

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.6.488

## 멱함수 가공경화 모델을 이용한 복합실린더의 자긴가공해석

박재현\* · 이영신† · 심우성\* · 김재훈\*\* · 차기업\*\*\* · 홍석균\*\*\*  
(2007년 12월 6일 접수, 2008년 4월 16일 심사완료)

### Autofrettage Analysis of Compound Cylinder with Power Function Strain Hardening Model

Jae-Hyun Park, Young-Shin Lee, Woo-Sung Shim, Jae-Hoon Kim, Ki-Up Cha and Suk-Kyun Hong

**Key Words:** Compound Cylinder(복합실린더), von Mises Yield Criterion(von Mises 항복조건), Bauschinger Effect(바우싱거효과), Strain-Hardening(가공경화), Autofrettage Model(자긴가공모델)

#### Abstract

In order to achieve long fatigue lifetimes for cyclically pressurized thick cylinders, multi-layered compound cylinder has been proposed. Such compound cylinder involves a shrink-fit procedure incorporating a monobloc tube which has previously undergone autofrettage. The basic autofrettage theory assumes elastic-perfectly plastic behaviour. Because of the Bauschinger effect and strain-hardening, most materials do not display elastic-perfectly plastic properties and consequently various autofrettage models are based on different simplified material strain-hardening models, which is assumed that combination of linear strain-hardening and power strain-hardening model. This approach gives a more accurate prediction than the elastic-perfectly plastic model and is suitable for different strain-hardening materials. In this paper, a general autofrettage model that incorporates the material strain-hardening relationship and the Bauschinger effect, based upon the actual tensile-compressive stress-strain curve of a material was proposed. The model was obtained using the von Mises yield criterion and plane strain condition.

The tensile-compressive stress-strain curve was obtained by experiment. The parameters needed in the model were determined by fitting the actual tensile-compressive curve of the material. Finally, strain-hardening model was compared with elastic-perfectly plastic model.

#### 기호설명

$A_1, A_3$  : 식에서의 상수

$A_2, A_4$  : 식 (2)와 (4)에서의 계수

$B_1, B_2$  : 식 (2)와 (4)에서의 지수

$E, E'$  : 부하와 제하 시의 탄성계수

$p_a$  : 자긴가공 압력

$r$  : 임의의 반경

$a$  : 복합실린더의 내반경

$b$  : 내부실린더의 외반경

$c$  : 복합실린더의 외반경

$\rho_L$  : 부하 소성영역 반경

$\rho_U$  : 제하 소성영역 반경

† 책임저자, 회원, 충남대학교 기계설계공학과  
BK21 메카트로닉스사업단장  
E-mail : leeys@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-6644 FAX : 042-821-8894

\* 충남대학교 대학원 기계설계공학과

BK21 메카트로닉스사업단

\*\* 충남대학교 기계설계공학과

BK21 메카트로닉스사업단

\*\*\* 국방과학연구소

$\alpha$	: 제하 소성영역과 부하 소성영역의 두께비
$\epsilon$	: 변형률
$\epsilon_y$	: 부하 항복변형률
$\epsilon_y^*$	: 제하 항복변형률
$\sigma$	: 응력
$\sigma_y$	: 항복응력
$\sigma^L$	: 부하응력
$\sigma^s$	: 열박음 응력
$\sigma^U$	: 제하응력
$\sigma^A$	: 잔류응력
아래첨자	
$\theta$	: 접선방향
$r$	: 접선방향
$z$	: 반경방향
*	: 제하상태

## 1. 서 론

여러 겹의 압력용기는 고압 기술분야에서 널리 쓰이고 있다. 특히 복합실린더는 자긴가공과 열박음을 사용하여 제조된다. 잔류응력장과 실린더의 기하형상에 따른 잔류응력분포는 전적으로 실린더 재료의 특성에 따라 좌우된다.<sup>(1)</sup>

자긴가공(自緊加工)은 포신이나 고압반응로 같은 두꺼운 실린더의 사용응력과 피로수명을 증가시키는 실용적인 방법이다. 자긴가공의 본질은 잔류응력을 발생시켜 응용하는 것이다. 이러한 잔류응력은 실린더 내벽에 부분적인 항복을 일으킨 후에 생성된다. 이러한 실린더의 사용응력, 피로균열생성과 파괴의 예측을 위해 잔류응력의 정확한 평가가 필요하다. 기초적인 자긴가공 모델, 즉 완전 탄소성모델은 Hill<sup>(2)</sup>에 의해 제안되었다.

대부분의 재료는 바우싱거 효과나 가공경화현상 때문에 완전 탄소성 가정을 만족시키지 못한

다. 그리하여 여러 가지 단순화된 가공경화 모델이 제안되었다. 두꺼운 실린더의 자긴가공 탄소성해석은 국내에서도 많은 연구가 이루어졌다. 김천옥, 이영신 등은<sup>(3)</sup> 1977년 국내에서 처음으로 두꺼운 실린더에 대한 자긴가공 탄소성해석을 연구하였다. 고승기, 이송인, 정세희 등은<sup>(4,5)</sup> 1995년 두꺼운 실린더의 잔류응력과 피로수명에 관해 연구하였다. 그리고 최근에 이영신, 박재현, 김재훈<sup>(6-8)</sup> 등은 복합실린더에 대한 기계가공 이론해석 및 바우싱거의 영향에 대해 연구하였다.

국외에서는 다음과 같은 다음과 같은 연구가 이루어졌다. 2005년 Huang<sup>(9)</sup>은 재료의 인장-압축 응력선도에 기반하여 일반적인 자긴가공 모델을 제안하였다. 미국기계학회(ASME) 학술지 Journal of Pressure Vessel Technology는 2006년(Vol.128, No.2)에 포신티프집호를 간행하였으며, 바우싱거나 가공경화 모델에 대해 소개하였다. Troiano, Parker<sup>(10)</sup> 등은 고강도강인 A723 압력용기강의 바우싱거효과에 대한 유한요소해석을 수행하였다. Swardt<sup>(11)</sup>는 바우싱거 효과를 보이는 재료의 유한요소해석을 위한 재료 모델에 대해 연구하였다. 2007년 Adibi-Als, Livieri 등은<sup>(12)</sup> 바우싱거 현상을 고려한 자긴가공된 압력용기에 대한 이론적 접근방법에 대한 연구를 수행하였다.

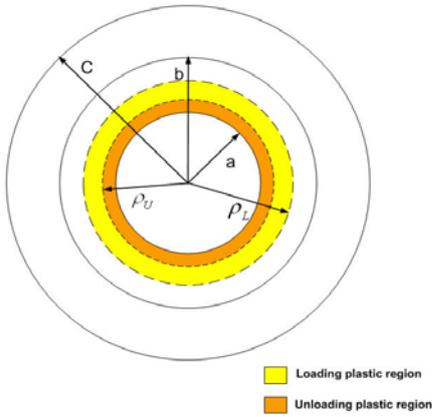
본 연구에서는 재료의 실제 인장-압축선도와 von Mises 항복조건에 기반하여 가공경화와 바우싱거 현상을 고려한 복합실린더의 자긴가공해석을 수행하였다.

## 2. 역함수 가공경화모델의 자긴가공해석

### 2.1 이론해석방법

자긴가공된 복합실린더의 부하와 제하 동안의 소성영역은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2는 일반적인 재료의 인장-압축 선도를 보여준다. 응력선도는 O-A, A-B, B-D, D-E의 네 부분으로 나눌 수 있고 4개의 식으로 표현된다.<sup>(9)</sup>

(a) **부하상태응력선도 (O-A-B선도)** Fig. 2에 보여진 바와 같이, 초기 부하상태, O-A에서 재료는 항복응력  $\sigma_y(\epsilon_y)$ 까지 탄성적으로 거동 한다; 이때의 탄성계수는 E이다. 그리고 재료는 A-B에서는 소성적으로 거동한다. 이러한 상태를 비선형적이라 한다. 이 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.



**Fig. 1** Loading and unloading plastic region of autofrettaged compound cylinder

선형탄성상태 (O-A 구간)

$$\sigma = E\epsilon \quad (\epsilon \leq \epsilon_y) \quad (1)$$

가공경화상태 (A-B 구간)

$$\sigma = A_1 + A_2\epsilon^{B_1} \quad (\epsilon \geq \epsilon_y) \quad (2)$$

(a) 제하상태응력선도(B-D-E구간) Fig. 2에 보여진 바와 같이, 제하 탄성상태는 B-D구간으로, 재료는 응력  $\sigma_D(\epsilon_y^*)$ 까지 탄성적으로 거동한다; 이때의 탄성계수는 E'와 같다. 그리고 D-E에서는 소성적으로 거동한다. 이때의 상태는 비선형성을 갖고 이 관계는 다음과 같이 표현된다.

선형탄성상태 (B-D 구간)

$$\sigma^* = E'\epsilon^* \quad (3)$$

가공경화상태 (D-E 구간)

$$\sigma^* = A_3 + A_4(\epsilon^*)^{B_2} \quad (\epsilon^* \geq \epsilon_y^*) \quad (4)$$

2.2 기본가정

본 연구에서 채용한 기본가정은 다음과 같다.

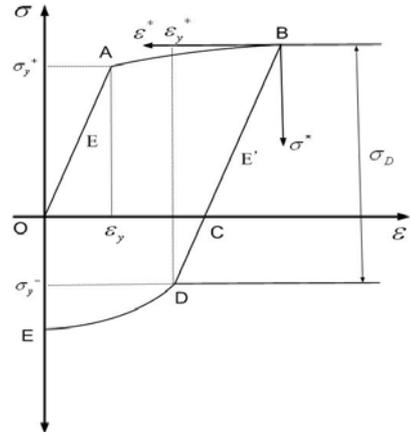
(a) 항복 선도에 대한 가정

응력강도(Stress intensity)  $\sigma_i$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2]} \quad (5)$$

변형률 강도(Strain intensity)  $\epsilon_i$

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_\theta - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_\theta)^2} \quad (6)$$



**Fig. 2** Actual material tensile-compressive stress-strain curve<sup>(9)</sup>

(b) 부피 비압축성 가정

$$\epsilon_\theta + \epsilon_r + \epsilon_z = 0 \quad (7)$$

(c) 평면변형률 가정

$$\epsilon_z = 0 \quad (8)$$

(d) 항복조건

$$\sigma_i = \sigma_y \quad (9)$$

2.3 부하시의 응력해석

(a) 소성영역 ( $a \leq r \leq \rho_L$ )

$$\sigma_r^{L1} = \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 \ln\left(\frac{r}{a}\right) + \frac{\sigma_y - A_1}{\sqrt{3} B_1} \rho_L^{2B_1} \left(\frac{1}{a^{2B_1}} - \frac{1}{r^{2B_1}}\right) - p_a \quad (10)$$

$$\sigma_\theta^{L1} = \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 \left[ \ln\left(\frac{r}{a}\right) + 1 \right] + \frac{\sigma_y - A_1}{\sqrt{3} B_1} \rho_L^{2B_1} \left[ \frac{1}{a^{2B_1}} + (2B_1 - 1) \frac{1}{r^{2B_1}} \right] - p_a \quad (11)$$

(b) 탄성영역 ( $\rho_L \leq r \leq c$ )

$$\sigma_r^{L2} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \rho_L^2 \left( \frac{1}{c^2} - \frac{1}{r^2} \right) \quad (12a)$$

$$\sigma_{\theta}^{L2} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \rho_L^2 \left( \frac{1}{c^2} + \frac{1}{r^2} \right) \quad (12b)$$

2.4 제하 시의 응력해석

자긴가공 압력이 완전히 제거될 때, 제하 압력이  $p_a$ 와 같다고 하면, 역항복이 일어나면서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(a) 소성영역 ( $a \leq r \leq \rho_U$ )

$$\sigma_r^{U1} = \frac{2}{\sqrt{3}} A_3 \ln\left(\frac{r}{a}\right) + \frac{\sigma_D - A_3}{\sqrt{3} B_2} \rho_U^{2B_2} \left( \frac{1}{a^{2B_2}} - \frac{1}{r^{2B_2}} \right) - p_a \quad (13a)$$

$$\sigma_{\theta}^{U1} = \frac{2}{\sqrt{3}} A_3 \left[ \ln\left(\frac{r}{a}\right) + 1 \right] + \frac{\sigma_D - A_3}{\sqrt{3} B_2} \rho_U^{2B_2} \left[ \frac{1}{a^{2B_2}} + (B_2 - 1) \frac{1}{r^{2B_2}} \right] - p_a \quad (13b)$$

(b) 탄성영역 ( $\rho_U \leq r \leq c$ )

$$\sigma_r^{U2} = \frac{\sigma_D}{\sqrt{3}} \rho_U^2 \left( \frac{1}{c^2} - \frac{1}{r^2} \right) \quad (14a)$$

$$\sigma_{\theta}^{U2} = \frac{\sigma_D}{\sqrt{3}} \rho_U^2 \left( \frac{1}{c^2} + \frac{1}{r^2} \right) \quad (14b)$$

위의 응력식 (10)~(14)에서는 가공경화에 관련된 계수  $A_2, A_4$ 는 식의 유도과정에서 소거되어 나타나지 않았다.

2.5 열박음 응력

Fig. 3에 공차  $\delta$ 를 포함하는 복합실린더의 단면을 나타내었다. 공차  $\delta$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.<sup>(13)</sup>

$$\delta = \frac{bp}{E} \left( \frac{b^2 + c^2}{c^2 - b^2} + \nu \right) + \frac{bp}{E} \left( \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} - \nu \right) \quad (15)$$

여기서  $\nu$ 는 푸아송의 비,  $E$ 는 탄성계수를 나타낸다. 그리고  $p$ 는 내·외부실린더의 간섭에 의해 생기는 압력을 나타낸다. 이 식으로부터 접촉면 압력은

$$p = \frac{E\delta}{b} \frac{(b^2 - a^2)(c^2 - b^2)}{2b^2(c^2 - a^2)} \quad (16)$$

복합실린더에서 이 압력은 외부실린더에 내압으로 작용하고, 내부실린더에는 외압으로 작용한다. 이를 바탕으로 자긴가공후 복합실린더의 잔류응력분포를 예측할 수 있다.<sup>(6-8)</sup>

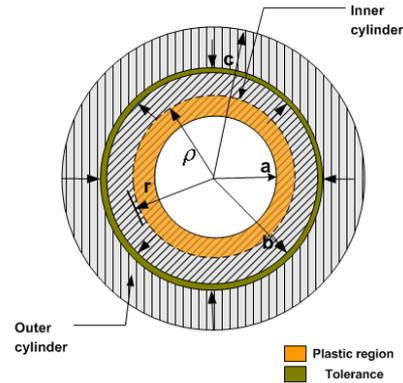


Fig. 3 Partially autofrettaged compound cylinder with interference  $\delta$

내부실린더( $a \leq r \leq b$ )에서의 열박음 응력분포는 식 (17)과 같다.

$$\sigma_r^{s1} = -\frac{E\delta}{2b} \frac{c^2 - b^2}{c^2 - a^2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (17a)$$

$$\sigma_{\theta}^{s1} = -\frac{E\delta}{2b} \frac{c^2 - b^2}{c^2 - a^2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (17b)$$

외부실린더( $b \leq r \leq c$ )에서의 열박음 응력분포는 식 (18)과 같다.

$$\sigma_r^{s2} = \frac{E\delta}{2b} \frac{b^2 - a^2}{c^2 - a^2} \left( 1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (18a)$$

$$\sigma_{\theta}^{s2} = \frac{E\delta}{2b} \frac{b^2 - a^2}{c^2 - a^2} \left( 1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (18b)$$

2.5 잔류응력분포

잔류응력분포는 부하 응력에서 제하 회복응력을 빼고 열박음 응력을 더하여 구할 수 있으며 다음식과 같이 표현된다; ( $\sigma^A = \sigma_r^L - \sigma_r^U + \sigma^s$ ). 여기서  $\sigma^L$ 은 부하응력,  $\sigma^U$ 는 제하응력,  $\sigma^s$ 는 열박음 응력을 나타낸다. 실린더의 잔류응력은 영역에 따른 응력성분을 중첩하여 얻어진다.

•소성영역이 내부실린더에 있는 경우( $a \leq \rho_L \leq b$ )

①내부실린더 제하 소성영역에서의 잔류응력

( $a \leq r \leq \rho_U$ )

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{L1} - \sigma_r^{U1} + \sigma_r^{s1} \quad (19a)$$

$$\sigma_{\theta}^A = \sigma_{\theta}^{L1} - \sigma_{\theta}^{U1} + \sigma_{\theta}^{s1} \quad (19b)$$

②내부실린더 부하 소성영역에서의 잔류응력

( $\rho_U \leq r \leq \rho_L$ )

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{L1} - \sigma_r^{U2} + \sigma_r^{s1} \quad (20a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{L1} - \sigma_\theta^{U2} + \sigma_\theta^{s1} \quad (20b)$$

③ 내부실린더 탄성영역에서의 잔류응력 ( $\rho_L \leq r \leq b$ )

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{L2} - \sigma_r^{U2} + \sigma_r^{s1} \quad (21a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{L2} - \sigma_\theta^{U2} + \sigma_\theta^{s1} \quad (21b)$$

④ 외부실린더 탄성영역에서의 잔류응력 ( $b \leq r \leq c$ )

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{L2} - \sigma_r^{U2} + \sigma_r^{s2} \quad (22a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{L2} - \sigma_\theta^{U2} + \sigma_\theta^{s2} \quad (22b)$$

• 소성영역이 외부실린더에 있는 경우 ( $a \leq \rho_L \leq b$ )

⑤ 내부실린더 제하 소성영역에서의 잔류응력

( $a \leq r \leq \rho_U$ )

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{L1} - \sigma_r^{U1} + \sigma_r^{s1} \quad (23a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{L1} - \sigma_\theta^{U1} + \sigma_\theta^{s1} \quad (23b)$$

⑥ 내부실린더 부하 소성영역에서의 잔류응력

( $\rho_U \leq r \leq b$ )

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{L1} - \sigma_r^{U2} + \sigma_r^{s1} \quad (24a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{L1} - \sigma_\theta^{U2} + \sigma_\theta^{s1} \quad (24b)$$

⑦ 외부실린더 부하 소성영역에서의 잔류응력

( $b \leq r \leq \rho_L$ )

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{L1} - \sigma_r^{U2} + \sigma_r^{s2} \quad (25a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{L1} - \sigma_\theta^{U2} + \sigma_\theta^{s2} \quad (25b)$$

⑧ 외부실린더 탄성영역에서의 잔류응력 ( $\rho_L \leq r \leq c$ )

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{L2} - \sigma_r^{U2} + \sigma_r^{s2} \quad (26a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{L2} - \sigma_\theta^{U2} + \sigma_\theta^{s2} \quad (26b)$$

## 2.6 자긴가공압력

소성반경  $\rho_L$ 는 두꺼운 실린더의 자긴가공 공정에서 기본적인 변수이다. 자긴가공 압력  $p_a$ 는 소성반경에 의해 좌우된다. 자긴가공 압력  $p_a$ 는 다음의 경계조건을 이용하여 구할 수 있다.

경계조건  $(\sigma_r)_e|_{r=\rho_L} = (\sigma_r)_p|_{r=\rho_L}$

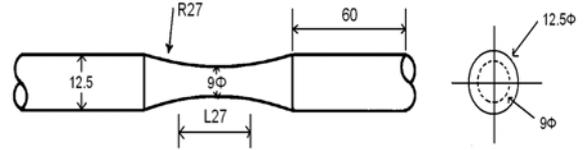
$$p_a = \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 \ln\left(\frac{\rho_L}{a}\right) + \frac{\sigma_y - A_1}{\sqrt{3} B_1} \left(\frac{\rho_L}{a}\right)^{2B_1} - \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \left(\frac{\rho_L}{c}\right)^2 - \frac{(1-B_1)\sigma_y - A_1}{\sqrt{3} B_1} \quad (27)$$

**Table 1** Chemical composition of SNCM8

C	0.36~0.43	Cr	0.6~1.00
Si	0.15~0.35	Mo	0.15~0.30
Mn	0.60~0.60	Ni	1.60~2.00
P	≤ 0.03	W	-
S	≤ 0.30	V	-

**Table 2** Mechanical properties of SNCM8

Young's modulus, E(GPa)	202.2
Tensile strength, $\sigma_u$ (MPa)	1272
Yield strength, $\sigma_{ys}$ (MPa)	1129
Elongation, EL(%)	19
Reduction in area, RA(%)	59.2



**Fig. 4** Dimension of specimen  
(All dimensions in mm)

2.7 자긴가공압력  $p_a$ 에 따른 제하소성반경

제하소성반경  $\rho_U$ 는 자긴가공압력에 따라 변화하며 아래의 경계조건을 이용하여 구할 수 있다.

경계조건  $(\sigma_r)_e|_{r=\rho_U} = (\sigma_r)_p|_{r=\rho_U}$

$$p_a = \frac{2}{\sqrt{3}} A_3 \ln\left(\frac{\rho_U}{a}\right) + \frac{\sigma_D - A_3}{\sqrt{3} B_2} \left(\frac{\rho_U}{a}\right)^{2B_2} - \frac{\sigma_D}{\sqrt{3}} \left(\frac{\rho_U}{c}\right)^2 - \frac{(1-B_2)\sigma_D - 2A_3}{\sqrt{3} B_2} \quad (28)$$

## 3. 가공경화특성 실험

### 3.1 재료 및 시편

본 연구에 사용된 소재는 포신용 재료인 SNCM8 고강도강이다. 본 고강도 강의 화학적 조

**Table 3** Calculation parameters of SNCM8

$\sigma_y$ (MPa)	E(GPa)	$A_1$ (MPa)	$A_2$ (MPa)	$B_1$	$\sigma_D$ (MPa)	E'(GPa)	$A_3$ (MPa)	$A_4$ (MPa)	$B_2$
1178	203	1096	12440	1	1449	192	0.5	42864	0.8



**Fig. 5** Photo of MTS810 for Experiment of uniaxial tension-compression test

성은 Table 1과 같으며, Table 2는 기계적 특성을 보여주고 있다. Fig. 4는 시험편의 형상 및 치수를 나타낸 것이다.

3.2 가공경화특성 실험방법

본 연구에 사용된 시험기는 MTS사의 10 Ton 용량의 만능재료 시험기(Model : MTS-810)이다. Fig. 5은 인장-압축 시험에 대한 사진이다. 본 시험기를 사용하여 2가지 실험을 하였다.

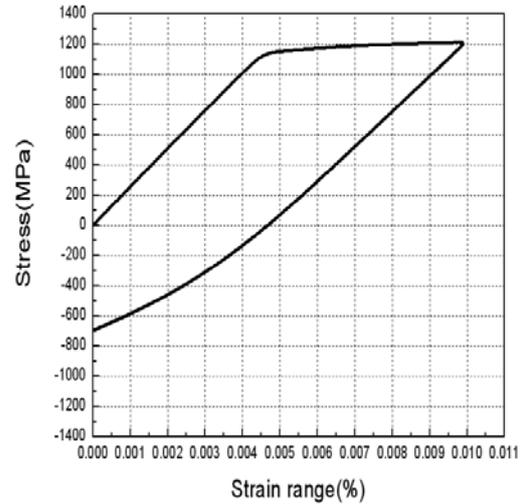
첫 번째 실험은 하중 제어 실험으로 작용 하중 75 kN~55 kN에서 주파수를 0.005 Hz로, 10 사이클 동안 수행하였다.

두 번째로 일축 인장-압축 시험을 수행하였다.

실험은 변형률 속도 0.0001 mm/mm/sec에서 변형률 제어조건하에서 실험하였다. 신장계(extensometer)의 총 범위는 ±20 mm이다. 시험편은 가공으로 인한 시험편의 평행부에 존재할 수 있는 미세한 균열들로 인한 영향을 제거하기 위하여 에머리 페이퍼 #600~#2000으로 연마하여 실험하였다. 바우싱거 실험은 각각의 시험에 대하여 실험된 전변형률 범위는 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 3%, 4%으로 선택하여 수행하였다.

3.3 실험결과

이 실험에서 재료의 인장-압축 응력선도는 Fig. 6에 나타나있다. 계산에 필요한 파라미터들은 식



**Fig. 6** Stress-strain curve of SNCM8

(1)~(4)를 이용하여 커브피팅(curve-fitting)을 통해 결정되었다. Table 3에 파라미터들의 값을 나타내었다. 이러한 실험과 커브피팅에 의해 구해진 값들은 복합실린더의 잔류응력 계산에 사용하였다

4. 복합실린더해석 결과 및 토론

가장 간단한 자긴가공 모델은 재료의 탄성-완전소성 응력선도를 사용한 모델이다. 이러한 해석방법은 오래전부터 사용되었다. 본 논문에서는 이러한 떡합수 가공경화 모델과 von-Mises 항복조건을 사용해서 복합실린더의 자긴가공 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 기하형상 변수들은 다음과 같다.

$$a = 78 \text{ mm}, b = 117 \text{ mm}, c = 156 \text{ mm},$$

$$\delta = 0.1 \text{ mm}, E = 209 \text{ GPa}, \nu = 0.3,$$

$$\rho_L = \text{arbitrary radius}$$

$$\rho_U = \alpha(\rho_L - a) + a$$

$$\text{여기서, } \alpha = (\rho_U - a) / (\rho_L - a)$$

Fig. 7 ~ Fig. 9는 각각 20 %, 40 %, 60 % 자긴

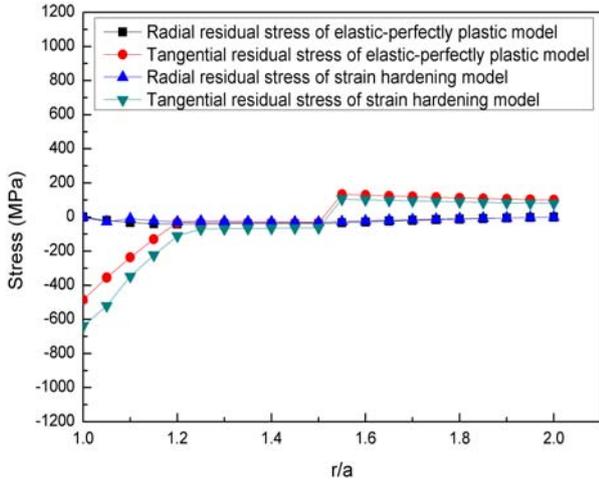


Fig. 7 Residual stress distribution of compound cylinder under 20 % overstrain level

가공에 따른 잔류응력 분포를 나타내었다. 각각 탄성-완전소성 모델과 실제 재료의 응력선도에 기반으로 멱함수모델을 이용한 잔류응력분포가 비교되었다. 재료를 탄성-완전소성이라 가정한 복합실린더의 잔류응력은 이영신, 박재현, 김재훈 등에<sup>(6-8)</sup> 의해 수행되었다.

세 그림에서 알 수 있듯이, 복합실린더의 내경에서 멱함수 모델에 의해 해석된 반경방향 잔류응력이 탄성-완전소성이라 가정해 해석한 잔류응력보다 7~200 MPa 정도가 큰 인장응력을 보이고 있다. 또한, 실린더 내벽의 접선방향 압축잔류응력은 멱함수 모델에 의해 해석된 잔류응력이 150~200 MPa 정도 큰 경향을 보이고 있다.

Fig. 10은 부하 소성영역과 제하 소성영역의 두께비( $\alpha$ )의 값이 0에서 1.0까지 변할 때, 복합실린더 내경에서의 압축 잔류응력을 나타내고 있다.  $\alpha$ 가 0일 때는 제하 소성영역이 없는 경우이고,  $\alpha$ 가 1일 때는 부하영역 전체가 제하 소성영역이 되는 경우이다. 제하 소성영역이 커질수록 복합실린더의 내경에서 압축 잔류응력이 점차 커지는 것을 알 수 있다.  $\alpha$ 는 부하소성영역 두께 대 제하 소성영역 두께비를 나타낸다.

부하 소성영역대비 제하 소성영역이 커질수록 복합실린더의 내경에서의 압축잔류응력이 점점 커짐을 알 수 있다. 그러나 직접적으로 제하소성영역을 임의로 제어하여 압축잔류응력을 응용하기는 어렵다.

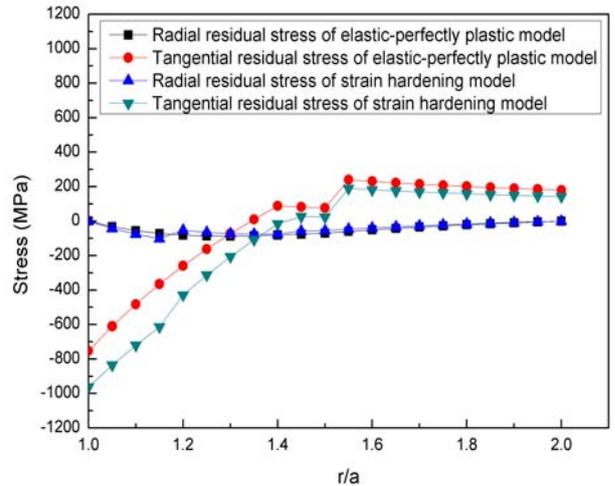


Fig. 8 Residual stress distribution of compound cylinder under 40 % overstrain level

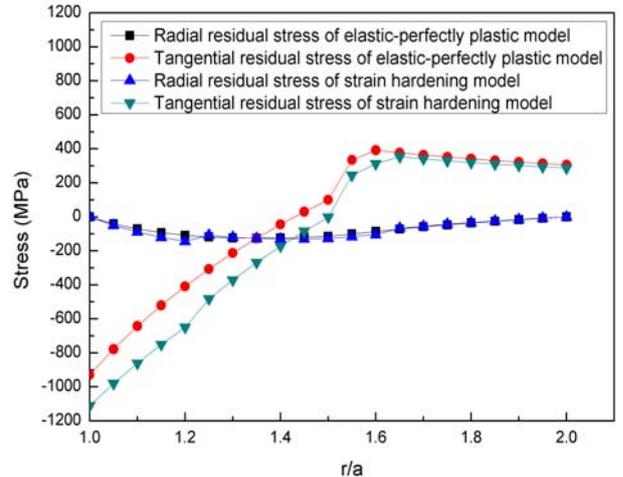


Fig. 9 Residual stress distribution of compound cylinder under 60 % overstrain level

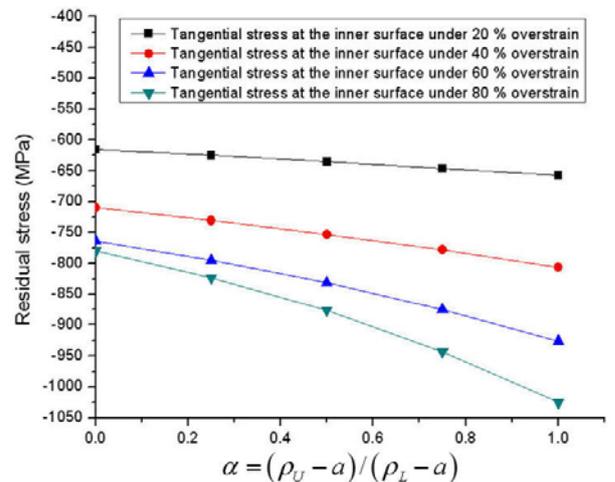


Fig. 10 Tangential residual stress at the inner surface with various loading and unloading region

### 5. 결 론

본 연구에서는 떡함수 가공경화모델을 이용하여 자긴가공된 복합실린더의 응력해석을 수행하였다. 복합실린더의 잔류응력 해석은 재료의 실제 응력선도와 von-Mises 항복조건에 기반해 수행되었다. 해석결과는 탄성-완전소성 모델 잔류응력해석 결과와 비교되었다. 그 결과 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

(1) 이중 실린더의 내경에서 떡함수 모델에 의해 해석된 반경방향 잔류응력은 탄성-완전소성으로 가정한 잔류응력과 큰 차이가 없는 결과를 나타냈다.

(2) 실린더 벽 전체에 걸쳐 접선방향 잔류응력은 떡함수 모델을 이용해 해석한 잔류응력이 완전탄소성모델과 비교하였을 때 7~200 MPa 정도의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 실린더의 잔류응력분포는 부하 및 제하시의 응력성분을 더하고 뺀 것이므로 반경에 따라 응력성분의 값이 달라지며 이 변화의 정도에 따라 잔류응력분포가 차이가 난다.

(3) 떡함수 모델에 의해 해석된 접선 잔류응력이 탄성-완전소성 모델 잔류응력보다 내경에서 150~200 MPa 정도 높은 잔류응력을 나타냈다.

(4) 부하 소성영역대비 제하 소성영역이 커질 수록 복합실린더의 내경에서의 압축잔류응력이 점점 커지나 직접적으로 제하소성영역을 임의로 제어하여 압축잔류응력을 응용하기는 어렵다.

### 후 기

본 연구는 방위산업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 UD060011AD)

### 참고문헌

(1) Jahed, H., Farshi, B. and Karimi, M., 2006, "Optimum Autofrettage and Shrink-Fit Combination in Multi-Layer Cylinder," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 128, pp. 196~200.  
 (2) Hill, R., 1950, "The Mathematical Theory of Plasticity," Oxford University Press, New York.  
 (3) Kim, C.W. and Lee, Y.S., 1977, "Elastic-plastic

Analysis of the Autofrettage Process by a Mechanical-push Swaging," *Trans. of the KSME*, Vol. 1, No. 1, pp. 40~47.  
 (4) Koh, S.K., Kim, Y.I., Chung, S.H. and Lee, S.I., 1995, "Stress Analysis and Fatigue Life Prediction of an Autofrettaged Thick Cylinder with Radial Holes," *Trans. of the KSME*, Vol. 2, No. 1, pp. 73~78.  
 (5) Lee, S.I., Kim, J.Y., Chung, S.H. and Koh, S.K., 1998, "Fatigue Crack Propagation Life Evaluation of an Autofrettaged Thick-Walled Cylinder," *Trans. of the KSME*, Vol. 22, No. 2, pp. 321~329.  
 (6) Park, J.H., Lee, Y.S., Kim, J.H., Cha, K.U. and Hong, S.K., 2007, "Machining Analysis of the Autofrettaged Compound Cylinder," *Trans. of the KSME*, Vol. 31, No. 7, pp. 800~807.  
 (7) Lee, Y.S., Park, J.H., Kim, J.H., Cha, K.U. and Hong, S.K., 2007, "Bauschinger Effect's Influence on the Compound Cylinder containing an Autofrettaged Layer," *Key Engineering Materials*, Vol. 345~346, pp. 149~152.  
 (8) Park, J.H., Lee, Y.S., Kim, J.H., Cha, K.U. and Hong, S.K., 2008, "Machining Analysis of the Autofrettaged Compound Cylinder," *Journal of Material Processing Technology*, In Press  
 (9) Huang X.P., 2005, "A General Autofrettage Model of a Thick-Walled Cylinder Based on Tensile-Compressive Stress-Strain Curve of a Material," *J. Strain Analysis*, Vol. 40, No. 6, pp. 599~607.  
 (10) Troiano, E., Underwood, J.H. and Parker, A.P., 2006, "Finite Element Investigation of Bauschinger Effect in High-Strength A723 Pressure Vessel Steel," *Trans. of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 128, No. 2, pp. 185~189.  
 (11) De Swardt, R.R. and Andrews, T.D., 2006, "Stress Analysis of Autofrettaged Midwall Cooled Compound Gun Tubes," *Trans. of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 128, No. 2, pp. 201~207.  
 (12) Adibi-Asl, R. and Livieri, P., 2007 "Analytical Approach in Autofrettaged Spherical Pressure Vessels Considering the Bauschinger Effect," *Trans. of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 129, pp. 411~419.  
 (13) Ugural, A.C. and Fenster, S.K., 1995, "Advanced Strength and Elasticity Third Edition," N.Y.