tensile Strength	8
Moh's hardness	7
Thermal expansion coefficient(10 ⁻⁶ /K)	
axial	4.4
radial	1.9

2.2 프리폼 제작 및 스퀴즈 캐스팅 방법

스퀴즈 캐스팅 방법으로 금속기 복합재료를 제작하려면 먼저 예비성형체인 프리폼 제작이 앞서야 한다. 프리폼의 제작 조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Specifications of preform

Type	Raw material	Blended quantity
Aluminum borate whisker	$9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$	120g
Ion water		1000ml
Organic bind	polym vinyl alcohol 10%	5ml
Coagulation	polyma 2%	5ml

그리고, 체적율은 25%로 하였고, 휘스커 중량은 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$V \times V_f \times \rho = 120g \quad (1)$$

여기서, V : 휘스커의 체적

V_f : 휘스커의 체적율

ρ : 휘스커의 밀도

휘스커 중량 120g에 대한 이온수 1000ml로 교환하면서, 폴리비닐알콜 및 응집제를 첨가하고, 충분히 교환된 슬러리(sully) 상태에서 슬러리 속의 기포를 제거하기 위하여, 진공탈포한 후 프리폼 금형에서 흡인펌프로 이온수를 여과시키면서 압축하여 소정의 프리폼 형상을 완성하였다. 그 후 3일간 자연건조후, 소결로에서 1100℃ 조건으로 2시간 소결(sintering)한 후, 노냉하여 제작하였으며 프리폼의 크기는 100×110×25(mm)이었다.

Fig. 2는 가압단조법의 제조과정을 나타내고 있다. 그림에서 제작한 프리폼을 약 700℃로 가열하고, 스퀴즈 캐스팅 장치의 금형 내에 고정하였다. 이 때의 금형 온도는 200℃이었다. 그 다음 760℃의 용탕을 금형에 주입하여 프레스 장치에서 가압력 83.4MPa, 가압속도 50mm/sec, 가압시간 40sec로 프리폼의 공극에 용탕을 침투, 응고시켜서 휘스커 강화복합재료를 제작하였다.

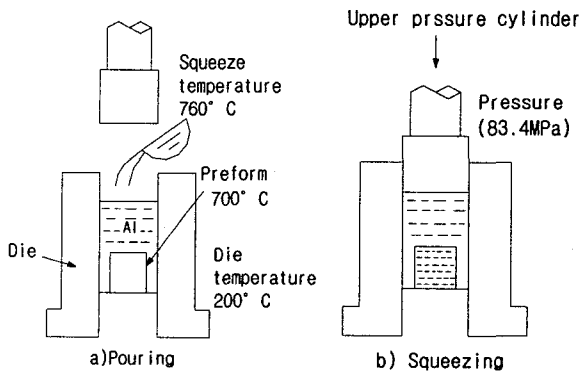


Fig. 2 Process of squeeze casting

2.3 피로수명시험

피로수명시험에 사용한 시험기는 MTS model 810 10ton_r 용량 컴퓨터 제어 서보 유압식 피로시험기이다. 기지재인 AC4CH합금 및 MMC의 피로시험

을 위하여 Fig. 3과 같은 형상으로 기계가공하고 평행부는 내수연마지(#600~1500)를 이용하여 습식연마 하였으며, 최종적으로 알루미나 분말(#0.3μ m)로 정밀연마 하였다.

피로수명시험은 ASTM D3470 규정에 의거하여 실시하였으며, 인장 편진피로시험으로 응력비 R=0.1, 반복주파수 20Hz, 정현파로 하중제어모드(load control mode) 방식으로 실온에서 실험을 하였다.

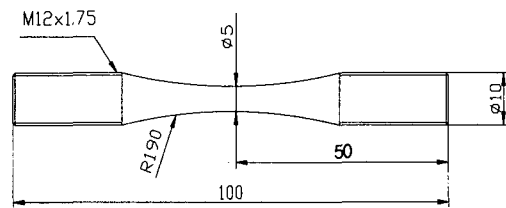


Fig. 3 Fatigue test specimen (unit : mm)

2.4 피로균열진전시험

피로균열진전시험은 하중제어방식으로 응력비 R= 0.05 및 0.1과 주파수 10Hz, 정현파로 실험하중은 2.3kN으로 일정하게 하였으며 Fig. 4는 피로균열진전시험편의 치수와 형상을 나타내고 있다. 또한, 예비크랙의 삽입조건은 8Hz, 정현파 및 일정하중진폭으로, 노치선단에서 1.5mm로 유지시켰으며 초기 노치균열길이 a와 시험편의 폭 W의 비(a/W)가 0.26으로 하였다. 크랙길이의 측정은 COD계이지를 이용한 컴플라이언스법으로 행하였다. 피로균열진전시험은 ASTM E647-95a규정에 따라 일정 진폭 하중 하에서 수행하였다.

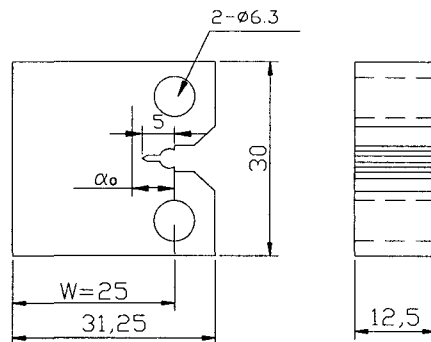


Fig. 4 Configuration of half-size CT-specimen (unit:mm)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기지재 및 MMC의 조직

Fig. 5는 기지재인 AC4CH합금 및 MMC의 SEM 사진을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것처럼 AC4CH에 비해 MMC의 조직이 미세한 것을 알 수 있으며 휘스커가 전체적으로 균일하게 분포하고 있으므로 가압단조법에 의한 제조가 복합화에 용이한 방법이라 생각한다. 또한 이런 조직의 미세화가 재료의 경도와 강도의 향상에 기여할 것으로 생각된다.

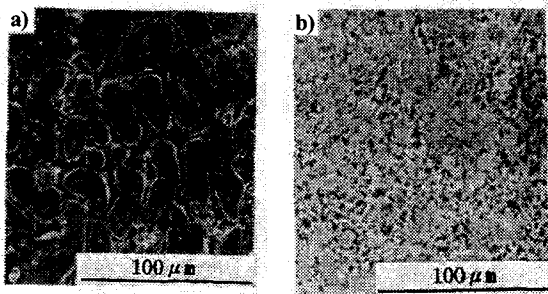


Fig. 5 SEM photographs of AC4CH and MMC structures (a) AC4CH b) MMC)

3.2 인장시험결과

Fig. 6은 기지재 및 모재에 강화재를 첨가한 금속기복합재료의 인장시험의 결과를 나타내었다.

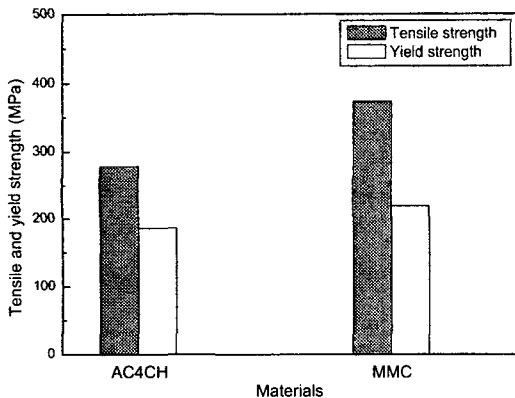
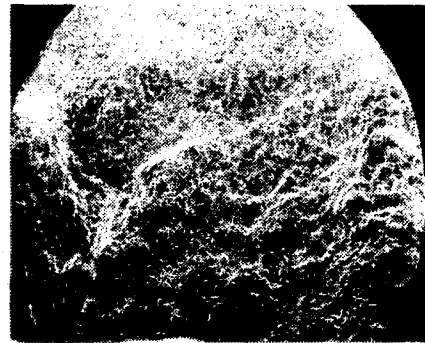


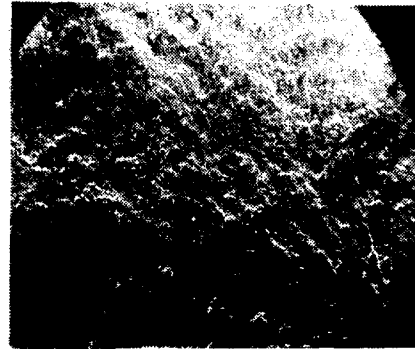
Fig. 6 Tensile strength of AC4CH and MMC

AC4CH의 인장강도가 약 278MPa 인데 비해, MMC의 인장강도는 373MPa, 복합재료의 인장강도가 각각 기지재보다 34% 향상된 것을 알 수 있다. 이것은 인성이 강한 기지재에 기계적, 화학적 특성이 우수한 강화재를 첨가시킴으로서 첨가된 강화재로 인하여 강도가 향상된 것으로 생각한다.

Fig.7은 AC4CH와 MMC에 대해 인장 후의 파단면 사진을 나타내고 있다. (a)인 AC4CH의 경우 비교적 평탄하고 고른 파면과 부분적으로 micro-dimple 형태를 확인 할 수 있다. (b)는 MMC의 경우로서 파면이 전체적으로 굴곡이 심하고 단을 형성하며 거친 취성파면 형태를 나타내고 있다.



(a) AC4CH



(b) MMC

Fig. 7 Microstructure of fracture surface after tensile test (×20)

3.3 기지재와 MMC의 피로수명

Fig. 8에 AC4CH와 MMC의 피로시험 결과를 나타내었다. AC4CH재의 피로수명한도는 반복회전수 10^7 기준에서 약 70MPa, 복합재의 피로수명한도는

120 MPa인 것을 알 수 있었다. MMC재의 피로수명이 AC4CH보다 71% 정도 높게 나타나고 있다. 이는 강도와 경도가 상승하기 때문에 피로한도도 증가하였다고 생각된다. 또한 인장강도의 증가폭보다는 피로수명에 의한 증가폭이 훨씬 크다는 것을 알 수 있으며, 이는 단순인장 보다는 피로의 경우 균열의 생성과 균열의 전파 그리고 최종 파단에 이르는 동안 재료의 조직적 특성에 큰 영향을 받기 때문으로 생각한다. 이상의 결과는 D. A. Gerard⁹⁾의 연구 결과와 유사함을 알 수 있었다. 그리고 MMC의 초기 생성이 어렵기 때문에 이로 인한 수명의 증가가 클 것으로 생각한다. 이 결과에서 알 수 있듯이 알루미늄 보레이터 휘스커는 Al-Si-Mg계인 AC4CH합금의 강화재로 유용함을 알 수 있다.

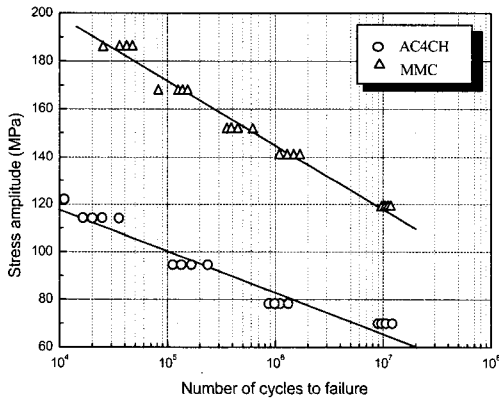


Fig. 8 Comparisons between stress and Nf in AC4CH, MMC

3.4 피로균열진전속도에 미치는 응력비의 영향

Fig. 9, Fig. 10은 응력비 R=0.05, R=0.1에서 AC4CH와 MMC간의 피로균열진전율(da/dN)과 응력확대범위(ΔK)의 관계를 나타낸 것이다. 실험 데이터는 ASTM E647-95a에서 제안된 증분다항법 (Polynomial method)으로 정리하였다. Fig. 9는 AC4CH의 경우로서 ΔK 의 증가와 함께 da/dN 가 증가하고 있으며 저 ΔK 에서 R=0.1의 경우가 R=0.05에 비해서 증가하고 있으나 고 ΔK 로 갈수록 응력비의 영향이 적었으며 균열진전속도가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 일반 연성재질의 균열진전거동과 유사하게 안정성장단계인 초기에는 응력비의 영향이 있다가 균열진전량이 커짐에 따라 영향이 줄어드는 경향과 일치함을 알 수 있다.

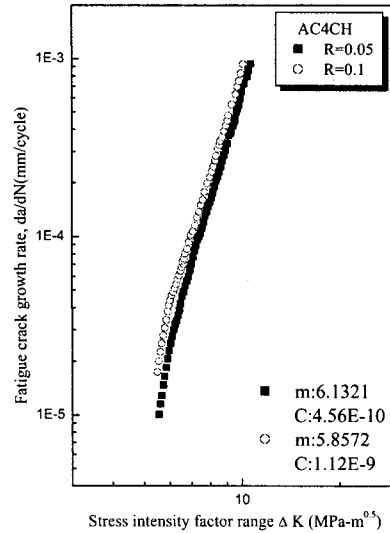


Fig. 9 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (AC4CH)

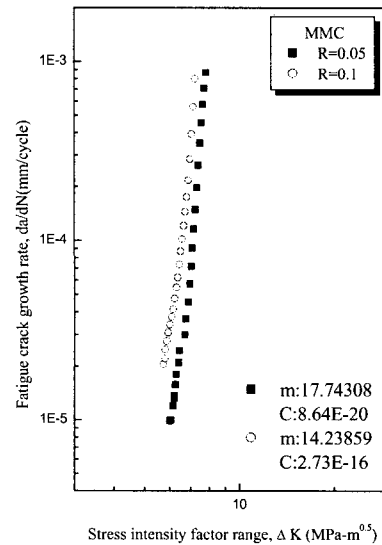


Fig. 10 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (MMC)

Fig. 10의 MMC의 경우 동일 ΔK 에서 응력비 R=0.1의 경우가 da/dN 가 크다는 것을 알 수 있으며, 피로균열진전율이 금속기복합재료가 AC4CH재에 비해 빠른 결과를 보였다. 본 연구 결과와 같이 Paris 영역에서 AC4CH재보다 금속기복합재료가 균열진전율이 더 빠르게 나타나는 결과는 Logsdon과

Liaw⁶⁾의 결과와 유사하다. 그리고 균열초기 부분에서 MMC가 AC4CH에 비해 균열성장이 지연되는 이유는 강화재의 균열가지(Crack bridging)현상에 기인한다는 것이다⁷⁾. 그리고 ΔK 가 K_{Ic} 에 가까운 K_{max} 부근의 높은 영역에서는 모재가 우수하다고 발표되고 있으며, 이것은 복합재료의 아주 낮은 파괴인성치로 인해 균열성장율이 가속되는 특징 때문이라고 하였다. 따라서 MMC의 경우가 AC4CH재에 비해 균열 진전속도가 빠르게 나타났으나, 피로수명은 훨씬 증가하였기 때문에 균열의 초기 생성이 수명의 대다수를 차지하고 있다고 생각한다.

3.5 파면 사진

AC4CH와 MMC의 피로균열진전 거동을 알아보기 위하여 균열의 안정성장 단계인 Resign II에 대하여 피로파면 사진을 나타내었다. 그리고 같은 조건에서의 비교를 위하여 동일 ΔK 영역에 대한 파면사진을 배율 200배 SEM 촬영하여 나타내었다.

Fig. 11은 AC4CH에 대하여 응력비 0.05, 0.1에 대한 피로파면 사진을 나타내고 있다. 그림에서 R=0.1은 R=0.05보다 조직이 크기 때문에 피로균열 진전속도가 약간 빠르게 진전 된 것으로 생각된다. 또한 연성재질의 특징인 dimple 형태의 개재물이나 void를 확인할 수 있으며 부분적으로 스트라이에이션도 확인 할 수 있다. Fig. 12는 MMC에 대하여 응력비 0.05, 0.1에 대한 피로파면 사진을 나타내고 있다. 파면은 전형적인 취성파면의 향상을 띄고 있으며 스트라이에이션이나 dimple의수가 R=0.1의 것보다 적게 나타났다. 따라서 균열진전속도가 0.05보다 빠르게 나타난 것으로 생각된다. 그리고 MMC재는 AC4CH재보다 취성적임을 알 수 있다.

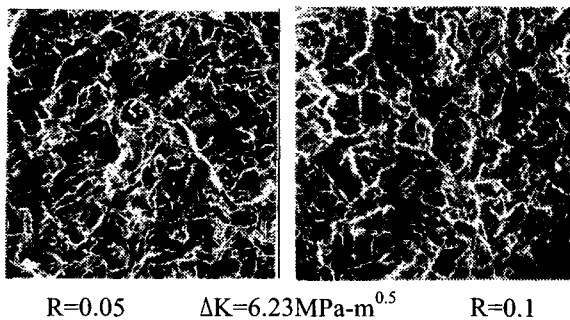


Fig. 11 SEM photographs of fatigue fracture surface in AC4CH (×200)

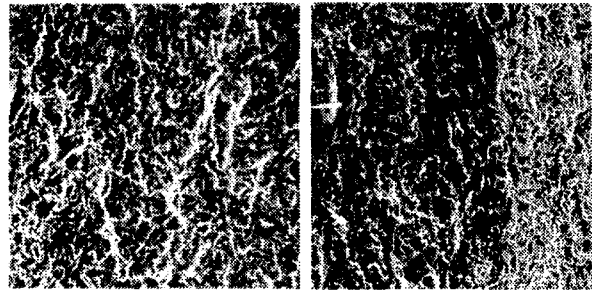


Fig. 12 SEM photographs of fatigue fracture surface in MMC (×200)

4. 결론

기지재를 AC4CH로 하여 스퀴즈캐스팅법에 의한 금속기복합재료를 제조하여 피로수명특성 및 피로균열진전거동에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스퀴즈 캐스팅에 의하여 금속기복합재료를 제조한 결과 비교적 양호한 복합재료를 제조할 수 있었다.
- 2) AC4CH의 피로한도는 70MPa, MMC의 피로한도 120MPa로 나타났으며, AC4CH의 피로한도보다 MMC의 피로한도가 10^7 cycle에서 약 71% 정도 크게 나타났다. 이는 조직의 조밀화에 의한 강도와 경도의 증가에 기인한 것으로 생각된다.
- 3) 피로균열 진전 실험 결과 AC4CH의 경우 응력비에 따른 진전속도의 영향은 거의 없었으나 MMC의 경우는 응력비의 증가에 따라 진전 속도의 영향이 약간 빠르게 나타났다.
- 4) AC4CH에 비해 MMC의 경우가 균열진전실험에서는 속도가 빠르게 나타났다는 것을 알 수 있으며, 전체 피로수명은 MMC가 크게 증가하였으므로 MMC의 경우 2단계 영역보다 1단계 영역인 균열의 초기 생성 수명이 크게 때문에 AC4CH 보다 수명이 크게 증가하였다고 생각한다.

후 기

본 논문은 경상대학교 지역대학육성사업단의 지원으로 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 홍창선, "복합재료 응용기술 및 연구," 대한기계학회지, 제34권, 제5호, pp. 334-341, 1994.
2. 落合莊郎, 長村, 光造, "アルミニウム基 複合材料," 輕金屬, 第38卷, 第10號, pp. 658-694, 1988.
3. D.Y.Ding, D.Z.Wang, X.X.Zhang, C.K.Yao. "Mechanical properties of alumina-coated $Al_{18}B_4O_{33}w/6061Al$ composites," Material Science and Engineering. A308, pp. 19-24, 2001.
4. Mingyi Zheng, Kum Wu, Hancen Liang, "Microstructure and mechanical properties of aluminum borate whisker-reinforced magnesium matrix composites," Materials Letters, 3847, 2002.
5. S.B.Kim, D.A. Koss, D.A.Gerard. "High cycle fatigue of squeeze cast Al/SiCw composites," Material Science and Engineering. A277, pp. 123-133, 2000.
6. W.A.Logsdon and P.K. Liaw, "Tensile, fracture toughness and fatigue crack growth rate properties of sil- icon carbide whisker and particulate reinforced alu- minum metal composites," Eng. Frac. Mech, Vol. 5, pp. 737-751, 1986.
7. J.K.Shang, et. al, "Role of silicon carbide particles in fatigue crack growth in SiC-particulate-reinforced aluminum alloy composites," Material Science And Engineering. A 102, pp. 181-192, 1998.