

섬유/입자 혼합 금속복합재료의 제조 및 특성평가

정성욱* · 남현욱* · 정창규* · 한경섭**

Fabrication of Fiber/Particle Hybrid MMCs and Analysis of the Mechanical Properties

S.W. Jung, H.W. Nam, C.K. Jung and K.S. Han

Key Words: Al₂O₃, hybrid MMCs, tensile strength, elastic modulus

Abstract

This study developed Fiber/Particle Hybrid MMCs and analyzed their mechanical properties. Using Al₂O_{3f} and Al₂O_{3p} with the fiber to particle ratio of 1:1, 1:3, 1:5 hybrid preform and MMCs are fabricated. For the analysis of the mechanical properties, three point bending tests were performed for the preform and tensile test for the MMCs. The experimental results show that the hybrid MMCs can be successfully fabricated using the equipment of fiber preform fabrication system and squeeze casting method. And as the amount of particle in hybrid MMCs increases, the tensile strength, elastic modulus and the volume fraction of reinforcement increases.

기호설명

E : elastic modulus

V : volume fraction

c, f, p, m : subindex of composites, fiber, particle and matrix

$E_1, \nu_{12}, G_{23}, K_{23}$: elastic constants of representative volume element

1. 서론

금속복합재료의 제조에 널리 사용되는 방법중 하나는 가압주조법이다. 이 방법은 기존의 금속재료의 가공방법을 그대로 사용할 수 있어 산업에 쉽게 적용할 수 있고, 대량생산에 용이하므로 생산 비용이 저렴하여 제품의 상용화에 유리한 것으로 알려져있다[1].

가압주조법으로 금속복합재료를 제조하기 위해서는 예비성형체의 제조가 요구된다. 예비성형체

는 일반적으로 SiC, Al₂O₃, Alborex, 등의 세라믹 보강재들을 단섬유 섬유형태로 가공하여 사용한다. 단섬유 형태의 보강재는 낮은 부피분율의 예비성형체 제조가 가능하며 섬유와 섬유간의 접합 부분에 무기성형체를 첨가하여 결합시키므로 가압주조시에도 형상을 유지할 수 있는 충분한 압축강도를 가지는 예비성형체를 제조할 수 있기 때문이다.

보강재가 입자형태로 존재할 경우 낮은 부피분율의 예비성형체 제작은 용이하지 않다. 20% 이하의 부피분율로 제작되는 금속복합재료는 컴포캐스팅, 분말야금법과 같은 예비성형체를 필요로 하지 않는 방법을 도입할 수 있으나 보강재와 모재가 잘 섞이지 않음으로 인한 불균일한 특성과 높은 생산원가 등의 문제가 존재한다.

섬유보강 MMCs와 입자 보강 MMCs는 이와 같은 예비성형체의 특성으로 인해 혼합해서 사용하는 경우가 드물다. 그러나 이러한 어려움을 극복하고 혼합 예비성형체를 제조할 수 있다면 MMCs의 가격을 획기적으로 낮출 수 있다. Table 1은 본 연구에서 사용된 보강재의 종류와 단가를 보여주고 있는데, 섬유가 입자에 비해서

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

Table 1. Materials used in MMCs

Material	Dia. (μm)	Length (μm)	E (GPa)	T.S. (MPa)	Price (₩/kg)
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{f}$	3	150	310	2010	200,000
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{b}$	-	45	380	-	9,000
Al 6061	-	-	70	310	2,500

매우 저렴함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구의 목표는 기존의 공법을 가압주조법을 도입하여 혼합 복합재료를 개발하고 관련 특성을 분석하는 것을 목표로 한다.

2. 금속복합재료의 제조

2.1 예비성형체의 제조

본 연구에서는 진공압 추출법에 의해 예비성형체를 제조했다. 이 방법은 보강재와 성형재가 혼합된 수용액을 진공압에 의하여 빠르게 제거시킴으로써 보강재간의 크기 차이에서 발생하는 불균일한 분포를 최소화시키는데 매우 유용한 방법이다[2]. 무기성형체는 SiO_2 를 수용액에 5 wt. % 첨가하였다. 예비성형체는 진공압에 의한 수분 제거후에 초음파에 의해 건조시킨 후 1000°C 에서 2시간 소결하였다.

섬유 보강재를 사용한 예비성형체의 부피비는 섬유의 종횡비와 평균길이에 의해 결정되나 Fig.1의 펀치의 가압력을 통해 어느 정도 조절이 가능하다. 이 경우 섬유가 펀치의 압력은 섬유의 파손이 일어나지 않을 정도의 압력까지 가해져야 한다. 입자형 보강재의 경우 파손을 고려할 필요 없이 높은 압력을 가할 수 있으나 본 연구에서 제조된 혼합복합재료의 예비성형체는 섬유 보강재의 파손이 일어나지 않도록 1기압으로 일정하게 유지시켜 복합재료를 제조하였다. 이와같이 제조된 예비성형체는 섬유와 입자의 혼합비에 따라 부피가 결정된다. Table 2는 본 연구에서 사용된 예비성형체의 부피분율과 조성을 보여준다.

2.2 MMCs의 제조

각각의 혼합 예비성형체에 대한 금속복합재료는 가압주조법을 사용하여 제조하였다. 제조조건은 알루미늄 기지재를 780°C 에서 용융한 후, 450°C 로 예열된 예비성형체에 25MPa 의 압력으로 침투시켰다. 이 때, 금형의 예열온도는 예비성형체와 같은 450°C 로 하였다.

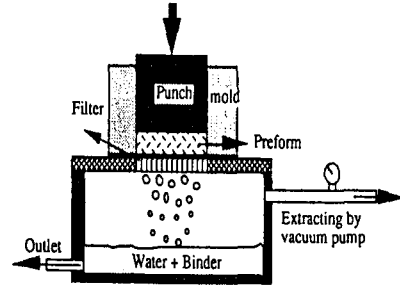


Fig.1. Schematic diagram of preform fabrication

Table 2. Composition of hybrid preforms

Material	Matrix	Fiber	Particle
Fiber	88.0	12	-
1:1	85.5	7.3	7.3
1:3	81.2	4.7	13.1
1:5	78.2	4.4	17.4

3. 실험

혼합 예비성형체 및 금속복합재료의 특성평가를 위해 예비성형체에 대해서는 굽힘시험이 금속복합재료에 대해서는 상온 인장시험이 수행되었다. 굽힘 시험은 만능인장시험기(UTM)를 사용한 3점 굽힘시험으로 5mm/min의 변위제어로 수행되었다. 각각의 조건에 대해서 3개의 시험편을 사용하여 시험이 파단될 때의 하중을 측정하였다. 인장시험은 MTS를 사용하여 상온에서 1mm/min 변위제어로 수행되었다. Extensometer를 사용하여 탄성계수를 측정하였으며, 각각의 조건에 대하여 4개의 환봉형 시험편이 사용되었다. 굽힘 및 인장시험의 시험편의 형상은 Fig.2와 같다.

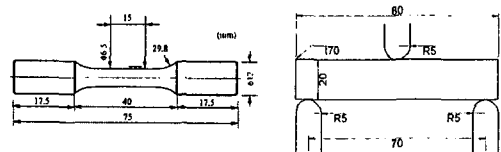


Fig.2. Test specimen for tension & bending

4. 탄성계수 해석

인장실험결과는 탄성계수의 이론적 해석을 통해 섬유/입자 보강재의 영향을 분석하였다. 이러한 해석은 실험에서 사용된 MMCs가 섬유/입자 혼합비에 따라 보강재의 부피비가 각각 다르게 제조되었으므로 섬유와 입자의 영향을 실험적으로는 확인이 어렵기 때문이다.

해석에는 Ashelby Method[3]와 Christen Walls의 3차원 랜덤배향 탄성계수 해석결과[4]를 혼합법칙[5,6]을 사용하여 적용하였다. 본 장에서 적용된 Ashelby Method는 단순화 된 것으로 입자형 복합재료에 적용가능한 식이며, Christen Walls의 식은 3차원 랜덤 배향의 섬유복합재료에 대해 적용되는 식이다. 혼합복합재료는 두 섬유와 입자의 두 종류의 보강재가 동시에 존재하므로 두 식을 조합하면 탄성계수를 쉽게 해석할 수 있으며 유도과정은 다음과 같다.

혼합복합재료의 탄성계수에 있어서 섬유와 입자보강재는 상호 간섭없이 독립적으로 강화효과를 발생시킨다고 하면 탄성계수는 다음의 혼합법칙으로 표현될 수 있다.

$$E_c = V_f E_f^* + V_p E_p^* + (1 - V_f - V_p) E_m \quad (1)$$

여기서, E^* 은 보강재의 orientation, length 등을 고려한 유효 탄성계수이다.

(1)의 식은 다음과 같이 정리된다.

$$E_c = V_f E_f^* + (1 - V_f) E_m + V_p E_p^* + (1 - V_p) E_m - E_m \quad (2)$$

$$= E_d + E_{cp} - E_m$$

(2)에서 E_d 는 다음의 Christen의 식을 적용하여

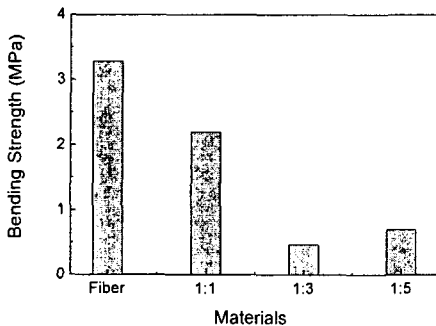


Fig.3. Result of bending test for preforms

구할 수 있다.

$$E_d = \frac{[E_1 + (4v_{12}^2 + 8v_{12} + 4)K_{23}]}{3[2E_1 + 8(8v_{12}^2 + 12v_{12} + 7)K_{23} + 2(G_{12} + 2G_{23})]} \times [E_1 + (4v_{12}^2 - 4v_{12} + 1)K_{23} + 6(G_{12} + G_{23})] \quad (3)$$

E_{cp} 는 다음의 Ashelby 식(4)를 적용하여 구할 수 있다.

$$8E_{cp}^2 - [(7 - 15V_p)E_p + (7 - 15V_m)E_m]E_{cp} + 7E_p E_m = 0 \quad (4)$$

5. 결과 및 토의

예비성형체 압축실험결과는 Fig.3에 나타나 있다. 섬유 예비성형체에 비해 혼합예비성형체의 굽힘강도는 혼합비 1:1에서 섬유 복합재료의 40% 정도로 감소하며, 1:3의 비율에서는 급격히 떨어져 1:5 이상에서는 예비성형체의 형상을 유지하지 못하게 된다. 이러한 원인은 예비성형체의 성형에서 무기성형체에 의한 결합력은 입자보강재를 결합시킬 수 있을 정도로 충분히 강하지는 않으나 섬유와 섬유들은 결합시킬 수 있는 정도이기 때문으로 생각된다. 섬유와 섬유의 경우 무기성형체의 결합력이 약하더라도 섬유의 Bridging 효과에 의해 예비성형체의 성형이 가능하다.

따라서, 혼합복합재료 예비성형체의 제조를 위해서는 가능한 Aspectio Ratio가 큰 섬유를 첨가하여 섬유간의 Bridging효과를 증대시키거나 좀더 강한 성형제를 개발하는 쪽으로 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

혼합금속복합재료의 인장실험결과는 Fig.4에 나타나 있다. Fig.4는 각각의 종류별로 대표적인

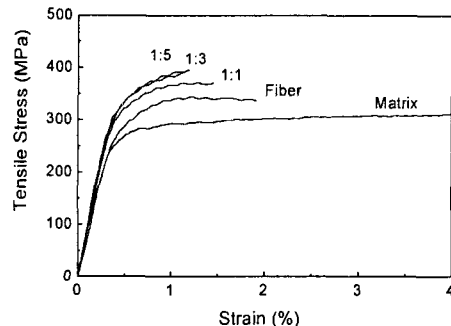


Fig.4. Result of tensile test for hybrid MMCs

응력-변형률 곡선을 보여주고 있다. 혼합복합재료에서 입자의 함유량이 증가할수록 인장강도는 증가하는 반면 연신율은 감소하고 있다. 이러한 경향은 금속복합재료에서 보강재의 함유량 증가 시 나타나는 일반적인 현상으로 본 연구에서 제조된 혼합금속복합재료의 제조상태가 양호함을 의미한다. 혼합비 1:1과 1:3에서는 보강재의 파괴분율은 Table 2에 나타난 바와 같이 섬유보강 복합재료에 비해 2.6%, 5.5% 만이 증가하였으나 강도의 향상은 섬유보강 복합재료에 비해 10%에 이르고 있다. 그러나 섬유의 혼합비가 1:3과 1:5에서는 곡선의 경향의 거의 일치하고 있다. 이러한 경향은 입자의 혼합비가 증가할지라도 강도의 향상에는 한계가 있음을 의미한다.

Fig.5는 각각의 재료에 대한 응력-변위 곡선으로부터 강도와 탄성계수의 평균값을 나타내고 있으며 4장의 이론적 탄성계수 해석결과도 함께 도시하였다. 탄성계수의 경우 혼합비가 증가할수록 지속적으로 증가하고 있다. 혼합비의 증가는 입자의 함유량 증가에 따른 전체 보강재의 파괴분율을 증가시켜 탄성계수를 증가시킨다. 이러한 경향은 이론적으로 볼 때에도 타당하다. 실험과 이론을 비교할 때 절대값에서는 다소 차이가 나지만 경향은 탄성계수의 경향은 거의 일치하고 있다. 한편, 인장강도는 1:3에서 최대값을 보이다가 1:5에서는 오히려 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 섬유와 입자간의 혼합비가 인장강도에 미치는 효과는 탄성계수에 미치는 효과와 다른 메카니즘으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 이에 대한 분석은 향후 연구에서 더욱 추가되어야 할 사항으로 생각된다.

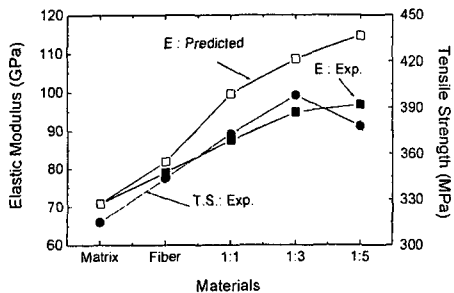


Fig.5.Result of theoretical analysis and tensile test

6. 결론

본 연구에서는 섬유/입자 혼합금속복합재료를 개발하고 관련 기계적 특성을 분석하였으며 다음의 결론을 얻었다.

1. 섬유/입자 혼합복합재료는 섬유복합재료 성형방법으로 성형이 가능하나 예비성형체 제조를 위해서 섬유가 일정 비율 이상으로 첨가되어야 한다.

2. 혼합복합재료에서 입자의 함유량 증가는 인장강도와 탄성계수 및 보강재의 전체 파괴분율의 향상을 가져온다. 그러나 인장강도의 경우 인장강도의 증가에는 한계가 있으며 이를 해석하기 위해 인장강도 메카니즘에 대한 해석이 요구된다.

후기

본 연구는 2000년도 학술진흥재단의 선도연구자 지원과제비로 수행되었으며 이에 감사드립니다

참고문헌

- (1) N.Miura, N.Miyake, "Ceramic Fiber Reinforced Piston for High Performance Diesel Engines", SAE Technical paper series, No. 830252, 1983
- (2) Maxwell, P.B., Martins, G.P., Olson, D.L. and Edwards, G.R. "The infiltration of aluminum into silicon carbide compacts", Metall. Transaction B, vol.21, pp.475-485, 1990
- (3) Corbin, S.F. and Wilkinson, D.S., "The influence of particle distribution on the mechanical response of a particulate metal matrix composite", Acta Metall. Mater., vol.42, pp.1211-1318, 1998
- (4) Christensen, R.M. and Waals, F.M., "Effective stiffness of randomly oriented fiber composites", J. Compos. Mater. Vol.3, No.2, pp352-358, 1968
- (5) Fu, S.Y. and Lauke, B., "Characterization of tensile behavior of hybrid short glass fiber/calcite particle/ABS composites", Composites Part A, Vol. 29A, pp.575-583, 1998
- (6) Liu, R.G, "A step-by-step method of rule of mixture of fiber-and particle-reinforced composites materials", Composite Structures, vol.40, pp.313-322,1998