

# 단섬유 금속복합체에서의 소성역 전개과정 및 바우신저 효과에 관한 연구

김 홍 건\*

## A Study on the Evolution of Local Plasticity and the Bauschinger Effects in Short Fiber Reinforced Metal Matrix Composites

Hong Gun Kim\*

### Abstract

A continuum analysis of the evolution of plasticity and Bauschinger effect in a short fiber reinforced metal matrix composite, based on the FEM solution for a single fiber model has been performed to investigate the strengthening behavior. The evolution of matrix field quantities during one cycle of fully reversed loading have been examined in detail. The results indicate that the role of constrained matrix flow in generating different levels of matrix triaxiality during forward and reversed loading provides an important contribution to the development of the Bauschinger effect in the metal matrix composite. Therefore, even when the plastic flow of the matrix material follows on isotropic hardening behavior, the Bauschinger effect is predicted for the composite material.

Keywords : Bauschinger Effect (바우신저 효과), Plasticity (소성), Metal Matrix Composite (MMC: 금속복합체), Reinforcement (보강재), Triaxiality (3축성), Coefficient of Thermal Expansion (열팽창계수), Isotropic Hardening(등방성 경화)

### 1. 서 론

최근 고강도(High Strength) 복합체가 등장한 이래 많은 연구개발의 성과로 이제는 항공우주 구조물에서부터 자동차, 산업기계 등에 이르는 상업적인 응용이 본격적으

로 시작되었다. 지속적인 소재기술의 발전으로 취약했던 여러 가지 기계적 성질이 보완되어 그 응용의 폭이 넓어지고 있으며 재료의 신뢰성과 관련된 연구가 진전을 보임에 따라 응용되는 부분도 2차구조물(Secondary Structure) 위주에서 1차구조물(Primary Structure)로

\* 전주대학교 기계공학과

확대되고 있는 실정이다.<sup>(11)</sup>

특히 금속복합재료(Metal Matrix Composite: 이하 MMC로 표기)는 구조용 재료로서 오래 전부터 연구되어 왔으나 약 10여년 전부터 Rice Hull로부터의 저렴한 SiC 획득이 가능하게 됨으로서 실용화되기 시작하였으며 이에 대한 응력해석을 비롯한 모사 방법도 다양하게 발전되어 왔다. 그러나 세라믹 보강재의 사용시 파괴인성이 기대 이하로 저하되고 또 보강재와 기지재의 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion: 이하 CTE로 표기) 차이로 인해 열처리 후의 냉각과정에서 잔류응력을 포함하게 되어 복합체의 기계적 성질을 열화시키는 원인이 되었으나<sup>(2,3)</sup> 이를 극복해 가며 발전을 거듭해 왔다. 이 원인은 금속복합체가 동일성질을 가지는 타재료에 비해 비강도, 비강성이 매우 높기 때문에 최근 들어 그 중요성이 더해가고 있기 때문이다.<sup>(4)</sup> 따라서 이의 응력장을 해석하여 복합체의 성질을 예측하는 것은 중요한 해석분야의 하나라 할 수 있다.

그 예로서, 최근에 Kim<sup>(5,6)</sup>은 종래의 전단지연(Shear Lag) 모델을 수정하여 복합강화효과를 계산한 수정전단지연(Modified Shear Lag) 모델을 사용하여 보강재 간의 불연속인 부분의 응력집중현상이 어느 정도로 발생하는지 정량적으로 식을 유도하고, 복합체의 탄성계수를 정량적으로 해석하여 응력-변형을 관계를 예측하며, 또 보강재 근처에서의 모재에서 응력집중으로 인한 항복현상을 해석하였다. 그리고 이와 같이 단섬유로 보강된 불연속 복합재료에서의 열탄성 거동을 조사하기 위해 Kim<sup>(7)</sup>은 유한요소 해석을 통한 모사를 수행함으로써 복합재료 내부의 거동을 정량적으로 해석한 바 있으며 또 보강재와 모재의 열팽창계수 차이에 따른 잔류응력해석을 탄소성 유한요소 해석을 이용하여 수행한 바 있다.<sup>(9)</sup> 한편, 서로 다른 재료로 결합된 복합체에서 유한요소해석시 오차해석을 계산하는 방법 및 체준의 형상비에 관해 조사하여, 이의 결과를 통해 효율적인 접근방안을 제시하기도 하였다.<sup>(10)</sup>

본 논문에서는 탄소성 유한요소해석을 통한 응력장을 고찰하여 국부적인 소성영역이 어떻게 전개되어 나가며 경계조건의 구속요건이 어떤 결과를 초래하는지에 관해 변형률의 미소증분을 단계적으로 변화시켜 가며 고찰하였고, 또 일반적인 가공경화 재료에서 나타나는 바우신저 효과(Bauschinger Effect)를 검토해 봄으로써 소성구속이 복합강화에 큰 영향을 미친다는 것을 증명하였다.

## 2. 탄소성 유한요소해석 모델의 정식화

유한요소 모델은 탄소성 증분이론을 적용하였으며<sup>(11-13)</sup> 비선형성을 해석하기 위해 Newton-Raphson법을 적용하였다.

$$\{d\epsilon^e\} = \{d\epsilon\} - \{d\epsilon^p\} \quad (1)$$

여기서  $\{d\epsilon\}$ ,  $\{d\epsilon^e\}$  및  $\{d\epsilon^p\}$ 은 전변형률벡터, 탄성변형률벡터 및 소성변형률벡터를 각각 의미한다. 탄소성 응력-변형률 매트릭스는 각 미소증분 단계마다 탄성변형률 벡터를 재계산하고 또 요소에서의 탄젠트 매트릭스도 재계산함으로써 반복적으로 구해질 수 있으며 연립방정식 구성절차는 다음과 같다.

$$[K] \{u\} = \{F^a\} \quad (2)$$

여기서  $[K]$ 는 stiffness matrix,  $\{u\}$ 는 변위, 그리고  $\{F^a\}$ 는 가해진 하중이 된다. Newton-Raphson법에 의한 경로에 따른 증분이론에 근거하여 각 단계별 반복을 수행하면

$$[K_{m,n}] \{\Delta u_n\} = \{F_m^a\} - \{F_{m,n}^{nr}\} \quad (3)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\Delta u\} \quad (4)$$

이 되며 여기서  $[K_{m,n}]$ 은 m번째 하중증가에 따른 tangent stiffness matrix가 되고, 하중증가 m단계 및 반복회수 n에서의 하중은  $\{F_{m,n}^{nr}\}$ 이 된다. 그리고  $\{F_m^a\}$ 은 하중증가 m단계에서 가해진 전체하중이 된다. 하중단계별 각각의 반복시에는  $[K_n]$  및  $\{F_n^{nr}\}$  모두  $\{u_n\}$  및 수렴설정조건(이 연구에서는 모든 Gauss 적분점에서 소성률을 1%로 설정하였음)에 의해 주어진 상태에 따라 평가된다. 그리고 n<sup>th</sup>반복에서 요소의 탄젠트 매트릭스  $[K_{e,n}]$  및 Newton-Raphson 벡터  $\{F_{e,n}^{nr}\}$ 은 다음과 같이 된다.

$$[K_{e,n}] = \int_V [B]^T [D_{ep,n}] [B] dV \quad (5)$$

$$\{F_{e,n}^{nr}\} = \int_V [B]^T [D_{ep,n}] \{\epsilon_n^e\} dV \quad (6)$$

이 때  $[B]$ 는 변형률-변위 매트릭스,  $[D_{ep,n}]$ 은 탄소성 응력-변형률 매트릭스가 되며  $[D_{ep}]$ 의 유도과정은 다음과 같다.

항복조건은 항복이 시작되는 곳에서의 응력을 결정하며

탄소성 재료에서 항복함수  $F$ 는 응력  $\{\sigma\}$  및 항복량  $\{a\}$ 의 함수로써 가공경화 법칙에 의해 정의될 수 있다. 즉, 항복이 일어날 조건은 다음과 같다.

$$F(\{\sigma\}, \{a\}, x) = 0 \quad (7)$$

여기에서  $x$ 는 단위체적당 소성일,  $\{a\}$ 는 항복면과 연관되며 경로 종속적으로서

$$\{a\} = \int C \{d\epsilon^{pl}\} \quad (8)$$

$$x = \int \{\sigma\}^T \{d\epsilon^{pl}\} \quad (9)$$

이 된다. 여기서  $C$ 는 물성치이다. 한편 von Mises 이론에 의해, 항복은 다음과 같이 유효응력  $\sigma_e$ 가 응력상태를 초과할 때 발생될 것이다.

$$\sigma_e = \left[ \frac{1}{2} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 \} + 3 (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]^{1/2} \quad (10)$$

이 때 소성흐름의 법칙은 소성변형률의 방향을 결정하며, 응력의 함수인 소성포텐셜  $Q$ 는 응력과 같은 단위로서  $Q = Q(\{\sigma\}, \{a\}, x)$ 가 된다. 그리고 소성변형률의 크기를 결정하는 스칼라량인  $\lambda$ 는 plastic multiplier라 불리며 소성변형률의 미소증분은 다음과 같이 주어진다.

$$\{d\epsilon^{pl}\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (11)$$

여기에서  $\{d\epsilon^{pl}\}$ 은 소성변형률의 미소증분이다. 경화법칙은 점진적인 항복면의 변화를 나타내며 응력공간에서 항복면의 조건을 보여준다. 따라서 식 (7)을 미분하면 다음과 같다.

$$dF = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} + \left\{ \frac{\partial F}{\partial a} \right\}^T \{da\} + \frac{\partial F}{\partial x} dx = 0 \quad (12)$$

식 (8) 및 (9)에 의해

$$\{da\} = C \{d\epsilon^{pl}\} \quad (13)$$

$$dx = \{\sigma\}^T \{d\epsilon^{pl}\} \quad (14)$$

이 되며 식 (13) 및 (14)를 식 (12)와 결합하면 다음과 같이 된다.

$$\left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} + \left\{ \frac{\partial F}{\partial a} \right\}^T C \{d\epsilon^{pl}\} + \frac{\partial F}{\partial x} \{\sigma\}^T \{d\epsilon^{pl}\} = 0 \quad (15)$$

응력의 증가는 탄성 응력-변형률 관계식에 의해 다음과 같이 계산되며

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D] \{d\epsilon^e\} \\ &= [D] (\{d\epsilon\} - \{d\epsilon^{pl}\}) \end{aligned} \quad (16)$$

식 (12)를 식 (15) 및 (16)에 대입하면

$$\lambda = \{C_\lambda\}^T \{d\epsilon\} \quad (17)$$

여기서

$$\{C_\lambda\} = \frac{\left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [D]}{\left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \{d\sigma\} - C \left\{ \frac{\partial F}{\partial a} \right\}^T \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} - \frac{\partial F}{\partial x} \{\sigma\}^T \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\}} \quad (18)$$

따라서 소성변형률 증분의 크기는 변형률의 전체 증분 및 항복면과 포텐셜면의 특정 형태와 관련되며 식 (11)에 의하여 계산될 수 있다. 그리고 탄젠트 혹은 탄소성 응력-변형률 매트릭스는 다음과 같이 식 (16)에 의해 유도된다.

$$\{d\sigma\} = [D] (\{d\epsilon\} - \{d\epsilon^{pl}\}) \quad (19)$$

한편 식 (11) 및 (17)에서  $\{d\epsilon^{pl}\}$  및  $\lambda$ 의 정의를 고려하면

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}] \{d\epsilon\} \quad (20)$$

여기에서 탄소성 응력-변형률 매트릭스는  $[D_{ep}]$ 는 다음과 같이 주어지게 된다.

$$[D_{ep}] = [D] \left( 1 - \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \{C_\lambda\}^T \right) \quad (21)$$

한편 이 논문에서는 Plandtl-Reuss 방정식인 associated flow rule과 isotropic hardening rule을 적용하여 계산하였다. 즉,  $Q=F$  및  $\{a\}=\{0\}$ 로 계산하였다.

### 3. 바우신저 효과

일반적으로 가공경화된 재료의 변형저항, 즉 예변형과 동일방향의 항복응력에 비교하여 그 재료를 역방향으로 변형할 때의 항복응력은 크게 저하한다. 이는 피로경화 및 피로연화에 직접적으로 연관되는 현상으로써 복합체에 대해서는 이와 관련된 기존연구가 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 복합체에서의 반복적 응력-변형을 (Cyclic Stress-Strain) 거동을 관찰해 봄으로써 단순 응력-변형률(Monotonic Stress-Strain) 거동과 어떤 차이가 있는지 조사하여 재료의 반복적인 종속 거동을 보기 위한 바우신저 효과를 계산해 보는데 그 목적이 있으며 이는 소성 구속조건과 관련하여 복합효과의 모델링 기법을 확립하는데 반드시 필요한 방법론을 제공해 줄 것이다.

일반적으로 변형저항의 가공경화 성분  $\sigma_0$ 는 결정격자의 저항성분과 변형의 방향에 의존하지 않는 성분  $\sigma_{f0}$ (입전위의 교차에 의하여 생기는 응력) 및 역방향에 구동력으로서 작용하는 성분  $\sigma_b$ (퇴적전위에 의한 역방향응력)로 나뉘어진다. 그런 이유로 예변형된 재료의 변형저항  $\sigma_F = \sigma_0 + \sigma_{f0} + \sigma_b$ 는 역방향 변형에서는  $\sigma_R = \sigma_0 + \sigma_{f0} - \sigma_b$ 로 되어 저하하게 된다. 이것이 바우신저 효과의 기본적 해석으로서 동일한 가공경화량을 나타내는 재료에 있어서도 가공경화의 양상, 즉  $\sigma_b$ 의 대소에 의하여 바우신저 효과의 크기는 상이한 것이 된다. 표 1에  $\sigma_b$ 의 수치의 한 예를 보여주고 있으며 적층결합에너지가 낮은 재료, 또 분산입자로 가공경화하는 재료에서는  $\sigma_b$ 가 크고, 바우신저 효과가 현저히 커지게 된다.

Table 1. The ratio of Back stress  $\sigma_b$  and deformable stress  $\sigma_F$

금속	$\sigma_b/\sigma_F$
알루미늄	0.16
동	0.15
a-황동	0.22
오스테나이트계 스테인레스강	0.37

### 4. 결과 및 고찰

복합체 대표모델(Representative Volume Element: RVE)로써는 축대칭 단섬유 모델(Fig. 1 참조)을 사용하

였으며 이 모델의 개념은 종전의 연구내용과 동일하다.<sup>(14,15)</sup> 여기에서는 미세구조역학적 접근방법으로서 보강재인 단섬유들이 축방향과 동일하게 정렬되어 인장하중을 받고 있는 것과 같으며 보강재와 모재간의 결합력은 완전한 것으로 가정하였다. 이는 실제의 MMC에서 실험적으로 유사하게 관측된 바 있다.<sup>(16-19)</sup>

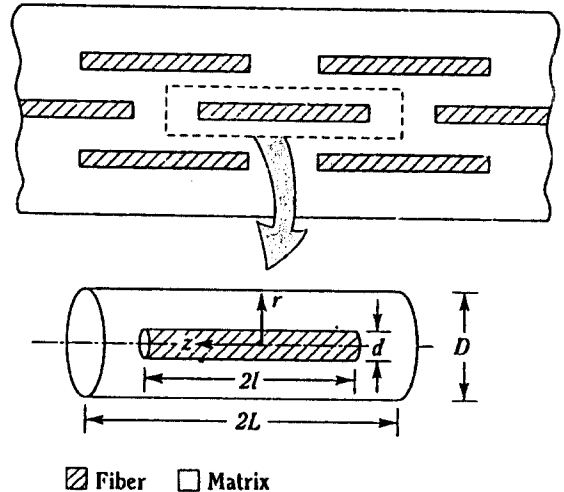


Fig. 1 Composite RVE containing single fiber in a cylindrical matrix volume.

본 연구에서 적용한 재료는 모재 Al 2124, 보강재 SiC Whisker로 하였으며 대표적인 값들은  $E_m=70.0\text{GPa}$ ,  $E_f=480\text{GPa}$ ,  $\nu_m=0.33$ ,  $\nu_f=0.17$ 로서 물성치를 적용하였다.<sup>(20,21)</sup> 유한요소해석도 동일조건하에서의 균일분포를 가정하여 대표모델에 관한 계산을 수행하였고  $V_f=20\%$ 의 경우에 대하여 수행하였으며 FEM 계산을 위해 생성된 모델은 Fig. 2와 같으며 이와 관련된 사항은 Kim<sup>(15-7)</sup>에

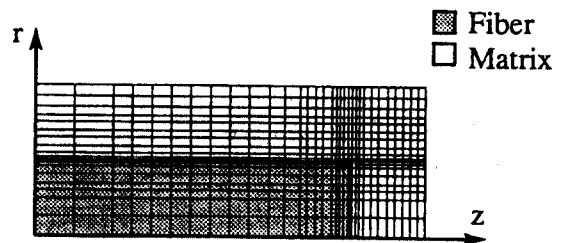


Fig. 2 The RVE and mesh pattern for an axisymmetric single fiber model.



(a)



(a')



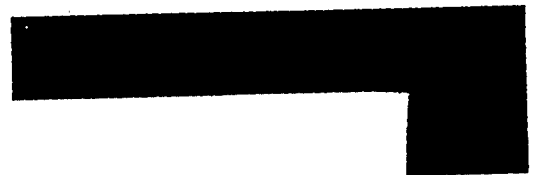
(b)



(b')



(c)



(c')



(d)



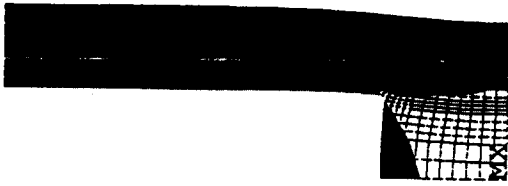
(d')



(e)



(e')



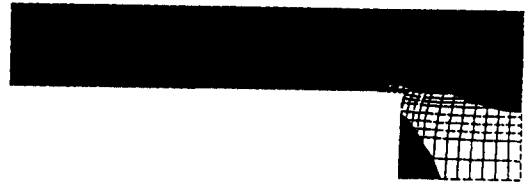
(f)



(f')



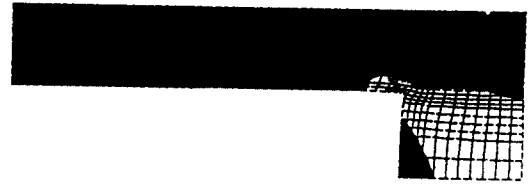
(g)



(g')



(h)



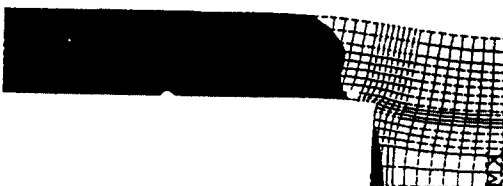
(h')



(i)



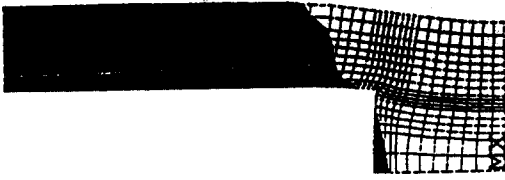
(i')



(j)



(j')



(k)



(k')



(l)



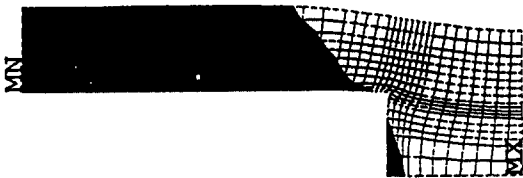
(l')



(m)



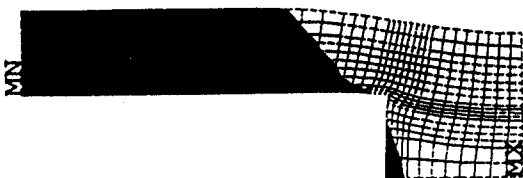
(m')



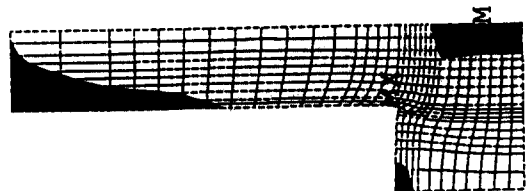
(n)



(n')



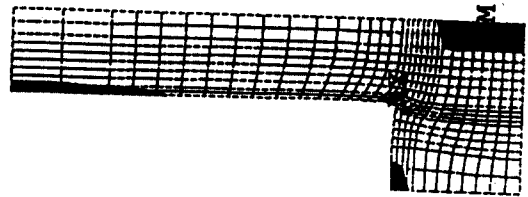
(o)



(o')



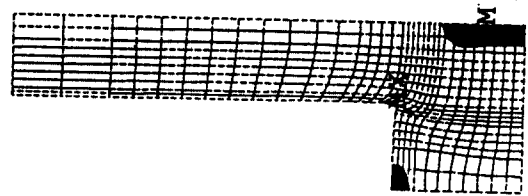
(p)



(p')



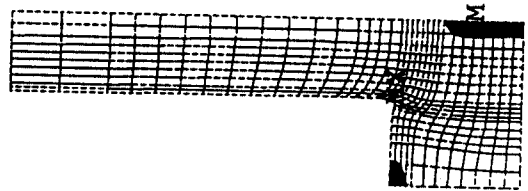
(q)



(q')



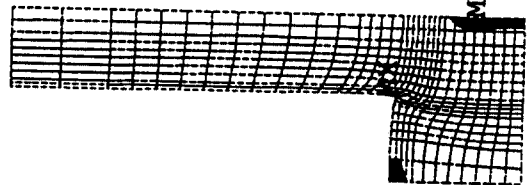
(r)



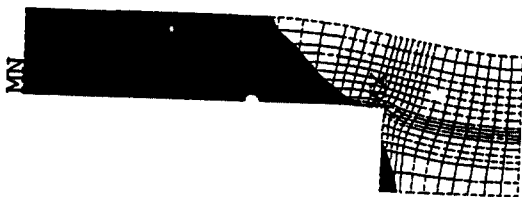
(r')



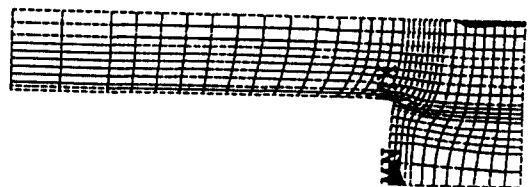
(s)



(s')



(t)



(t')



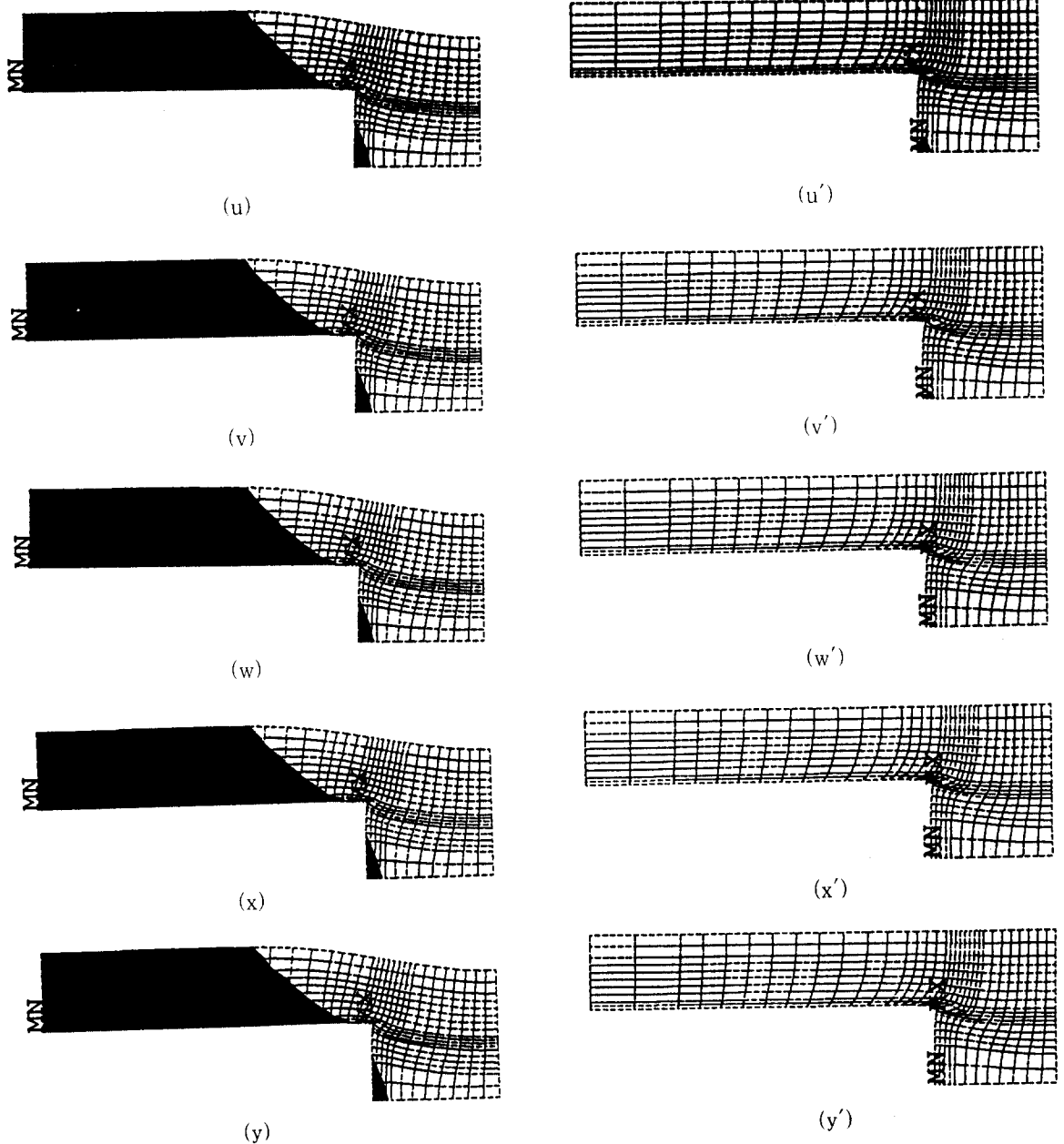


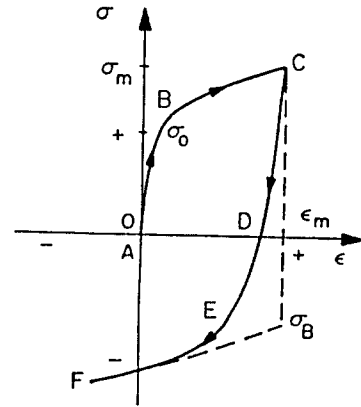
Fig. 3 Plastic deformation evolution in the matrix without and with constraint conditions. The applied strains are (a) and (a')  $\epsilon_c=0.04\%$ , (b) and (b')  $\epsilon_c=0.08\%$ , (c) and (c')  $\epsilon_c=0.12\%$ , (d) and (d')  $\epsilon_c=0.16\%$ , (e) and (e')  $\epsilon_c=0.20\%$ , (f) and (f')  $\epsilon_c=0.24\%$ , (g) and (g')  $\epsilon_c=0.28\%$ , (h) and (h')  $\epsilon_c=0.32\%$ , (i) and (i')  $\epsilon_c=0.36\%$ , (j) and (j')  $\epsilon_c=0.40\%$ , (k) and (k')  $\epsilon_c=0.44\%$ , (l) and (l')  $\epsilon_c=0.48\%$ , (m) and (m')  $\epsilon_c=0.52\%$ , (n) and (n')  $\epsilon_c=0.56\%$ , (o) and (o')  $\epsilon_c=0.60\%$ , (p) and (p')  $\epsilon_c=0.64\%$ , (q) and (q')  $\epsilon_c=0.68\%$ , (r) and (r')  $\epsilon_c=0.72\%$ , (s) and (s')  $\epsilon_c=0.76\%$ , (t) and (t')  $\epsilon_c=0.80\%$ , (u) and (u')  $\epsilon_c=0.84\%$ , (v) and (v')  $\epsilon_c=0.88\%$ , (w) and (w')  $\epsilon_c=0.92\%$ , (x) and (x')  $\epsilon_c=0.96\%$ , (y) and (y')  $\epsilon_c=1.00\%$  from the top to the bottom. All figures of left column are unconstraint condition and those of right column are with constraint condition. Black and white regions represent elastic and plastic deformation, respectively.

상세히 도시되어 있다. 경계조건으로는  $r=0$  및  $z=0$ 에 대칭조건,  $z=L$ 에 균일분포 변형률,  $r=R$ 에는 반경방향으로의 변위를 Free Boundary Condition 및 Coupled Degrees of Freedom의 두 가지 경우로 계산하여 구속 효과를 비교하였다. 기타 여러 조건들은 Kim<sup>(5-7)</sup>에서 연구된 내용과 동일하다.

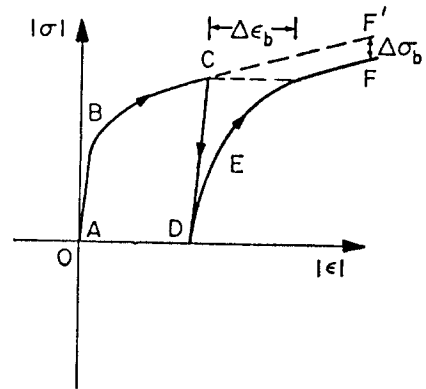
먼저 소성역 전개과정을 고찰하기 위해 균일분포 변형률 하중  $\epsilon_c$ 를 무부하 상태에서부터 미소증분 0.04%씩 증가시켜가며 모재에서의 변화를 살펴보았다. Fig. 3에 이러한 변화가 순차적으로 도시되어 있으며 좌측(Fig. 3(a)-(y))은 모두 비구속조건 상태인 Unconstraint 상태의 소성역 전개과정을 나타내고 있고 우측(Fig. 3(a')-(y'))은 모두 구속조건을 준 Constraint 상태의 소성역 전개과정을 나타내고 있다. 즉 좌측 및 우측 모두 (a) 및 (a')은  $\epsilon_c=0.04\%$ , (b) 및 (b')은  $\epsilon_c=0.08\%$ , (c) 및 (c')은  $\epsilon_c=0.12\% \dots$ , (y) 및 (y')은  $\epsilon_c=1.00\%$ 까지의 하중상태에서 비구속조건 및 구속조건 상태가 상호 비교되어 있다.

이 그림에서 알 수 있는 것처럼 비구속조건의 경우, 약 0.5%의 하중이 가해지면 더 이상 소성전개가 안되는 것을 볼 수 있으며 이는 물리적으로 불합리한 결과를 초래한다. 따라서 Fig. 3 (a')-(y')에 도시된 구속조건 상태가 올바른 경계조건임을 알 수 있고 소성역 전개 과정은 역시 응력집중이 예상되는 섬유단에서 부터 시작되어 전체소성(General Yielding)으로 발전됨을 알 수 있다.

한편 바우신저 효과의 미세구조역학적 현상은 하중조건을 +/-로 반복시킴으로써 반복적 응력-변형률 데이터를 구한후 이를 이용하여 바우신저 응력과 바우신저 변형률을 구할 수 있다. 바우신저 효과를 그림으로 살펴보기 위하여 도시된 Fig. 4(a)를 관찰해 보면 ABC는 균일 인장 상태를 나타내며 C점이 무부하 시작점이 된다. CD는 인장영역에서의 부하를 제거하는 과정이고 DEF는 역방향(압축)의 하중을 가하는 상태이다. 이 때 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 압축방향의 응력-변형률선도를 전복시킴으로써 바우신저 응력  $\Delta\sigma_b$ 와 바우신저 변형률  $\Delta\epsilon_b$ 를 구할 수 있다. 따라서 ABCD는 인장, DEF는 압축하중에 해당된다 (C'까지). 이러한 바우신저 응력 및 바우신저 변형률에 의해 보여지는 바우신저 효과는 재료의 영구연화(Permanent Softening)를 나타낸다고 할 수 있다. 본 FEM 모사 결과 나타난 바우신저 효과는 그림 5와 같으며 경계조건을 구속조건으로 하였을 때 바우신저 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Schematic of Bauschinger Effect. (a) The stress-strain curve for fully reversed loading, (b) Only the magnitude of the stress and the accumulated strain is replotted to illustrate the Bauschinger Effect.

Fig. 5는 FEM으로 모사한 바우신저 효과를 보여주고 있으며 비구속 조건하에서도 약간의 바우신저 효과가 나타남을 알 수 있다. 그러나 구속 조건하에서는 매우 뚜렷한 바우신저 효과가 나타난다는 것을 알 수 있으며 등방성(Isotropic) 경화법칙을 사용하더라도 복합체 효과에 의하여 바우신저 효과가 있음을 보여주고 있다. 이와 같은

바우신저 효과는 소성역 전개과정과 상호 연관성이 있으며 구속효과로부터 기인하는 소성역의 증대분이 이와 같이 큰 바우신저 효과를 나타남을 알 수 있는 것이다.

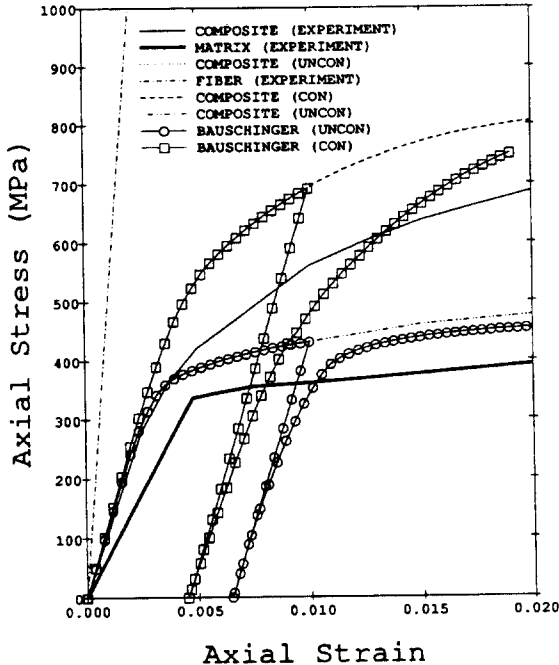


Fig. 5 The Bauschinger Effect predicted by FEM results with and without constraint conditions.

### 5. 결 론

단섬유로 보강된 금속복합체에서 경계조건에서의 구속성 유무를 비교하여 소성역 전개과정 및 바우신저 응력과 바우신저 변형률을 고찰해 봄으로써 소성구속 효과가 복합체 강화 메카니즘에 지대한 영향을 미친다는 것이 입증되었다. 소성영역의 전파 과정은 보강재 끝에서부터 시작되어 보강재 중앙쪽으로 전개돼 나가는 것을 가시적으로 알 수 있었다. 그리고 모재의 성질을 등방성 경화법칙으로 적용하더라도 소성구속 효과에 의하여 바우신저 효과가 뚜렷이 나타남을 알 수 있었으며, 이와 같은 소성구속은 모재에 3축성을 발생시켜 등방응력을 크게 하기 때문에 복합강화 효과가 커지게 된다는 것을 예측할 수 있게 되었다.

### 후 기

이 논문은 1997년도 전주대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

1. 홍창선, "복합재료 응용기술 및 현황", 대한기계학회지, 제34권, 제5호, pp. 334-341, 1994.
2. Divecha, A.P., Fishman, S.G. and Karmarkar, S.D., "Silicon Carbide Reinforced Aluminum - A Formable Composite", Journal of Metals, pp. 12-17, 1981.
3. Nair, S.V., Tien, J.K. and Bates, R.C., "SiC-Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites", International Metals Review, Vol. 30, No.6, pp. 275-290, 1985.
4. Gibson, R.A., McGraw-Hill Inc., "Principles of Composite Material Mechanics", New York, 1994.
5. Kim, H.G., "Stress Transfer in Shear Deformable Discontinuous Composites," KSME Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 475-484, 1994.
6. 김홍건, "불연속 금속복합체에서의 탄성거동에 관한 미세구조역학적 해석", 한국공작기술학회지, 제6권, 제3호, pp. 58-64, 1997.
7. 김홍건, "단섬유 보강 복합재료에서의 열탄성거동에 관한 해석", 한국공작기술학회지, 제6권, 제3호, pp. 89-95, 1997.
8. Povirk, G.L., Needleman, A. and Nutt, S.R., "An Analysis of the Effect of Residual Stresses on Deformation and Damage Mechanisms in Al-SiC Composites", Materials Science and Engineering, Vol. A132, pp. 31-38, 1991.
9. Nair, S.V. and Kim, H.G., "Thermal Residual Stress Effects on Constitutive Response of a Short Fiber or Whisker Reinforced Metal Matrix Composite," Scripta Metallurgica, Vol. 25, No. 10, pp. 2359-2364, 1991.
10. 김홍건, 김종삼, "유한요소법을 이용한 복합체 해석시의 오차 예측에 관한 연구", 전주대학교 공학연구소 논문

문집, 제3권, 제1호, pp. 57-64, 1997.

11. Cook, R.D., Malkua, D.S. and Plesha, M.E., John Wiley & Sons., "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", New York, 1989.
12. Taya, M. and Aresenault, R.J., "Metal Matrix Composites: Thermomechanical Behavior", Pergamon Press, pp. 25-28, 1989.
13. Levy, A and Papazian, J.M., "Elastoplastic Finite Element Analysis of Short Fiber Reinforced SiC/Al Composites: Effects of Thermal Treatments", Acta Metallurgica, Vol. 39, pp. 2255-2266, 1991.
14. Agarwal, B.D. and Broutman, L.J., "Analysis and Performance of Fiber Composites," John Wiley and Sons, New York, pp. 71-104, 1980.
15. Kim, H.G. and Nair, S.V., "Strengthening Analysis of SiC Whisker Reinforced Aluminum Alloys," Proceedings of the 11th World Korean Scientists and Engineers Conference, The Korean Federation of Science and Technology Societies, Seoul, Korea, June. 25-29, pp. 1737-1742, 1990.
16. Aresenault, R.J., "Interfaces in Metal Matrix Composites," Scripta Metallurgica, Vol. 18, pp. 1131-1134, 1983.
17. Nair, S.V., Tien, J.K. and Bates, R.C., "SiC-Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites," International Metals Review, Vol. 30, No.6, pp. 275-290, 1985.
18. Nutt, S.R. and Needleman, A., "Void Nucleation at Fiber Ends in Al-SiC Composites," Scripta Metallurgica, Vol. 21, pp. 705-710, 1987.
19. Nair, S.V. and Kim, H.G., "Thermal Residual Stress Effects on Constitutive Response of a Short Fiber or Whisker Reinforced Metal Matrix Composite," Scripta Metallurgica, Vol. 25, No. 10, pp. 2359-2364, 1991.
20. Taya, M. and Mori, T., "Dislocations Punched-Out Around a Short Fiber Metal Matrix Composite Subjected to Uniform Temperature Change," Acta Metallurgica, Vol. 35, pp. 155-162, 1987.
21. Derby, B. and Walker, J.R., "The Role of Enhanced Dislocation Density in Strengthening Metal Matrix Composites", Scripta Metallurgica, Vol. 22, pp. 529-532, 1988.