

섬유/입자 혼합금속복합재료의 인장거동

정성욱*·정창규*·한경섭**

Tensile Behavior of Fiber/Particle Hybrid Metal Matrix Composites

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

Key Words: tensile behavior, stress-strain, MMC, tensile strength

Abstract

This study presents a mathematical model predicting the stress-strain behavior of fiber reinforced (FMMCs) and fiber/particle reinforced metal matrix composites (F/P MMCs). MMCs were fabricated by squeeze casting method using Al₂O₃ short fiber and particle as reinforcement, and A356 aluminum alloy as matrix. The fiber/particle ratios of F/P MMCs were 2:1, 1:1, 1:2 with the total reinforcement volume fraction of 20 vol.%, and the FMMCs were reinforced with 10 vol.%, 15 vol. %, 20 vol. % of fibers. Tensile tests were conducted and compared with predictions which were derived using laminate analogy theory and multi-failure model of reinforcements. Results show that the tensile strength of FMMCs with 10 vol.% of fiber was well matched with prediction, and as the fiber volume increases, predictions become larger than experimental results. The difference between the prediction and experiment is considered to be a result of matrix allowance of fiber damage in tensile loading. As the fiber volume fraction in FMMCs increases, the fiber damage increases and so that the tensile strength is reduced. The strength of F/P MMCs approaches more closely to the prediction than FMMCs reinforced with 20 vol.% of fibers because F/P MMCs contains small quantity of fibers and thus has a positive effect in fiber strengthening.

1. 서론

금속복합재료(MMCs)는 차세대 신소재로 각광을 받고 있다. 이 재료의 발전방향은 저가 보강재의 개발과 저가의 제조공정 개발이라는 두 가지 측면에서 파악할 수 있다. 세라믹 보강재는 단섬유에서 입자형으로 발전되고 있는데, 이는 입자가 섬유에 비해 저렴하며, 대부분의 세라믹이 입자형태로 제조가 가능하므로 개발 가능성이 크기 때문이다. 그러나 입자 보강재로 금속복합재료를 제조할 경우 섬유보강재에 비해 제조에 어려움이 있다. 섬유보강 금속복합재료(FMMC)는 1980년대 가압주조법을 통해 상용화가 되었으나 입자보강금속복합재료(PMMC)의 제조공정인 Powder metallurgy, Pressless infiltration, Composting, Stir casting 등은 보강재의 고른 분산, 제조시간 단축, 보강재의 화학반응 등 상용화를 위해서 극복해야 할 많은 문제를 안고 있다.

본 연구는 섬유/입자 혼합 금속복합재료(F/P MMC)를 가압주조공정을 통해 제조함으로써 입자 보강재의 저렴함과 가압주조법의 생산성을 동시에 가질 수 있게 하였다. 이 재료의 기계적 성질은 기존 FMMC 또는 PMMC와 다른 독특한 특징을 가지므로 이에 따른 해석이 필요하다. 인장강도의 경우 일반적으로 FMMC에 비해 F/P MMC가 낮을 것으로 예상되나 F/P MMC의 강도는 FMMC보다 높은 경우도 보고된 바 있다[1]. 그러나 기존의 강도해석은 실험적인 연구에 한정되어 FMMC 및 F/P MMC의 강도에 대한 고찰에는 한계가 있다. 본 연구는 이러한 새로운 해석방법을 제시하여 이러한 한계를 극복하고 FMMC 및 F/P MMC의 인장하중에 대한 응력-변형을 곡선을 예측하고 이로부터 강도해석을 실시하였다.

2. 실험

FMMC 및 F/P MMC는 진공압출에 의한 예비성형제 제조에 이어 가압주조공정을 통해 제조되

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

었다. 이러한 MMC는 주조용 알루미늄 합금인 A356과 Al₂O_{3f} 단섬유 및 Al₂O_{3p} 입자를 사용하였으며 이들에 대한 기계적 성질은 Table 1에 나타나 있다. 진공압 추출법 및 가압주조공정은 FMMC제조에 널리 사용되는 방법으로 세부적인 공정조건은 참고 문헌[2]과 동일하며 제조된 MMC의 종류는 Table 2와 같다.

Table 1. Matrix and reinforcements

Materials	Dia. (μm)	Length (μm)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)
Al ₂ O _{3f}	3	100~150	2000	450
Al ₂ O _{3p}	3	3	-	300
Al 356	-	-	0.79	70

Table 2. Composition of MMCs

Materials	Volume fraction (%)		
	Total	Fiber	Particle
A356	-	-	-
F10	10.0	10.0	-
F15	15.0	15.0	-
F20	20.0	20.0	-
F/P(2:1)	20.0	13.3	6.67
F/P(1:1)	20.0	10.0	10.0
F/P(1:2)	20.0	6.67	13.3

3. 이론

3.1 FMMC의 강도예측

FMMCs의 인장강도 해석을 위해서는 섬유와 매트릭스의 방향과 길이(L/d)의 영향을 동시에 고려해야 한다. MMCs내의 섬유는 2차원 또는 3차원 랜덤배향으로 가정할 수 있으며 이에 따른 강화효과는 섬유 각 방향에 대한 예측을 바탕으로 평균하는 방법이 널리 사용된다. 한편 섬유의 길이 효과는 Shear lag 모델이 주로 사용된다. 혼합법칙을 사용한 강도해석의 예를 들면 다음과 같다[3,4].

$$\sigma_c = \chi_1 \chi_2 V_f \sigma_{fu} + (1 - V_f) \sigma_m \quad (1)$$

여기서, χ_1 과 χ_2 는 각각 배향인자와 길이인자이며 σ_c , σ_{fu} , σ_m 는 각각 복합재료, 섬유, 모재의 강도를 나타낸다. 이와 같은 기존의 예측식들은 FMMCs의 파괴시점에서의 강도를 예측하나 중간 단계인 인장 거동을 나타내지 못한다.

MMCs의 강도는 보강재의 강화효과 외에도 모재의 특성변화, 잔류응력의 영향, 열처리 조건, 기공함유 등 많은 요소들이 복합적으로 작용하므로 이러한 다양한 요소에 대한 영향을 살펴보기 위해서는 인장

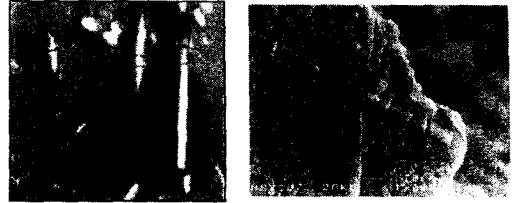


Fig.1. SEM showing fiber failure of FMMCs[5]

거동의 예측이 필수적이다.

강도해석을 위해서는 MMC의 주요 강화기구와 파손기구에 대한 고찰이 선행되어야 한다. MMC의 주요 강화기구는 보강재의 응력전달이며 주요 파손 모드는 보강재로 알려져 있다[5,6]. Fig.1은 Al₂O₃가 첨가된 FMMC의 인장하중시 MMC의 파손기구를 보여주는 것으로 섬유의 파손이 주요한 요소임 보여준다. Fig.1에서 섬유는 한 번 이상 파손되어 있는데 이는 섬유가 MMC의 변형을 증가에 따라 단단계로 파손됨을 의미한다. 이러한 단단계 파손은 응력전달효과의 변화를 가져와 MMC의 응력-변형률 선도에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

다단파손모델

본 연구는 섬유의 이러한 다단 파손에 대한 영향을 고려한 해석모델을 제안하고 선형 탄성이론을 도입하여 FMMC의 응력-변형률 곡선을 예측하였다. 해석 순서는 다음과 같다.

Step 1. 1방향 FMMC의 응력-변형률 계산

ABAQUS 6.1을 사용하여 1/4 축대칭 모델을 정의하고 탄-소성 해석을 실시하여 섬유의 종횡비 L/d=40, 20, 10, 5일 경우와 부피분율 10, 15, 20 vol.%에 대해 응력-변형률 곡선을 계산한다. Fig.2는 해석에 사용된 FEM 모델을 나타낸다.

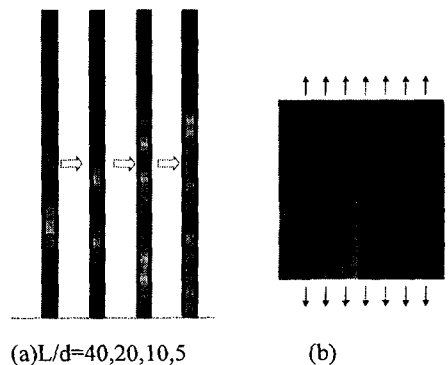


Fig.2. FEM model for (a)FMMC and (b)PMMCs

Step 2. 1방향 FMMC의 각 방향의 탄성계수 계산

FEM에서 구해진 1방향 복합재료의 응력-변형률 관계로부터 각 변형률 구간에서의 1방향 탄성계수를 구하면 다음과 같다.

$$E_{11} = \frac{\Delta(\sigma_{c1}|_{\epsilon+\Delta\epsilon} - \sigma_{c1}|_{\epsilon})}{\Delta\epsilon} \quad (2)$$

응력-변형률 곡선은 섬유의 파손을 고려해서 결정한다. Fig.3는 수식(2)에 사용된 응력-변형률 곡선으로 초기 변형률은 L/d=40 섬유의 곡선으로부터 시작하여 섬유의 파손이 일어남에 따라 단계적으로 L/d=20, L/d=10, L/d=5의 곡선을 따라간다. 이때, 섬유의 파손 기준은 섬유의 축방향 인장응력으로부터 다음 식과 같이 표현된다.

$$\sigma_f \geq \sigma_{fu} / \cos^2 \theta \quad (3)$$

여기서, 섬유에 작용되는 축방향 응력 σ_f 이 섬유의 강도보다 낮을 경우 섬유는 파손되며 길이가 1/2로 줄어든다. 한편 transverse modulus E_{22} , in-plane shear modulus G_{12} 는 Halpin-Tsai의 식으로부터 구하며 Poisson's ratio ν_{12} 는 혼합법칙으로부터 계산한다.

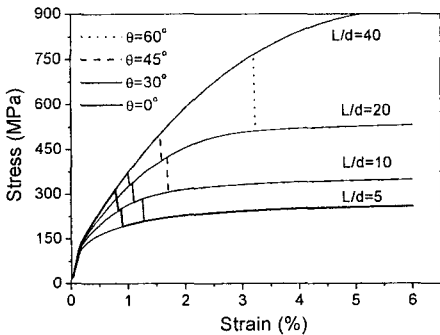


Fig.3. Stress-strain for aligned FMMC from FEM.

Step 3. 복합재료의 강성행렬 계산

Step 2 에서 계산된 탄성계수들로부터 Laminate theory를 적용[7]하여 일방향 배향 FMMC의 강성계수 Q_{ij} 를 계산한다.

$$\begin{aligned} Q_{11} &= E_{11} / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), & Q_{22} &= E_{22} / (1 - \nu_{12}\nu_{21}) \\ Q_{12} &= \nu_{21}Q_{11}, & Q_{66} &= G_{12}, & Q_{16} &= Q_{26} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

수식(4)를 행렬 변환시켜 일방향 FMMC가 각 방향으로 위치했을 경우에 대한 강성계수 \bar{Q}_{ij} 를 계산하고 이러한 각각의 방향을 모두 합산함으로써 랜덤배향 FMMCs의 강성계수 \bar{Q}'_{ij} 를 계산한다. 다음은 이러한 합산 계산식을 나타낸다.

$$\bar{Q}'_{ij} = \int_0^{\pi/2} \bar{Q}_{ij} \sin^2 \theta d\theta \quad (5)$$

Step 4. FMMC의 응력-변형률 계산

수식(5)를 사용한 Laminate theory로 부터 FMMC의 각 변형률에 대한 순간 탄성계수가 계산되며 이를 적분하면 전체 변형률 구간에 대한 응력-변위관계를 계산할 수 있다.

3.2 F/P MMC의 강도해석

F/P MMCs의 강도해석은 FMMC와 달리 보강재의 배향효과와 파손을 고려하지 않고 입자가 최대로 하중전달을 할 때를 이론값으로 하여 FEM해석을 통해 예측한다. Fig.2(b)는 FEM해석 모델로서 해석방법은 FMMC와 동일하며 모재의 물성은 앞 절에서 계산된 FMMC의 물성을 도입한다.

4. 실험 및 해석결과

Fig.4는 FMMC와 F/P MMC의 인장실험 결과이다. FMMCs의 강도는 섬유의 함유량이 증가함에 따라 순차적으로 증가하며 연신률은 저하된다. 한편 F/P MMC의 경우 입자의 함유량에 따른 강도의 차이는 적으며 전체적으로 20% FMMC보다는 낮고 10% FMMC보다 높게 나타난다. 이로부터 입자의 강화효과는 있으나 섬유보강재보다 낮음을 알 수 있다.

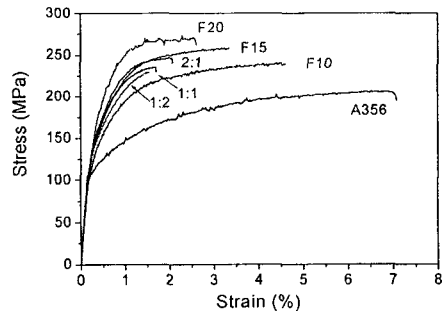


Fig.4. Stress-strain from tensile tests.

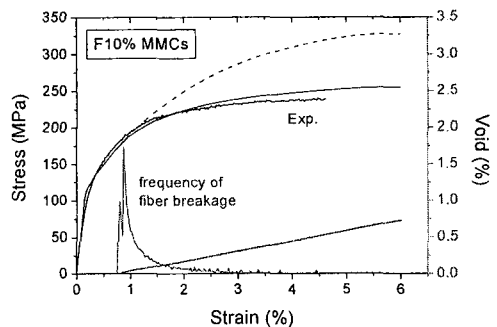


Fig.5. Stress-strain predicted and tested for FMMC.

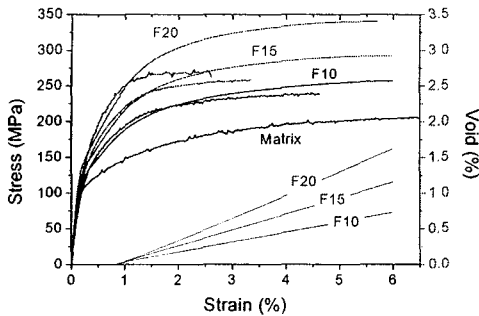


Fig.6. Stress-strain for FMMC according to V_f

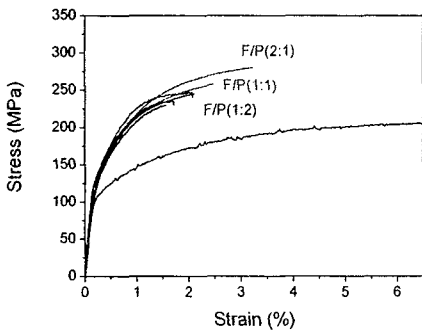


Fig.7. Stress-strain for F/P MMCs

Fig.5는 섬유가 10% 첨가된 FMMC에 대한 해석 및 실험결과이다. 점선은 섬유의 다단 파손모델을 적용하지 않은 경우이며 실선은 섬유의 다단 파손모델이 적용된 예측결과이다. 점선과 실선이 분리되는 지점에서 섬유의 파손이 시작되며 이에 따른 기공이 발생한다. 섬유의 파손빈도는 0.7%정도의 변형률에서 최대가 되며 이후로 점차 감소하나 파손에 따른 기공은 점차로 증가한다. 이러한 파손을 적용한 예측결과는 실험과 잘 일치하여 제안된 다단파손모델이 성공적임을 보여준다.

Fig.6은 섬유의 부피분율의 영향을 나타낸다. 섬유의 부피분율이 증가할수록 이론값과 예측값의 차이가 커지는데 이는 섬유의 파손에 따른 기공이 부피분율이 클수록 증가하기 때문이다. 이러한 기공은 다단 파손모델에서 고려하지 않은 모재의 손상이 MMC의 파손에 영향을 주기 때문인 것으로 사려된다. 이 결과는 섬유보강재의 증가가 FMMC의 강도증가와 비례관계가 아님을 보여주는 것으로 섬유의 부피분율이 낮을수록 섬유 파손에 따른 기공이 적어져서 예측값과 실험값이 일치함을 의미한다.

Fig.7은 해석을 통해 구해진 F/P MMC의 강도예측과 실험결과를 보여준다. 이론값은 Fig.2(b)의 해석모델로부터 계산된 것으로 F/P MMC의 연신률은 모재의 연신률 한계를 기준으로 정의하였다. 해석결과 섬

유의 함유량이 많을수록 강도는 증가되나 연신률은 저하되는 것으로 예측되며 실험결과에서도 유사한 경향이 나타나고 있다. F/P MMC의 실험결과는 Fig.6의 F20의 섬유복합재료보다 이론적 예측과 더욱 잘 일치하는데 이는 F/P MMCs에 사용되는 섬유보강재의 양이 FMMC에서 보다 적기 때문이다. 즉 섬유의 다단 파손에 따른 기공이 섬유의 함유량이 낮을수록 적어지며 결과적으로 이론값에 가까워지기 때문이다. 그러나 F/P의 강도 또한 예측값보다 낮은게 나타나는 것은 본 해석에서 고려하지 않은 입자의 파손 등이 원인으로 생각된다.

4. 결 론

1. MMCs의 섬유보강재는 인장하중시 다단계로 파손되며 이에 따른 인장거동을 보인다. 이러한 인장거동은 다단파손모델을 도입한 해석을 통해 성공적으로 모사된다.

2. 다단파손모델을 적용한 FMMC의 인장거동은 10 vol.%이하의 섬유가 보강된 FMMCs에 대해서 예측값이 잘 일치하며 섬유의 부피분율이 증가할수록 실험값은 예측값보다 작아진다.

3. MMCs의 인장강도는 섬유의 부피분율과 종횡비(L/d)의 증가를 통해 향상시킬 수 있으나 일정 부피분율 및 종횡비 이상에서는 섬유의 다단파손에 의해 강도 향상에 한계가 있다.

4. F/P MMCs의 인장강도는 동일 부피분율로 보강된 FMMCs보다 실험값이 예측값에 근접한다. 이는 F/P MMCs의 섬유보강률이 FMMCs보다 상대적으로 낮으므로 섬유의 다단파손에 따른 손상률이 FMMCs보다 낮기 때문이다.

후기

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S.W.Jung, J.H.Lee, J.B.Nam, H.W.Nam and K.S.Han, Key Eng. Mater. 183 (2000) 1297.
- [2] J.I. Song, K.S. Han, J. Mater. Sci. 31 (1996) 2615.
- [3] S.Y. Fu, B. Lauke, Composites A29 (1998) 575.
- [4] S.Y. Fu, B.Lauke, Composites Sci. Technol. 56 (1996) 1179.
- [5] C.S. Liao, J.C. Huang, Mater. Sci. Eng. A271 (1999) 79.
- [6] E. Le Pen, D. Baptiste, G. Hug, Int. J. Fatigue 24 (2002) 205.
- [7] S.Y. Fu, B. Lauke, Composites A29 (1998) 575.