

Al₁₈B₄O₃₃ 휘스커 강화 금속기 복합재료의 파괴인성에 관한 연구

박성호 **, 최용범 **, 박원조*, 허선철*, 윤한기***

*경상대학교 기계항공공학부

**경상대학교 대학원

***동의대학교 기계산업 시스템 공학부

A Study on Fracture Toughness of Metal Matrix Composites Reinforced with Al₁₈B₄O₃₃

Sung-Ho Park *, Yong-Bum Choi*, Won-Jo Park **, Sung-Chul Huh**

* School of Mechanical and Aerospace Engineering Kyeongsang National University, Tongyoung, Kyeongnam, 650-160 Korea

** School of graduate Engineering Kyeongsang National University, Tongyoung, Kyeongnam, 650-160 Korea

*** Dept of Mechanical Engineering, National University Dong-Eui, Korea

KEY WORDS: Metal Matrix Composites(금속기복합재료), Squeeze casting(가압단조법), Fracture toughness(파괴인성), Inanimate binder(무기바인더)

ABSTRACT: In recent years, the study of metal matrix composite has increased specially, aluminum alloy, research and development are briskly progress to find new metal matrix composite. this study is following the this purpose; This study is used metal matrix composite that was produced by matrix, AC4CH. and reinforcement Al₁₈B₄O₃₃ metal matrix composite to add Al₂O₃, TiO₂ for strengthen of binding together among the Whisker. Each Metal matrix composite is produced using the squeeze casting method. Fracture toughness test was in accordance with the provisions of ASTM E399; Specimen was produced half-size CT specimen W=25mm, B=12.5mm, Cross head speed 0.05mm/min in room temperature. The plane strain fracture toughness K_{IC} is 8.7MPa·m^{0.5} for Al₁₈B₄O₃₃/AC4CH, 9.28MPa·m^{0.5} for Al₁₈B₄O₃₃/AC4CH added TiO₂, and Al₂O₃ but AC4CH alloy was violated the critical stipulated by ASTM standard for a valid measurement of K_{IC}. In case of, it was performed J_{IC} test instead of K_{IC} based on ASTM E 1820

1. 서 론

최근 차세대 첨단재료로서 기존의 금속재료에 비해 월등한 성질을 갖는 새로운 제조기술 및 재료개발에 대한 요구가 점차 증가됨에 따라 복합재료에 대한 요구가 점차 증가됨에 따라 복합재료에 관한 연구 및 개발이 활발히 진행되어 있다. 기존 금속재료로서 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. 그 중 금속재료에 세라믹 섬유나 분말, 휘스커 등으로 강화하여 재료의 강도 및 강성을 보완하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.(박익민 외, 1984, 박익민, 1991)

특히, 금속기 복합재료(MMC: metal matrix composites)는 우주항공 분야에서 광범위하게 실용화되고 있으며, 비강도, 내열성, 내마모성 및 내구성 등의 기계적 특성이 우수하여 자동차 부품이나 엔진부와 구동축, 브레이크 시스템에도 사용되며 항공기 부품으로도 활용되고 있다.(落合莊郎, 長村, 光造, 1988.)

제1저자 박원조 연락처: 경남 통영시 인평동 445번지

E-mail : wjpark@nongae.gsnu.ac.kr

TEL : (055) 640-3183 FAX : (055)640-3811

이와같이 성능이 향상된 강화섬유와 기지재가 개발되어 더욱 더 고기능성을 가진 복합소재가 연구되고 있으며 경제적인 성형, 제작기법에 대한 연구가 많은 관심을 끌고 있다.(Ding,, 2001)

금속기 복합재료는 제조공정의 복잡성, 높은 비용, 낮은 파괴인성치와 파괴에 이를 때 까지 변형이 적은 문제 때문에 그 개발과 응용이 제한적이다. 최근 단섬유강화 금속기복합재료는 등방성 물성을 갖게 하는 특성을 갖고 있고 경제적이며, 조 방법도 종래의 주조법, 분말 야금법등의 금속주조법을 그대로 사용할 수 있는 잇점을 갖고 있다. 따라서 단섬유 강화 금속복합재료는 엔지니어링 분야에서 더욱더 많은 응용이 될 것이다.

또한 MMC의 제작기법중 가압단조법은 강화재를 예비성형체(preform)로 제작한 후, 용융상태의 기지재를 함침(infiltration)시켜 성형하는 방법으로 주조와 단조를 동시에 병행할 수 있고 제조방법이 간단하며 단시간에 정밀성형부품을 제조할 수 있을 뿐만 아니라 가압력에 의해 강화재와 기지재간의 결합력을 향상시켜 치밀한 미세조직을 얻을 수 있어서 기계적 특성을 크게 개선시킬 수가 있다.(西野直久, 砥線眞一, 1995) 그러나 현재는 금속복합재료의 제조공정의 기술개발에만 치우쳐 이들을 구조물에 적용하는데 필수적인 안정설계의 필수조건인 파괴인성에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 실제 MMC가 적용되는 구조물은

대개는 자동차나 항공기의 경량화에 요구되는 필수부품으로 응용되어 과대하중을 받거나 반복하중을 받아 피로파괴의 양상을 보이게 됨을 볼 때 그 중요성은 더욱 절실하다 하겠다. (송정일 외 1994)

따라서, 본 연구에서는 알루미늄 보레이터 휘스커($Al_{18}B_4O_{33}$)를 강화재로 하고 AC4CH를 기지재로 하여 가압단조법에 의해서 금속기 복합재료를 제작하였다. 휘스커간의 결속력을 향상시키고 가압단조시 발생하기 쉬운 예비성형체의 변형을 억제하기 위해 무기바인더인 TiO_2 , 그리고 Al_2O_3 를 첨가하여 각각의 금속기 복합재료를 제작하여 기지재인 AC4CH와 MMC복합재료의 파괴인성치와 파면사진을 통하여 파괴형태를 고찰하였다.

2. 시험재료 및 방법

2.1 시험재료

본 연구에 사용된 기지재인 AC4CH는 순수한 Al-Si-Mg계 합금에서 Fe의 함량을 0.2% 이하로 인성을 높인 알루미늄 합금으로서 주물용 합금의 중간정도의 강도를 나타내고 있지만 연신율이 커서 인성이 우수하고 주조성도 양호하며, 내식성이 우수한 합금으로서 복합재료의 기지재료로 많이 사용되고 있다. (菅沼克昭, 藤田昭, 佐佐木元, 鈴木信幸, 1991) Fig.1은 시험편의 일부를 절취하여 15%의 회염산에 보름동안 에칭 시킨 후, 휘스커만을 추출하여 SEM을 이용하여 관찰하였다. a)에서 보듯이 휘스커는 일정한 방향성을 가지고 있지 않다는 것을 알 수 있으며, b)는 부분 확대사진으로서 휘스커의 표면이 깨끗하고 매끈하다는 것을 알 수 있었다. Table.1은 기지재인 AC4CH의 화학적 성분을 나타내고 있으며, Table.2는 기계적 물성치를 나타내고 있다. 그리고 Table.3은 강화재로 사용된 알루미늄 보레이터 휘스커의 기계적 물성치를 나타내고 있다.

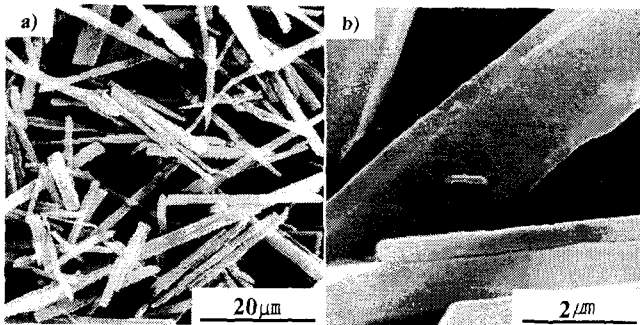


Fig. 1 SEM photographs of aluminum borate whiskers

Table.1 Chemical composition 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 Basic properties of aluminum borate whisker

Material	Dia. (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 프리폼제작 및 스퀴즈 캐스팅 방법

프리폼 제작조건은 Table.4와 같다. 예비 성형체는 알루미늄 보레이터 휘스커 ($Al_{18}B_4O_{33}$)의 체적율을 25%로 하였고, 휘스커의 중량 120g을 다음 식에 의해 계산하였다.

Table.4 Specification of preform

Type	Raw material	Blended quantity
Aluminum borate whisker	$9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$	120g
Ion water		1000ml
Organic binder	poly vinyl alcohol 10%	5ml
Coagulation	polyma 2%	5ml
Inorganic binder	Al_2O_3, TiO_2	13g

$$\text{휘스커제작} \times \text{휘스커의 체적율} \times \text{휘스커의 밀도} = 120g$$

휘스커 중량에 대한 이온수 1000ml를 교반하면서, 폴리비닐알콜 및 응집제를 첨가하고, 충분히 교반된 슬러리(sully) 상태에서 슬러리 속의 기포를 제거하기 위해서 진공탈포처리 하였으며, 프리폼 금형에서 흡입펌프로 이온수를 여과시키면서 압축하여 소정의 프리폼 형상을 제조하였다. 그 후, 3일 정도 자연 건조하고 소결로에서 1100 $^{\circ}C$ 조건으로 2시간 소결(sintering)한 후, 노냉하여 제작하며, 제작된 프리폼의 크기는 100 \times 110 \times 25(mm)이다. 가압단조법의 제조과정은 Fig.2에 나타내었다. 제작한 프리폼은 용해된 기지금속과 강화재간의 젖음성을 향상시키기 위하여 약 700 $^{\circ}C$ 로 가열하여, 압축단조장치의 금형 내에 고정하고, 이 때의 금형 온도는 200 $^{\circ}C$ 이며, 760 $^{\circ}C$ 의 용탕을 금형에 주입하여 프레스 장치에서 가압력을 83.4MPa, 가압속도를 50mm/sec, 가압시간은 40초의 조건으로 가압하여 프리폼의 공극에 용탕을 주입시킨 후, 응고시켜 금속기복합재료를 제작하였다.

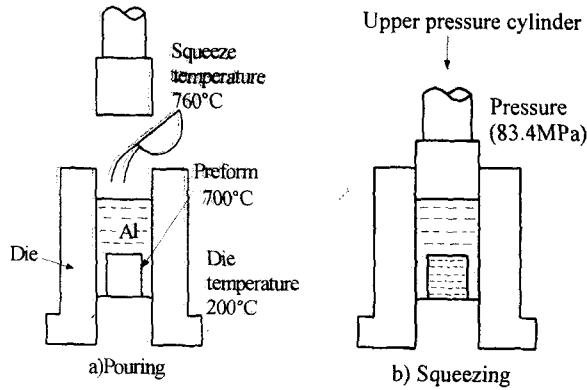
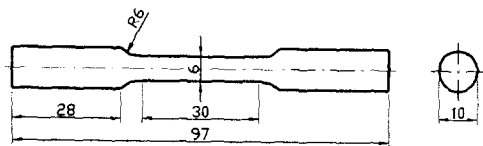


Fig. 2 Process of squeeze casting

2.3 파괴인성 시험

Fig. 3은 실험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타내었다. 인장 및 파괴인성시험에 사용한 시험기는 MTS model 810 10tonf 용량 컴퓨터 제어 서보 유압식 피로시험기이다. (a)는 인장시험편으로 실험은 ASTM E8 규정에 의거 변위제어모드에서 크로스헤드 스피드는 0.1mm/min으로 실험하였으며, 대기중의 실온에서 실시하였다. (b)는 파괴인성 실험에 사용한 시험편으로서, 기지재인 AC4CH합금 및 Nobinder, TiO₂, Al₂O₃의 파괴인성 실험을 위해 ASTM E399에 의거 하여 CT(half-size)시험편으로 W=25, B=12.5mm이며 초기 노치 균열 길이 a와 시험편의 폭 W의 비 (a/W)는 0.45로 하였으며, 노치의 가공은 Wire.E.D.M을 이용하여 가공하였으며 precrack 조건은 주파수 8Hz, 정현파로 crack extension은 1.5mm로 하였으며 K_{IC} 측정시 cross head speed는 0.05mm/min으로 상온에서 실험하였다.



(a) Tensile test specimen

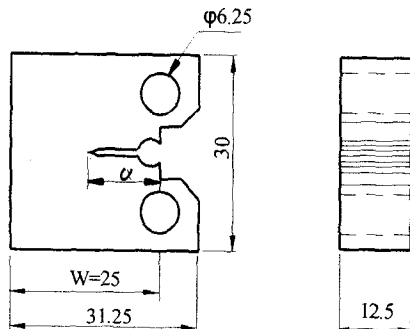


Fig. 3 Fracture toughness test specimen

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장실험결과

Fig.4는 기지재 및 강화재를 첨가한 금속기 복합재료의 인장 시험의 결과를 나타내었다. AC4CH의 인장강도가 약 278MPa 인데 비해 Nobinder의 인장강도는 373MPa, Al₂O₃는 345MPa, TiO₂는 375로서 복합재료의 인장강도가 각각 기지재보다 34%, 24%, 34.8%씩 향상된 것을 알 수 있다. 또한 Fig.4에서는 항복 강도를 나타내고 있다. AC4CH의 항복강도는 186MPa이며, Nobinder의 항복강도는 218MPa, Al₂O₃는 143MPa, TiO₂는 208MPa로서 복합재료의 항복강도가 Nobinder, TiO₂는 17.2%, 11.8%씩 향상되었으나 Al₂O₃ 경우 40.3% 감소하였다 특히 TiO₂는 첨가한 복합재료의 최대인장강도가 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다. 이것은 인성이 강한 기지재에 강화재를 첨가시킴으로서 기지재의 조직이 조밀화 되어 강도의 향상으로 나타난 것으로 생각한다. 또한 유기바인더 및 무기바인더는 강화재의 균일한 분산을 위해 첨가되고, 용탄 단조시 예비성형체의 변형을 억제하여 예비성형체의 강도향상을 위해 첨가되므로 이에 따라 바인더의 종류에 따라 인장강도가 증가한 것으로 생각한다.

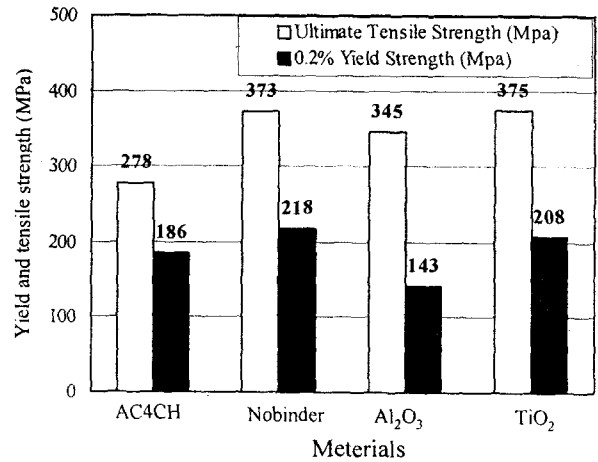


Fig. 4 Tensile and yield strength of AC4CH and MMC

3.2 파괴인성 특성

3.2.1 K_{IC} 실험

금속기 복합재료의 평면변형을 파괴인성치는 아래의 식(1)에 의해서 계산되었다.

$$K_Q = \frac{P_Q}{B W^{1/2}} f(a/W) \quad (1)$$

$$f(a/W) = \frac{(2 + a/W)(0.886 + 4.64a/W - 13.32a^2/W^2 + 14.72a^3/W^3 - 5.6a^4/W^4)}{(1 - a/W)^{3/2}}$$

여기서,

P_Q : 하중(kN)

B : 시험편의 두께 (mm)

W : 시험편의 폭 (mm)

a : 균열길이 (mm)

시험결과 파괴인성치(K_{Ic})는 ASTM E399에서 규정된 하중 조건과 두께규정(B,a)인 아래의 식(2)와 식(3)을 잘 만족하였다.

$$P_{max} / P_{min} < 1.10 \quad (2)$$

$$B, a \geq 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (3)$$

위의 식을 이용하여 Nobinder의 파괴인성치는 $8.70 \text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, Al_2O_3 의 파괴인성치는 $8.02 \text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, TiO_2 의 파괴인성치는 $9.28 \text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 으로 나타났다. 하지만 기지재인 AC4CH의 경우 인성이 너무 높아 식(2)에 만족하지 못하여 J_{Ic} 실험을 하였고 여기서 구한 J_{Ic} 값을 변환시켜 K_{Ic} 값을 구하였다. 본연구에서 사용된 Nobinder, Al_2O_3 , TiO_2 의 파괴인성치를 Table.5에 나타내었고, 각각의 파괴인성 실험결과를 Fig.5, Fig.6, Fig.7에 나타내었다.

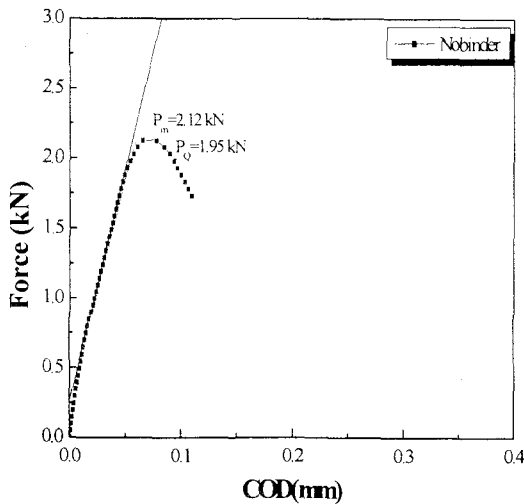


Fig. 5 Relations between force and COD in Nobinder

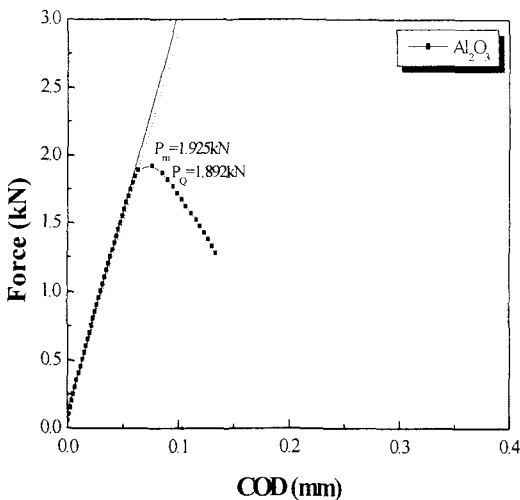


Fig. 6 Relations between force and COD in Al_2O_3

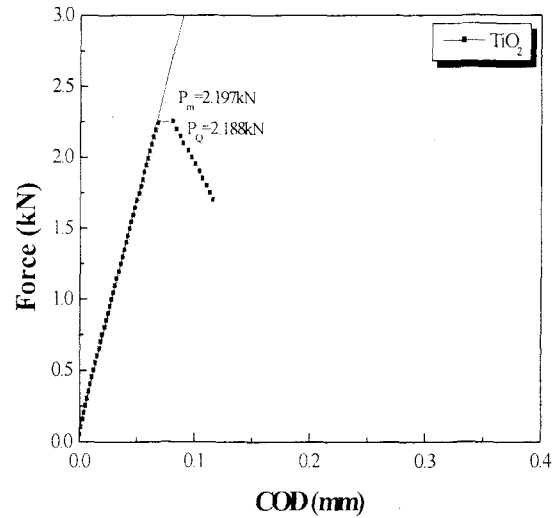


Fig. 7 Relations between force and COD in TiO_2

Table 5. Fracture toughness value of each materials

Materials	Critical load PQ(kN)	Maximal load Pm(kN)	σ_y (MPa)	Elongation n (%)	Fracture toughness KQ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$)
Nobinder	1.95	2.12	231	1.77	8.70
Al_2O_3	1.89	1.92	143	1.95	8.02
TiO_2	2.18	2.19	205	2.24	9.28

3.2.3 J_{Ic} 실험

기지재인 AC4CH의 J - Δa 의 관계를 Fig.8에 나타내었다. 분화 직선은 $J=2\sigma fs \cdot \Delta a$ 에 따라 나타내었다. J_{Ic} 값의 계산은 ASTM E1820 규정에 계산하였다($J_{Ic}=9.49 \text{kJ}/\text{m}^2$). 그리고 계산되어진 J_{Ic} 값을 이용하여 $K_{J_{Ic}}$ 로의 변환은 아래의 식(4)를 이용하였다.

$$K_{J_{Ic}}^2 = \frac{J_{Ic} E}{1 - \nu^2} \quad (4)$$

위 식에 의해 계산된 $K_{J_{Ic}}$ 값은 $26.9 \text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 으로 나타났다. MMC와 실험결과를 비교해 볼 때 Nobinder는 32.3%, Al_2O_3 는 23.8%, TiO_2 는 34.5%씩 기지재인 AC4CH보다 감소하였다는 것을 알 수 있었다. 이러한 영향은 취성적인 세라믹 재료를 강화재로 사용하는 금속기 복합재료의 취약성을 보여주며, 본 연구에서 강화재를 알루미늄 보레이트 휘스커를 사용하여 파괴인성의 향상을 기대했으나 그다지 큰 영향은 얻지 못했다.

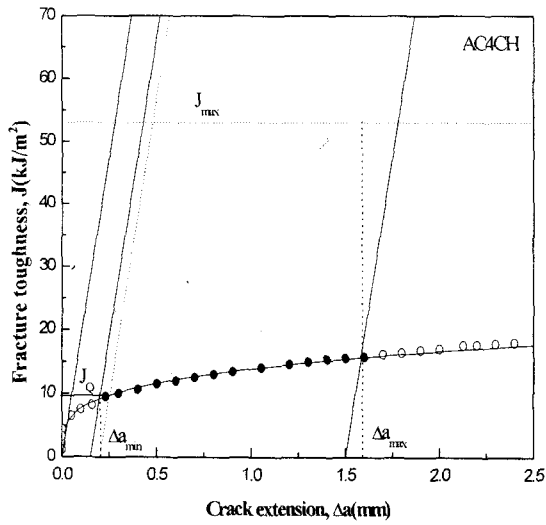


Fig. 8 Relations between J-integral and crack extension of AC4CH

3.4 파면 관찰

파괴인성 실험으로 파단된 시험편의 파단면을 관찰하기 위하여 주사식현미경(SEM)으로 관찰하였으며, Fig.9에 나타냈었다. 기지재 및 금속기 복합재료의 파면은 예비균열과 피로파면 사이에 미끄럼면 분리에 의해 생긴 사행미끄럼이나 잔물결상 모양으로 형성되는데 이 모양을 스트레치존이라 하며, 이 구간을 선택하여 SEM촬영하였다. 기지재인 AC4CH의 파면은 전체적으로 거칠다는 것을 알 수 있으며 연성 파괴현상인 덩플형상과 의벽개(quasi-cleavage)형상이 나타났다. Nobinder의 경우 덩플은 관찰 할 수 없었으며, 취성 파괴형상인 벽개파괴 양상을 나타내고 있으며, d)2000배의 확대 사진으로 관찰한 결과 휘스커의 뽑힘(pull out)현상을 관찰 할 수 있었다. Al₂O₃의 파면은 휘스커의 뽑힘 흔적보다는 휘스커 자체가 파인 흔적을 나타내고 있다. TiO₂의 경우 Nobinder와 비슷한 양상을 나타내고 있으나 h)확대 사진에서는 휘스커의 추출은 거의 확인 할 수 없었다. 금속기 복합재료는 전반적으로 기지재인 AC4CH에 비해 파면이 평탄한 전형적인 취성파괴의 양상이 보이며 기지재파면과 금속기 복합재료간의 파면을 비교해 볼때는 각각의 파면의 조직적인 특성은 확인 할 수 있었으나, 금속기 복합재료간의 조직적인 특성은 확인 할 수 없었다. 또한 전체적인 파면의 관찰 결과 휘스커 자체가 추출된 흔적은 거의 보이지 않은 것으로 보아 가압단조시 휘스커의 변형을 억제시키기 위한 무기 바인더의 첨가가 기지재와 젖음성도 우수하고 복합재의 사용에 적합하다고 생각된다.

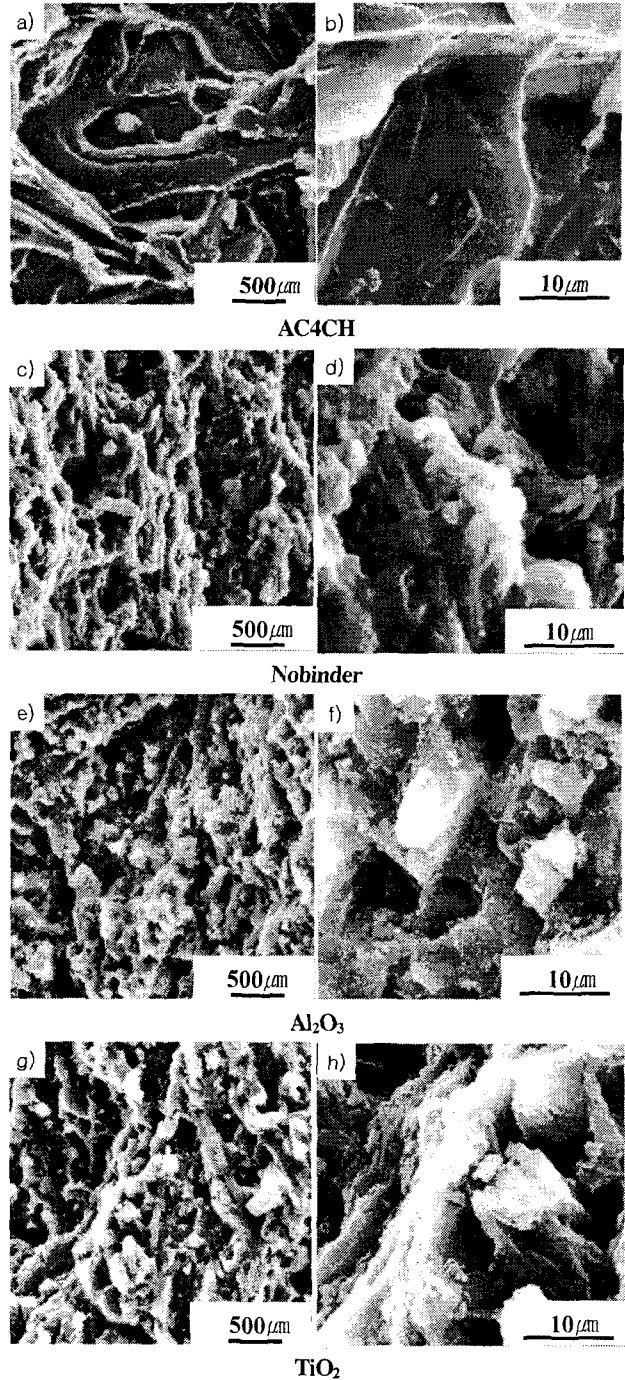


Fig. 9. SEM photographs fracture toughness of AC-4CH and MMC

5. 결 론

기지재를 AC4CH로 하여 스퀴즈캐스팅법에 의한 금속기 복합재료를 제조하여 파괴인성치를 연구하였고, SEM을 통하여 파면 관찰을 실행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가압단조법에 의해 제조된 금속기 복합재료는 기지재인 AC4CH보다 Nobinder가 34%, Al₂O₃가 24%, TiO₂가 34.8%씩 향상되었으며, 특히, TiO₂의 인장강도가 가장 높게 나타났다.

향복강도는 Nobinder 17%, Al_2O_3 11%씩 향상되었으나 TiO_2 의 경우 40.3%로 감소되었다.

2. 기지재 및 MMC의 파괴인성치는 nobinder가 $8.70MPa \cdot m^{0.5}$, Al_2O_3 가 $8.02MPa \cdot m^{0.5}$, TiO_2 는 $9.28MPa \cdot m^{0.5}$ 으로 측정되었으며, 기지재인 AC4CH의 $K_{J_{IC}}$ 는 $26.9MPa \cdot m^{0.5}$ 로 나타났다.

3. 측정된 파괴인성치의 결과로 볼 때 기지재인 AC4CH의 파괴인성치가 가장 높았고 MMC의 경우는 오히려 인성치가 저하됨을 알 수 있는데 이것은 연성적인 기지재의 특성을 강화시키기 위해 첨가한 세라믹계의 취성적인 강화재의 영향으로 생각된다.

4. 파면을 관찰한 결과 기지재인 AC4CH의 경우 전체적으로 거친파면을 보이고 있었고 연성 파괴현상인 덩플형상이 나타났다. MMC의 경우 기지재와 비교해 볼 때 비교적 평탄한 취성적인 파면의 양상을 보이고 있었으며 휘스커 자체의 뿔뿔 현상이 나타났다. 휘스커 자체의 추출물은 보이지 않아 가압단 조법에 의한 복합재의 제조가 적합하다고 생각된다.

후 기

본 논문은 경상대학교 지역대학육성사업단의 지원으로 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 박익민, 최정철, (1984), "복합재료, 반도출판사, 개정1판
- 박익민, (1991), 제2회 응고기술 심포지엄, 서울, KIM-KFS
- 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,
- Ding, D, Y., Wang, D, Z., Zhang, X., Yao, C, K., (2001), "Mechanical properties of alumina coeal $Al_{18}B_4O_{33}W/6061Al$ composites." Material Science and Engineering. A308, pp19-24.
- 西野直久, 砥線眞一, (1995) "ほう酸アルミニウムウイスカ 強化アルミニウム合金の機械的性質た及ばす マグネシウム量の影響", 輕金屬學會 第89回 春季大會講演概要, pp.99.
- 송정일, 양유창, 봉하동, 한경섭, (1994), "Al/ Al_2O_3 /SiC 금속 복합재료의 파괴 인성과 피로균열전파거동", 한국복합 재료학회 춘계학술대회논문집. pp. 146 -152.
- 管沼克昭, 藤田昭, 佐佐木元, 鈴木信幸,(1991) "うアルミニウムウイスカ/AC8A および606 アルミニウム合金の界面反應", 輕金屬, 第41卷 5號, pp.297. .