

## 論文

용탕단조법에 의하여 제조한 단섬유 강화 금속복합재료의  
계면특성을 고려한 강도해석

구광서\* · 강충길\*\*

**Strength Analysis Considering Interface Characteristics of  
Short Fibers Reinforced Metal Matrix Composites Fabricated  
by Squeeze Casting**

Gwang Seo Ku\* and Chung Gil Kang\*\*

**ABSTRACT**

Tensile properties of metal matrix composites fabricated by squeeze casting process were evaluated as a function of various forming conditions. To investigate reinforcement behaviour and bonding phenomena between fiber and matrix, the microstructures of fracture surfaces were examined using SEM. And dispersion states of fibers were also examined. For comparison, numerical results based on the modified shear lag method are presented. A concept of bonding strength coefficient is introduced to compensate bonding phenomena between fibers and the matrix. Variables considered were fiber volume fraction, fiber aspect ratio, interface strength between fiber and matrix, fiber orientation and mechanical properties of fiber and matrix.

## 초 록

용탕단조법에 의하여 금속복합재료를 제조하고, 성형조건에 따른 금속복합재료의 기계적 성질의 변화를 조사하였다. 또한 강화기구 및 기지재와 강화재의 계면의 상태 및 섬유의 분산 상태를 관찰하기 위해 광학현미경 및 주사현미경에 의한 금속의 미세조직을 관찰하였다. 제조된 금속복합재료의 인장 강도를 예측하기 위한 방법으로 수정된 Shear-lag method를 사용하였으며 계면에서의 결합 상태를 나타내기 위하여 계면 강도 계수를 제안하였다. 실험결과와 비교하여 본 결과 섬유의 길이가 임계길이에 가까워 질수록 인장강도에 미치는 접합상태의 영향이 큰 것을 확인할 수 있었다.

**1. 서 론**

용탕단조법에 의한 금속복합재료의 제조는 성형 시간이 짧고, 연속적인 공정으로 제품의 크기와 형상에

구속되지 않는 부품 제조가 용이하며 금속복합재료 내부의 결합이 비교적 작기 때문에 주요한 연구 대상이 되어 왔다[1~2]. 용탕단조법에 의한 제조 공정은 예비성형체의 제조와 가압 함침성형으로 구분되며, 성형조

\*연암공업대학 기계설계과

\*\*부산대학교 기계공학부

건에 따라 기지재와 섬유 사이의 계면 상태, 섬유의 배향, 금속 복합 재료의 결합 등에 있어서 큰 차이를 나타내고 결과적으로 금속복합재료의 인장 거동에도 영향을 미치게 된다[3]. 주요한 성형변수로는 가압력, 섬유의 체적 분률, 가압속도, 예비성형체의 예열 온도, 섬유의 형상 및 결합재의 양 등이 있으며, 양호한 상태의 금속복합재료를 제조하기 위해서는 이러한 성형 변수가 금속복합재료의 미세조직에 미치는 영향을 정량적으로 파악하여야 한다.

본 연구에서는 용탕단조법에 의하여 금속복합재료를 제조한 후 섬유의 체적 분률 및 섬유의 길이에 따른 탄성계수 및 인장강도를 실험적으로 구하고, 계면의 상태와 섬유의 분산상태를 관찰하였다. 금속복합재료의 인장 강도를 예측하기 위한 방법으로, 금속복합재료의 계면에서의 결합 상태를 나타내기 위하여 Fukuda 등[4]이 제안한 수정 Shear-lag method에 계면 강도 계수를 도입한 해석 모델링을 제안하였으며, 또한 해석의 타당성을 조사하기 위하여 실험 결과와 비교하였다.

## 2. 실험

### 2.1 예비성형체 제조

예비성형체 제조를 위한 금형은 자체 설계, 제작하였으며 그 주요부는 금형 부분과 섬유 체적분률을 제어하기 위한 배수 및 진공 장치 부분으로 이루어져 있다[5]. 성형 방법으로는 복잡한 형상에 대하여도 섬유 체적 분률의 제어가 용이한 진공 가압 성형법을 택하였다. 사용된 강화재는 길이가 각각 50, 150, 200 $\mu\text{m}$ 이고 평균 직경이 2~3 $\mu\text{m}$ 인 ICI사의 SAFEIL(RF Grade) 단섬유이며, 섬유의 체적 분률( $V_f$ )은 각각 10, 15, 20%로 제조하였다.

### 2.2 금속복합재료의 제조

기지재로는 알루미늄 합금인 Al2024를 사용하여 합침실험을 하였고, 금속복합재료를 제조할 때 예비성형체의 섬유 분률 및 기지재의 종류등에 따라 성형조건을 변화시킬 수 있도록 실험장치를 설계 제작하였다[6]. 성형 중 금형과 펀치 부분의 온도를 측정하기 위하여 펀치부에는 펀치 표면으로부터 2mm되는 지점, 다이 부분에는 2개의 열전대를 좌우에 각각 1개씩, 캐비티 내부 표면으로부터 2mm의 위치에 직경 1.6mm의 열전대를 설치하였다.

유압프레스는 최대 100톤까지 가압이 가능하며 펀치의 가압속도를 조절할 수 있는 구조로 되어 있다. 프레스의 압력을 소정의 압력으로 고정된 뒤 이형재를 금형 및 펀치에 균일하게 도포한 후 펀치를 하강하여 금형속에 넣은 후 예열시킨다. 금형이 유지 온도에 달하면 미리 전기로에서 예열시킨 예비성형체를 금형안에 위치시키고, 실험온도로 용융한 기지재를 금형의 캐비티내에 주입한 후 가압하였다. 이 때 금형온도 및 가압력을 측정하여 기지재가 용탕내에 함침되는 시간과 압력과의 관계를 정량적으로 파악하였다. 30초 동안 가압한 후 밀판을 분리하고 150 $^{\circ}\text{C}$ 까지 강제 냉각시킨 후 펀치를 하강시켜 금속복합재료를 추출하였다.

제조된 금속복합재료는 492 $^{\circ}\text{C}$ 에서 90분간 용체화 처리를 한 후 191 $^{\circ}\text{C}$ 에서 12시간 동안 인공 시효하였다. 인장 시편은 평행부의 길이와 직경이 각각 25mm, 5mm가 되도록 가공하였으며, 인장속도는 0.4mm/min으로 상온에서 실험하였다.

## 3. 이론 해석

### 3.1 해석 모델

섬유의 배향이 일정하고 길이가 긴 경우 금속복합재료의 강도를 해석하기 위한 유용한 방법으로 Shear-lag method가 많이 사용되고 있으며, 섬유의 길이 및 배향이 일정하지 않은 경우에도 적용 가능하도록 이 모델을 기본으로 한 수정 해석 방법이 제시되어 왔다. 이러한 해석 모델은 기지재와 섬유 사이의 계면 전체에서 완전 결합을 전제로 해석한 것이다. 그러나 성형 조건에 따라 계면에 기공 및 불순물이 존재하게 되고 부분적으로 완전한 결합이 이루어지지 않은 경우가 있다. Fig.1(a)~(c)는 실험에서 가압속도를 달리 하였을 때, 인장 시편의 파단면을 관찰한 SEM 사진이다. 가압속도가 느린 Fig.1(b)와 Fig.1(c)에서 보여주는 기공은 인장 강도에 크게 영향을 미치며, 가압속도가 증가할수록 기공이 증가되어 인장강도가 감소함을 알 수 있었다[6]. 위의 원인은 가압 속도가 증가할수록 예비성형체가 변형되어 기지재의 함침이 용이하지 않기 때문이다.

Fig.2(a)(b)는 예비성형체의 제조시 결합재의 양을 각각 섬유 무게의 20%, 30% 사용하였을 때 예비성형체에 잔류하는 결합재를 나타낸 SEM 사진이다. 결합재의 양이 20%일 때는 결합재가 섬유 표면에 균일하

게 분산되어 있으나 30%일 때는 섬유의 표면에 화살표로 나타난 것과 같은 덩어리 형태의 결합재가 다수 관찰되었다. Fig.2에서 보여주는 바와같이 덩어리 형태의 결합재가 기지재와 섬유의 계면에서 불순물로 작용

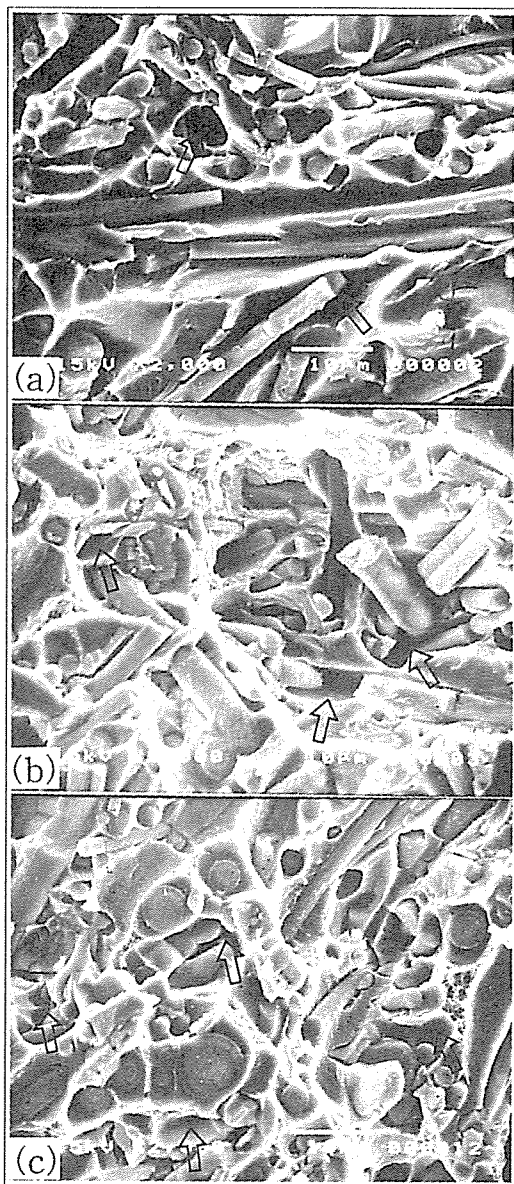


Fig.1. SEM micrographs of tensile specimens in the fracture surfaces for various velocity conditions; (a)  $V=4\text{mm/sec.}$ , (b)  $V=12\text{mm/sec.}$ , (c)  $V=22.6\text{mm/sec.}$  ( $T_m=400^\circ\text{C}$ ,  $T_i=800^\circ\text{C}$ ,  $T_p=800^\circ\text{C}$ ,  $V_f=15\%$ ,  $l_f=150\mu\text{m}$ ,  $P=75\text{MPa}$ )

하여 계면 강도를 저하시키는 요인이 된다. 이러한 계면에서의 기공과 불순물의 영향을 고려하여 강도를 예측하면 향후 복합 재료의 부품 설계에 있어서 유용성이 있으리라고 생각된다. 그러나 복합 재료의 제조 공정에서 계면 현상을 정량화하기는 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 기지재와 섬유의 계면에서 접합강도 계수를 도입하여 인장강도를 예측하는 방법을 제안하고자 한다. Fig.3은 기지재와 섬유의 결합상태를 도식적으로 나타낸 것이다.

$A_t$ 는 섬유의 전체 표면적을 나타낸 것이고  $A_b$ 는 기공 및 불순물이 차지하는 면적을 제외한 결합면적을 나타낸 것이다.

본 연구에서 접합강도계수  $k$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$k = A_b / A_t \dots\dots\dots (1)$$

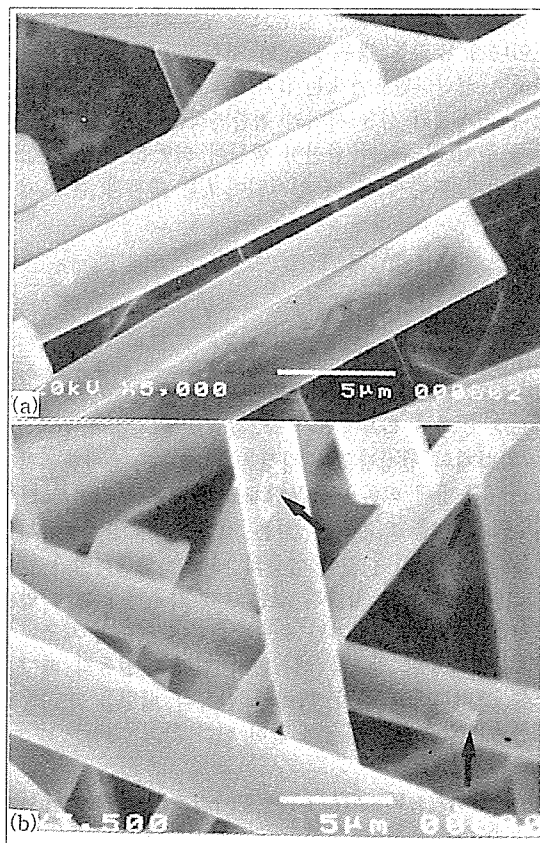


Fig. 2. SEM micrographs of preform showing the distribution of binder; (a)  $W_b=20\%$ , (b)  $W_b=30\%$

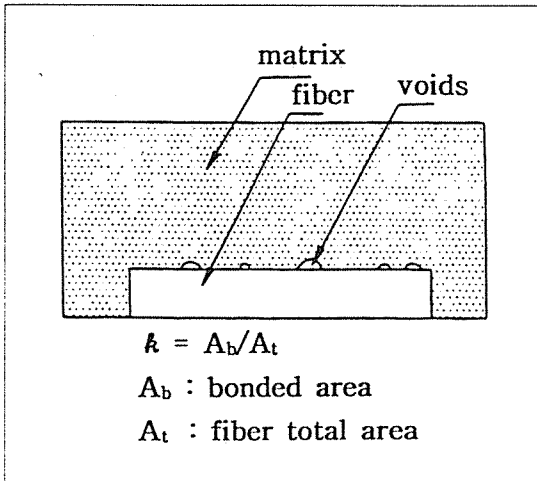


Fig. 3. Schematic of bonding strength coefficient between matrix and fiber

제조 공정상 불완전 함침으로 인하여 계면 접합이 일어나지 않았을 경우 계면의 접합강도를  $k\tau$ 로 평균화하여 계산하였으며  $k$ 는 0~1까지 변하는 값으로 하였다. 기지재와 섬유 사이의 접합면적을 기준으로 섬유 전체 길이에 대하여 완전히 함침이 되었을 때  $k$ 의 값은 1이다. 따라서 이 때 임계길이  $l_c$ 는 다음과 같이 제안한다.

$$l_c = \frac{\sigma_m}{2k\tau_i} \times d \quad \dots\dots\dots(2)$$

여기서  $\tau_i$ 는 기지재와 계면에서의 접합강도이며 일반적으로 강화재 항복응력의 1/2값으로 가정하며,  $\sigma_m$ ,  $d$ 는 강화재의 인장강도와 직경을 의미한다. 용탕단조법과 반응용법에 의한 금속복합재료의 제조에 있어서 단섬유의 배향을 일정하게 하는 것은 거의 불가능하기 때문에 강도해석에 있어 섬유의 배향을 고려하여야 한다. 섬유의 배향은 압출과 같은 2차 가공에 의해서 방향성을 제어할 수 있지만 용탕단조법에 의하여 제조된 금속복합재료의 강도를 해석하기 위하여 섬유의 배향성을 고려하여야 한다. 따라서 섬유의 배향을 고려한 복합재료의 강도는 다음과 같이 된다[7].

$$\sigma_{cu} = \sigma_m \times V_f \times F(l_c/\bar{l}) \times C_0 + \sigma'_m \times (1 - V_f) \quad \dots\dots\dots(3)$$

여기서  $F(l_c/\bar{l})$ : 섬유 길이의 영향을 고려하기 요소,

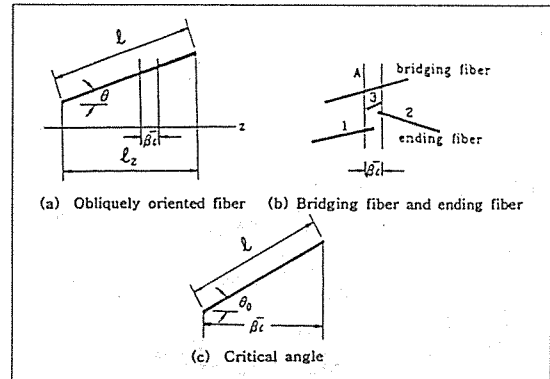


Fig. 4. Several notation on short fiber arrangement

$\sigma'_m$ : 기지재의 파단응력,  $\sigma_{cu}$ : 복합재료의 강도,  $V_f$ : 섬유 분율,  $\bar{l}$ : 섬유의 평균길이를 나타내며,  $C_0$ 는 섬유의 배향을 고려한 매개변수이며, 이 값은 인장강도 및 탄성률(또는 영률)에 큰 영향을 준다.

Bader등[8]은 일방향의 배향을 갖는 금속복합재료의 강도 해석에 있어 임계영역(critical zone)의 개념을 제안하였다. Fig.4(a)에서 보여주는 바와 같이 임계영역은  $\beta\bar{l}$ 만큼의 거리를 가지며 인장방향과 수직을 이루는 두 평면으로 정의되는데, 여기서  $\beta$ 는 1보다 작은 상수이다. 임계영역을 통과하지 않는 단섬유는 인장강도에 기여하지 못하고 임계영역을 통과하는 단섬유만이 인장강도에 기여한다고 가정하였다.

금속복합재료의 제조시 섬유의 길이가 일정하지 않은 경우 위에서 서술한 현상을 고려하기 때문에 섬유 길이에 대한 밀도함수  $h(l)$ 은 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\int_0^\infty h(l)dl = 1 \quad \dots\dots\dots(4)$$

그리고 섬유의 평균길이는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{l} = \int_0^\infty l \times h(l)dl \quad \dots\dots\dots(5)$$

본 연구에서는 단섬유로 실험 하였으므로 배향성을 고려한 섬유의 길이  $l_c$ 은 Fig.4(a)에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_c = l \times \cos\theta \quad \dots\dots\dots(6)$$

Fig.4(b)(c)에서 임계영역을 통과하기 위한 섬유의

임계각도  $\theta_0$ 는 매개변수  $\beta$ 를 이용하면 다음과 같다.

$$\theta_0 = \cos^{-1} \beta \bar{l} / l \dots \dots \dots (7)$$

이며, 만약  $\beta \bar{l} > l$ 이면  $\theta_0$ 는 정의되지 않으며 섬유는 임계영역을 통과하지 못하는 섬유가 된다. 섬유가 무작위 배향을 갖는 금속복합재료에서 섬유의 길이를  $l$ 로 할때, 인장방향에 대해서  $\theta$ 의 배향을 갖는 섬유가 임계영역을 통과하지 못하는 섬유(ending fiber)가 될 확률  $p(e)$ 는 다음과 같다.

$$p(e) = \beta \bar{l} / l = \begin{cases} \beta \bar{l} / l \cos \theta & (0 \leq \theta \leq \theta_0 \text{ and } \beta \bar{l} \leq l) \\ 1 & (\theta_0 \leq \theta \leq \pi/2 \text{ or } \beta \bar{l} \geq l) \end{cases} \dots \dots (8)$$

따라서 임계영역을 통과하는 섬유가 되기 위한 확률은 식(9)와 같이 주어진다.

$$p_b = 1 - p_e \dots \dots \dots (9)$$

섬유의 배향이 인장방향에 대하여 대칭일 때 섬유배향에 대한 밀도함수  $g(\theta)$ 는 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\int_0^{\pi/2} g(\theta) d\theta = 1 \dots \dots \dots (10)$$

본 연구에서는  $g(\theta)$ 를 Fig.5와 같이 임의의 배향을 갖지만 인장방향으로 섬유의 배향밀도가 높은 경우로 해석하였다. 즉

$$g(\theta) = (\pi/2\alpha) \cos(\pi\theta/2\alpha) \quad (0 \leq \theta \leq \alpha)$$

$$g(\theta) = 0 \quad (\alpha \leq \theta \leq \pi/2), \text{이며, 여기서 } \alpha \text{는 } \alpha \leq \pi/2 \text{의 조건을 갖는다.}$$

### 3.2 섬유의 응력분포

단섬유가 인장방향과 같은 방향인 경우 섬유에 발생하는 평균응력은  $\sigma_{f0}$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_{f0} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_f(z) dz \dots \dots \dots (11)$$

계면 접합강도를 나타내는 매개변수  $k\tau$ 를 도입하여 섬유길이 방향으로 접합강도가 일정한 모델에 접합강도가 변하는 것으로 가정하면 섬유의 평균응력  $\sigma_{f0}$ 는

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{f0} = \begin{cases} \sigma_{fu} (1 - \frac{l_c}{2l}) & (l > l_c) \\ \sigma_{fu} \frac{l}{2l_c} & (l < l_c) \end{cases} \dots \dots \dots (12)$$

이 때  $l_c$ 는 식(2)에 의해 정의된 값이다.

섬유가 인장방향과  $\theta$ 의 각을 이루는 경우를 고려하면, 힘의 평형 조건으로부터,

$$\sigma_0' = \sigma_0 \cos^2 \theta \dots \dots \dots (13)$$

$$\theta_0' = \sigma_0 \sin \theta \cos \theta \dots \dots \dots (14)$$

이며, 여기서  $\sigma_0'$ ,  $\theta_0'$ 는 인장 응력과 전단 응력을 각각 나타내고 있다. 전단응력을 무시하면 인장방향으로 섬유에 가해지는 힘  $F_z$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_z = A_f \sigma_{f0} \cos^3 \theta \dots \dots \dots (15)$$

강도해석의 편의상 변의 길이가 a, b, c 인 직육면체의 금속복합재료를 고려한다. 여기서 변 c의 방향과 인장방향이 같다고 가정하면, 섬유의 체적분률  $V_f$ 는

$$V_f = N A_f \bar{l} / abc \dots \dots \dots (16)$$

이며, N과  $A_f$ 는 각각 섬유의 총 수와 섬유의 단면적을 나타낸다. 또한 섬유의 인장방향으로의 투영거리  $l_z$ 의 평균길이  $\bar{l}_z$ 는 다음과 같다.

$$\bar{l}_z = \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} l \cdot \cos \theta \cdot h(l) \cdot g(\theta) \cdot dl \cdot d\theta$$

$$= \bar{l} \int_0^{\pi/2} g(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta \dots \dots \dots (17)$$

따라서 인장방향에 수직인 단면을 지나는 섬유의 수  $N_c$ 는

$$N_c = N \cdot \frac{\bar{l}_z}{c} = \frac{abV_f}{A_f} \int_0^{\pi/2} g(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta \dots \dots (18)$$

이다.

금속복합재료내에서 섬유의 체적분률이 일정하다는 가정 하에서 임계영역을 통과하지 못하는 섬유가 될

확률  $q_b$ 는

$$q_c = \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} P_c \cdot h(l) \cdot g(\theta) \cdot dl \cdot d\theta \dots (19)$$

이고, 따라서 임계영역을 통과하는 섬유가 될 확률  $q_b$ 는

$$q_b = \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} P_b \cdot h(l) \cdot g(\theta) \cdot dl \cdot d\theta \\ = 1 - q_c \dots (20)$$

식 (8)과 (9)를 식 (19)와 (20)에 대입하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_c = \int_0^{\theta_0} d\theta \left[ \int_0^{\beta l} g(\theta) \cdot h(l) \cdot dl + \int_{\beta l}^{\infty} \beta \frac{\bar{l}}{l \cos \theta} \cdot g(\theta) \cdot h(l) \cdot dl \right] + \int_{\theta_0}^{\pi/2} \int_{\beta l}^{\infty} g(\theta) \cdot h(l) \cdot dl \cdot d\theta \dots (21)$$

$$q_b = \int_{\beta l}^{\infty} dl \int_0^{\theta_0} (1 - \beta \bar{l} / l \cdot \cos \theta) \cdot g(\theta) \cdot h(l) \cdot d\theta \dots (22)$$

임계영역을 통과하는 섬유의 총수  $N_b$ 와 통과하지 못하는 섬유의 총수  $N_c$ 는 각각

$$N_b = N_c q_b, \quad N_c = N_c q_c \dots (23)$$

이다.

임계영역을 통과하는 섬유에서 하나의 섬유가 받는 인장방향으로의 평균하중  $\bar{F}_z$ 는

$$\bar{F}_z = \int_0^{\theta_0} \int_{\beta l}^{\infty} F_z \cdot h(l) \cdot g(\theta) \cdot dl \cdot d\theta \dots (24)$$

이기 때문에 임계영역을 통과하는 전체의 섬유가 받는 총하중  $F_T$ 는

$$F_T = N_b \cdot \bar{F}_z \dots (25)$$

이며, 금속복합재료의 강도  $\sigma_{cu}$ 는

$$\sigma_{cu} = \frac{F_T}{ab} + \sigma_m'(1 - V_f) \dots (26)$$

이다. 앞에서의 식 (12), (15), (18)과 (21)~(24)까지의 식을 식 (26)에 대입하고, 섬유의 길이가 일정하고 임계길이  $l_c$ 보다 긴 조건을 대입하여 정리하면 금속복합재료의 인장강도  $\sigma_{cu}$ 는

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \cdot V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) \int_0^{\pi/2} g(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \\ \times \int_0^{\theta_0} g(\theta) \cdot \cos^3 \theta \cdot d\theta \int_0^{\theta_0} \left(1 - \frac{\beta}{\cos \theta}\right) \\ \times g(\theta) \cdot d\theta + \sigma_m'(1 - V_f) \dots (27)$$

이 된다. 금속복합재료의 탄성계수는 섬유와 기지재의 변형율이 같은 조건 하에서  $\sigma_c = E_c \cdot \epsilon_1$ ,  $\sigma_f = E_f \cdot \epsilon_1$ ,  $\sigma_m' = E_m \cdot \epsilon_1$ 이 되므로 이를 식 (28)에 대입하면 금속복합재료의 탄성계수  $E_c$ 는 다음과 같다.

$$E_c = E_f \cdot V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) \int_0^{\pi/2} g(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \\ \times \int_0^{\theta_0} g(\theta) \cdot \cos^3 \theta \cdot d\theta \int_0^{\theta_0} \left(1 - \frac{\beta}{\cos \theta}\right) \\ \times g(\theta) \cdot d\theta + E_m(1 - V_f) \dots (28)$$

여기서,  $g(\theta)$ 는 섬유의 배향 밀도를 나타내는 함수이며,  $\beta$ ,  $\theta_0$ 는 각각 임계영역의 길이와 각도를 나타낸다.

식 (27)과 (28)에서, 섬유의 배향 밀도를 나타내는  $g(\theta)$ 와 임계영역의 길이를 나타내는  $\beta$ , 기지재와 섬유 사이의 접합강도를 나타내는 매개변수  $k$ 에 따라 강도 및 탄성계수가 달라짐을 알 수 있다.

본 연구에서는  $g(\theta)$ 를 Fig.5와 같은 형태를 갖고,  $A$ 가  $\pi/3$ ,  $\pi/2$ 의 두가지의 경우로 해석하여 실험결과와 비교하였다. 계면의 접합강도계수는 0.4, 0.7, 1.0의 세가지 경우에 대하여 해석하였으며  $\beta$ 는 0이라 가정하였다.

즉, 결합 면적이 줄면 결합강도가 떨어지게 되는데 이를 섬유의 전체면적에 걸쳐 평균적으로 저하한다고 생각하여 이를 매개변수로 하였다. 여기서 정의된 매개변수를 Fukuda등[4]이 제안한 수정 Shear-lag method에 적용하여 금속복합재료의 강도와 탄성계수를 구하였다.

Fig.6(a)(b)는 본 연구의 실험에서 함침 후 섬유의

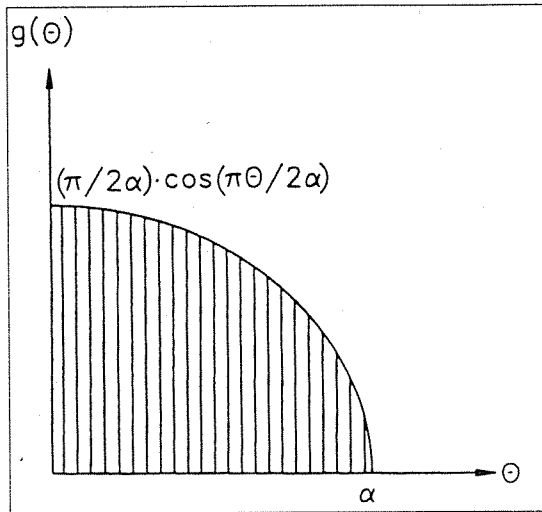


Fig. 5. Model of distributions of fiber orientation

분산상태를 관찰하기 위한 광학현미경에 의한 조직사



Fig. 6. (a)(b) Optical micrographs of MMCs along a direction parallel to the pressurization  
( $T_p=300^\circ\text{C}$ ,  $T_m=400^\circ\text{C}$ ,  $V_f=10\%$ ,  $T_i=800^\circ\text{C}$ ,  $P=75\text{MPa}$ )

진이다. Fig.6(a)(b)에서 볼 수 있듯이 가압방향과 평행인 단면에서는 섬유의 길이방향의 섬유는 거의 관찰되고 있지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig.7(a)(b)가 가압방향과 수직인 단면에서 섬유의 분산상태를 나타낸 사진이다. 사진에서 볼 수 있듯이 길이방향의 섬유가 많이 관찰되고 있다. 이는 함침성형과정에서 섬유의 배향이 가압방향과 수직으로 변환된 것을 나타낸 것이다. 따라서 본 연구에서는 Fig.5에 나타낸 바와 같이 섬유의 배향밀도  $g(\theta)$ 는 섬유가 가압방향과 직각인 면으로 2차원적인 배향을 갖으며 인장방향으로 배향밀도가 높은 것으로 생각하였다. 여기서 배향밀도  $g(\theta)$ 는 식(10)을 만족하여야 한다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig.8은 본 연구에서 사용된 섬유와 기지재료의 응



Fig. 7. (a)(b) Optical micrographs of MMCs along the longitudinal direction in the cross section perpendicular to pressurizing direction  
( $T_p=300^\circ\text{C}$ ,  $T_m=400^\circ\text{C}$ ,  $V_f=10\%$ ,  $T_i=800^\circ\text{C}$ ,  $P=75\text{MPa}$ )

력-변형을 선도를 나타낸 것이다. 섬유는 탄성거동을 하며 탄성계수  $E_f$ 는 300GPa이며 인장강도  $\sigma_{fu}$ 는 2000MPa이다. 매개변수  $\beta$ 는 0으로 가정하였기 때문에  $\theta_0$ 는  $\pi/2$ 가 된다. 기지재의 파단응력  $\sigma_m'$ 은 470MPa, 항복 전단응력  $\theta$ 는 162MPa로 하였다[9].

Fig.9는  $\alpha$ 가 각각 P/2와 P/3일 때 접합강도계수  $k$ 를 매개변수로 섬유의 체적분률에 따른 인장강도의 해석 결과를 나타낸 것이며, 섬유의 길이가 200 $\mu$ m이고 섬유체적분률  $V_f$ 가 각각 10%, 15% 및 20%일 때 실험결과와 비교한 것이다. 해석 결과에서 볼 수 있듯이  $\alpha$ 와  $k$ 값에 관계없이 섬유의 체적분률이 증가함에 따라 금속복합재료의 인장강도가 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 섬유와 기지재의 인장강도 차가 크기 때문이다. 접합강도계수  $k$ 가 인장강도에 미치는 영향은 섬유의 배향 밀도를 나타내는  $\alpha$ 가 미치는 영향에 비하여 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 배향 밀도를 나타내는  $\alpha$ 가  $\pi/2$ 일 때의 해석결과 실험결과에 비하여 섬유의 체적분률에 관계없이 항상 작은 값을 나타내고 있으며 차이도 상당함을 알 수 있다. 반면,  $\alpha$ 가  $\pi/3$ 일 때의 해석 결과는 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 섬유의 체적분률이 높아질수록 해석결과와 실험결과가 보다 일치하고 있다. 이는 초기 섬유체적분률이 높을수록 예비성형체의 체적분률의 변화가 작기 때문이다. 즉,  $V_f$ 가 각각 10%, 15% 및 20%일 때 제조된 금속복합재료의 평균체적분률은 17.5%, 19%, 24%이기 때문이다[10]. 따라서  $V_f$ 가 각각 10%, 15%, 20%의 결과를 17.5%, 19%, 24%의 해석결과와 비교하면 보다 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig.10은 금속복합재료의 탄성계수를, 섬유의 배향

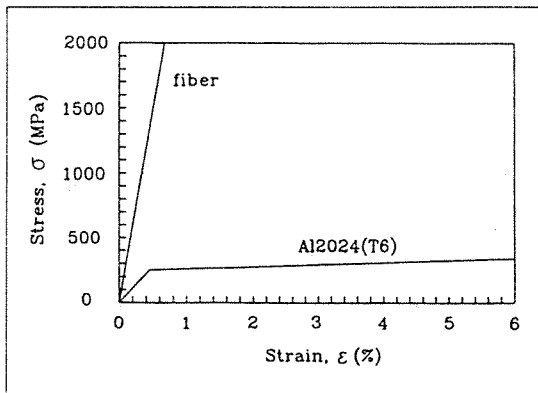


Fig. 8. Stress-strain curve for the matrix and the fiber

밀도를 나타내는  $\alpha$ 와 접합강도계수  $k$ 를 매개변수로, 섬유의 체적분률에 따라 해석한 결과를 나타낸 것이며, 섬유의 길이가 200 $\mu$ m이고 섬유체적분률  $V_f$ 가 각각 10%, 15% 및 20%일 때의 실험결과와 비교한 것이다. 해석결과에서 볼 수 있듯이  $\alpha$ 와  $k$ 값에 관계없이 섬유의 체적분률이 증가함에 따라 금속복합재료의 탄성계수가 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 인장강도의 해석에서와 마찬가지로 이는 섬유와 기지재의 탄성계수의 차가 크기 때문이다. 접합강도계수  $k$ 가 인장강도에 미치는 영향은 섬유의 배향밀도를 나타내는  $\alpha$ 가 미치는 영향에 비하여 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 배향밀도를 나타내는  $\alpha$ 가  $\pi/2$ 일 때의 해석결과 실험결과에 비하여 섬유의 체적분률에 관계없이 항상 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.  $\alpha$ 가  $\pi/3$

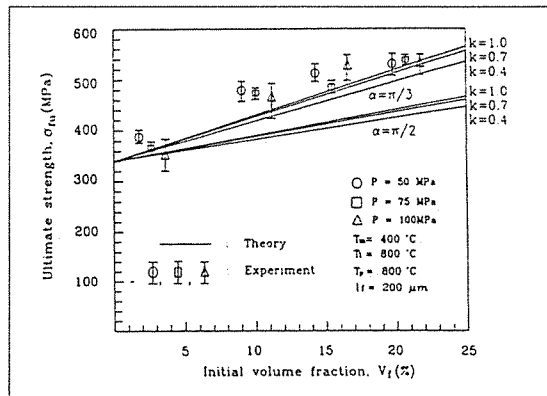


Fig. 9. Tensile strength of metal matrix composites as a function of fiber volume fraction,  $k$ , and  $\alpha$

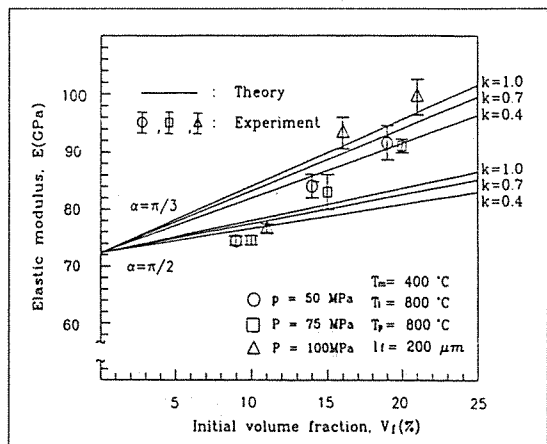


Fig. 10. Elastic moduli of metal matrix composites as a function of fiber volume fraction,  $k$ , and  $\alpha$



일 때의 해석결과와 실험결과를 비교하면  $V_f$ 가 각각 15%, 20%일 때는 해석결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하고 있으나  $V_f$ 가 10%일 때는 차이가 있음을 알 수 있다.

위의 원인은 섬유의 초기 체적분율  $V_f$ 가 10%인 경우는 함침성형과정에서 과도한 예비성형체의 변형이 수반되어 섬유의 파단과 금속복합재료의 섬유체적분율이 위치에 따라 큰 차이를 나타내기 때문이라고 생각된다.

Fig.11은 배향밀도를 나타내는  $\alpha$ 가  $\pi/3$ 일 때 섬유 길이에 따른 인장강도의 변화를 접합강도계수  $k$ 를 매개변수로 해석한 결과이며 섬유의 체적분율  $V_f$ 가 15%이고 섬유의 길이가 각각 50 $\mu$ m, 150 $\mu$ m, 200 $\mu$ m 일 때의 실험결과와 비교한 것이다. 실험결과와 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 섬유의 길이가 작을수록 금속복합재료의 인장강도에 미치는 접합강도계수  $k$ 의 영향이 큰 것으로 해석되었으며 특히 섬유의 길이가 50 $\mu$ m인 경우에는  $k$ 에 따라서 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 섬유의 길이가 짧아짐에 따라 수정임계 길이에 접근하고 실제  $k$ 가 0.4인 경우 섬유의 길이가 수정임계길이보다 작기 때문에 이같은 결과를 얻었다. 실험결과에서도 볼 수 있듯이, 섬유의 길이가 150 $\mu$ m, 200 $\mu$ m인 경우에 비하여 50 $\mu$ m의 경우가 인장강도의 편차가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 금속복합재료의 제조 시 사용하는 섬유의 길이가 임계길이보다 그다지 크지 않은 경우에는 작업조건에 따라 인장강도의 편차를 고려해야만 할 것으로 생각된다.

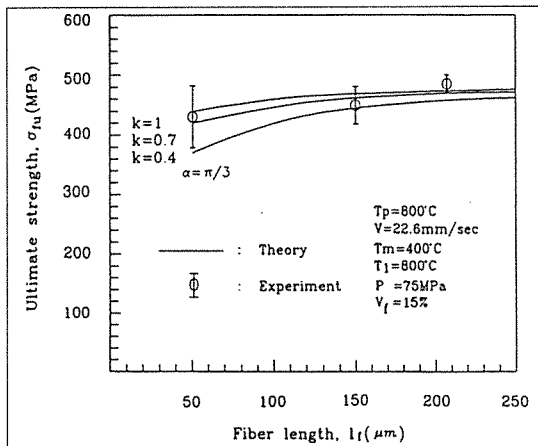


Fig. 11. Tensile strength of metal matrix composites as a function of fiber length and  $k$  ( $\alpha = \pi/3$ )

Fig.12는 배향밀도를 나타내는  $\alpha$ 가  $\pi/2$ 일 때 섬유 길이에 따른 인장강도의 변화를 접합강도계수  $k$ 를 매개변수로 해석한 결과이다.  $\alpha$ 를 제외한 해석조건은 Fig.10과 동일하다. 실험결과와의 비교에서 알 수 있듯이 해석결과와 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.  $\alpha$ 가  $\pi/3$ 에서와 마찬가지로 섬유의 길이가 길수록 접합강도계수  $k$ 의 영향이 상대적으로 줄고 있음을 알 수 있으며, 특히 섬유의 길이가 50 $\mu$ m일 때  $k$ 의 영향이 크다.

Fig.13은 접합강도계수  $k$ 를 매개변수로 섬유배향밀도  $\alpha$ 에 따른 인장강도의 변화를 섬유의 길이 50 $\mu$ m, 200 $\mu$ m, 섬유의 체적분율  $V_f$ 가 15%인 경우에 대하여 나타낸 것이다.  $\alpha$ 가 커짐에 따라서 인장강도가 줄고 있음을 알 수 있는데,  $\alpha$ 가 크다는 것은 섬유의 배향이 인장방향에 대하여 많은 편차가 있음을 나타내는 것이므로 당연한 결과라고 생각된다. 해석결과에서 볼 수 있듯이, 섬유의 길이가 200 $\mu$ m인 경우에는 섬유의 배향밀도  $\alpha$ 가 접합강도계수  $k$ 에 비하여 인장강도에 미치는 영향이 크며, 섬유의 길이 50 $\mu$ m인 경우는 접합강도계수  $k$ 도 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

수정 Shear-lag type의 해석을 기본으로 섬유의 형상비, 체적률, 계면강도 및 배향을 변수로 탄성계수 및 인장강도를 산출하여 이를 실험과 비교한 결과를 요약

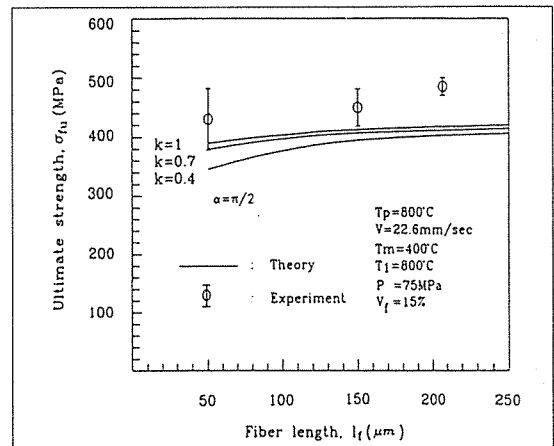


Fig. 12. Tensile strength of metal matrix composites as a function of fiber length and  $k$  ( $\alpha = \pi/2$ )

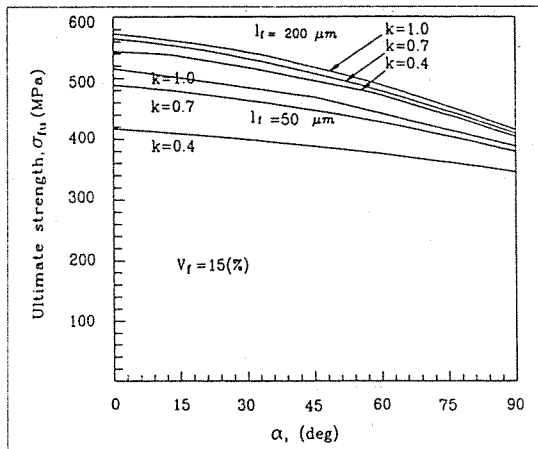


Fig. 13. Tensile strength of metal matrix composites as a function of fiber  $\alpha$ ,  $k$ , and  $l_f$

하면 다음과 같다.

(1) 금속복합재료의 인장강도는 섬유의 체적분률에 따라 거의 직선적으로 증가하였으며, 접합강도의  $k$ 의 영향은 섬유의 배향밀도  $\alpha$ 에 비하여 상대적으로 작았으나 섬유의 길이가 임계길이에 접근할 때는 큰 영향을 주었다.

(2) 금속복합재료의 탄성계수는 섬유의 체적분률에 따라 거의 직선적으로 증가하였으며, 접합강도와 섬유의 배향밀도  $\alpha$ 의 영향은 인장강도의 해석에서와 같았다.

(3) 섬유의 배향밀도  $\alpha$ 를 추정하여 해석한 결과, 인장강도에서는 비교적 실험결과와 잘 일치하였고 탄성계수에 있어서도 비교적 잘 일치하였으나 섬유의 체적분률  $V_f$ 가 10%인 경우는 다소 편차가 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Fukunaga, H. "Squeeze Casting Processes for Fiber Reinforced Metals and their Mechanical Properties", Proc. Symp. Advanced in Cast Reinforced Metal Composites, ASM, 1988, pp.

101-107.

2. Suresh Verma, K., and Doroci, John L. "Manufacturing of Composites by Squeeze Casting", Proc. Symp. Advanced in Cast Reinforced Metal Composites, ASM, 1988, pp. 115-126.

3. Kang, C. G., and Ku, G. S. "An experimental Investigation on Infiltration Limit and the Mechanical Properties of  $Al_2O_3$  Short Fiber Reinforced Metal Matrix Composites Fabricated by Squeeze Casting", J. of Composite Materials, Vol. 29, No. 4, 1995, pp. 444-462.

4. Fukuda, H. and Chou, T. "A probabilistic Theory of the Strength of Short-Fiber Composites with Variable Fiber Length and Orientation", J. of Materials Science, Vol. 17, 1982, pp. 1003-1011.

5. 강충길, 구광서, "용탕단조법에 의한 금속복합재료의 성형공정에 있어서 함침한계성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제17권 제7호, 1993, pp. 1751-1760.

6. 강충길, 구광서, 박봉수, "용탕단조법에 의한 금속복합재료의 제조 공정에 있어서 예비성형체의 변형과 그 방지책에 관한 연구", 한국주조공학회논문집, 제14권 제4호, 1994, pp. 331-338.

7. Kelley, A. and Macmillian, N. H. "Strong Solids", 3 Ed., Clarendon Press, Oxford, 1966.

8. Bader, M. G., Clyne, T. W., Cappleman, C. R. and Hubert, P. A. 1985, "The Fabrication and Properties of Metal Matrix Composites Based on Aluminum Alloy Infiltrated Alumina Fibre Preforms", Composites Science and Tech., Vol.23, 1985, pp.287-305.

9. 구광서, "용탕단조법에 의한 단섬유 강화 금속복합재료의 성형공정에 관한 연구", 부산대학교 박사학위논문, 1997.

10. 강충길, 구광서, 이해욱, "용탕단조법에 의한 금속복합재료의 성형공정에 있어서 예비성형체의 변형과 인장거동에 관한 연구", 한국복합재료학회지, 제7권 제3호, 1994, pp.11-19.