

# 금속기복합재료의 바인더 첨가제에 따른 강도 특성

박원조\* · 이광영\* · 허선철\* · 최용범\*\*

## The Strength Properties of Metal Matrix Composites by Binder Additives

Won Jo Park · Kwang Young Lee · Sun Chul Huh · Yong Bum Choi

Key Words: Metal Matrix Composites(금속기복합재료), Squeeze casting(가압단조법), Inanimate binder(무기바인더), Infiltrate(침투)

### Abstract

This study is about controlled impurities, which make metal alloys, especially AC4CH alloy that is made by restraining 0.2% Fe and Aluminum to make a matrix material. A metal matrix composite is produced using the squeeze casting method. The first step in the squeeze casting method is to add some organic binder including aluminum borate whisker into the matrix. After the fabrication of a metal matrix composite, each is individually appended to an inanimate binder such as  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{TiO}_2$ . Through experiments the mechanical property changes were investigated between the metal matrix composite and AC4CH alloy.

This study proves the superiority of the mechanical property of a metal matrix composites over AC4CH according to the previous tests and results that were mentioned above. One excellent property of matrix material composites is the infiltrated  $\text{TiO}_2$  reinforcement. This material is a good substitute for the existing materials that are used in the development of industries today.

### 1. 서론

산업이 발달함에 따라 경량, 고강도의 우수한 소재개발이 요구되고 있으며, 또한 많은 연구자에 의해 연구되고 있으며, 그 중 금속재료에 세라믹 섬유나 분말, 휘스커 등으로 강화하여 재료의 강도 및 강성을 보완하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1)(2)</sup>

특히, 금속기 복합재료는 우주항공 분야에서 광범위 하게 실용화되고 있으며, 비강도, 내열성, 내마모성 및 내구성 등의 기계적 특성이 우수한 자동차 부품으로 엔진부와 구동축, 브레이크

시스템에도 사용되며 항공기 부품으로도 활용되고 있다<sup>(3)</sup>. 강화재로는  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC, graphite, ceramic, 알루미늄 보레이트 휘스커(Aluminum borate whisker =  $\text{Al}_{18}\text{B}_4\text{O}_{33}$ ) 등이 사용되고 있으며, 기지재는 강화재의 사이에서 응력을 전달하며 기계적인 마모로부터 강화재를 보호하는 역할을 하며 기지재의 종류로는 고분자재료, 알루미늄, 마그네슘, 티타늄, 등의 금속재료, SiC 등의 세라믹 재료가 사용되고 있다.

현재에는 소재기술의 발전으로 취약했던 여러 가지 기계적 성질이 보완되어 그 응용폭이 넓어지고 있으며 성능이 향상된 강화섬유와 기지재가 개발되어 더욱더 고기능성을 가진 복합소재가 연구되고 있으며 경제적인 성형, 제작기법에 많은 관심을 기울이고 있다.

\* 경상대학교 수송기계공학과

\*\* 경상대학교 대학원

특히, 가압단조법(squeeze casting)<sup>(4)</sup>은 강화재를 예비성형체(preform)로 제조한 후, 용융기지를 함침(infiltration)시켜 성형하는 방법으로 주조와 단조를 동시에 병행 할 수 있어서 제조방법이 간단하여 단시간 내에 정밀정형부품을 제조할 수 있을 뿐 아니라 가압력에 의해 강화재와 기지재간의 결합력을 향상시켜 치밀한 미세조직을 얻을 수 있고, 제조시간이 짧아 보강섬유와 기지재료간의 화학반응이 적으며 기존의 다이캐스팅 공정과 흡사하여 생산현장에서 응용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 가압하에서 용탕이 응고되기 때문에 미세한 조직을 얻을 수 있으며, 원하는 국부보강과 2차 가공이 별도로 요구되지 않는 near-net shape 형상으로 대량생산이 용이하고 실용적인 측면에서 가장 효율적인 방법으로 알려져 있다. 이러한 방법으로 제조된 금속기 복합재료들은 강도, 내열성, 내식성, 내마모성이 우수하여 차세대 첨단산업의 구성재료 등으로 각광받고 있으며, 미국, 일본, 유럽 여러 국가들을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다.

따라서, 본 연구는 기지재인 AC4CH와 강화재인 알루미늄 보레이트 휘스커에 무기바인더인 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> 를 첨가하여 가압단조법으로 금속기복합재료를 제작하여, 기지재와 금속기복합재료의 인장강도, 연신률, 탄성계수, 항복강도 등의 기계적 특성의 변화에 대하여 연구하였다.

## 2. 시험재료 및 실험장치

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 복합재료의 기지재료로 널리 사용되고 있다. Table 1은 기지재인 AC4CH의 화학적 성분을, Table 2는 강화재로 사용된 알루미늄 보레이트 휘스커의 물성치를 나타내었다.

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. Properties of aluminum borate whisker.

Chemical composition	9Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Crystal structure	Orthorhombic
Lattice constant ( Å )	
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 <sup>3</sup> )	2.93
Young's Modulus ( GPa )	400
Tensile Strength	8
Moh's hardness	7
Thermal expansion coefficient(10 <sup>-6</sup> /K)	
axial	4.4
radial	1.9

### 2 프리폼 제작

Table 3.은 프리폼의 제작조건<sup>(5)</sup>을 나타내고 프리폼제작의 개략적인 도식을 Fig. 2에 나타내었다. 실험에 사용된 휘스커의 체적율을 25%로 하기 위해서 휘스커 중량을 (120g)을 다음 식에 의해 계산하였다.

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

휘스커 중량에 대한 이온수 1000ml를 교반하면서, 폴리비닐알콜 및 응집제를 첨가하고, 충분히 교반된 슬러리(sully) 상태에서, 진공탈포함으로써 기포를 제거한 후, 금형에서 흡입펌프로 이온수를 여과시키면서 압축하여 소정의 프리폼 형상을 완성하였다. 그 후, 3일 정도 자연 건조하고 소결로에서 1100°C 조건으로 2시간 소결(sintering)한 후, 노냉하여 제작하며, 제작된 프리폼의 크기는 100×110×25(mm)이다.

Table 3. Specification of preform

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

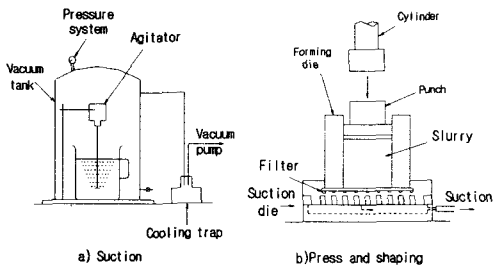


Fig. 2 Process of preform preparation

### 3. 가압단조

Fig. 3은 가압단조법의 과정을 나타내고 있다. 제작한 프리폼을 약 700℃로 가열하여, 압착단조장치의 금형 내에 고정하여, 이 때의 금형 온도는 200℃이며, 760℃의 용탕을 금형에 주입하여 프레스 장치에서 가압력을 83.4MPa, 가압속도를 50m/sec, 가압시간은 40초의 조건으로 가압하여 프리폼의 공극에 용탕을 주입시킨 후, 응고시켜 금속기복합재료를 제작하였다.

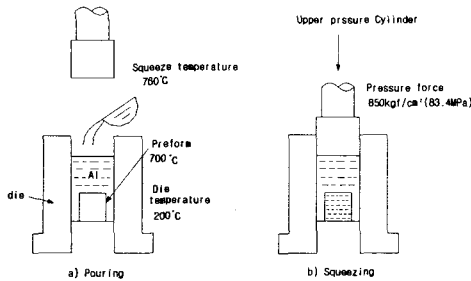


Fig. 3 Process of squeeze casting

### 4. 경도 및 인장시험

경도시험은 마이크로 비커스 경도계(松擇(株)제 MHT-1)을 사용하여 기지재인 AC4CH와 nobinder, 그리고 무기바인더로서 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>를 첨가한 MMC재의 경도를 측정하였다. 측정조건은 하중 200g, 하중유지 시간은 10초로 상온에서 실시하였으며, 측정위치와 횟수는 랜덤형식으로 각 10점을 측정하여 각각 평균값을 구하였다.

Fig. 4는 인장시험을 위한 시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있다. 기지재인 AC4CH 및 MMC의 인장시험을 위하여 평행부는 내수연마지(#600~1500)를 이용하여 습식 연마하였으며, 최종적으로 알루미나 분말(#0.3μ)로 정밀 연마하였

다. 인장시험은 ASTM D3039규정에 의거 10tony MTS(810)으로 실시하였으며, 변위제어모드에서 크로스헤드 스피드는 0.1mm/min으로 실험하였으며, 대기중의 실온에서 실시하고, 최대인장응력, 파단연신을 및 탄성계수의 측정은 익스텐션메타를 이용하여 측정하였다

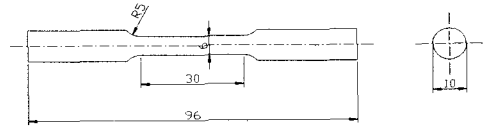


Fig. 6 Configuration of specimen(unit:mm)

## 3. 시험재료 및 실험장치

### 1. AC4CH의 기계적 성질

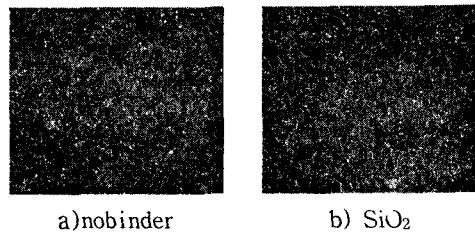
Table 4.는 AC4CH의 기계적 성질을 나타내고 있다.

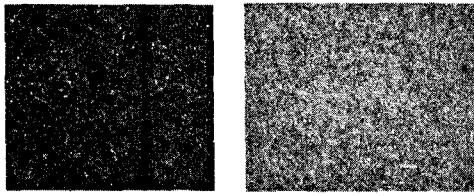
Table 4. Mechanical properties of AC4CH aluminum alloy

$\sigma_{UTS}$ (MPa)	$\sigma_{YS}$ (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
278	186	68	4.07	65	2.68

### 2. 복합재료의 미시조직

Fig. 5는 복합재료의 미시조직사진을 나타내고 있다. a)는 nobinder, b), c), d)는 무기바인더인 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>를 각각 첨가하였을 때의 조직사진을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것처럼 전체적으로 매트릭스에 휘스커가 균일하게 분포하고 있으므로 가압단조법에 의한 제조가 복합화에 비교적 용이한 방법이라 생각한다. 그러나 nobinder와 무기바인더 종류에 따른 조직적 특성들은 구분하기 어려우므로 기계적 특성 및 화학적 특성들은 차후에 규명이 필요하다.





c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>                      d) TiO<sub>2</sub>

Fig. 5 Optical microstructure of metal matrix composite

### 3. 인장시험결과

Fig. 6은 기지재 및 모재에 강화재를 첨가한 금속기복합재료의 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 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. 또한 Fig. 7은 모재와 복합재료간의 항복강도를 나타내는 것으로 AC4CH에 비해 Nobinder와 TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 모두 항복강도가 증가하였으며 인장강도와 마찬가지로 nobinder와 TiO<sub>2</sub>의 경우가 항복강도가 가장 우수하다는 것을 알 수 있다.

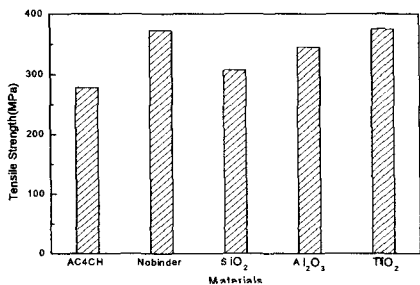


Fig. 6 Tensile strength of AC4CH and metal matrix composite

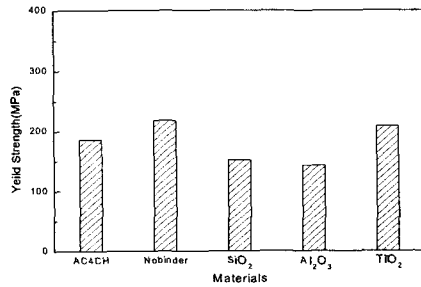


Fig.7 Yield strength of AC4CH and MMC

### 4. 탄성계수 측정결과

Fig. 8은 기지재인 AC4CH와 각각의 MMC간의 탄성력을 시험한 결과이다. 그림에서 기지재인 AC4CH의 탄성계수는 68GPa, nobinder는 88GPa, SiO<sub>2</sub>는 72GPa, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 84GPa, TiO<sub>2</sub>는 90GPa로 바인더를 첨가한 MMC의 탄성계수가 평균21%정도 높아졌음을 알 수 있다. 이로서 Fig.6, Fig.7과 비교해 보면 기지재에 휘스커를 첨가하고 강화재의 균일한 분산을 위해 유기바인더를 첨가한 후 예비성형체의 변형을 방지하기 위해 무기바인더 3종류를 첨가한 결과 TiO<sub>2</sub>의 경우가 기계적 특성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있다.

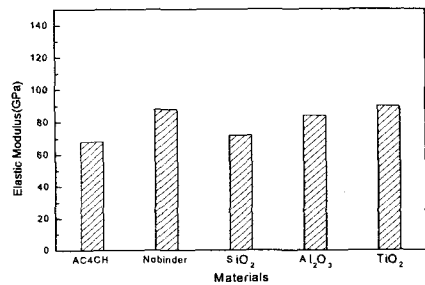


Fig. 8 Elastic modulus of AC4CH and MMC

### 5. 연신율의 측정결과

Fig. 9는 기지재 및 강화재를 첨가한 MMC의 파단연신을 시험의 결과를 나타내고 있다. AC4CH가 4.07%로 가장 높고, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nobinder 순으로 연신율이 감소하고 있다. 따라서 무기바인더를 첨가함에 따라 연신율이 감소하는 것은 강도향상을 기할 수 있는 결과이므로 무기바인더의 첨가 효과를 확인할 수 있으며 특히, 강도가 가장 높으면서 연신율도 우수한

TiO<sub>2</sub>를 첨가제로 사용한다면 복합재의 사용 목적에 맞는 적합한 소재로 생각한다.

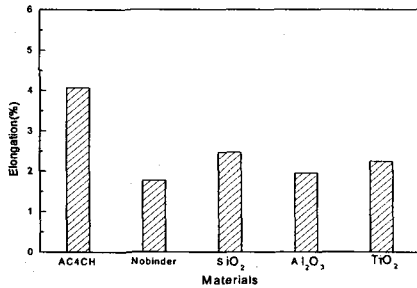


Fig.9 Elongation of AC4CH and MMC

### 6. 비커스 경도 측정결과

Fig. 10은 기지재인 AC4CH와 MMC의 비커스 경도를 측정한 결과이다.

기지재인 AC4CH의 경도값이 65, nobinder의 경도값이 115, SiO<sub>2</sub>는 99, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 110, TiO<sub>2</sub>는 114로 나타났고, 기지재인 AC4CH보다 MMC의 경도값이 평균 70%정도로 향상되었다는 것을 알 수 있었다.

이것으로 연성적인 모재를 강화하기 위해 첨가한 휘스커 복합재에 강도 및 예비성형체의 변형을 억제하기 위해 첨가한 바인더의 효과를 확인할 수 있으며 특히, 표면 경도값에서도 무기바인더 중에서 TiO<sub>2</sub>는 가장 우수한 기계적 특성을 나타내고 있어 사용상 가장 적합하다고 할 수 있다.

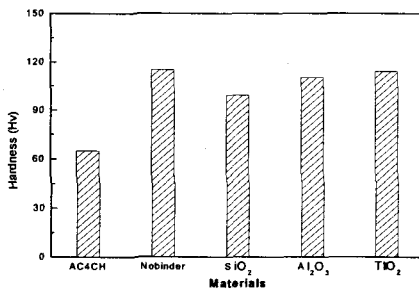


Fig. 10 Vickers hardness of AC4CH and MMC

### 7. 파면 관찰

Fig.11은 각 소재에 대한 인장 후의 파단면 사진을 나타내고 있다. 그림에서 I은 파단면 전체의 파단양상을 나타내고 II는 균열의 개시점을

확대하여 나타낸 그림이다.

a)인 AC4CH의 경우 연신율이 가장 크게 나타났으므로 파면도 가장 거칠게 나타났으며, II의 균열의 시작점은 시험편 표면에서 시작된 micro-dimple 형태를 확인할 수 있다.

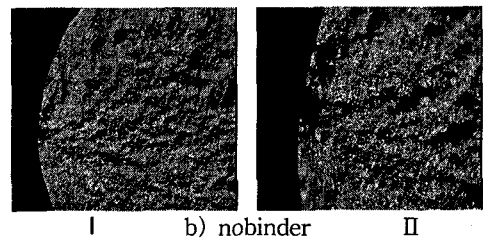
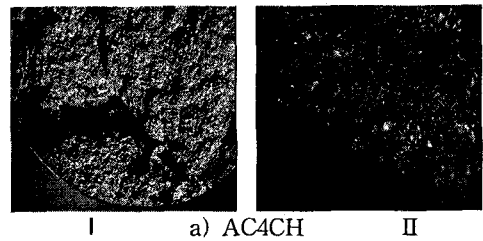
b)는 nobinder의 경우로서 파면이 전체적으로 고르게 균일하다는 것을 알 수 있으며 II의 좌측부분에서 균열이 생겨 파단한다는 것을 알 수 있다.

c)는 SiO<sub>2</sub>로서 표면이 거칠고 전체적으로 micro-dimple 형태를 확인할 수 있다.

d)는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우로서 전체적으로 파면이 거칠다는 것을 알 수 있다.

e)는 TiO<sub>2</sub>로서 대체적으로 고르게 파면을 형성하고 있으나, 부분적으로 큰 단을 형성하고 있다는 것을 알 수 있다.

a)~e)까지의 파면에서 일반 강재의 파단면과는 달리 최대전단응력 방향의 파면은 확인할 수 없으며, 복합재료의 전형적인 파단형태인 하중이 직각방향 파면과 부분적으로 micro-dimple 형태를 확인할 수 있다. 또한 인장실험 결과인 Fig.6과 비교한다면 인장강도가 가장 낮은 AC4CH의 경우 파면이 가장 거칠고 dimple 형태가 많이 존재하며 인장강도가 가장 큰 nobinder 및 TiO<sub>2</sub>의 경우 전형적인 취성 파괴 형태인 평탄한 표면임을 알 수 있으므로 파단면의 거칠기 정도로서 인장강도의 크기 순서를 짐작 할 수 있다.



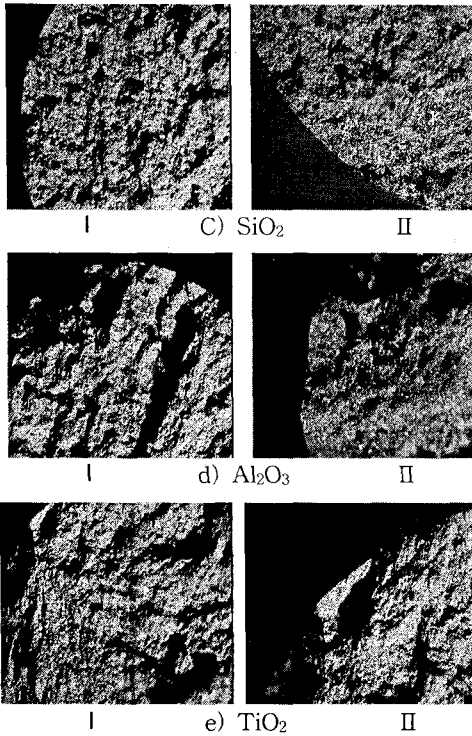


Fig.11 Microstructure of fracture surface after tensile test

#### 4. 결론

기지재 AC4CH에 알루미늄 보레이트 휘스커 프리폼에 유기바인더와 무기바인더 종류를 달리하여 가압단조법으로 제작한 복합재료의 기계적 특성을 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기지재인 AC4CH의 인장강도 보다 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 향상 되어 강화재의 종류에 따라 인장강도가 크게 향상되었으며 nobinder와 TiO<sub>2</sub>의 인장강도가 가장 우수한 것으로 나타났다.

2. 기지재에 강화재를 첨가한 금속기 복합재료는 연신율은 감소 하였으나 탄성계수는 nobinder가 29%, SiO<sub>2</sub>가 5%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 23%, TiO<sub>2</sub>가 32%씩 증가되었다.

3. 비커스 경도값은 기지재인 AC4CH에 비해 nobinder가 77%, SiO<sub>2</sub>가 52%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 69%, TiO<sub>2</sub>가 75%씩 증가하였음을 알 수 있었다. 따라서 기지재에 비해 금속기 복합재료의 표면경도가 크게 향상되어 것을 알 수 있다.

4. 인장시험 후 파단면은 인장강도가 증가함에 따라 파단면의 골곡 정도가 평탄하게 나타났으며 인장시 균열의 시작점은 시험편 표면의 최대응력이 작용하는 부에서 발생하며 기지재와 휘스커의 계면문제는 확인할 수 없었다.

#### 후기

본 논문은 경상대학교 지역대학육성사업단의 지원으로 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다

#### 참고문헌

- (1). 박익민, 최정철 : 복합재료, 반도출판사, 개정 1판 (1984)
- (2). 박익민 : 제2회 응고기술 심포지엄, 서울, KIM-KFS (1991)
- (3). 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
- (4). B. F. Quigley, G. J. Abbaschian, R. Wunderlin and R. Mechrabian, " A Method for Fabrication of Aluminum-Alumina Composites", J. of Met. Trans. A, Vol.13A, pp.93.-100, 1982
- (5). 西野直久, 砥線眞一, “ほう酸アルミニウムウイス카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, 1995.