

자동차엔진용 금속기 복합재료의 피로균열거동에 관한 연구

박원조¹⁾ · 허선철^{*1)} · 정재욱¹⁾ · 이해우²⁾ · 부명환³⁾

경상대학교 기계항공공학부¹⁾ · 삼성중공업²⁾ · 전력연구원³⁾

A Study on Fatigue Crack Behavior of Metal Matrix Composites for Automobile Engine

Wonjo Park¹⁾ · Sunchul Huh^{*1)} · Jaewook Jung¹⁾ · Haewoo Lee²⁾ · Myunghwan Boo³⁾

¹⁾School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Geongnam 650-160, Korea

²⁾Samsung Heavy Industries, Koje Shipyard, 530, Jangpyung-Ri, Sinhyun-Up, Koje-City, Geongnam 656-710, Korea

³⁾Korea Electric Power Research Institute, 103-16, Munji-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-380, Korea

(Received 9 January 2003 / Accepted 2 July 2003)

Abstract : Metal matrix composites had generated a lot of interest in recent time because of their high specific strength and stiffness in specific properties. It was also highlighted as the material of frontier industry because strength, heat-resistance, corrosion-resistance and wear-resistance were superioered. In this study, the strength properties of Al₁₈B₄O₃₃/AC4CH composites were represented mixing the binder of SiO₂. It was also fabricated by squeeze casting. Al₁₈B₄O₃₃/AC4CH was fabricated at the melt temperature of 760°C, the perform temperature of 700°C and mold temperature of 200°C under the pressure of 83.4MPa. Consequently, fatigue life was observed roughly in the order of AC4CH > nobiner > SiO₂, independently on crack propagation direction and stress ratio.

Key words : Metal matrix composites(금속기 복합재료), Squeeze casting(가압주조), Sinusoidal wave(정현파), Stress intensity factor range(응력확대계수범위), Fatigue crack growth(피로균열진전)

1. 서론

복합재료는 1940년대에 개발된 유리섬유 복합재료를 시발점으로 출발하여, 선진국에서는 2000년대에 전투기 자체중량의 40%까지 복합재료화 한다는 계획을 추진 중이며 우주항공, 방위산업, 자동차, 산업분야 등에 중요한 위치를 차지하고 있다.¹⁻⁴⁾

국내에서도 자동차 산업의 성장과 더불어 고효율 디젤 및 가솔린엔진 개발의 일환으로 금속기복합재료의 사용이 대두되고 있고, 최근 소수의 대학, 연구소 및 산업체에서는 복합주조법 또는 가압주조법을

통하여 금속기 복합재료를 개발하고 있다.⁵⁻⁸⁾

가압주조법(squeeze casting)은 조형성과 생산성이 우수하여 많이 사용하고 있으나, 제조시 예열온도, 용탕온도, 용탕가압력 등의 제반 조건에 의해 프리폼의 내부는 변형 및 미소크랙이 일어날 수 있으며 이를 방지하여 프리폼(preform)의 강도를 향상시키는 것은 대단히 중요하다.⁹⁾

따라서, 본 연구에서는 기지재(matrix)인 AC4CH와 유기 binder만으로 제조된 금속기 복합재료(이하 nobinder)에 무기 binder인 SiO₂첨가하여 제작한 복합재료에 대하여 기계적 특성 및 피로균열전파거동을 연구하였다.

*To whom correspondence should be addressed.
schuh@nongae.gsnu.ac.kr

2. 시험재료 및 방법

2.1 시험재료

AC4CH는 순수한 Al-Si-Mg계 합금에서 Fe의 함량을 0.2% 이하로 인성을 높인 알루미늄 합금으로서 주물용 합금의 중간정도의 강도를 나타내지만 연신율이 커서 인성이 우수하고 주조성도 양호하며, 내식성이 우수한 합금으로서 현재 자동차용 휠용 합금으로 이용되고 있으며 복합재료의 기지재료로 널리 사용되고 있다.¹⁰⁻¹²⁾

Table 1은 기지재인 AC4CH의 화학적 성분을, Table 2는 기계적 물성치를 나타내었다. 그리고 강화재로 사용된 알루미늄 보레이트 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 Mechanical 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)
Al ₁₈ B ₄ O ₃₃	0.5~1.0	10~30	8	400

2.2 금속기 복합재료 제조

예비성형체는 알루미늄 보레이트 휘스커(Al₁₈B₄O₃₃)에 이온수 1000ml를 교반하면서, 폴리비닐알콜 및 응집제를 첨가하고, 충분히 교반된 슬러리(slurry) 상태에서, 진공탈포함으로써 기포를 제거한 후, 금형에서 흡입펌프로 이온수를 여과시키면서 압축하여 소정의 프리폼 형상을 완성한다. 실험에 사용된 휘스커의 체적율은 20%로 고정하였고, 이에 따라 첨가한 바인더 SiO₂의 첨가량은 Table 4와 같다.

이렇게 제작된 프리폼에 대하여 Fig. 1과 같은 가압장치를 이용하여 가압주조법에 의하여 복합재를 제작하였다. 제작조건은 프리폼을 약 700℃로 가열

Table 4 Specification of preform

Type	Raw material	Blended quantity
Aluminum borate whisker	9Al ₂ O ₃ · 2B ₂ O ₃	120g
Ion water		1000ml
Organic bind	polym vinyl alcohol 10%	5ml
Coagulation	polyma 2%	5ml
SiO ₂	46%	13g

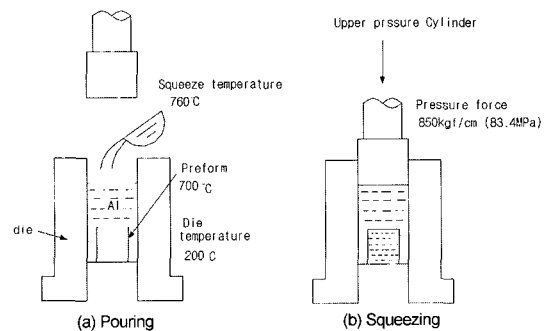


Fig. 1 Process of squeeze casting

하여, 200℃로 가열 된 금형내에 고정한 후, 760℃로 가열 된 용탕 금속을 금형내에 주입한다. 이때 가압 조건은 프레스 장치에서 가압력을 83.4MPa, 가압속도를 50mm/sec, 가압시간은 40초의 조건으로 가압한 후, 응고시켜 금속기복합재료를 제작하였다.

2.3 실험방법

인장실험과 피로균열진전실험을 위한 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 (a)는 인장시험편으로서 실험은 ASTM E-8¹³⁾ 규정에 의거 10ton_r MTS으로 실시하였으며, 변위제어모드에서 크로스헤드 스피드는 0.1mm/min, 대기중의 실온에서 실시하였다. Fig. 2의 (b)는 피로 균열진전시험편으로써 실험에 사용된 시험편은 half-size CT형 시험편으로 W = 25mm, 두께는 B = 12.5mm, 하중제어 방식으로 응력비 R = 0.05 및 0.1과 주파수 10Hz, 정현파로 실험하중은 2.3 kN으로 일정하게 하였다.

또한, 예비크랙의 삽입조건은 8Hz, 정현파 및 일정하중진폭으로, 노치선단에서 1.5mm로 유지시켰으며 초기노치균열길이 a와 시험편의 폭 W의 비(a/W)가 0.26으로 하였다. 크랙길이의 측정 COD 게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 행하였다. 피

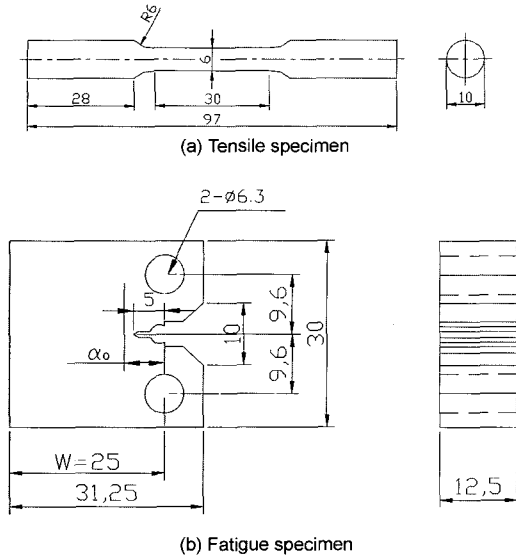


Fig. 2 Configuration of test specimen (unit:mm)

로균열진전 실험은 ASTM E647-95a¹⁴⁾의 규정에 따라 일정하중진폭 하에서 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장강도 특성

Fig. 3은 기지재 및 nobinder, SiO₂를 첨가한금속기 복합재료에 대하여 각각 3개 이상의 시험편에 대하여 인장시험한 후 평균값에 대한 결과를 나타내었다. AC4CH의 인장강도가 약 278MPa, nobinder의 인장강도는 373MPa, SiO₂는 307MPa로서 복합재료의 인장강도가 각각 기지재보다 34%, 10%씩 향상된 것을 알 수 있다. 특히, 유기바인더만을 첨가한 nobinder 복합재료의 최대인장강도가 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다. 무기바인더는 주로 예비성형체의 강도향상을 위하여 첨가하고, 유기바인더는 강화재의 균일한 분산을 위해 첨가되나 과도한 바인더는 복합재료의 기계적 특성을 저하시킨다고 보고하고 있다.¹⁵⁾

본 연구에서도 무기바인더 SiO₂의 첨가로 인한 강도 향상을 기대하였으나 오히려 nobinder 보다 강도가 저하하였으므로, 이 부분은 첨가량, preform의 제조조건 등 추가적인 연구가 필요하다. Fig. 4는 인장시험 후의 파단면 사진을 나타내고 있다. Fig. 4의

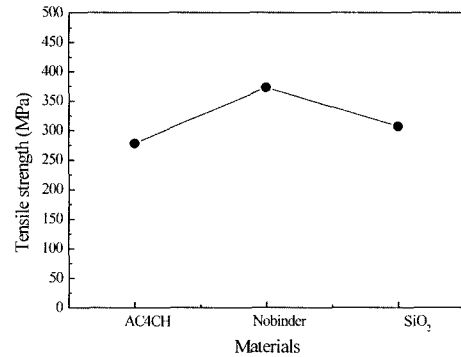


Fig. 3 Tensile strengths of AC4CH and MMC

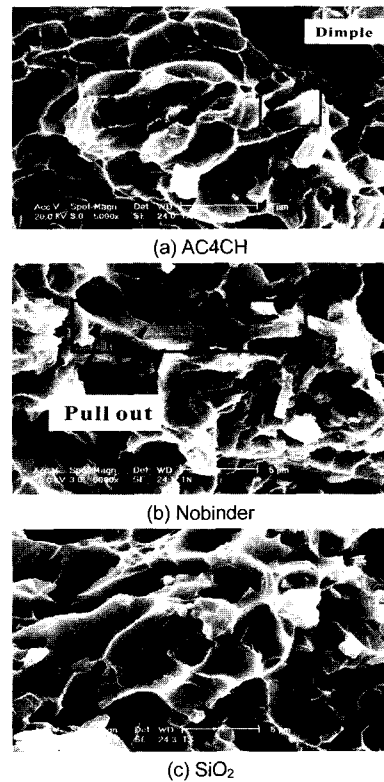


Fig. 4 SEM photographs of tensile fractured plane

(a)는 AC4CH의 경우로서 전형적인 연성 딴플(dimple) 파면이 지배적인 파괴양식을 나타내고 있다. Fig. 4의 (b)는 nobinder의 경우로서 전형적인 휘스크강화 복합재료의 파괴양상인 휘스크 계면파괴와 휘스커가 뽑혀져나간 pull-out 현상을 관찰할 수 있다. Fig. 4의 (c)는 무기바인더 SiO₂를 첨가한 복합재의 파면으로 연성 dimple과 휘스커의 pull-out 현상이 혼재된 형태의 파면을 나타내고 있다.

3.2 피로균열진전속도에 미치는 응력비의 영향

Fig. 5 ~ Fig. 7은 응력비 R=0.05, R=0.1에서 기지재와 금속기 복합재료간의 피로균열진전율(da/dN)과 응력확대범위(ΔK)의 관계로 비교하기 위해 양대수 관계로 정리한 것이다. 실험은 각 조건마다 3~4개 시험편에 대하여 실험한 후 각 데이터의 평균값에 해당되는 결과값에 대하여 정리한 것이다. Fig. 5는 AC4CH를 응력비에 따라 피로균열진전율과 응력확대범위의 관계를 나타내고 있다. ΔK 의 증가와 함께 da/dN가 증가하고 있으며 저 ΔK 에서 R=0.1의 경우가 R=0.05에 비해서 증가하고 있으나, 고 ΔK 로 갈수록 응력비의 영향이 적고, 균열진전속도가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 일반 연성재료의 균열진전거동과 유사하게 안정성장단계인 초기에는 응력비의 영향이 있다가 균열진전량이 커짐에 따라 영향이 줄어드는 경향과 일치함을 알 수 있다.¹⁶⁾

Fig. 6은 nobinder를 응력비에 따라 피로균열진전율과 응력확대범위의 관계로 비교하여 양대수 관계로 정리하였다. nobinder의 경우 동일 ΔK 에서 응력비 R=0.1의 경우가 균열진전속도가 크다는 것을 알 수 있고, 저 ΔK 영역에서는 응력비의 영향이 크나 고 ΔK 로 갈수록 응력비의 영향이 작아지고 있다. 그리고 Fig. 5와 비교해 보면 기지재의 경우 고 ΔK 에서 응력비의 영향이 거의 없으나 nobinder의 경

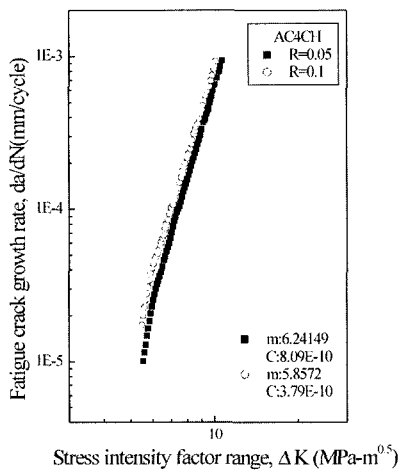


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth rate and ΔK (AC4CH, R=0.05, R=0.1)

우 고 ΔK 에서도 응력비의 영향이 있으며 저 ΔK 에서는 응력비의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 SiO₂를 응력비에 따라 피로균열진전율과 응력확대범위의 관계를 나타내고 있다. 본 결과에서는 응력비 R=0.05, R=0.1의 경우 모두 ΔK 와 da/dN의 값은 기지재와 nobinder에 비해서 크게 증가하고 있다. 응력비 R=0.1과 R=0.05를 비교해보면 SiO₂의 경우 응력비에 상관없이 균열진전속도는 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

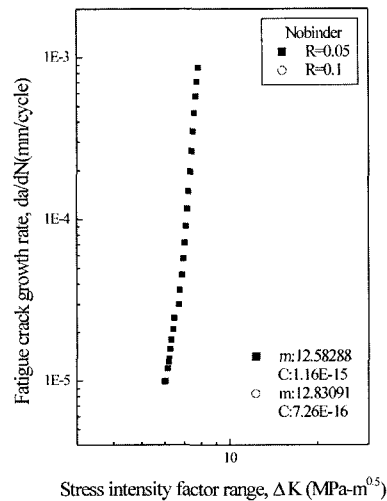


Fig. 6 Relation between fatigue crack growth rate and ΔK (nobinder, R=0.05, R=0.1)

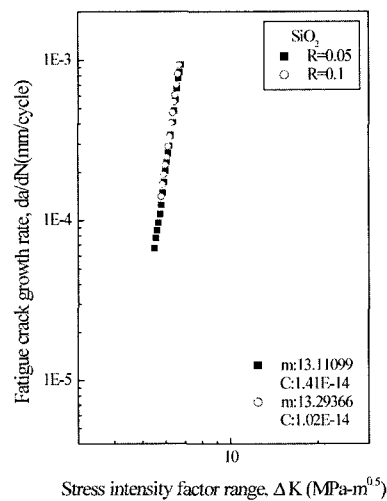


Fig. 7 Relation between fatigue crack growth rate and ΔK (SiO₂, R=0.05, R=0.1)

3.3 동일한 응력비에 따른 피로균열 진전속도의 관계

Fig. 8~Fig. 9는 응력비 R=0.1, R=0.05에서 matrix와 각 MMC와의 피로균열진전속도 da/dN과 응력확대계수범위 ΔK와의 관계를 나타내었다. Fig. 8은 응력비 R=0.1에서 각각의 금속기 복합재료들은 matrix에 비해 직선의 기울기가 증가된 것을 보여주고 있다. 이는 Paris영역(Regin II)에서 모재에 비해 금속기복합재료가 균열진전을 더 빠르게 나타내는 결과는 Logsdon과 Liaw의 결과와 유사하다.¹⁷⁾

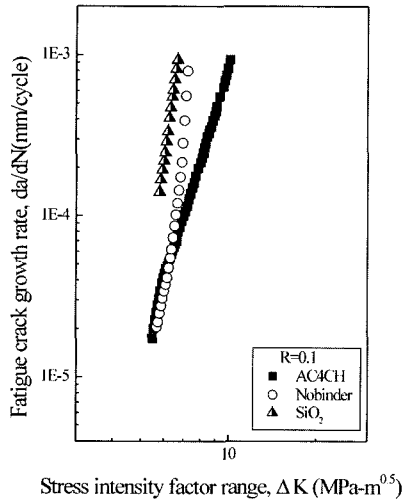


Fig. 8 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

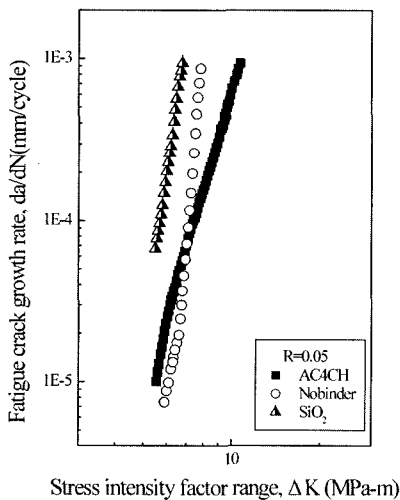


Fig. 9 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

이는 금속기복합재료의 취약성을 나타내는 것으로 보강재인 알루미늄 보레이트 휘스커를 사용하여 Regin II에서 피로균열진전의 지연효과를 기대했으나 그 영향은 그다지 크게 나타나지 않았다. 그러나 Fig. 9에서 보는 것처럼 2단계 안정성장 구간에서는 전체적으로 복합재료의 피로수명이 감소하며 응력비 0.1과는 달리 Regin II의 전반부에서 기지체인 AC4CH에 비해 높은 ΔK에서 진전이 시작되는 것을 알 수 있다.

따라서 휘스커의 영향으로 초기 균열의 생성은 늦게되나 균열이 진전단계에서는 빠른 균열진전속도를 나타내고 있는 것으로 생각되며 복합재의 전체 진전속도는 SiO₂ > nobinder > AC4CH 순으로 진전이 되고 있다. 이는 AC4CH의 경우 연성재질인데 반해 복합재료의 경우 휘스커 보강으로 인한 취성화로 인한 것과 휘스커와 매트릭스의 계면에서 debonding으로 인하여 균열진전 속도가 빠른 것으로 생각한다.

3.4 응력비에 따른 피로파면

AC4CH와 nobinder, 무기 바인더 SiO₂를 첨가하였을 때의 피로균열진전 거동을 알아보기 위하여 균열의 안정성장 단계인 Resign II에 대하여 피로파면 사진을 나타내었다. 그리고 같은 조건에서의 비교를 위하여 동일 ΔK 영역에 대한 파면사진을 나타내었다.

Fig. 10은 AC4CH에 대하여 응력비 R=0.05, 0.1에 대한 피로파면 사진을 나타내고 있다. 응력비 0.05, 0.1 모두 연성파면인 스트라이에이션을 확인할 수 있으며, 0.1에 비해 0.05의 경우가 좀 더 치밀한 스트라이에이션 분포를 나타내었다.

Fig. 11은 nobinder에 대하여 응력비 R=0.05, 0.1에 대한 피로파면 사진을 나타내고 있다. 전체파면 모두 휘스커의 pull-out을 관찰할 수 있으며 R=0.1의 경우가 더 거친 파면을 나타내었다. Fig. 12는 무기바인더 SiO₂에 대하여 응력비 R=0.05, 0.1에 대한 피로파면 사진을 나타내고 있다. 각 응력비 모두 휘스커의 pull-out을 관찰할 수 있으며 특히 R=0.1의 경우 부분적으로 스트라이에이션을 나타내고 있고, 기지체에 다량의 바인더(binder)가 산포되어 있다는 것을 알 수 있다.

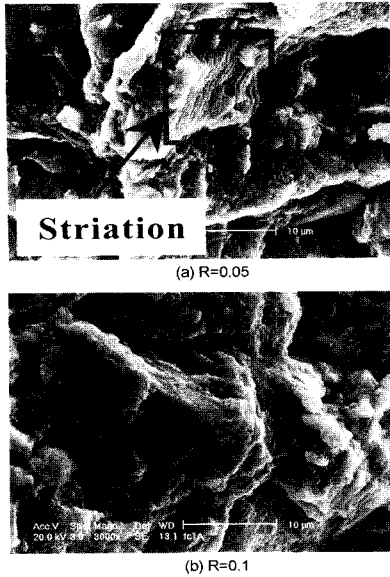


Fig. 10 SEM photographs of fatigue fracture surface in AC4CH ($\times 3000$)

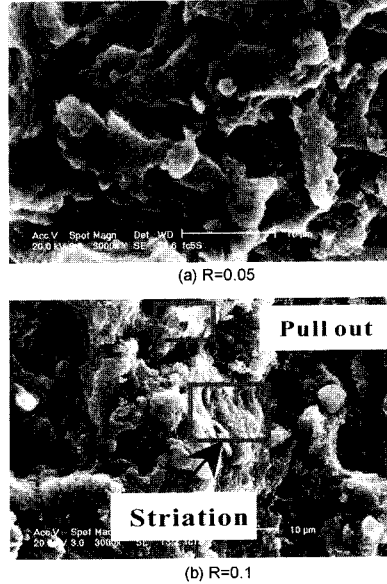


Fig. 12 SEM photographs of fatigue fracture surface in SiO₂ ($\times 3000$)

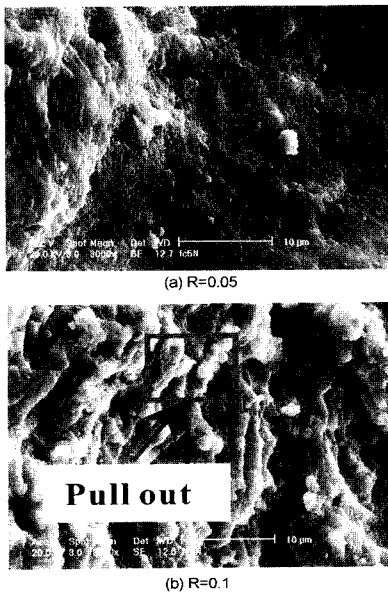


Fig. 11 SEM photographs of fatigue fracture surface in nobinder ($\times 3000$)

바인더의 경우 휘스커와 휘스커 사이에 골고루 산포하여 bridging 역할을 해야하나 파면에서와 같이 매트릭스에 산포되어 있으므로 무기바인더 첨가의 효과를 볼 수 없었으며 차후 제조조건이나 첨가량등을 달리한 연구가 추가되어야 할 것으로 생각한다.

그리고, Fig. 10~Fig. 12 에서 AC4CH, nobinder, SiO₂의 파면 양상은 많은 차이를 나타내고 있다. 즉, AC4CH는 전형적인 연성파면의 스트라이에이션을 관찰할 수 있으며, 휘스커를 강화한 nobinder 및 SiO₂ 모두 복합재의 파면 양상인 휘스커의 pull-out을 관찰할 수 있으며, 특히 SiO₂의 경우는 부분적으로 스트라이에이션을 관찰할 수 있다.

4. 결론

알루미늄 보레이드 휘스커 프리폼에 알루미늄 AC4CH를 스퀴즈 캐스팅으로 침투시켜 금속기복합 재료를 제작하고, 휘스커에 무기바인더인 SiO₂를 첨가시킨 복합재료의 균열진전속도에 미치는 응력비의 영향에 관한 연구결과 다음과 같다.

- 1) 기지재인 AC4CH의 인장강도 보다 nobinder가 34%, SiO₂가 10%씩 향상되었으며 nobinder의 인장강도가 가장 우수한 것으로 나타났다.
- 2) 응력비 0.1일 때 소재의 진전속도는 SiO₂ > nobinder > AC4CH순으로 나타났으며 응력비 0.05 일 때도 동일한 결과를 보였다.
- 3) 무기바인더 SiO₂의 경우 nobinder 보다 강도 및 피로특성이 저하하였으므로 무기바인더 첨가에 따

른 강도향상을 확인할 수 없었다.

4) 피로파면에서 AC4CH는 전형적인 연성파면인 스트라이에이션, nobinder는 휘스크의 pull-out, 무기 바인더 SiO₂는 휘스크의 pull-out과 스트라이에이션의 혼재가 지배적인 파면양상을 나타내었다.

후 기

본 논문은 경상대학교 지역대학육성사업단의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

Reference

- 1) N. Saito, M. Nakanishim, Y. Nishida, "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, 1994.
- 2) E. J. Jun, C. R. Joe, "Composite Application to Car," Journal of KSAE, Vol.13, No.3, pp. 1-5, 1991.
- 3) B. C. Koh, J. M. Choi, O. K. Kwon, "A Study of Estimating the Mechanical Properties of Light-weight Composites for Automobile," Journal of KSAE, Vol.14, No.6, pp.1-8, 1992.
- 4) D. G. Lee, P. K. Oh, "Design and Manufacturing of Composite Automotive Parts," Journal of KSAE, Vol.16, No.2, pp.45-54, 1994.
- 5) C. S. Hong, "Technology and Status of Composites Applications," Journal of the KSME, Vol.34, No.5, pp.334-341, 1994.
- 6) S. K. Hong, J. Y. Yun, J. C. Choi, "Fabrication of Aluminum Alloy Composites Reinforced with SiC whisker and Al₂O₃-SiO₂ Short Fiber by Squeeze Casting," Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol.17, No.1, pp.28-35, 1997.
- 7) H. K. Ahn, "Static and Dynamic Toughness Evaluation in SiC/6061 Al Composite," Korean Journal of Materials Research, Vol.8, No.6, pp.565-572, 1998.
- 8) Y. G. Choi, T. S. Lee, M. H. Lee, "Fatigue Crack Propagation Behavior and Fracture Mechanism of Short Fiber Reinforced Metal Matrix Composites," Journal of the KSME, Vol.19, No.11, pp.2817-2829, 1995.
- 9) M. K. Eom, W. I. Lee, "Composite Materials and Their Manufacturing Processes," Journal of the KSME, Vol.34, No.5, pp.310-325, 1994.
- 10) I. D. Yeo, C. H. Lee, "A Study on Interfacial Reactions of δ -Al₂O₃ Short Fiber Reinforced AC4C Matrix Composite Materials Manufactured by Squeeze Casting Method," Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol.14, No.4, pp.345-352, 1994.
- 11) T. W. Lim, K. S. Han, "Manufacture and Mechanical Property Evaluation of Al Matrix Composite Material," 1991 KSAE Autumn Conference Proceeding, pp.126-134, 1991.
- 12) I. D. Yeo, C. H. Lee, "Influence of Binder and Applied Pressure on Tensile Strength of AC4C/Al₂O₃ Composites Made by Squeeze Casting Process," Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol.15, No.2, pp.138-145, 1995.
- 13) ASTM E-8, "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.01, pp.56-76, 2000.
- 14) ASTM E647-95a, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.01, pp.557-593, 2000.
- 15) K. C. Kim, Y. S. Cho, S. H. Lee, I. M. Park, "Microstructure and Mechanical Properties of Squeeze Cast AZ91 Mg/Al Borate Whisker Composites," Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol.16, No.6, pp.537-549, 1996.
- 16) W. A. Logsdon, P. K. Liaw, "Tensile, Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Rate Properties of Silicon Carbide Whisker and Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites," Eng. Frac. Mech., Vol.5, No.5, pp.737-751, 1996.
- 17) Y. S. Kim, D. M. Kang, G. H. Sin, "Fatigue Crack Propagation Formula regard of Crack Close Phenomenon," Transactions of Korean Institute for Industrial Safety, Vol.6, No.4, pp.81-87, 1991.