

금속기복합재료의 바인더 첨가제에 따른 강도 특성

박 원 조*·허 선 철*

(2002년 5월 3일 접수, 2003년 5월 22일 심사완료)

The Strength Properties of Metal Matrix Composites by Binder Additives

Won Jo Park and Sun Chul Huh

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 SiO₂, Al₂O₃, and TiO₂. 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 TiO₂ reinforcement. This material is a good substitute for the existing materials that are used in the development of industries today.

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 경량, 고강도의 우수한 소재개발이 요구되고 있으므로 현재 많은 연구자에 의해 활발히 연구되고 있다.^(1,2)

특히, 금속기 복합재료는 우주항공 분야에서 광범위하게 실용화되고 있으며, 비강도, 내열성, 내마모성 및 내구성 등의 기계적 특성이 우수하여 자동차 부품으로 엔진부와 구동축, 브레이크 시스템에도 사용되며 항공기 부품으로도 활용되고 있다.⁽³⁾

복합재료 제조법 중 가압단조법(squeeze casting)은 강화재를 예비성형체(preform)로 제조한 후, 용융기지재를 함침(infiltration)시켜 성형하는 방법으로 주조와 단조를 동시에 병행 할 수 있어서 제조방법이 간단하여 단시간 내에 정밀정형부품을 제조 할 수 있을 뿐 아니라 가압력에 의해 강화재와 기지재간의 결합력을 향상시켜 치밀한 미세조직을 얻을 수 있다.^(4,5) 현재, 금속기 복합재료에 대한 연구는 복합재료의 피로수명 예측에 관한 연구,⁽⁶⁾ 파괴인성 및 피로균열 성장에 관한 연구^(7,8) 등 기계적 특성 뿐만 아니라 파괴역학적인 측면에서도 많은 연구가 되고 있다.

또한, 복합재의 경우 제조공정에 따라 강도차이가 심하기 때문에 제조공정에 따른 강도특성에 관한 연구⁽⁹⁾ 등도 많이 행해지고 있으며 가압력에 따른 강도특성⁽¹⁰⁾ 특히, 바인더의 첨가량에 따른 강도특성⁽¹¹⁾등 많은 연구가 행해지고 있으나

* 책임저자, 회원, 경상대학교 수송기계공학부

해양산업연구소

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

TEL : (055)640-3186 FAX : (055)640-3188

* 회원, 경상대학교 수송기계공학부 해양산업연구소

Table 1 Chemical compositions of AC4CH alloy

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 ₂ O ₃ · 2B ₂ O ₃
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 ³)	2.93
Young's Modulus (GPa)	400
Tensile Strength	8
Moh's hardness	7
Thermal expansion coefficient(10 ⁻⁶ /K)	
axial	4.4
radial	1.9

비교적 가격이 저렴한 알루미늄 보레이트 휘스커에 바인더 종류에 따른 강도특성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서, 본 연구는 기지재인 AC4CH와 강화제인 알루미늄 보레이트 휘스커에 무기바인더를 첨가하지 않은 nobinder와 무기바인더의 종류를 SiO₂, Al₂O₃, TiO₂로 달리하여 가압단조법으로 금속기복합재료를 제작하여, 조직적 특성 및 인장강도, 연신률, 탄성계수등의 기계적 특성의 변화에 대하여 연구하였다.

2. 시험재료 및 실험장치

AC4CH는 순수한 Al-Si-Mg계 합금에서 Fe의 함량을 0.2% 이하로 첨가하여 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 강화제로 사용된 알루미늄 보레이트 휘스커의 물성치를 나타내었다.

Table 3 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 , Al ₂ O ₃ , TiO ₂	46%	13g, 60g, 19.9g

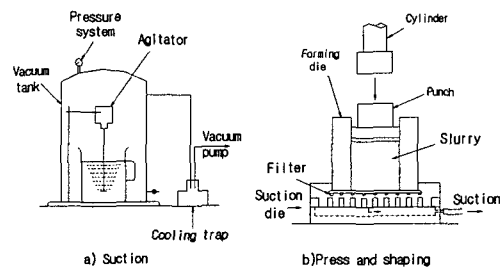


Fig. 1 Process of preform preparation

2.1 프리폼 제작

Table 3은 프리폼의 제작조건을 나타내고 프리폼제작의 개략적인 도식을 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 휘스커의 체적율을 20%로 하기 위해서 휘스커 중량을 (161g)을 다음 식에 의해 계산하였다.

$$\text{휘스커체적} \times \text{휘스커의 체적율} \times \text{휘스커의 밀도} = 161\text{g}$$

휘스커 중량에 대한 이온수 1000ml를 교반하면서, 폴리비닐알콜 및 응집제를 첨가하고, 충분히 교반된 슬러리(slurry) 상태에서, 진공탈포함으로써 기포를 제거한 후, 금형에서 흡입펌프로 이온수를 여과시키면서 압축하여 소정의 프리폼 형상을 완성하였다. 그 후, 3일 정도 자연 건조하고 소결로에서 1100℃ 조건으로 5시간 소결(sintering)한 후, 노냉하여 제작하며, 제작된 프리폼의 크기는 100×110×25(mm)이다.

2.2 가압단조

Fig. 2은 가압단조법의 과정을 나타내고 있다. 제작한 프리폼을 약 700℃로 가열하여, 압착단조장치의 금형 내에 고정하고, 이때의 금형 온도는 200℃이며, 760℃의 용탕을 금형에 주입하여 프

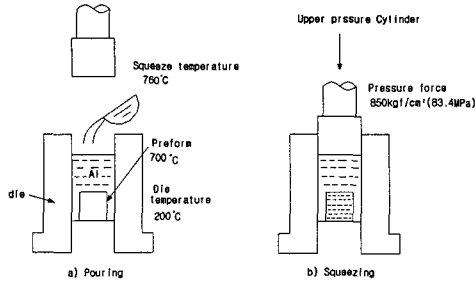


Fig. 2 Process of squeeze casting

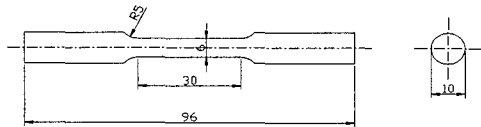


Fig. 3 Configuration of specimen(unit:mm)

레스 장치에서 가압력을 83.4MPa, 가압속도를 50m/sec, 가압시간은 40초의 조건으로 가압하여 프리폼의 공극에 용탕을 주입시킨 후, 응고시켜 금속기복합재료를 제작하였다.

2.3 경도 및 인장시험

경도시험은 마이크로 비커스 경도계(松攞 (株) 제 MHT-1)를 사용하여 기지재인 AC4CH와 nobinder, 그리고 무기바인더로서 SiO₂, Al₂O₃, TiO₂를 첨가한 MMC재의 경도를 측정하였다. 측정조건은 하중 200g, 하중유지 시간은 10초로 상온에서 실시하였으며, 측정위치와 횟수는 랜덤형식으로 각 10점을 측정하여 각각 평균값을 구하였다.

Fig. 3는 인장실험을 위한 시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있다. 기지재인 AC4CH 및 MMC의 인장시험을 위하여 평행부는 내수연마지(#600~1500)를 이용하여 습식 연마하였으며, 최종적으로 알루미늄 분말(#0.3μ)로 정밀 연마하였다. 인장시험은 ASTM D3039규정에 의거 10ton_r MTS(810)으로 실시하였으며, 변위제어모드에서 크로스헤드 스피드는 0.1mm/min으로 실험하였으며, 대기중의 실온에서 실시하고, 최대인장응력, 파단연신을 및 탄성계수의 측정은 익스텐션메타를 이용하여 측정하였다.

Table 4 Mechanical properties of AC4CH aluminum alloy

σ_{UTS} (MPa)	σ_{YS} (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)	Density (g/cm ³)
278	186	68	4.07	65	2.68

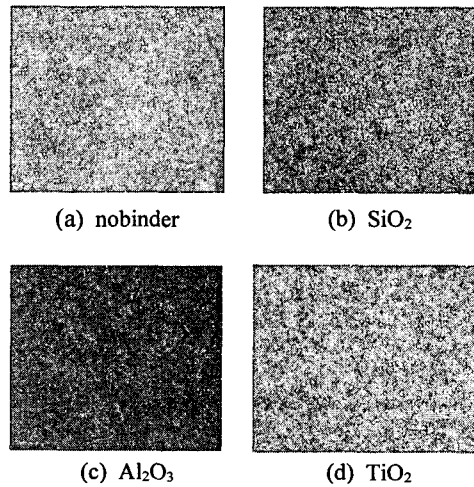


Fig. 4 Optical microstructure of metal matrix composite

3. 시험재료 및 실험장치

3.1 AC4CH의 기계적 성질

Table 4은 AC4CH의 기계적 성질을 나타내고 있으며 인장강도는 278MPa, Hv는 65를 나타내고 있다.

3.2 복합재료의 미세조직

Fig. 4는 복합재료의 미세조직사진을 나타내고 있다. (a)는 nobinder, (b), (c), (d)는 무기바인더인 SiO₂, Al₂O₃, TiO₂를 각각 첨가하였을 때의 조직사진을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것처럼 전체적으로 매트릭스에 휘스커가 균일하게 분포하고 있으므로 가압단조법에 의한 제조가 복합화에 비교적 용이한 방법이라 생각한다. 그러나 광학적 조직검사는 nobinder와 무기바인더 종류에 따른 조직적 특성들은 구분하기 어렵다.

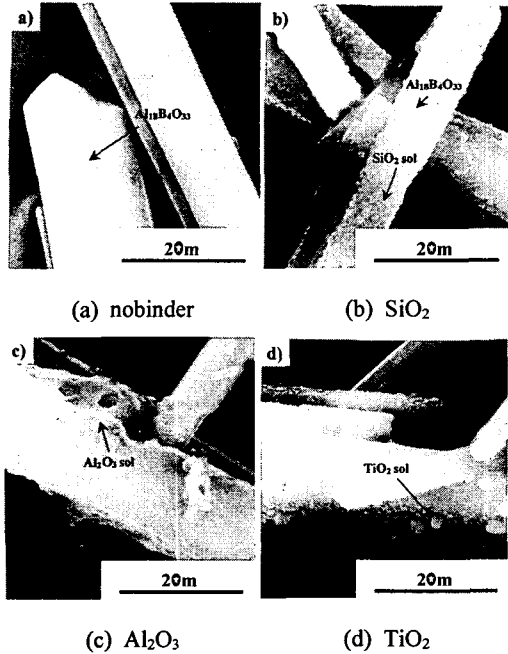


Fig. 5 SEM photographs of the whisker

3.3 휘스크의 미세조직

Fig. 5은 휘스커만을 추출하여 나타낸 조직사진을 나타내고 있다. (a)는 무기바인더를 첨가하지 않은 nobinder로서 프리폼 내의 휘스커의 표면이 깨끗함을 알 수 있다. (b)는 무기바인더 SiO_2 sol을 첨가하여 소결한 프리폼 내부의 휘스커의 SEM사진이다. 프리폼내의 휘스커는 첨가한 무기바인더 SiO_2 에 의해 모두 덮여져 있는 것은 아니고 구상입자로 되어 휘스커 표면에 무수히 부착되어 있으며 휘스커 교차 부분에서 bridging 역할을 하고 있음을 볼 수 있다. (c)는 Al_2O_3 sol을 첨가하여 소결한 프리폼 내부 휘스커의 SEM 사진이다. Al_2O_3 을 첨가한 경우 프리폼내의 휘스커 표면에 전체적으로 부착되어 있지는 않고 휘스커의 일부에 국부적으로 부착되어 있다. 특히 휘스커 상호간의 교차지점에 많이 부착되어 있는 것으로 확인되었다. (d)는 TiO_2 sol의 미소입자가 휘스커 표면 및 교차부분에 무수히 부착되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 무기바인더가 휘스커 표면에 부착되어 휘스커와 휘스커 사이의 bridging 역할을 함으로서 휘스커 상호간의 결합력을 촉진시켜 preform의 변형을 방지하고 이러한 preform의 강화는 복합재 전체 강도를 향상시킬 것이라 생각한다.

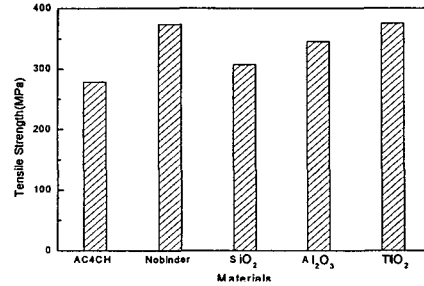


Fig. 6 Tensile strength of AC4CH and metal matrix composite

3.4 인장시험결과

Fig. 6은 기지재 및 모재에 강화재를 첨가한 금속기복합재료의 인장시험의 결과를 나타내었다. AC4CH의 인장강도가 약 278MPa 인데 비해, nobinder의 인장강도는 373MPa, SiO_2 는 307MPa, Al_2O_3 는 345MPa, TiO_2 는 375MPa로서 복합재료의 인장강도가 각각 기지재보다 34%, 10.4%, 24%, 34.8%씩 향상된 것을 알 수 있다. 특히 TiO_2 를 첨가한 복합재료의 최대인장강도가 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다.

복합재의 인장강도는 강화재인 휘스커의 강도에 비례하므로 기지재인 AC4CH보다 복합재의 인장강도가 증가한 것으로 생각한다. 문헌⁽¹³⁾에 의하면 유기바인더를 사용하면 예비성형체의 건조 후 소결과정에서 무기바인더가 섬유와 섬유의 교차점에 분포하도록 하는 효과를 가진다고 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서도 이러한 점에 착안하여 무기바인더 종류에 따른 복합재의 인장강도 향상을 검토하였으나 무기바인더 SiO_2 , Al_2O_3 의 경우는 nobinder보다 강도가 저하하여 강도향상의 효과는 얻지 못하였고, Fig.5의 (d)에서 보는 바와 같이 TiO_2 의 경우는 비교적 휘스커 표면에 바인더가 고르게 분포되어 있으므로 TiO_2 의 인장강도가 가장 우수하다고 생각한다.

3.5 탄성계수 측정결과

Fig. 7은 기지재인 AC4CH와 각각의 MMC간의 탄성력을 시험한 결과이다. 그림에서 기지재인 AC4CH의 탄성계수는 68GPa, nobinder는 88GPa, SiO_2 는 72GPa, Al_2O_3 는 84GPa, TiO_2 는 90GPa로 바인더를 첨가한 MMC의 탄성계수가 평균21%정

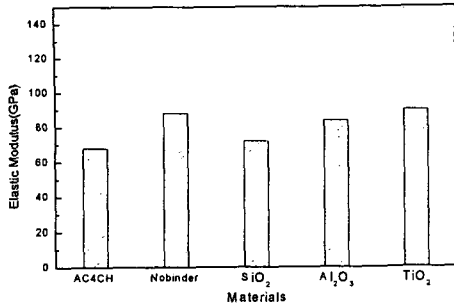


Fig. 7 Elastic modulus of AC4CH and MMC

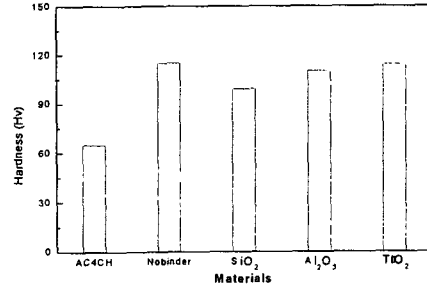


Fig. 9 Vickers hardness of AC4CH and MMC

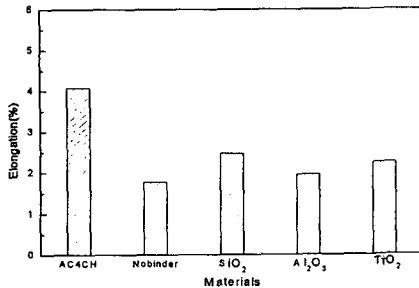


Fig. 8 Elongation of AC4CH and MMC

도 높아졌음을 알 수 있다. 이로서 Fig. 5, Fig. 6 과 비교해 보면 기지재에 휘스커를 첨가하고 강화재의 균일한 분산을 위해 유기바인더를 첨가한 후 예비성형체의 변형을 방지하기 위해 무기바인더 3종류를 첨가한 결과 TiO₂의 경우가 기계적 특성이 가장 우수하다는 것을 알 수 있다.

3.6 연신율의 측정결과

Fig. 8는 기지재 및 강화재를 첨가한 MMC의 파단연신율 시험의 결과를 나타내고 있다.

AC4CH가 4.07%로 가장 높고, SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, 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 비교적 우수한 TiO₂를 첨가제로 사용한다면 적절한 강도와 우수한 연신율을 가진 복합재의 제작이 가능하다고 생각한다.

3.7 비커스 경도 측정결과

Fig. 9은 기지재인 AC4CH와 MMC의 비커스 경도를 측정한 결과이다.

기지재인 AC4CH의 경도값이 65, nobinder의 경도값이 115, SiO₂는 99, Al₂O₃는 110, TiO₂는 114로 나타났고, 기지재인 AC4CH보다 MMC의 경도값이 평균 70%정도로 향상되었다는 것을 알 수 있었다.

이것으로 연성적인 모재를 강화하기 위해 첨가한 휘스커 복합재의 경우 복합화에 따른 표면경도는 향상되었으나 예비성형체의 변형을 억제하기 위해 첨가한 바인더에 따른 표면경도 향상은 확인하기 어려웠고, 무기바인더 중에서 TiO₂는 가장 우수한 기계적 특성을 나타내고 있어 사용상 가장 적합하다고 할 수 있다.

3.8 파면 관찰

Fig. 10은 각 소재에 대한 인장시험 후의 거시적 파면사진과 SEM 파면사진을 나타내고 있다.

(a)는 모재인 AC4CH의 경우로서 전체적으로 비교적 거친 형태의 파면양상을 보이고 있으며 II)의 SEM 파면에서는 전형적인 연성파괴의 거동으로 dimple이 지배적인 것을 확인할 수 있다.

(b)는 nobinder의 경우로서 파면이 거의 연신이 없는 평탄한 파면으로 전형적인 취성파면을 나타내고 있으며 이는 Fig. 8의 결과에서 가장 연신율이 작게 나온 결과와 잘 일치하고 있다. 또한 II)의 SEM 파면에서는 휘스커 강화 복합재의 일반적인 경향인 휘스커의 pull-out 현상이 지배적이며 부분적으로 휘스커의 파단을 관찰 할 수 있다.

(c)는 무기바인더 SiO₂를 첨가하였을 때의 파면 사진으로 파면이 약간 거칠고 단을 형성하고 있

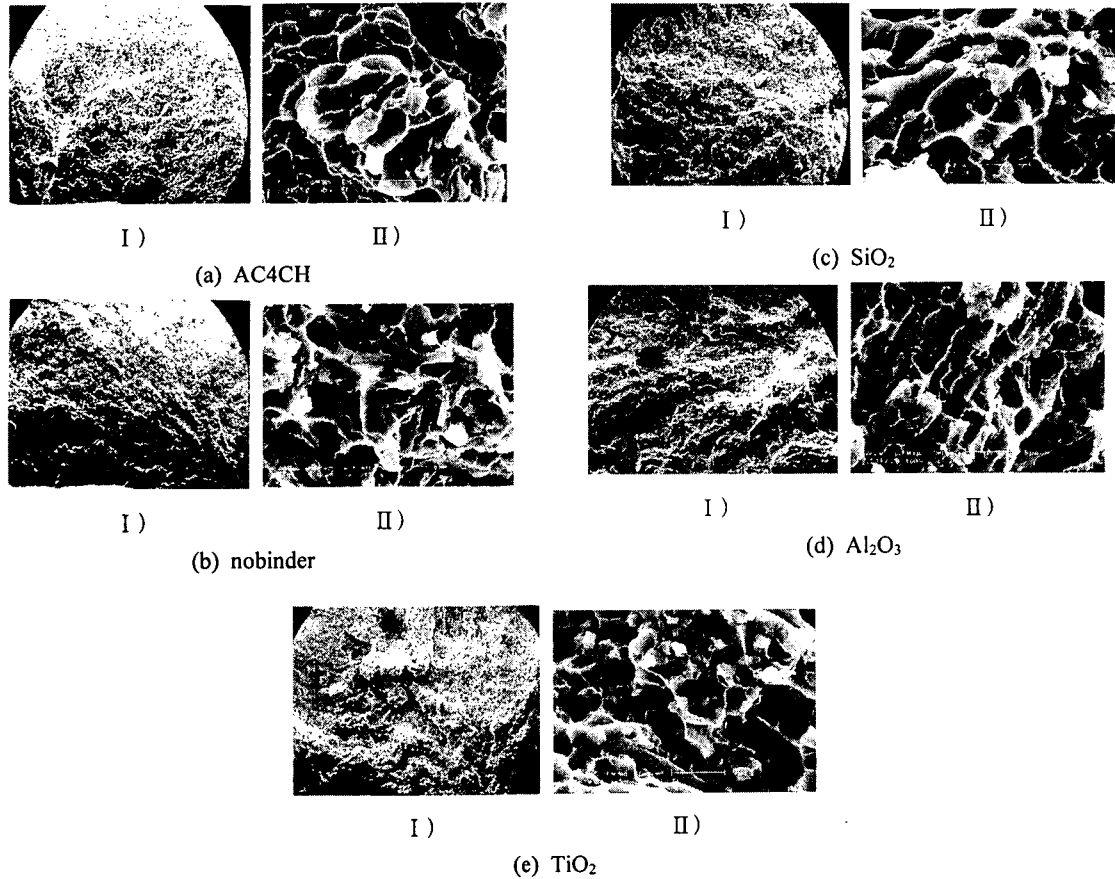


Fig. 10 Microstructure of fracture surface after tensile test

다는 것을 알 수 있다. II)의 SEM 파면에서는 전체적으로 취성파면이나 부분적으로 연성적인 특성인 dimple을 확인 할 수 있으며 이는 Fig. 8의 결과에서 복합재 중에서 연신율이 가장 크다는 결과와 잘 일치하고 있다.

(d), (e)는 무기바인더 Al_2O_3 와 TiO_2 의 경우로서 부분적으로는 평탄하나 큰 단을 형성하며 전체적으로 거친 파면을 나타내고 있다. 특히, TiO_2 의 경우 휘스크의 pull-out 현상을 확인하기는 어려우며 부분적으로 휘스크의 파단을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구조건에서 무기바인더 TiO_2 의 경우가 휘스크 표면에 비교적 고르게 분포되어 whisker간의 bridging 역할을 함으로서 강도가 높아진 것이라 생각한다.

4. 결 론

기지재를 AC4CH로 하고 알루미늄 보레이트 휘스커 강화 복합재료를 제작시 무기바인더 종류를 달리하여 가압단조법으로 제작한 복합재료의 기계적 특성을 시험한 결과는 다음과 같다.

(1) 기지재인 AC4CH의 인장강도 보다 nobinder가 34%, SiO_2 가 10%, Al_2O_3 가 24%, TiO_2 가 34.8%씩 향상되어 복합재의 강도는 향상되었으나, 무기바인더만을 첨가한 nobinder에 비하여 무기바인더 종류를 달리한 경우에 있어서 강도향상의 효과는 확인할 수 없었다.

(2) 비커스 경도값은 기지재인 AC4CH에 비해 nobinder가 77%, SiO_2 가 52%, Al_2O_3 가 69%, TiO_2 가 75%씩 증가하였음을 알 수 있었다. 따라서 기지재에 비해 금속기 복합재료의 표면경도가 크게

향상되어 것을 알 수 있다.

(3) 기지재에 강화재를 첨가한 금속기 복합재료는 연신율은 감소하였으나 탄성계수는 nobinder가 29%, SiO₂가 5%, Al₂O₃가 23%, TiO₂가 32%씩 증가되었다.

(4) 인장시험 후 파면은 nobinder의 경우 휘스크의 pull-out을 관찰할 수 있고, 무기바인더 중 TiO₂의 경우가 휘스크 표면에 고르게 확산되어 휘스크간의 bridging 역할을 함으로서 전체적으로 기계적 특성이 우수하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Hong, C. S. 1994, "Technology and Status of Composites Applications," *Journal of the KSME*, Vol. 34, No. 5, pp. 334~341.
- (2) Eom, M.K and Lee, W.I. 1994, "Composite Materials and Their Manufacturing Processes," *Journal of the KSME*, Vol. 34, No. 5, pp. 310~325.
- (3) Sung-Kil Hong, Jung-Yul Yun, Jung-Chul Choi, 1997, "Fabrication of Aluminum Alloy Composites Reinforced with SiC whisker and Al₂O₃-SiO₂ Short Fiber by Squeeze Casting," *Journal of the Korean Foundrymn's Society*, Vol. 17, No. 1, pp. 28~35.
- (4) Kang, C.G., 1996, "Effects of Secondary Forming Process on Mechanical Properties of SiC/Al Composites Fabricated by Squeeze Casting," *Journal of the KSME*, Vol. 20, No. 11, pp. 3474~3490.
- (5) Kim, K.C., Cho, Y.S., Lee, S.H. and Park, I.M., 1996, "Microstructure and Mechanical Properties of Squeeze Cast AZ91 Mg/Al Borate Whisker Composites," *Journal of the Korean Foundrymn's Society*, Vol. 16, No. 6, pp. 85~97.
- (6) Lee, T.S., Kwon, J.D., Kishi, T., Shiwa, M., Kim, S.T., Lee, Y.T., 1995, "Evaluation of Fracture Mechanism for SiC/SiC Ceramic Matrix Composites by Acoustic Emission Method," *Journal of the KSME*, Vol. 19, No. 10, pp. 2421~2430.
- (7) Ahn, H.K., 1998, "Static and Dynamic Toughness Evaluation in SiC/6061 Al Composite," *Korean Journal of Materials Research*, Vol. 8, No. 6, pp. 565~572.
- (8) Choi, Y.G., Lee, T.S. and Lee, M.H., 1995, "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.
- (9) 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.
- (10) In-Dong Yeo, Chi-Hwan Lee, 1994, "A Study on Interfacial Reactions of δ -Al₂O₃ Short Fiber Reinforced AC4C Matrix Composite Materials Manufactured by Squeeze Casting Method," *Journal of the Korean Foundrymn's Society*, Vol. 14, No. 4, pp. 345~352.
- (11) In-Dong Yeo, Chi-Hwan Lee, 1995, "Influence of Binder and Applied Pressure on Tensile Strength of AC4C/Al₂O₃ Composites Made by Squeeze Casting Process," *Journal of the Korean Foundrymn's Society*, Vol. 15, No. 2, pp. 138~145.
- (12) Kyung Cheol Moon, Jun Hee Lee, 1994, "The Tensile Properties and Microstructure of AC4A/SiC Composites by Squeeze Casting," *Journal of the Korean Foundrymn's Society*, Vol. 14, No. 2, pp. 176~187.
- (13) Krager, G., Kainer, K.U., 1993, "Characterisation of Ceramic Fiber Preforms," *ICCM9*, Vol. 2, pp. 15~22.