

금속기복합재료의 피로균열성장거동에 대한 응력비 영향에 관한 연구

최 용 범**, 박 원 조*, 허 선 철*, 윤 한 기***

*경상대학교 수송기계공학부

**경상대학교 대학원

***동의대학교 기계·산업시스템공학부

A Study on the Stress Ratio effect of Metal Matrix Composites on Fatigue Crack Growth Behavior

YONG-BUM CHOI**, WON-JO PARK*, SUN-CHUL HUH* AND HAN-KI YOON***

*School of Transport Vehicle Engineering Gyeongsang National Univ., Tongyeong, Kyeongnam, 650-160, Korea

***Dept. of Mechanical Eng., #24, Gaya-Dong, Busanjin-Gu, Busan, Korea

KEY WORDS: Metal matrix composites(금속기 복합재료), Squeeze casting(가압단조), Sinusoidal waveform(정현파), Stress intensity factor range(응력확대계수범위), Fatigue crack growth rate(피로균열진전속도)

ABSTRACT: Metal matrix composites had generated a lot of interest in recent times because of significant in specific properties. It was also highlighted as the materials of frontier industry because strength, heat-resistant, corrosion-resistant, wear-resistant were superiored.

In this study the strength properties of $Al_{18}B_4O_{33}/AC4CH$ were represented mixing the binder of Al_2O_3 and TiO_2 . It was also fabricated by squeeze casting. $Al_{18}B_4O_{33}/AC4CH$ was fabricated at the melt temperature of $760^\circ C$ the perform temperature of $700^\circ C$ and mold temperature of $200^\circ C$ under the pressure of $83.4MPa$ and observed SEM. Fatigue crack growth rate tests on compact tension specimen(half-size) of thickness $12.5mm$ were conducted by using sinusoidal waveform. Compact tension specimens(half-size) were used and fatigue crack growth rate da/dN and stress intensity factor range ΔK were analyzed concerning to the R value of 0.1 and 0.05. In order to find out the value of ΔK , load amplitude constant method was applied by the standard fatigue testing method describes in ASTM E647-95a.

As the results of this study, Fatigue crack growth rate increased with in creasing the load ratio, Consequently, At equivalent stress intensity factors, the fatigue crack growth rates in MMC were faster than those of AC4CH alloy. then the fatigue life and the fatigue crack growth rate was investigated using scanning election microscopy(SEM)

1. 서 론

최근 차세대 첨단재료로서 기존의 금속재료에 비해 월등한 성질을 갖는 새로운 재료개발에 대한 요구가 점차 증대됨에 따라서 복합재료에 관한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다. 기존의 금속재료는 경량화, 고강도, 고강성이 한계에 이르렀으며, 금속이 근본적으로 가지고 있는 높은 밀도, 부식성 및 제품생산에 필요한 고 에너지 요구 등의 문제 때문에 복합재료의 사용이 증대되고 있는 추세

이다.¹⁾²⁾ 복합 재료는 성분이나 형태가 다른 두 종류이상의 재료로 조합되어 유용한 기능을 갖는 재료를 말하며 첨가되는 강화재나 기지재의 종류에 따라 여러 가지 복합 재료로 구분된다. 특히 금속기 복합재료는 고강도, 비강도, 우수한 내마모성 및 고온특성으로 항공기, 자동차, 우주항공, 방위산업, 고속전철, 전자산업, 레저산업의 소재로서 그 응용범위가 확대되어 가고 있다.³⁾⁴⁾

특히, 금속기 복합재료는 우주항공 분야에서 광범위하게 사용되고 있으며 비강도, 내열성, 내마모성 및 내구성등의 기계적 특성이 우수하여 자동차 부품으로 엔진부와 구동축, 브레이크 시스템에도 사용되며 항공기부품으로도 활용되고 있다.⁵⁾ 그러나 현재는

교신저자 박원조 연락처: 경남 통영시 인평동 445번지
055-640-3183 wjpark@nongae.gsnu.ac.kr

금속복합재료의 제조공정의 기술 개발에 치우쳐, 이들을 구조물에 응용하는데 필수적인 안전설계의 기준설정을 위한 피로전파거동에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 실제 MMC가 적용되는 구조물의 대개는 자동차나 항공기 등의 경량화에 요구되는 필수부품으로 응용되어 과대한 하중을 받거나, 반복하중을 받아 피로파괴의 양상을 보이게 됨을 볼 때 그 중요성은 더욱 절실하다고 보고되고 있다.⁶⁾

본 연구에서는 휘스커간의 결속력을 향상시키기 위해 무기binder인 Al_2O_3 를 첨가(이하 Al_2O_3)와 TiO_2 를 첨가(이하 TiO_2)하여 각각의 응력비에 따른 피로균열전파거동의 특성을 연구하였으며, 피로파면 고찰을 통하여 MMC의 파괴특성에 대하여 고찰하였다.

2. 시험재료 및 방법

2.1 시험재료

AC4CH는 Al-Si-Mg계 합금에서 Fe의 함량을 0.2% 이하로 인성을 높인 알루미늄 합금으로서 주물용 합금의 중간정도의 강도를 나타내지만 연신율이 커서 인성이 우수하고 주조성이 양호하고, 내식성이 우수한 합금으로서 복합재료의 기지재료로 널리 사용되고 있다. Table 1은 기지재인 AC4CH의 화학적 성분을, Table 2는 기계적 성질을 나타내었다. 또한 강화재로 사용된 알루미늄 보레이더 휘스커의 물성치를 table 3에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of AC4CH 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	Bal.

Table 2 Properties of AC4CH alloy.

Materials	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation (%)
AC4CH	278	186	68	4.07

Table 3 Properties of aluminum borate whisker

Materials	Diameter (μm)	Length (μm)	Tensile strength (GPa)	Young's modulus (GPa)	Crystal structure
$Al_{18}B_4O_{33}$	0.5~1.0	10~30	8	400	Orthorhombic

2.2 시험편

Fig. 1은 시험편의 형상과 치수를 나타내고있다. 재료는 내열성, 내마모성 등이 뛰어나며 기계적 성질이 우수한 휘스커강화복합재료로 본 실험에 사용된 시험편은 CT(half-size)형 시험편으로 $W=25$, $B=12.5$ mm이고, 하중제어방식으로 응력비 $R=0.05$ 및 0.1과 주파수 10Hz, 정현파로 실험하중은 2.3kN으로 일정하게 하였다. 또한 예비크랙의 삽입조건은 8Hz, 정현파로 행하였다. 그리고 ASTM E647-95a의 규정에 의해 일정하중진폭으로, 예비크랙은 노치선단에서 1.5mm로 삽입시켰으며 초기노치균열길이 a 와 시험편의 폭 W 의 비(a/W)를 0.26으로 하였다. 크랙길이의 측정은 COD게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 행하였다.

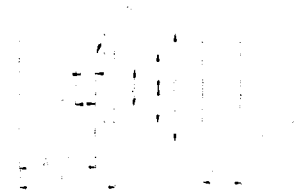


Fig. 1 Configuration of CT(half-size) specimen

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기계적 성질

Fig. 2는 기지재 및 MMC의 인장 및 항복강도를 나타낸 것이다. AC4CH의 인장강도가 약 278MPa 인데 비해 Al_2O_3 는 345MPa, TiO_2 는 375MPa로 복합재료의 인장강도가 각각 기지재보다 24%, 34.8%씩 향상됨을 알 수 있으며, 항복강도는 AC4CH에 비해 TiO_2 는 증가하였으나 Al_2O_3 는 기지재보다 낮은 항복강도 값을 나타내었다. 따라서, 강화재 TiO_2 를 첨가한 MMC의 인장강도 및 항복강도가 가장 우수한 것을 알 수 있었다.

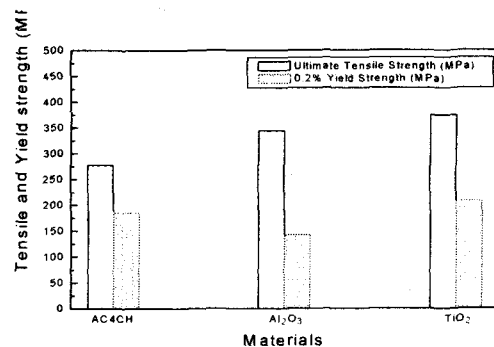


Fig. 2 Tensile and yield strength of AC4CH and MMC

3.2 피로균열진전속도에 미치는 응력비의 영향

Fig. 3 ~ Fig. 7은 응력비 R=0.05, R=0.1에서 기지재와 각각의 금속기 복합재료간의 피로균열진전속도 (da/dN)와 응력확대범위(ΔK)의 관계를 비교하여 양 대수 관계로 정리한 것이다. 여기서 Fig. 3은 AC4CH를 응력비에 따라 정리한 것을 ΔK 의 증가와 함께 da/dN가 증가하며 저 ΔK 에서 R=0.1의 경우 R=0.05에 비하여 증가하고 있으나 고 ΔK 로 갈수록 응력비의 영향이 적으며 균열진전속도가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 일반 연성재료의 균열진전거동과 유사하게 안정성장단계인 초기에는 응력비의 영향이 있다가 균열진전량이 커짐

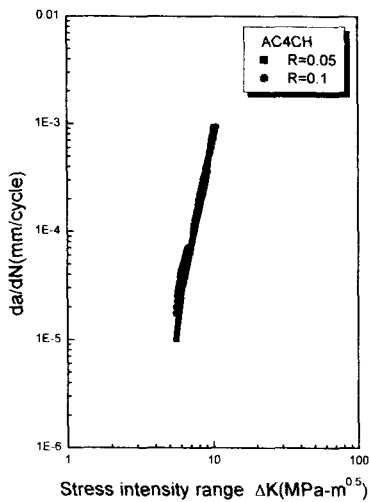


Fig. 3 Relations between fatigue crack growth rate and ΔK (AC4CH, R=0.05, R=0.1)

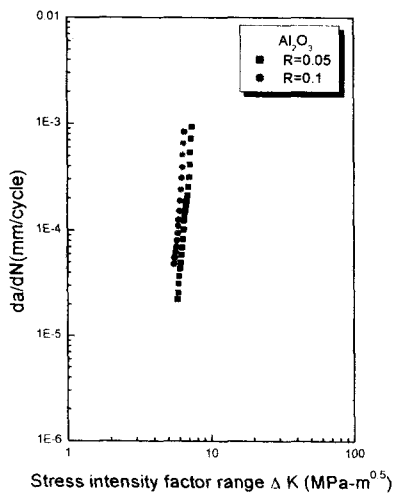


Fig. 4 Relations between fatigue crack growth rate and ΔK (Al_2O_3 , R=0.05, R=0.1)

에 따라 영향이 줄어드는 경향과 일치함을 알 수 있다. Fig. 4는 Al_2O_3 는 ΔK 와 da/dN는 응력비에 관계없이 균열진전속도는 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 고 ΔK 영역에서도 응력비의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 TiO_2 로써 ΔK 에 따른 균열성장속도는 Al_2O_3 에 비해 충분히 길게 나타나는 것을 알 수 있으며 저 ΔK 나 고 ΔK 영역 모두 응력비의 영향에 따라 지배되는 것으로 나타나고 있다.

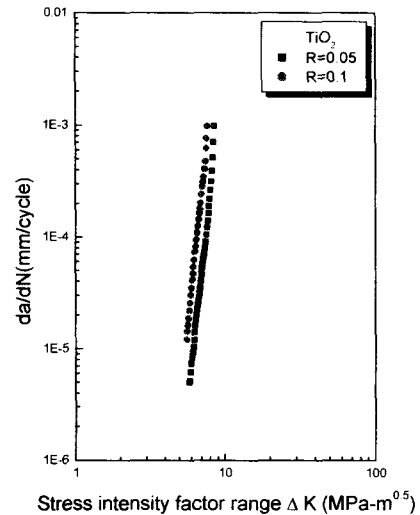


Fig. 5 Relations between fatigue crack growth rate and ΔK (TiO_2 , R=0.05, R=0.1)

3.3 동일한 응력비에 따른 피로균열진전속도와의 관계

Fig. 6 ~ Fig. 7은 응력비 각각 R=0.1, R=0.05에서 기지재와 각 MMC와의 피로균열진전속도 da/dN과 응력확대계수범위 ΔK 와의 관계를 나타내었다. Fig. 6는 응력비 R=0.1에서 각각의 금속기 복합재료들은 기지재에 비하여 직선으로 기울기가 증가된 것을 보여주고 있다. 이는 Paris영역(Regin II)에서 저 ΔK 에서는 모재와 TiO_2 는 비슷하게 진행되었으나 고 ΔK 에서는 기지재보다는 MMC가 균열진전속도가 더 빠르게 나타나는 결과는 Logsdon과 Liaw의 결과와 유사하다.⁷⁾ 이는 금속기복합재료의 취약성을 나타내는 것으로 보강재인 알루미늄 보레이더 휘스커를 사용하여 Regin II에서 피로균열진전의 지연효과를 기대했으나 응력비 0.1에서는 그 영향은 그다지 크게 나타나지 않았다. 그러나 Fig. 7에서 보는 것처럼 2단계 안정성장 구간에서는 응력비 0.1과는 달리 Regin II의 전반부에서 중반부까지는 기지재인 AC4CH가 피로균열진전속도가 빠르게 진전되는 것을 알 수 있었다. 따라서 휘스커 및 무기바인더인 TiO_2 의 영향으로

초기 균열의 생성은 균열이 진전 중간단계까지는 늦어지고 그 이후에는 빠른 균열진전속도를 나타내고 있는 것으로 생각되며 복합재의 전체 진전속도는 $Al_2O_3 > AC4CH > TiO_2$ 순으로 진전이 된다. 따라서 무기바인더의 종류에서는 TiO_2 가 가장 수명이 우수한 것으로 나타났으므로 이는 파면에서 더욱 깊은 고찰이 필요하다.

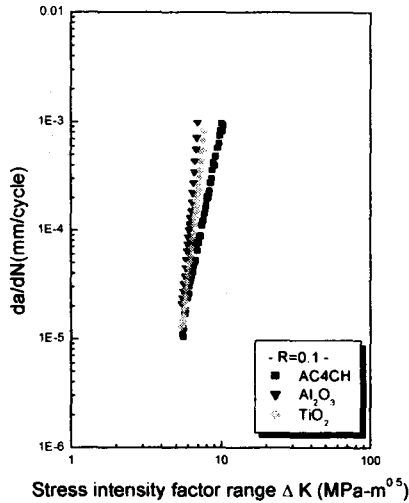


Fig. 6 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

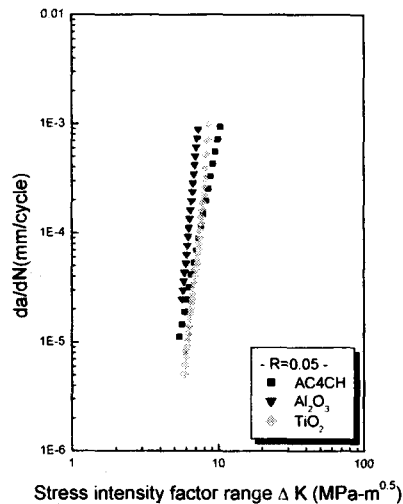


Fig. 7 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

3.4. 동일한 응력비에 따른 사이클과 균열길이와의 관계

Fig. 8은 응력비 $R=0.1$ 에서 각각의 재료에 대해서 피로 균열길기와 사이클과의 관계를 나타내었다. 기지재의 경우 1.03×10^5 사이클에서 파단되었으며 Al_2O_3 의 경우 3.4

$\times 10^4$ 에서 파단된 반면에 TiO_2 의 경우 1.09×10^5 에서 파단된 결과로 보아, 모재보다 사이클수가 TiO_2 금속기복합재료가 약간 증가한 것을 알 수 있었다. 이는 균열성장 초기에서 기지재보다 MMC가 진전이 지연된 것으로 생각된다. 그리고 연성인 모재에 취성인 재료를 보강재로 사용한 금속기복합재료의 취약성을 보여주듯이 모재에 비하여 금속기복합재료가 취성적인 파괴가 일어났음을 알 수 있다. Fig. 9는 응력비 $R=0.05$ 에서 각각의 재료에 대해서 피로균열진전 길이와 사이클과의 관계를 나타내었다. 모재가 1.5×10^5 에서 급속하게 파단되었으며 Al_2O_3 의 경우 3.4×10^4 에서 파단된 반면에 TiO_2 의 경우 2.2×10^5 사이클에서 급속하게 파단된 것을 알 수 있었다. 앞의 결과와 비교해 보면 TiO_2 의 경우 응력비의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 또한 반복횟수와 균열길이에 대한 결과에서 인장실험의 결과와 비교해 보면 인장강도와 피로균열진전특성을 본 결과와 비교한다면 TiO_2 경우가 기지재인 AC4CH 보다 기계적 특성은 뛰어나고 피로균열진전특성 또한 전체적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 무기바인더 중 TiO_2 의 경우는 기지재보다 기계적 특성의 증가는 물론 피로균열진전 특성도 아주 우수하므로 차후 TiO_2 에 관한 연구가 계속적으로 필요하다고 생각한다.

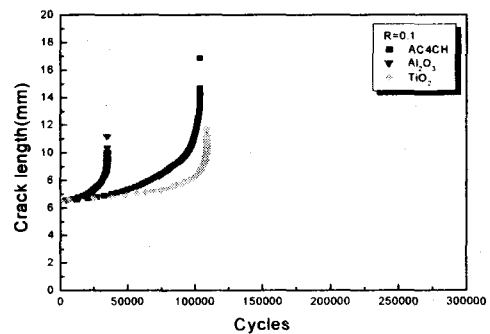


Fig. 8 Relations between crack length and cycles

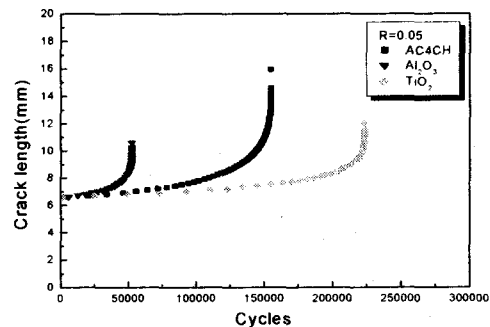


Fig. 9 Relations between crack length and cycles

Fig. 10은 AC4CH와 MMC인 Al₂O₃와 TiO₂와의 응력비 R=0.1일때의 안전성장에 해당하는 구역의 피로파면사진을 나타내고 있다. a)는 AC4CH의 파면으로서 파면이 거칠고 입계파면 양상을 확인할 수 있으며 부분적으로 스트라이에이션을 관찰할 수 있다. 그러나 b)와 c)의 경우 전체적으로 파면이 평탄한 취성파괴의 양상을 보이고 있으며, 부분적 스트라이에이션을 확인할 수 있으나 a)의 AC4CH와는 파괴양상이 확연히 차이가 나는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 응력비 R=0.05일때의 2단계 안전성장 구간의 파면사진을 나타내고 있다. a)는 AC4CH의 경우로써 부분적 스트라이에이션을 관찰할 수 있으나 Fig. 10의 R=0.1의 경우와 비교하면 비교적 조직이 안정화되어있다는 것을 알 수 있다. 그러나 MMC인 Al₂O₃와 TiO₂의 경우 R=0.1과 유사하게 파면의 거칠기가 평탄한 취성파괴양상을 확인할 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11에서 전체적인 파괴양식은 AC4CH의 경우는 파면이 전체적으로 거칠고 응력비에 따른 조직적 특성을 확인할 수 있으나 MMC의 경우는 전형적인 취성파괴 형식으로 응력비에 따른 조직적 특성을 확인하기 어렵다.

기지재 AC4CH에 알루미늄 보레이트 휘스커 프리폼에 무기바인더 종류 Al₂O₃, TiO₂를 달리하여 가압단조법으로 제작한 복합재료의 피로균열진전 특성을 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장강도는 기지재인 AC4CH보다 Al₂O₃가 24%, TiO₂가 34.8%씩 향상되어 강화재의 종류에 따라 강도가 크게 증가되었고, TiO₂의 인장강도가 가장 우수한 것으로 나타났다.

(2) 응력비가 0.1일 때 모재의 경우 N_f :1.03×10⁵cycle에서 파단되었으나 TiO₂의 경우 N_f :1.09×10⁵cycle에서 파단되었다. 그리고 응력비가 0.05일 때 모재는 N_f :1.54×10⁵cycle에서 파단되었으나 TiO₂의 경우 N_f :2.2×10⁵cycle에서 파단되었다. 이 결과로 보아 모재보다는 무기바인더 TiO₂를 첨가한 금속기 복합재료가 전체적인 피로균열진전특성은 우수함을 알 수 있다.

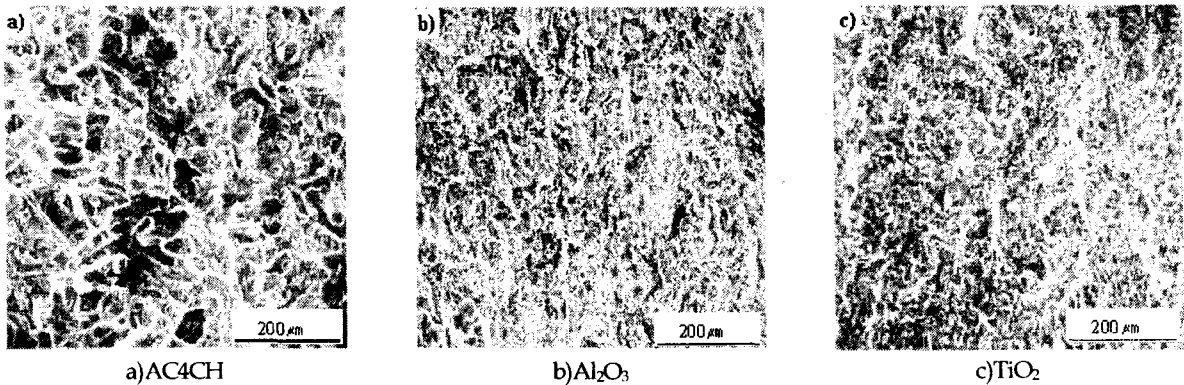


Fig. 10 SEM micrographs of fracture surface at R=0.1

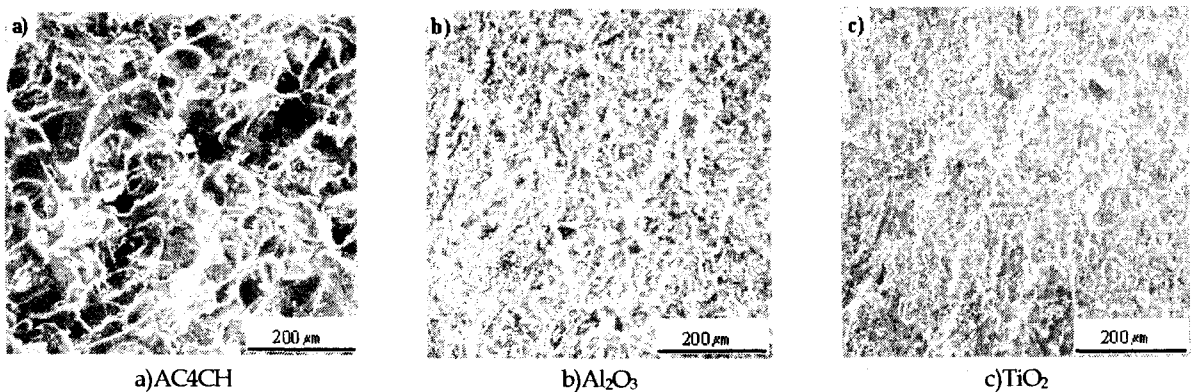


Fig. 11 SEM micrographs of fracture surface at R=0.05

(3) 응력비 0.1일 때 각 소재들의 진전속도는 $Al_2O_3 > AC4CH > TiO_2$ 순으로 나타났으며 응력비 0.05일 때도 동일한 결과를 보였다. 하지만 응력비의 영향은 TiO_2 가 가장 현저함을 알 수 있었다.

(4) RegInII에서는 AC4CH보다 금속기복합재료, TiO_2 가 중반부까지는 균열진전을 이 지연되는 것을 알 수 있었다. 금속기복합재료들 중에서 균열진전속도가 $Al_2O_3 > TiO_2$ 순으로 나타났으며, 두 복합재료간의 균열진전의 현저한 차이를 보였다.

(5) AC4CH의 파면은 전체적으로 거칠고 응력비에 따른 조직적 특성을 확인 할 수 있고, MMC의 경우 평탄한 취성파면을 형성하며 응력비에 따른 조직적 특성을 확인 할 수 없었다.

후 기

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

참 고 문 헌

홍창선(1994), "복합재료 응용기술 및 연구", 대한기계학회지, 제34권, 제5호, pp.334~341.

엄문광, 이우일(1994), "복합재료와 성형공정", 대한기계학회지, 제34권, 제5호, pp.310~325.

박익민, 최정철(1984), 복합재료, 반도출판사, 개정1판 MG.
.Mckimpson, T.E.Scott(1989), Material Science and Engineering, A107.

落合莊郎, 長村, 光造(1988), "アルミニウム基 複合材料", 輕金屬, 第38卷 第10號, pp.658- 694.

송정일, 양유창, 봉하동, 한경섭(1994), "Al/ Al_2O_3 /SiC 금속 복합 재료의 파괴 인성과 피로균열전파거동", 한국복합 재료학회 춘계학 술대회논문집. pp. 146 -152.

Nabumi Saito, Masri Nakanishim and Yoshinori Nishida(1994), "Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Aluminum Borate Whisker Reinforced 6061 Aluminum Alloy", Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 44, No. 2, pp. 86~90.

W.A. Logsdon and P.K. Liaw(1896), "Tensile, fracture toughness and fatigue crack growth rate properties of silicon carbide whisker and particulate reinforced aluminum metal matrix composites", Eng. Frac. Mech. Vol. No. 5, pp. 737-751,