

# 바인더 첨가에 따른 $Al_{18}B_4O_{33}/AC4CH$ 의 파괴인성에 관한 연구

신동인\*\*·정재욱\*\*·박원조†·허선철\*·김형진\*

## A Study on Fracture Toughness Properties of $Al_{18}B_4O_{33}/AC4CH$ by Binder Additives

Won-Jo Park, Dong-In Shin, Jae-Wook Jung, Sun-Chul Huh, Hyung-Jin Kim

**Key Words:** Fracture toughness(파괴인성), Inorganic binder(무기바인더), MMC(금속기 복합재료)

### Abstract

In this paper, the effect of binder additive on the fracture toughness was metal matrix composite produced by squeeze casting method. In this study using the matrix is AC4CH and reinforcement used Aluminum borate whisker. Each MMC was produced by add inanimate binder ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ) to whiskers for increase the binding together of whiskers. Fracture toughness test were carry out in accordance with the ASTM E-399 standard test method,  $W=25mm$ ,  $b=12.5mm$  CT(half size) specimen. However Base metal AC4CH was not meet the qualification of  $P_m/P_Q < 1.1$ , so that test were performed  $J_{IC}$  test.  $K_{Jc}$  value was measuring by  $J_{IC}$  value change into  $K_{Jc}$ .  $J_{IC}$  test was carry out in accordance with the ASTM 1820.

### 1. 서론

복합재료는 기존의 금속재료에 비해 월등한 기계적 성질을 가지고 있어 그 제조 기술 및 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 금속재료가 가지고 있는 높은 밀도, 부식성 및 제품생산에 필요한 고에너지 요구 등의 문제점과 경량화, 고강도, 고강성의 한계를 해결할 수 있어 신소재로서 각광받고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 복합재료의 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 안정성 등을 확보할 수 있기 때문이다. 선진 산업국에서는 이미 자동차 엔진 부품

중 피스톤 헤드, 커넥팅 로드, 피스톤 핀, 로커 암, 푸쉬 로드 등을 금속복합재료로 대체하는데 성공하였고, 우주왕복선 및 미사일 등의 부품에 그 응용이 시도되고 있다.<sup>2)</sup> 이와 같이 성능이 향상된 강화섬유와 기지체가 개발되어 더욱 더 고기능성을 가진 복합소재가 연구되고 있으며 경제적인 성형, 제작기법에 대한 연구가 많은 관심을 끌고 있다.<sup>3)</sup> 그러나 금속복합재료는 제조공정의 복잡성, 높은 비용, 낮은 파괴인성치와 파괴에 이를 때까지 변형이 적은 문제 때문에 그 개발과 응용이 제한적이다.

최근 단섬유강화(chopped fiber, whisker, particles) 금속복합재료는 등방성 물성을 갖게 하는 물성을 갖고 있고 경제적이며, 제조방법도 종래의 주조법, 분말야금법, extrusion, hot forming 등의 금속주조법을 그대로 사용할 수 있는 이점을 갖고 있다. 따라서 단섬유 강화 금속복합재료는 엔지니어링 분야에서 더욱 더 많은 응용이 기대되고 있다. 또한, 복합재료 주조법 중 고압응고 주조법(squeeze casting)은 강화재를 예비성형체로 제조한 후, 용융기지체를 함침(infiltration)시켜 성형하는

† 경상대학교 기계항공공학부

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

TEL : (055)640-3183 FAX : (055)640-3188

\* 경상대학교 기계항공공학부

\*\* 경상대학교 대학원

방법으로 주조와 단조를 동시에 병행할 수 있고 제조방법이 간단하며 단시간에 정밀정형부품을 제조할 수 있을 뿐만 아니라 가압력에 의해 강화재와 기지재료의 결합력을 향상시켜 치밀한 미세조직을 얻을 수 있어 기계적 특성을 개선시킬 수 있다.<sup>4)</sup> 그러나 현재는 금속복합재료의 제조공정의 기술개발에만 치우쳐 이들을 구조물에 적용하는데 필수적인 안전설계의 필수조건인 파괴인성치에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 실제 MMC가 적용되는 구조물이 대개는 자동차나 항공기의 경량화에 요구되는 필수부품으로 응용되어 과대하중을 받거나 반복하중을 받아 피로파괴의 양상을 보이게 됨을 볼 때 그 중요성은 더욱 절실하다 하겠다.<sup>5)</sup>

따라서, 본 연구에서는 알루미늄 보레이트 휘스커( $Al_{18}B_4O_{33}$ )를 강화재로 하고 Al-Si-Mg계인 AC-4CH를 기지재료로 가압단조법으로 금속기 복합재료를 제조( $Al_{18}B_4O_{33}/AC4CH$ : 이하 Nobinder)하고 휘스커간의 결합력을 향상시키고 가압단조시 발생하기 쉬운 예비성형체의 변형을 억제하기 위해 무기바인더인  $SiO_2sol$ ,  $Al_2O_3sol$ ,  $TiO_2sol$ 을 첨가하여 각각의 금속기 복합재료를 제작하여 파괴인성치와 파면사진을 통한 파괴형태를 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료

본 연구에 기지재료로는 시판되고 있는 알루미늄 주조용 합금인 AC4CH를 사용하였다. 이의 화학 조성은 Table 1에 나타내었다. 그리고 사용한 강화재로는 저가이면서도 우수한 성질을 가진 일본 四國化成제품인 알루미늄 보레이트 휘스커, (Aluminum borate whisker : M12), 화학식은  $9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$ 인 휘스커를 사용하였다. 이의 특성을 다른 강화재와 비교하여 Table 2에 나타내었다.

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

|     |     |      |     |     |     |      |     |      |      |      |     |
|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|------|------|------|-----|
| Cu  | Si  | Mg   | Zn  | Fe  | Mn  | Ni   | Ti  | Pb   | Sn   | Cr   | Al  |
| 0.2 | 7.5 | 0.45 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.05 | 0.2 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | Bal |

Table 2. Basic properties of reinforcements.

| Reinforcement               | $Al_{18}B_4O_{33}$ | $(K_2O) \cdot 6(TiO_2)$ | $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ (47:53) | $Al_2O_3(96-97) \cdot SiO_2(3-4)$ |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.93               | -                       | 2.6                           | 3.2                               |
| Dia.( $\mu m$ )             | 0.5-1.0            | 0.5-3.0                 | 2.8                           | 3.0                               |
| Length( $\mu m$ )           | 10-30              | 10-100                  | 20-300                        | 200                               |
| $\sigma$ (GPa)              | 7.8                | 3.0-5.0                 | 1.4                           | 2.0                               |
| E(GPa)                      | 400                | 280                     | 120                           | 300                               |
|                             | Whisker            | Whisker                 | Short fiber                   | Short fiber                       |
|                             | M12                |                         | Kaowool                       | Saffil                            |

### 2.2.1 프리폼제작 및 스퀴즈캐스팅 방법

금속기 복합재료의 제작에 앞서 예비성형체인 프리폼을 제작하였다. 프리폼의 제작조건은 Table 3과 같다.

Table 3. 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%        | 2ml              |
| Coagulation              | polyma 2%                     | 2ml              |
| Inorganic binder         | $SiO_2$ , $Al_2O_3$ , $TiO_2$ | 13g, 60g, 19.9g  |

그리고 체적율은 20%로 하였고, 휘스커 중량은 다음식에 의해 계산하였다.

$$V \times V_F \times \rho = 161g \quad (1)$$

여기서, V : 휘스커의 체적

$V_F$  : 휘스커의 체적율

$\rho$  : 휘스커의 밀도

휘스커의 중량 120g에 대한 이온수 1000ml로 교반하면서, 폴리비닐알콜 및 응집제 및 무기 바인더인  $SiO_2sol$ ,  $Al_2O_3sol$ ,  $TiO_2sol$ 을 아래의 식에 의해첨가하고,

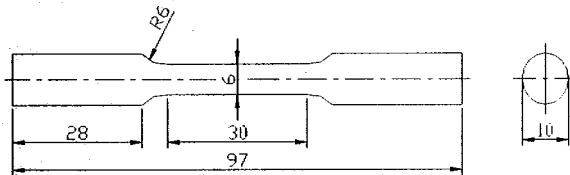
$$5mass\% \dots 100: 무기바인더농도 = x: 6g \quad (2)$$

충분히 교반된 슬러리(slurry)상태에서 슬러리 속의 기포를 제거하기 위하여, 또한 미세기공이 없는 양호한 예비성형체를 제조하기 위해 진공탈포처리 하였다. 제조된 예비성형체는 3일간 자연건조후, 예비성형체의 강도 향상과 복합화 후의 압축변형을 막기위해 1100℃ 조건으로 2시간 소결한후 노냉하였다. 가압단조법으로 금속기 복합재

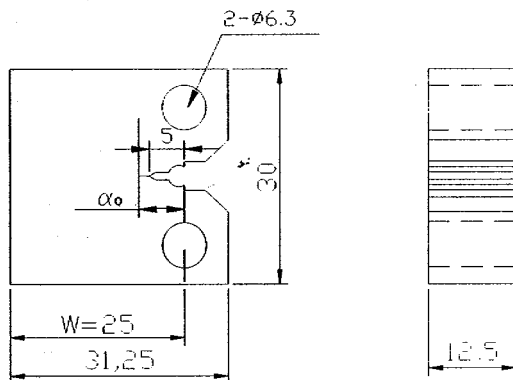
료를 제작하기 위하여 프리폼을 약 700℃로 가열하고, 스퀴즈 캐스팅 장치의 금형 내에 고정하였다. 이 때의 금형 온도는 200℃이었다. 그 다음 760℃의 용탕을 금형에 주입하여 프레스 장치에서 가압력 83.4MPa, 가압속도 50mm/sec, 가압시간 40sec로 프리폼의 공극에 용탕을 침투, 응고시켜서 휘스커 강화복합재료를 제작하였다.

2.2 파괴인성 특성

Fig. 1은 실험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타내었다. 인장 및 파괴인성에 사용한 시험기는 MTS model 810 10tonr 용량 컴퓨터 제어 서보 유압식 피로시험기이다. (a)는 인장시험편으로 실험은 ASTM E8규정에 의해 변위제어모드에서 cross head speed는 0.1mm/min으로 실험하였으며, 대기중의 실온에서 실시하였다. (b)는 파괴인성 실험에 사용한 시험편으로서, 기지재인 AC4CH합금 및 MMC의 파괴인성 실험을 위해 ASTM E399에 의거하여 CT(half-size)시험편으로 W=25, B=12.5mm이며 초기 노치 균열길이 a와 시험편의 폭 W의 비 (a/W)는 0.45로 하였으며, 예균열 조건은 주파수 8Hz, 정현파로 균열선단에서 1.5mm 삽입하였다 K<sub>IC</sub> 실험은 cross head speed 0.05mm/min으로 상온에서 실험하였다.



(a) Tensile test specimen



(b) Fracture toughness test specimen

Fig. 1 Configurations of test specimen

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험결과

Table 4는 기지재 및 강화제를 첨가한 MMC의 인장시험의 결과를 나타내었다. AC4CH의 인장강도가 약 278MPa 인데 비해, Nobinder의 인장강도는 373MPa, SiO<sub>2</sub>는 307MPa, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 345MPa, TiO<sub>2</sub>는 375MPa로서 복합재료의 인장강도가 각각 기지재보다 34%, 10%, 24%, 34.8%씩 향상된 것을 알 수 있다. 특히 TiO<sub>2</sub>를 첨가한 복합재료의 최대인장강도가 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다. 이것은 용탕단조법으로 알루미늄 보레이트 휘스커 강화 금속기 복합재료의 제조시 AC4CH와 whisker와의 계면 결합성과 접합성이 강화재로서 충분한 응력전달을 할 수 있을 정도로 우수함을 나타내었으며, 예비성형체의 변형을 방지하기 위해 첨가한 무기바인더가 휘스커 상호간의 결합력을 향상시켜 강도 향상에 기여한 것으로 생각된다.

Table 4. Mechanical properties of each Materials

| Materials                      | $\sigma_{UTS}$<br>(MPa) | $\sigma_{YS}$<br>(MPa) | E<br>(GPa) | Elongation<br>(%) |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|------------|-------------------|
| AC4CH                          | 278                     | 186                    | 68         | 4.07              |
| Nobinder                       | 373                     | 218                    | 88         | 1.77              |
| SiO <sub>2</sub>               | 307                     | 152                    | 72         | 2.46              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 345                     | 143                    | 84         | 1.95              |
| TiO <sub>2</sub>               | 375                     | 208                    | 90         | 2.24              |

3.2 파괴인성 실험

3.2.1 K<sub>IC</sub> 실험

파괴인성 실험시 사용한 시험편은 각각 3개의 시험편을 사용하였으며 각 재료에 대한 파괴인성치의 계산은 아래의 식 (3)을 이용하였다.

$$K_Q = \frac{P_Q}{B W^{1/2}} f(a/W) \quad (3)$$

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

여기서,

P<sub>Q</sub> : 하중(kN)

B : 시험편의 두께 (mm)

W : 시험편의 폭 (mm)

a : 균열길이 (mm)

시험결과 파괴인성치(K<sub>IC</sub>)는 ASTM E399에서 규정된 하중조건과 두께규정(B,a)인 아래의 식(4)

와 식(5)를 잘 만족하였다.

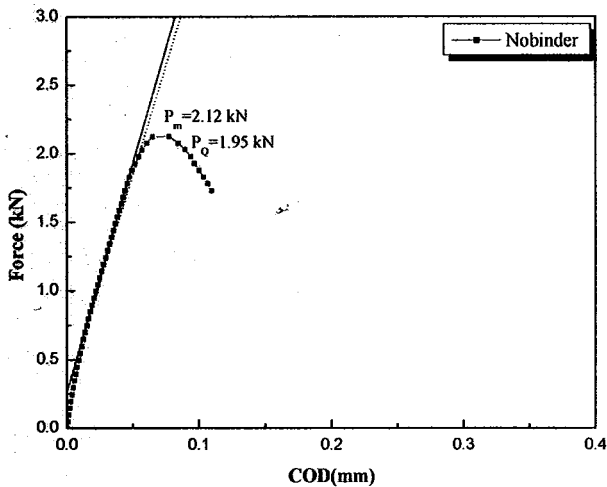
$$P_{max} / P_{min} < 1.10 \quad (4)$$

$$B, a \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (5)$$

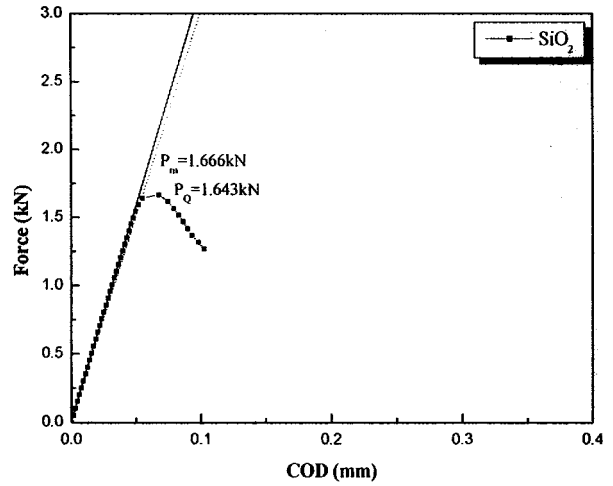
위 식들에 의해 측정된 MMC의 파괴인성치는 각각 Nobinder가 8.70MPa·m<sup>0.5</sup>, SiO<sub>2</sub>가 6.97MPa·m<sup>0.5</sup>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 8.02MPa·m<sup>0.5</sup>, TiO<sub>2</sub>가 9.28MPa·m<sup>0.5</sup>으로 나타났다. 그러나 연성적인 기지재 AC4CH의 경우는 식 (3)에 만족하지 못하여 ASTM E 1820 규정에 의해 J-integral을 이용하여 J<sub>IC</sub>실험을 하였고 MMC의 파괴인성치와 비교하기 위해 J<sub>IC</sub>값을 변환시켜 K<sub>J<sub>IC</sub></sub>값을 구하였다. 본 연구에서 사용된 AC4CH 및 MMC의 파괴인성치를 Table 5에 파괴인성 실험결과를 Fig. 2, 3, 4, 5에 나타내었다.

**Table 5.** Fracture toughness valus about AC4CH and MMC

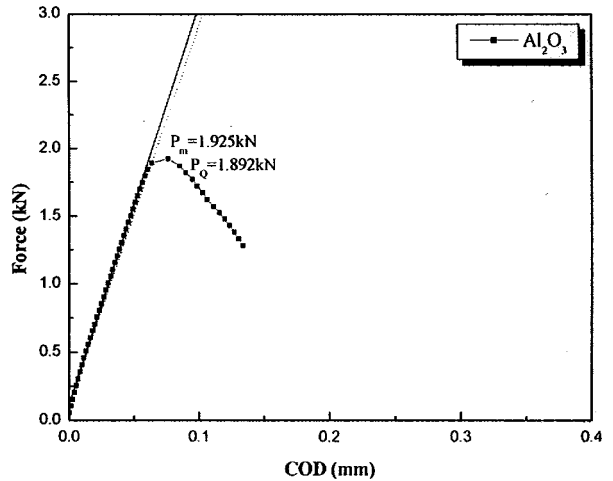
| Materials                      | Critical load<br>P <sub>Q</sub> (kN) | Maximal load<br>P <sub>m</sub> (kN) | σ <sub>y</sub><br>(MPa) | Elongation | Fracture toughness<br>K <sub>Q</sub><br>MPa·m <sup>0.5</sup> |
|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|--|
| Nobinder                       | 1.95                                 | 2.12                                | 231                     | 1.77       | 8.70   |
| SiO <sub>2</sub>               | 1.64                                 | 1.66                                | 176                     | 2.46       | 6.97   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.89                                 | 1.92                                | 143                     | 1.95       | 8.02   |
| TiO <sub>2</sub>               | 2.18                                 | 2.19                                | 205                     | 2.24       | 9.28   |
| AC4CH                          | J <sub>IC</sub>                      | K <sub>JIC</sub>                    |                         |            |  |
|                                | 9.49821<br>(kJ/m <sup>2</sup> )      | 26.9<br>(MPa·m <sup>0.5</sup> )     |                         | 10.7       | 26.9   |



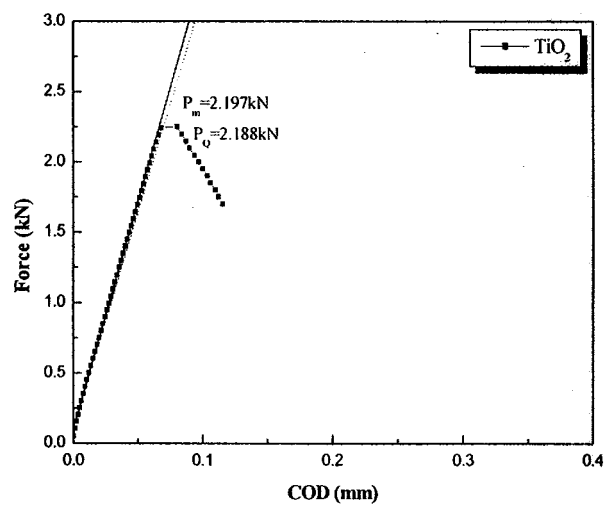
**Fig. 2** Relations between force and COD in Nobinder



**Fig. 3** Relations between force and COD in SiO<sub>2</sub>



**Fig. 4** Relations between force and COD in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



**Fig. 5** Relations between force and COD in TiO<sub>2</sub>

3.2.2 J<sub>IC</sub> 실험

Fig. 6은 기지재인 AC4CH의 J-Δa의 관계를 나타내었다.

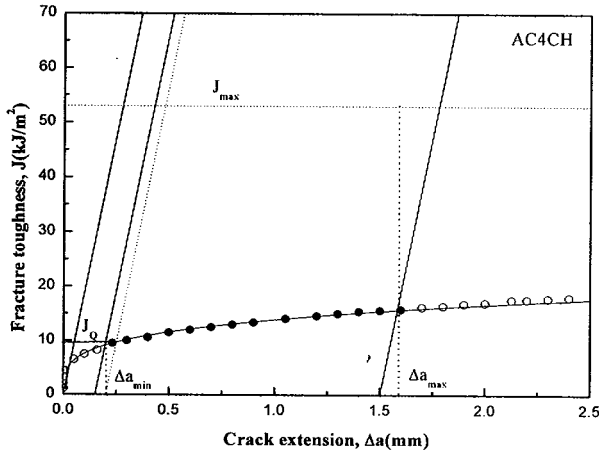


Fig. 6 Relations between J-integral and Δa of AC4CH

둔화직선은  $J=2\sigma_f \cdot \Delta a$ 에 따라 나타내었다. J<sub>IC</sub> 값의 계산은 ASTM E1820 규정에 의해 계산하였다(J<sub>IC</sub>=9.49kJ/m<sup>2</sup>). 그리고 계산되어진 J<sub>IC</sub>값을 이용하여 K<sub>J<sub>IC</sub></sub>로의 변환은 아래의 식(6)을 이용하였다.

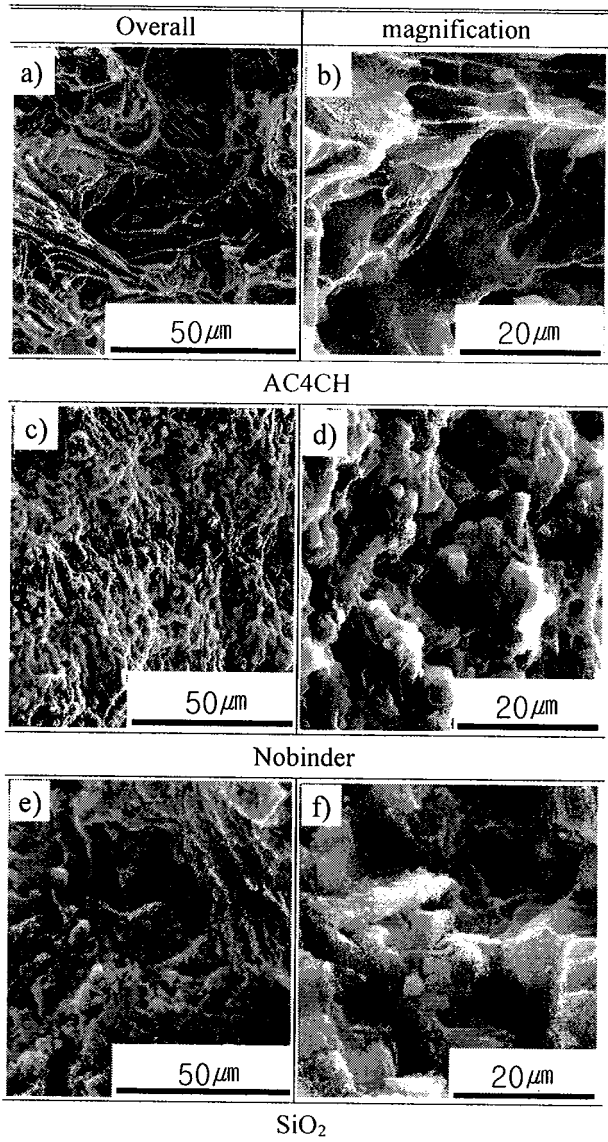
$$K_{J_{IC}}^2 = \frac{J_{IC}E}{1-\nu^2} \quad (6)$$

위 식에 의해 계산된 K<sub>J<sub>IC</sub></sub>값은 26.9MPa·m<sup>0.5</sup>으로 나타났다. 앞서 언급된 Nobinder와 TiO<sub>2</sub>의 결과와 비교해 볼 때 기지재인 AC4CH의 파괴인성치가 훨씬 높다는 것을 알 수 있었다. 이는 박<sup>6)</sup> 등의 연구와 비교해 볼 때 연성적인 기지재의 특성을 향상시키기 위해 첨가한 세라믹계의 취성적인 강화재의 영향으로 생각된다. 이것으로서 강화재인 알루미늄 보레이트 휘스커를 첨가하여 제작한 금속기 복합재료의 파괴인성치 향상의 효과는 볼 수가 없었다.

3.3 파면관찰

파괴인성 실험으로 파단된 시험편의 파단면을 관찰하기 위하여 주사식전자현미경(SEM)으로 촬영하였으며 촬영된 사진들을 Fig. 7에 나타내었다. a)는 기지재인 AC4CH의 파면을 나타내고 있다. 전체적인 파면의 양상이 거칠다는 것을 알 수 있으며 입계 연성파괴의 일종인 의벽개(quasi cleavage)와 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있었다. c), e), g), l)은 MMC의 파면사진으로서

AC4CH에 비해 전체적인 파면이 평탄한 전형적인 취성파괴의 파면을 보이고 있다. 기지재인 AC4CH의 파면과 금속기 복합재료간의 파면을 비교해볼 때 각각의 파면의 조직적 특성을 확인할 수 있었으나, 전체적으로 평탄한 파면을 가지는 MMC간의 조직적인 특성은 확인할 수 없었다. 그러나, nobinder의 경우는 d)의 파면상에서 휘스커의 뽑힘현상(pull out)이 관찰되나 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우는 f)와 h)의 파면상에서 휘스커의 뽑힘 현상보다는 휘스커 자체가 파여있는 형상을 관찰할 수 있었다. 하지만, m)의 TiO<sub>2</sub>의 파면상에서는 휘스커 자체의 추출은 거의 확인 할 수 없었다. 따라서, 가압단조시의 예비성형체의 변형을 억제하기 위해 무기바인더인 TiO<sub>2</sub>의 첨가가 기지재와 젖음성도 우수하고 복합재의 사용목적에 적합한 소재라고 생각된다.



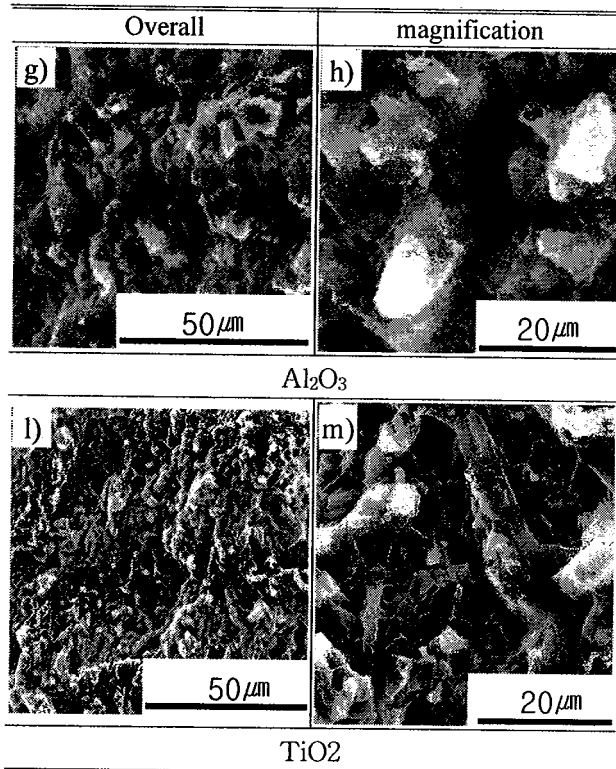


Fig. 7 SEM photographs fracture toughness of AC4CH and MMC

#### 4. 결론

본 연구에서 알루미늄 보레이트 휘스커 프리폼에 AC4CH를 스퀴즈 캐스팅법으로 함침시켜 금속기 복합재료를 제작하여 AC4CH 및 MMC의 파괴인성치를 연구하였고, SEM을 통하여 파면관찰을 실행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인장강도는 기지재인 AC4CH보다 Nobinder가 34%, SiO<sub>2</sub>가 10%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 24%, TiO<sub>2</sub>가 34.8%씩 향상되어 첨가된 강화재의 종류에 따라 강도가 크게 증가되었고 특히, TiO<sub>2</sub>의 인장강도가 가장 뛰어난 것으로 나타났다.

2. 기지재 및 MMC의 파괴인성치는 Nobinder가 8.70MPa·m<sup>0.5</sup>, SiO<sub>2</sub>가 6.97MPa·m<sup>0.5</sup>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 8.02MPa·m<sup>0.5</sup>, TiO<sub>2</sub>는 9.28MPa·m<sup>0.5</sup>으로 측정되었으며, 기지재인 AC4CH의 K<sub>JIC</sub>는 26.9MPa·m<sup>0.5</sup>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. 파면의 관찰결과 Nobinder의 경우 파면상에서 휘스커 자체의 뽑힘현상(Pull out)이 관찰되고 있고 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우는 휘스커 자체의 파인 흔적을 관찰할 수 있었으나 TiO<sub>2</sub>의 경우는 거의 확인 할 수 없으므로 TiO<sub>2</sub>의 경우가 휘스커와의 젖음성이 비교적 좋다는 것을 알 수 있었다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) 홍창선, 1994, "복합재료 응용기술 및 연구", 대한기계학회지, 제34권, 제5호, pp. 334~341.
- (2) 박경동, 김정호, 윤한기, 임만배, 2000, "SA-516/70 압력용기강의 저온피로균열전진속도에 미치는 응력비의 영향", 대한기계학회 재료 및 파괴부분 추계학술대회 논문집, pp. 156-164.
- (3) Ding, D, Y., Wang, D, Z., Zhang, X, X., Yao, C, K., 2001, "Mechanical properties of alumina coated Al<sub>18</sub>B<sub>4</sub>O<sub>33</sub>w/6061Al composites." Material Science and Engineering, A308, pp19-24.
- (4) Zheng, M., Wu, K., Liang, H., 2002, "Microstructure and mechanical properties of aluminum borate whisker reinforced magnesium matrix composite", Materials Letters, pp. 3847.
- (5) 송정일, 양유창, 봉하동, 한경섭, 1994, "Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC 금속 복합재료의 파괴 인성과 피로균열전파거동", 한국복합 재료학회 춘계학술대회논문집, pp. 146~152.
- (6) 최용범, 허선철, 박원조, 2002, "MMC의 피로수명과 피로균열전파 거동에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 146~150.