

## 論文

## 금속복합재료의 잔류응력 특성연구

이진승\*\* · 남현욱\* · 한경섭\*

## Characteristics of Residual Stress in Metal Matrix Composites

J.S. Lee\*\*, H.W. Nam\* and K.S. Han\*

## ABSTRACT

In metal matrix composites (MMCs), residual stress is induced by the mismatch of thermal expansion coefficient between matrix alloy and reinforcements. The residual stress influence on the behavior of MMCs. In this study, residual stress was analyzed using FEM according to fabrication methods and T6 heat treatment conditions. These results were compared with experiment. The X-ray diffraction method was used in experiment. MMCs was fabricated using  $Al_2O_3$  and Al7075 under pressure and pressureless casting methods. In FEM results, the matrix is subjected to tension and compression in radial and tangential direction, respectively, while the reinforced fiber is subjected to compression. Also it shows that residual stress is not affected by casting pressure but dependent on heat treatment conditions.

## 초 록

금속복합재료는 보강재와 기지재 사이의 열팽창계수로 인해 잔류응력이 발생하며, 이는 금속복합재료의 거동에 상당한 영향을 미친다. 본 연구에서는 금속복합재료의 제조 조건이나 열처리 유무에 따른 잔류응력을 유한요소법을 이용하여 해석하였으며, 이를 실험치와 비교하였다. 실험에 사용된 재료는 알루미늄( $Al_2O_3$ )과 Al7075이며, 시편은 가압을 하여 제조하는 가압주조와 중력 상태에서 가압없이 제조하는 중력주조의 두 가지 방법으로 제조하였다. 잔류응력측정을 위한 시험은 X-ray diffraction 방법을 이용하여 수행하였다. FEM 해석 결과 보강재에는 압축응력이 발생하였으며, 기지재에는 반경 방향으로는 압축응력이 접선방향으로는 인장 응력이 발생하였다. 또한 제조시 가압력은 잔류응력에 별다른 영향을 미치지 않으나 열처리는 잔류응력에 큰 영향을 미치는 것으로 해석되었다. 이는 실험치와 비교되었으며 두 결과는 잘 일치하였다.

## 1. 서 론

과학과 기술의 발전에 따라 여러 분야에서 기존의 재료보다 우수한 특성을 발휘하는 첨단소재의 필요성이 대두되었으며, 이러한 요구에 의해 등장하게 된 것이 고기능성 금속복합재료이다. 금속복합재료는 기존의 구조용 재료에 비강도, 비강성이 월등한 강화재를 보강 시킴으로써 탄성계수, 인장강도 및 피로강도를 향상시키고, 또 내마모성을 향상시키는 등 첨단소재로서의 고

기능성을 가지는 동시에 재료가 가볍다는 장점을 가지고 있어 신소재로서 많은 연구가 진행중이다.

금속복합재료는 비강도가 큰 보강재의 하중전달이나, 기지재의 경화현상 등의 강도향상요인 외에 보강재 주위의 기공, 기지재와 보강재의 계면에 응력집중, 분리 현상 등 강도 저하요인들도 많이 있어 이들에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이들 강도저하의 주요 원인 중의 하나가 잔류응력이며, 이 잔류응력은 금속복합재료의 물성 전반에 걸쳐 큰 영향을 끼치므로 이에 대한

\*\* 국방과학연구소

\* 포항공과대학교 기계공학과

이해는 필수적이라 할 수 있다.

금속복합재료의 잔류응력에 관한 대부분의 연구는 잔류응력의 정량적인 측정의 어려움으로 인해 주로 이론적인 접근을 하고 있다. Arsenaults 등은 Eshelby's Method를 이용하여 잔류응력 모델을 세웠으며[1], Shi 등은 열응력에 의해 발생하는 소성유동이 금속복합재료의 변형에 미치는 영향들을 연구하였다[2]. 이외에 2차원이나 3차원 F.E.M. 해석을 통해 잔류응력을 해석하고 있다.

최근에는 X-ray diffraction이나 neutron diffraction을 이용하여, 격자상수를 측정함으로써 잔류응력과 잔류변형률의 실험적 측정이 가능하게 되었다. 그럼에도 불구하고 실제 사용되는 단섬유보강 금속복합재료의 경우 잔류응력은 분포가 불규칙하여 정확한 측정이 매우 어렵다.

본 연구에서는 알루미늄 로드(Rod)를 이용하여 금속복합재료에 발생하는 잔류응력을 단순화 하였으며, X-ray diffraction을 이용하여 잔류응력을 측정하였다. 또 이에 대한 지배 방정식을 세워 기지재와 보강재에서 발생하는 잔류응력을 해석하였으며, 유한요소법을 이용하여 열처리와 가압력이 금속복합재료의 잔류응력에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 잔류응력 측정 시편

본 연구에서는 기지재로서 7075알루미늄 합금과 보강재로서 알루미늄( $Al_2O_3$ )을 사용하였다. 알루미늄 로드(Rod)는 Saffil 알루미늄 단섬유와 같은 물성을 가지도록 하여 직경 3.2mm로 ICI사에서 제작하였다. Fig. 1에 금속복합재료의 제조 과정을 간략히 나타내

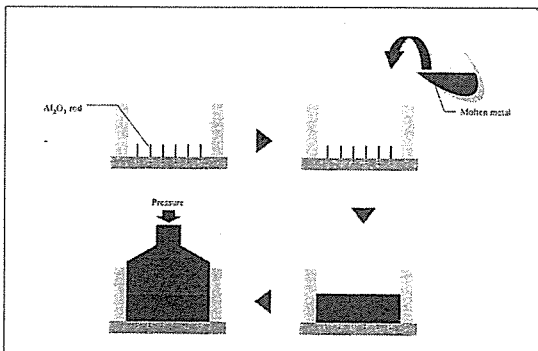


Fig. 1. Schematic illustration of squeeze casting process

었다. 금속복합재료의 제조를 위해 기지재로 사용되는 알루미늄합금을 780℃ 질소 분위기 속에서 용해시킨 다음 용탕을 주입시켰다. 이때 알루미늄 로드는 Fig. 1에서와 같이 장착하였다. 이곳은 가압주조와 중력주조 두 가지 방법으로 제조하여 자연 냉각시켰다.

잔류 측정 시편 제조에 사용된 재료의 물성치는 Table 1, Table 2와 Table 3에 나타내었으며[5], 이 물성치는 이론적 해석 및 유한요소해석을 하는데 사용하였다.

Table 1. Material properties of 7075 alloy

Property	Unit	7075 Alloy
E	GPa	72
$\nu$		0.33
$\alpha$	E-6/°C	8.3

Table 2. Material properties of  $Al_2O_3$

Property	Unit	7075 Alloy
E	GPa	330
$\nu$		0.22
$\alpha$	E-6/°C	23.6

Table 3. Material properties of 7075 alloy at various temperature

Temperature(°C)	Tensile Strength(MPa)	Yield Strength (0.2% offset, MPa)
24	572	503
100	483	448
149	214	186
204	110	87
260	76	62

Fig.2에 나타난 바와 같이 제조된 금속복합재료를 기계가공하여 가로, 세로 11.5mm의 시편으로 만들었다. 이때 X-ray diffraction으로 측정할 면은 Isomat을 이용하여 높이 5mm로 절단하였다. 이것은 X-ray diffraction으로는 시편 표면의 원력 밖에 측정을 못하는데, 가공시에 잔류응력이 표면에 남아 정확한 측정을 방해함으로 이것을 최소화시키기 위한 것이다. 이 표면을 chemical polishing을 하였으며, 이 때 조건은 다음과 같다. 인산(6:9)에 황산(2:9)과 질산(1:9)을 섞은 용액에 시편을 15분 정도 넣어두어 측정 표면을 0.1mm정도 제거하였다.

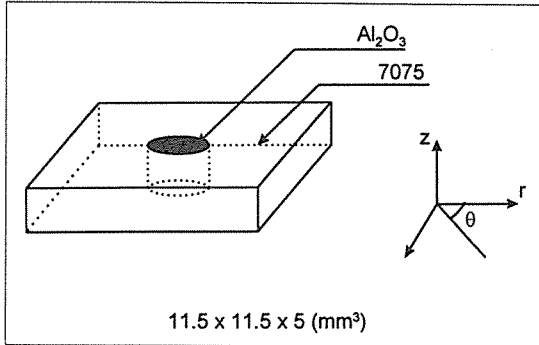


Fig. 2. Configuration of test specimen

## 2.2 잔류응력측정

X-ray를 이용한 잔류응력 측정은  $\sin^2\psi$ 방법을 사용하였다[4]. 어떤 응력을 받고 있는 물체에서 전단응력이 작용하지 않는 어떤 방향을 생각할 수 있는데, 이것이 주응력 방향이다. 그리고 이 때 작용하는 응력이 주응력이다. 어떤 응력을 받고 있는 물체의 표면에는  $\sigma_1, \sigma_2$ 가 작용하고 있고 표면의 법선 방향으로 존재하는  $\sigma_3$ 는 나타나지 않는다. 이 조건을 이용하여 변형율을 나타내보면 다음과 같다.

$$\varepsilon_3 = -\nu(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1)$$

$\varepsilon_3$ 는 격자 간격  $d$ 를 이용하여 구할 수 있는 것으로 식(1)을  $d$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{d_n - d_0}{d_0} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

여기에서  $dn$ : 응력을 받을 때의 격자 간격

$do$ : 응력이 없을 때의 격자 간격

임의의 방향에서 구하고자 하는 응력을  $\sigma_\psi$  라하면  $\sigma_\psi$ 는 탄성론에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_\psi = \frac{1}{E} \{ \sigma_\psi (1+\nu) \sin^2\psi - \nu(\sigma_1 + \sigma_2) \} \quad (3)$$

식(1)를 이용하여 식(3)을 고치면 다음과 같다.

$$\varepsilon_\psi - \varepsilon_3 = \frac{\sigma(1+\nu) \sin^2\psi}{E} \quad (4)$$

식(4)가 X-ray diffraction으로 응력을 측정하는 기본 식이며, 이것을 격자상수로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{d_i - d_0}{d_0} - \frac{d_n - d_0}{d_0} = \frac{d_i - d_n}{d_0} = \frac{\sigma(1+\nu) \sin^2\psi}{E} \quad (5)$$

식(5)에서  $d_0$ 는 응력이 없을 때의 격자상수로 측정이 불가능하다. 그러나  $d_0, d_i, d_n$  모두 크게 차이가 없고  $(d_i - d_n)$ 은  $d_0$ 에 비하여 매우 작은 값을 가지므로  $d_0$ 을  $d_n$ 으로 치환이 가능하다. 치환을 하면 식(5)은 다음과 같이 나타난다.

$$\sigma_\psi = \frac{E}{(1+\nu) \sin^2\psi} \left( \frac{d_i - d_n}{d_n} \right) \quad (6)$$

여기서  $E$ 와  $\nu$ 는 알고 있는 상수 값이고  $\sin^2\psi$ 와  $d_i, d_n$ 을 측정하면 응력을 계산할 수 있다. 측정된 격자간격으로부터 식(6)를 사용하여 평면의 응력상태를 측정하게 된다. 이때 X-ray로 30KV, 10mA 조건에서 발생된 Cr-K 복사선을 이용하였다.

## 3. 이론적 배경

### 3.1 이론 해석 모델

열팽창계수 차에 의해 발생하는 잔류응력은 다음과 같은 가정 하에서 계산되었다. 강화재와 기지재는 모두 등방성이고, 경계면은 완전히 접촉한 것으로 가정하여, 두 재료 사이의 분리나 파단현상은 고려하지 않았다. 용융상태의 기지재가 강화재와 동일온도로 열응력이 존재하지 않는 온도로부터 상온으로 냉각시 상온으로의 열응력을 해석하였으며, 이때 재료내부는 균일 온도로 냉각된다고 가정한다. 잔류응력이 존재하지 않는 상태의 온도는 전위현상이 가장 적게 일어날 때의 온도로 알려져 있고, 알루미늄의 경우 150~300℃ 정도로 알려져 있으나 정확한 온도는 알려져 있지 않다[4]. 재료의 기계적 특성 모델로서는, 기지재와 강화재 모두 선형탄성재료로서 각각 가정하였다.

재료는 냉각됨에 따라 수축하게 된다. 이러한 수축은 모든 방향에 동일하게 발생하여 주변형울만 발생시키고, 전단변형율은 발생하지 않는다. 서로 다른 열팽창계수를 가지는 기지재와 보강재는 연속성을 만족시켜

야 하는 조건 때문에 열응력을 유발시킨다. Fig.2와 같은 모델에, 힘 평형 방정식을 만들면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (7)$$

모델의 대칭성으로 전단응력과 전단변형은 발생하지 않으며 식 (7)은 주응력만 고려되어 식(8)와 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (8)$$

재료는 냉각됨에 따라 수축하게 되며, 이러한 수축은 모든 방향에 대해 동일하게 일어난다. 따라서 주변형울만 발생시키고 전단변형울은 발생시키지 않게 된다.

그러므로 원통 좌표계에서 변형량은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$u_k = u(r), u_\phi = u_z = 0 \quad (9)$$

따라서 변형률은 아래 식과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \epsilon_z = 0 \quad (10)$$

Hook's law와 식(10)을 이용하여 식(8)을 변형시키면 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (11)$$

1) 기지재에 발생한 응력

Fig.3에서와 같이 기지재와 보강재 사이의 열팽창계수차이에 의해 발생하는 각각의 변형울은 기지재와 보강재 사이에서 압력(P)을 발생시키며, 이로부터 다음과 같은 경계조건을 생각할 수 있다.

$$r = r_o, \quad \sigma_r = 0 \quad (12)$$

$$r = r_i, \quad \sigma_r = -P \quad (13)$$

식(10)와 식(11)로부터 반경방향과 접선방향의 변형울은 다음과 같이 표시된다.

$$\epsilon_{rm} = A_m - \frac{B_m}{r^2} \quad (14)$$

$$\epsilon_{\theta m} = A_m + \frac{B_m}{r^2} \quad (15)$$

식(14)와 식(15)에 경계조건으로 식(12), (13)을 대입하면 을 대입하면,  $\sigma_{rm}$ 과  $\sigma_{\theta m}$ 을 구할 수 있다.

$$\sigma_{rm} = - \frac{P \left[ \left( \frac{r_o}{r} \right)^2 - 1 \right]}{\left( \frac{r_o}{r} \right)^2 - 1} \quad (15)$$

$$\sigma_{\theta m} = - \frac{P \left[ \left( \frac{r_o}{r} \right)^2 + 1 \right]}{\left( \frac{r_o}{r} \right)^2 - 1} \quad (16)$$

여기서 기지재의 반경방향 응력은 압축 응력이며, 접선방향응력은 인장응력이라는 것을 알 수 있다. 반경 r이 증가할수록 응력은 줄어들고,  $r=3r_i$ 인 경우에는 거

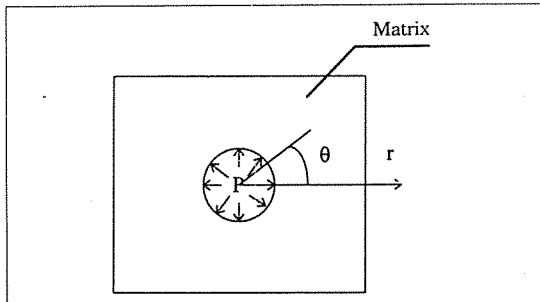


Fig. 3. Schematic of cylindrical matrix hole

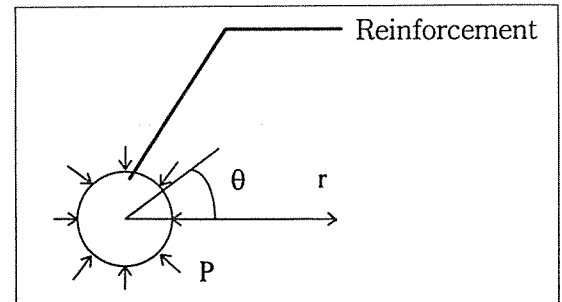


Fig. 4. Schematic of cylindrical reinforcement particle

의 0에 가까워짐을 예측할 수 있다.

### 2)보강재의 응력

보강재에서도 기지재에서와 마찬가지로 압력(P)이 보강재의 외부에서 작용한다고 생각하면, 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$r \rightarrow 0, u = 0 \quad (18)$$

$$r = r_i, \sigma_r = -P \quad (19)$$

식(11)과 경계조건을 이용하여 반경, 접선방향의 응력을 구하면,

$$\sigma_{rf} = -P, \sigma_{\theta f} = -P \quad (20)$$

기지재와는 다르게 반경방향, 접선방향 모두 압축력이 작용한다는 것을 알 수 있다.

### 3)압력(P)의 결정

서로 다른 열팽창계수 때문에 발생하는 압력은 다음과 같은 경계조건을 만족해야 한다.

$$r \rightarrow r_i, \epsilon_{rm} = \epsilon_{rf} \quad (21)$$

Hook's law로부터

$$\frac{1}{E_m} \{ \sigma_{rm} - \nu_m (\sigma_{\theta m} + \sigma_{z m}) \} + \alpha_m \Delta T =$$

$$\frac{1}{E_m} \{ \sigma_{rf} - \nu_f (\sigma_{\theta f} + \sigma_{z f}) \} + \alpha_f \Delta T = \quad (22)$$

$r=r_i$ 에서 기지재와 보강재의 반경방향과 접선방향의 응력을 대입하여 압력P에 관해 정리하면,

$$P = \frac{(\alpha_m - \alpha_f) \Delta T}{\frac{-1 + \nu_f}{E_f} + \frac{1 + \nu_m}{E_m}} \quad (23)$$

따라서 식(23)에 의한 압력P로부터 보강재와 기지재의 반경방향과 접선방향의 잔류응력 분포가 구해진다. 여기서  $\Delta T$ 는 잔류 응력이 존재하지 않을 때의 온

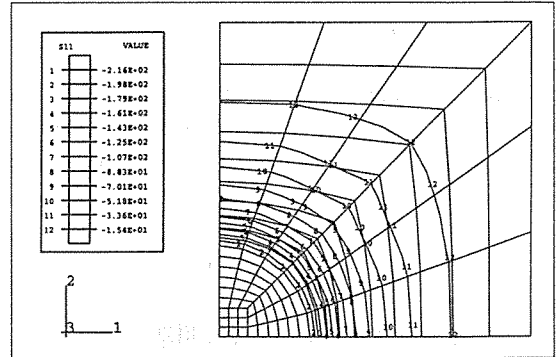


Fig. 5. Radial residual stress in matrix ( $\sigma_r$ )  
(Stress free temp. : 300℃, pressureless casting)

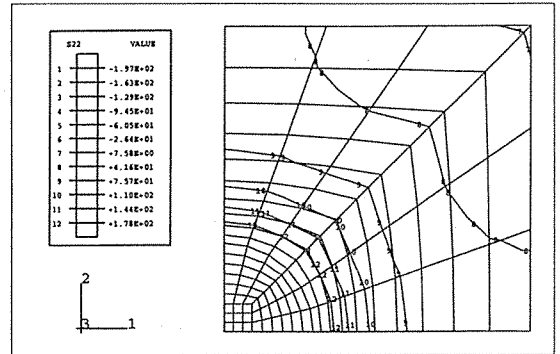


Fig. 6. Tangential residual stress in matrix ( $\sigma_\theta$ )  
(Stress free temp. : 300℃, pressureless casting)

도로부터 결정이 되는데 본 연구에서는 300℃로 가정하였다.

### 3.2 유한요소법 해석

본 연구에서는 3D 8-node linear brick element 630개와 1109개의 질점으로 모델링하여 상용 유한 코드인 ABAQUS finite element code를 이용하여 잔류응력을 계산하였다. 해석 모델은 축대칭이므로 전체 모델의 1/4단면을 해석영역으로 설정하였다. 유한요소 해석시 기지재는 탄성 변형 후 완전 소성 변형 (elastic-perfectly plastic)한다고 가정하였으며, 보강재는 선형탄성재료로 가한다. 유한 요소 해석에 사용한 재료의 물성은 Table 2와 Table 3에 있다. 1/4단면의 변위는  $U_i=0$ 이고, 이외의 면은 자유면의 경계조건이 주어졌다. 모든 질점은 열응력이 발생하지 않는 온도를 초기 조건으로 가진다. 금속복합재료 제조시 잔류응력의 발생은 열변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon^{thermal} = \Delta\alpha \Delta T \quad (24)$$

Fig.5와 Fig.6에 금속복합재료에 발생한 접선방향( $\sigma_\theta$ )과 반경방향( $\sigma_r$ )의 잔류 응력을 유한 요소 해석하여 나타내었다. 잔류 응력이 없는 온도는 300℃로 가정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 이론 해석과 유한요소법 해석 비교

Fig.7와 Fig.8에 이론 해석치와 유한요소법 해석치의 반경방향과 접선방향의 잔류응력을 나타내었다. 이론 해석에서 접선방향으로 압축응력과 반경방향으로 인장응력의 결과를 보였는데 유한요소해석에서도 이와 같은 응력발생 경향을 보임을 알 수 있다. 보강재와 기지재의 경계면에서 이론치와 유한요소해석치 모두 잔류응력이 가장 높게 나타났으며, 기지재 반경의 2배가 넘는 위치에 도달하면 기지재에 발생하는 잔류응력값은 거의 사라지게 된다. 기지재 반경에서 멀어질수록 이론치와 유한요소해석치의 오차가 감소하는 것을 볼 수 있다.

보강재와 기지재의 경계면에 가까이 갈수록 오차가 많이 발생하는 것은 이론치는 소성변형을 고려하지 않는 완전 탄성조건과 반경방향 응력과 축방향 응력이 서로 독립적이라고 가정되어 계산되어진 값이고, 반면 유한요소법 해석치는 온도에 따른 소성영역을 고려한 값이기 때문이다.

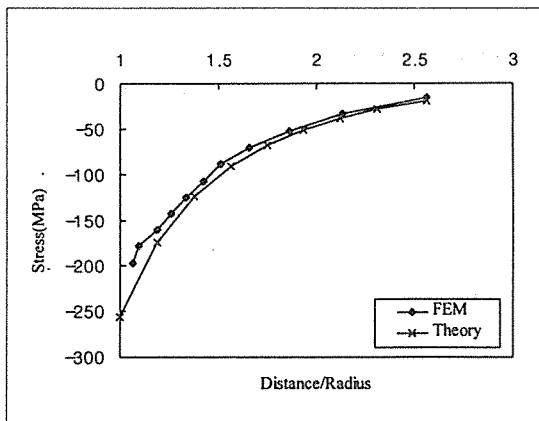


Fig. 7. Radial residual stress in matrix ( $\sigma_r$ ) (Stress free temp. : 300℃, pressureless casting)

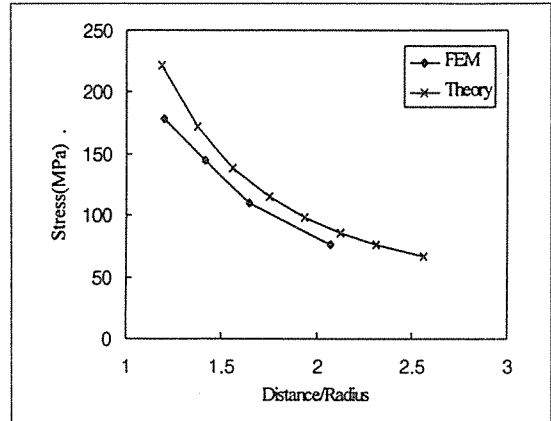


Fig. 8. Tangential residual stress in matrix ( $\sigma_\theta$ ) (Stress free temp. : 300℃, pressureless casting)

##### 4.2 제조조건에 따른 유한요소법 해석 결과

Fig.9와 Fig.10은 제조 조건에 따른 반경방향과 접선방향의 유한요소법을 이용한 잔류응력을 나타낸다. 가압주조시 발생한 반경방향과 접선방향 잔류 응력은 중력주조시 발생한 반경방향과 접선방향의 잔류 응력과 별 차이가 발생하지 않았다. 따라서 가압주조시 가해지는 25MPa의 가압력은 금속복합재료 제조시 잔류응력에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

가압 주조를 이용한 금속복합재료는 T6 열처리를 하게 되는데, 이러한 T6열처리 해석은 다음과 같이 고려하였다. 먼저 잔류 응력이 없다고 가정한 300℃로부터 상온 25℃로 냉각 후 계산된 잔류응력에 다시 480℃로 상승 후 상온으로 냉각될 때 발생하는 소성변형을 고려하여 잔류응력을 계산하였다. T6열처리 중 시효

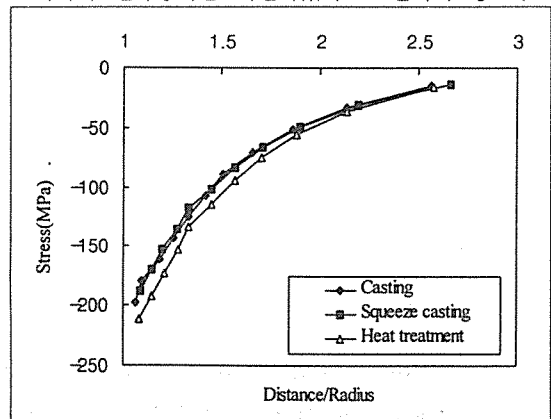


Fig. 9. Effect of fabrication condition on radial residual stress ( $\sigma_r$ ) in matrix

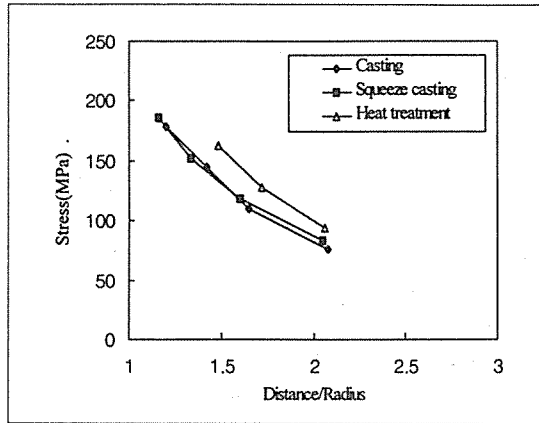


Fig. 10. Effect of fabrication condition on radial residual stress ( $\sigma_r$ ) in matrix

처리 효과는 본 연구에서는 고려하지 않았다. T6열처리 후의 금속복합재료의 잔류응력은 반경방향으로는 압축응력이 증가하였으며, 접선방향으로는 인장응력이 증가하였다. 이러한 잔류응력의 증가는 보강재와 기지재의 경계면에 가까이 갈수록 증가하고 경계면에서 멀어질수록 감소하는 것을 볼 수 있었는데 이는 열처리시 경계면 근처에서 기지재의 소성변형이 크게 발생하기 때문이다. 반면 경계면에서 멀어질수록 열처리에 의한 소성변형은 감소하여 거리가 보강재 반경의 2배에 달하게 되면 열처리가 잔류응력발생에 미치는 영향이 미미해지게 된다.

Fig.11은 보강재에 발생하는 반경방향과 접선방향의 잔류응력을 나타낸다. 기지재에서와는 달리 반경방향과 접선방향 모두 압축응력이 발생한다. 또한 보강재에서는 이론해석에서 등압축력이 발생하였는데 유한요소법 해석치에서도 기지재에 비해 응력구배가 미미하여 등압축력으로 볼 수 있었다. 가압주조시 가해지는 압력 역시 보강재에서 잔류응력에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 그리고 보강재는 기지재에서와 마찬가지로 열처리시 반경방향과 접선방향 모두의 압축응력 증가를 보인다.

#### 4.3 X-ray diffraction을 이용한 잔류응력 측정 결과

Fig.12는 X-ray diffraction을 이용하여 측정된 기지재에 발생된 평균 잔류응력이다. 유한요소법 해석치와 마찬가지로 가압주조시 가해지는 압력이 미치는 영향은 미미하였으나 T6 열처리된 금속복합재료의 잔류압축응력의 증가를 가져왔다.

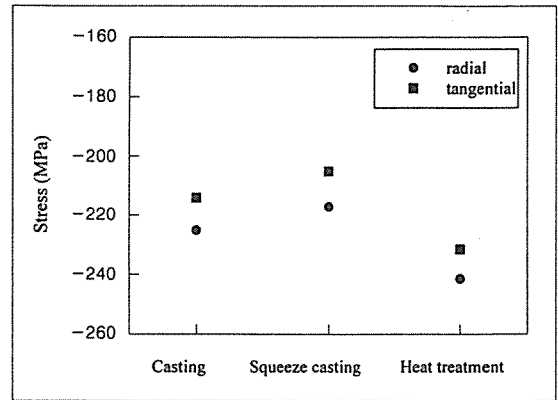


Fig. 11. Effect of fabrication condition on residual stress in reinforcement

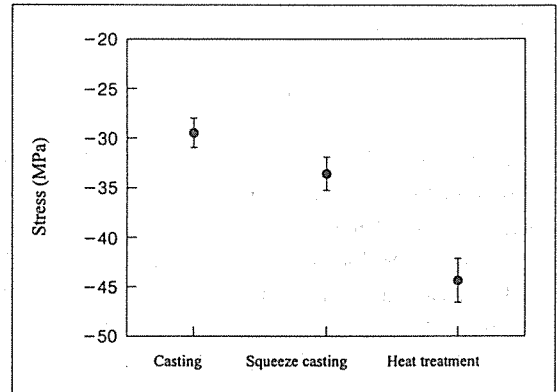


Fig. 12. Residual stress measured by X-ray diffraction method according to fabrication condition

X-ray diffraction을 이용한 측정값은 해석값과는 달리 방향성을 가지지 못하므로 이론 해석치와 유한요소법 해석치와 직접적인 정량적 비교는 불가능하다. 그러나 제조조건이 금속복합재료의 잔류응력에 미치는 영향의 경향을 보여줄 수 있다. X-ray diffraction을 이용하여 측정한 T6열처리나 가압력에 따른 잔류응력 거동은 유한요소해석을 통해 얻은 잔류응력거동과 일치하였다.

#### 5. 결 론

1) 금속복합재료의 잔류응력을 알루미늄 로드(Rod)를 이용하여 단순화시켰으며, 이를 이론 해석과 유한요소해석을 이용하여 계산하였다. 해석결과 기지재에서 반경방향으로 압축잔류응력이, 접선방향으로 인장잔류

응력이 작용하였으며, 보강재에서는 반경방향과 접선방향에 대하여 압축잔류응력이 발생하였다.

2) 유한요소해석을 통해 가압력과 T6열처리가 금속 복합재료의 잔류응력에 미치는 영향을 연구하였다. 가압력은 금속복합재료의 잔류응력에 영향을 주지 않았으나 T6 열처리는 금속복합재료의 잔류응력을 증가시켰다.

## 후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(신소재 분야)(Ministry of Education Research Fund for advanced Materials in 1996)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Arsenault, R.J. and Taya, "Thermal Residual Stress in Metal Matrix Composite", *Acta Metall.*, Vol.35, No.3, 1987, pp.651-659.
2. Shi, N., Wilner, B. and Arsenault, R.J., "Residual Stresses and Their Effects on Deformation in Particle-Reinforced Metal-Matrix Composites", *Acta Metall.*, Vol.40, 1992, pp.2841-2854.
3. Davis, L.C. and Allison, J.E., "Residual Stresses and Their Effects on Deformation in Particle-Reinforced Metal Matrix Composites", *Metall. Trans. A*, Vol.24A, 1993, pp.2487.
4. Cullity, B.D., "Elements of X-ray Diffraction", Addison-Wesley Publishing Comp., 1956, pp.78-103.
5. Davis, J.R., "Properties and Selection : Non-ferrous Alloys and Special-Purpose Materials", *ASM Hand Book*, Vol.2, 1990, pp.114-116, pp.1021-1024.
6. Povirk, G.L. et al, "Thermally and Mechanically Induced Residual Strains in Al-SiC Composites", *Acta Metall.*, Vol.40, No.9, 1992, pp.2391-2412.
7. Ledbetter, H.M. and Ausin, M.W., "Internal Strain in Al-SiC Particle-reinforced Composite: X-ray Diffraction Study", *Material Sci.&Eng.*, Vol.89, 1987, pp.53-61.
8. Lee, E.U., "Thermal Stress and Strain in Metal Matrix Composite with a Spherical Reinforcement Particle", *Metall. Trans. A*, Vol.23, 1992, pp.2205-2210.
9. Krawitz, A.D., Reichel, D.G. and Hitterman, R.L., "Residual Stress and Stress Distribution in a WC-Ni Composite", *Material Sci.&Eng.*, Vol.89, 1989, pp.127-134.
10. Durodola, J.F. and Derby, B., "An Analysis of Thermal Residual Stresses in Ti-6-4 Alloy Reinforced with SiC Fibers", *Acta Metall.*, Vol.42, No.5, 1994, pp.1525-1534.
11. Nakamura, T. and Suresh, S., "Effects of Thermal Residual Stresses and Fiber Packing on Deformation of Metal-Matrix Composite", *Acta Metall.*, Vol.41, No.6, 1993, pp.1665-1681.
12. Ho, S. and Saigal, A., "Three-Dimensional Modeling of Thermal Residual Stresses and Mechanical Behavior of Cast SiC/Al Particulate Composites", *Acta Metall.*, Vol.42, No.10, 1994, pp.3253-3262.
13. Zhang, H., Anderson, P.N., and Daehn, G.S., "Analysis of Thermally Induced Stress and Strain in Continuous Fiber-Reinforced Composites", *Metall. Trans. A*, Vol.25A, 1994, pp.415-425.
14. Zhirui, W., Chen, T.K., and Lloyd, D.J., "Stress Distribution in Particulate-Reinforced Metal-Matrix Composites Subjected to External Load", *Metall. Trans. A*, Vol.24A, 1993, pp.197-207.
15. Zahl, D.B., and McMeeking, R.M., "The Influence of Residual Stress on The Yielding of Metal Matrix Composites", *Acta Metall. Mater.*, Vol.39, No.6, 1991, pp.1117-1122.