

< 논문 >

자긴가공된 복합실린더의 기계가공해석

박재현* · 이영신† · 김재훈** · 차기업*** · 홍석균***
(2007년 4월 24일 접수, 2007년 6월 25일 심사완료)

Machining Analysis of the Autofrettaged Compound Cylinder

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

Key Words: Machining(기계가공), Autofrettage(자긴가공), Overstrain Level(소성가공도), Compound Cylinder(복합실린더)

Abstract

Autofrettage process is used for internal forming and sizing of cylinder designed to withstand high internal pressures. Once the tube is autofrettaged, it needs to be machined to its final dimensions both at the bore and its outer surface. This paper presents an analytical analysis and numerical analysis of machined compound cylinder using finite element code, ANSYS10.0. An analytical model for predicting the level of autofrettage following either inner, outer, or combined machining of the compound cylinder is developed for the autofrettage residual stress field is simulated by an autofrettaged pressure. The autofrettaged pressures are obtained by using trying-error method. As autofrettage percentage is 20 % and 40 %, the numerical results are found to be in almost agreement with the analytical ones. However, as autofrettage percentage is 60 %, the numerical results have a little difference with the analytical ones.

1. 서 론

높은 내압이 작용하는 후속원통은 중화학공업, 발전설비, 병기산업 등의 여러 분야에서 응용되는 구조부재로서 작용하중과 응용 조건 하에서도 안전하게 운전되도록 설계·제작되어야 한다. 두꺼운 원통에 작용하는 내압이 어느 한도 즉, 항복강도 이상에 이르르면 원통의 안쪽에는 소성역이 발생하고 바깥쪽은 아직 탄성역이 존재하는 후속

탄소성 상태로 된다. 이와 같은 두꺼운 원통의 탄소성 문제는 탄소성학의 전형적인 과제의 하나로써 일찍부터 연구의 대상이 되어왔다. Hill, Lee 및 Tupper⁽¹⁾ 1947년에 두꺼운 원통의 소성변형에 있어 그 때까지 무시되어왔던 탄성 변형을 고려하여 탄소성 문제를 해석함으로써 종래의 이론에 수정을 가하였다. 그들은 $\epsilon_z = 0$ 으로 하여 탄성변형률 문제로 취급하였으며 항복조건식은 Mises, Tresca 조건식을 모두 사용하여 결과를 비교하였다. 특히 자긴가공(自緊加工)은 내압을 제거함으로써 발생하는 잔류응력을 이용하여 사용 내압을 크게 할 수 있는 아주 유용한 가공방법이다. 두꺼운 실린더의 자긴가공 탄소성해석은 국내에서도 많은 연구가 이루어졌다. 김천욱, 이영신 등은⁽²⁾ 1977년 국내에서 처음으로 두꺼운 실린더에 대한 자긴가공 탄소성해석을 연구하였다. 고승기, 이송인, 정세희 등은^(3,4) 1995년 두꺼운 실린더의 잔류응력과 피로수명예측에 관한 연구하

† 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

였다. 그리고 2007년 이영신, 박재현, 김재훈 등은⁽⁵⁾ 복합실린더에 대한 이론해석 및 바우싱거의 영향에 대해 연구하였다.

오늘날 대부분의 두꺼운실린더는 스웨이징 자진가공으로 가공되어진다. 소성변형 공정은 두꺼운 실린더의 내경에서 이루어진다. 실린더가 자진가공되면, 실린더의 최종 치수에 맞춰지기 위해 내·외경 기계가공이 필요하다. 대부분의 경우 기계가공은 브로치(broach)에 의해 재료의 일부분이 제거가 된다. 그 결과로 소성가공도나 잔류응력장이 바뀌게 된다. 압력용기의 허용압력이나 피로수명은 소성가공도나 잔류응력장에 좌우되기 때문에, 기계가공에 의해 바뀐 소성가공도 값은 매우 중요하다.⁽⁶⁾

최근 미국기계학회(ASME) 학술지 Journal of Pressure Vessel Technology는 2006년(Vol.128, No.2)에 포신 특집호를 간행하였으며, 소개된 주요 자진가공 연구는 다음과 같다. Troiano, Underwood, Parker 등은⁽⁷⁾ 고강도강인 A723 압력용기강의 바우싱거 효과에 대한 유한요소해석을 수행하였다. Jahed, Farshi, Karimi 등은⁽⁸⁾ 열박음과 자진가공된 다중실린더의 최적화에 대해 연구하였다. De Swardt, Andrews 등은⁽⁹⁾ 냉각유로가 있는 포신의 응력해석을 연구하였다.

실린더를 이중으로 하는 이유는 피로수명을 늘릴 수 있는 방법으로 압력용기 분야에 많이 쓰인다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 자진가공된 이중 후속실린더의 응력해석에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 내·외경 기계가공된 복합실린더의 이론해석을 수행하였다. 다음으로 내·외경 기계가공된 복합실린더의 유한요소해석을 수행하였다. 복합실린더의 소성가공 영역은 유한요소해석을 통해 소성일에너지(Plastic work energy)가 전파하는 영역을 고찰한 후 소성가공도를 예측할 수 있었다. 이러한 자진압력은 시행착오법(trial-error method)를 통해 결정할 수 있었다.

2. 자진가공된 복합실린더의 이론해석

부분 자진가공된 복합실린더의 기계가공에 의해 잔류응력장이나 소성가공도의 변화가 평가되었다. 이 해석을 위해 자진가공과 내경, 외경의 기계가공이 고려되었다. 이론응력해석을 위해 평

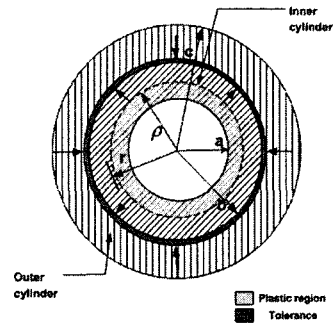


Fig. 1 Partially autofrettaged compound cylinder

면응력상태($\sigma_z = 0$)라 가정하고 이론해석을 수행하였다.

2.1 부분 자진가공된 복합실린더의 응력성분

자진가공된 복합실린더가 반복적인 내압을 받을 때 실린더에 발생하는 응력분포는 실린더의 내구성 평가의 중요한 기초가 된다. 일반적으로 내압을 받는 자진가공된 실린더에 존재하는 응력은 자진가공에 의한 잔류응력과 내압에 의한 응력의 합으로 표시할 수 있다. 두꺼운 실린더에 대한 자진가공 후의 두께에 따른 불균일한 탄성회복에 의하여 내경부근에 압축잔류응력과 외경부근에 인장잔류응력이 유도된다. 이러한 실린더를 두 개의 실린더로 열박음 가공과 자진가공을 수행한 후, 기계가공에 따른 이론응력해석을 수행하였다. Fig. 1은 공차 δ 가 있는 복합실린더의 단면도를 나타낸다. 공차 δ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\delta = \frac{bp}{E} \left(\frac{b^2 + c^2}{c^2 - b^2} + \nu \right) + \frac{bp}{E} \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} - \nu \right) \quad (1)$$

여기서 ν 는 푸아송의 비, E는 탄성계수를 나타낸다. $R_i = a$, $R_m = b$, $R_o = c$ 는 각각 내반경, 중간반경, 외반경을 나타낸다. 그리고 p는 내·외부 실린더의 간섭에 의해 생기는 압력을 나타낸다. 이 식으로부터 접촉면 압력은

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

복합실린더에서 이 압력은 외부실린더에 내압으로 작용하고, 내부실린더에는 외압으로 작용한다. 이를 바탕으로 자진가공후 복합실린더의 잔류응력분포를 예측할 수 있다.⁽⁵⁾

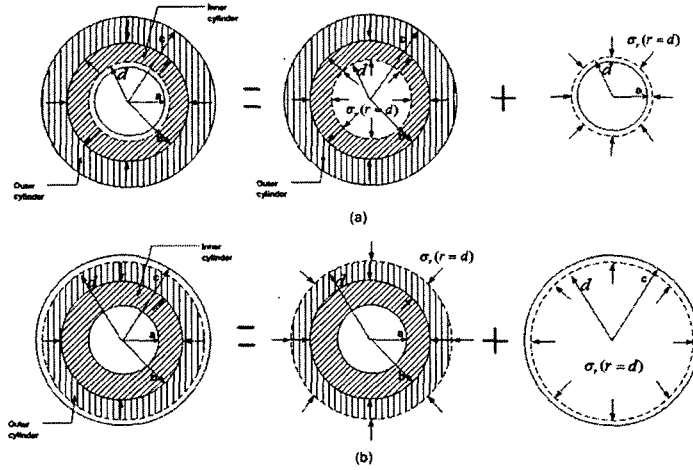


Fig. 2 The original cross section, the remaining ring, and the removed ring: (a) inner machining, (b) outer machining ⁽⁶⁾

소성영역($a \leq r \leq \rho$)에서의 반경 및 접선방향응력은

$$\sigma_r^{p1} = \sigma_Y \left[\ln \frac{r}{\rho} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{c^2} \right) \right] \quad (3a)$$

$$\sigma_\theta^{p1} = \sigma_Y \left[\ln \frac{r}{\rho} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho^2}{c^2} \right) \right] \quad (3b)$$

여기서 하첨자 r, θ 는 각각 반경 및 접선방향을 나타낸다.

탄성영역($\rho \leq r \leq c$)에서의 반경 및 접선방향응력은

$$\sigma_r^{p2} = \sigma_Y \frac{\rho^2}{2c^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (4a)$$

$$\sigma_\theta^{p2} = \sigma_Y \frac{\rho^2}{2c^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (4b)$$

탄성회복응력은 Lamé 식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_r^e = -\sigma_Y \left[\ln \frac{\rho}{a} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{c^2} \right) \right] \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (5a)$$

$$\sigma_\theta^e = -\sigma_Y \left[\ln \frac{\rho}{a} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{c^2} \right) \right] \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (5b)$$

내부, 외부실린더의 접촉면에 작용하는 압력을 바탕으로 열박음 응력분포를 구할 수 있다.

내부실린더에서의 열박음 응력분포는($a \leq r \leq b$)

$$\sigma_r^{s1} = -\frac{E\delta}{2b} \frac{c^2 - b^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (6a)$$

$$\sigma_\theta^{s1} = -\frac{E\delta}{2b} \frac{c^2 - b^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (6b)$$

외부실린더에서의 열박음 응력분포는($b \leq r \leq c$)

$$\sigma_r^{s2} = \frac{E\delta}{2b} \frac{b^2 - a^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (7a)$$

$$\sigma_\theta^{s2} = \frac{E\delta}{2b} \frac{b^2 - a^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (7b)$$

여기서 σ_Y 는 실린더 재료의 항복응력을 나타낸다.

2.2 기계가공후 복합실린더의 잔류응력

기계가공 후에 복합실린더는 실린더의 기하형상이 바뀌면서 잔류응력이 바뀌게 된다. 이 공정은 중첩의 원리를 이용해서 두 단계로 이론적인 응력해석을 할 수 있다. 첫 단계에서는 단면은 두 부분으로 분리될 수 있는데, 하나는 링이 제거된 실린더와 나머지는 링이 남아있는 실린더이다. Fig. 2는 내·외경에서 이러한 기계가공에 대한 단면도를 도식적으로 보여준다. $\sigma_r(r=d), \tau_{r\theta}(r=d) = 0$ 은 링과 실린더 사이에서 작용하는 반경 및 접선방향응력을 나타낸다.

두 번째 단계로는, 내·외경으로 기계가공된 복합실린더를 모델링하는 것이다. 내경에서의 기계가공 후, 응력분포는 Fig. 3의 (a)를 나타내는데 실린더의 형상은 $R_i = d, R_m = b, R_o = c$ 로 바뀌게 된다. 이러한 경우 그림과 같이 압축응력 $\sigma_{rr}(r=d)$ 과 인장응력 $\sigma_{rr}(r=d)$ 은 중첩되어서 0이 된다. 외경에서의 기계가공은 Fig. 3의 (b)를 나타내는데 실린더의 형상은 $R_i = a, R_m = b,$

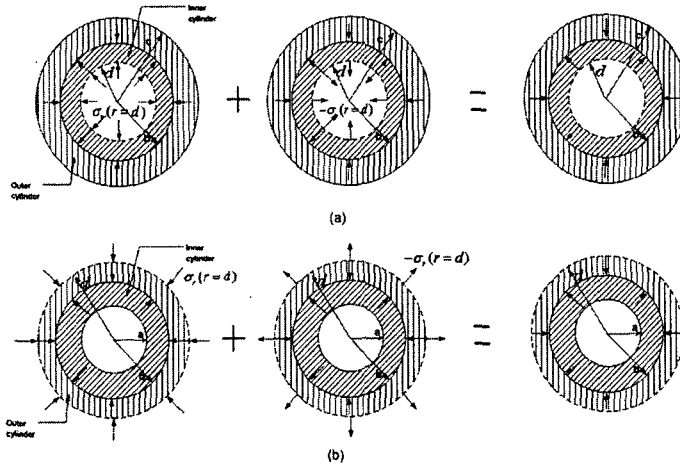


Fig. 3 The superposition for obtaining the post-machining autofrettaged compound cylinder: (a) inner machining, (b) outer machining⁽⁶⁾

$R_o = d$ 로 바뀌게 된다. 외경 가공한 경우에도 중첩에 의해 압축응력 $\sigma_{rr}(r=d)$ 과 인장응력 $\sigma_{rr}(r=d)$ 이 중첩되어 0이 된다.⁽⁶⁾

내경기계가공. 내경이 기계가공된 복합실린더는 기하형상이 바뀌면서 응력성분이 바뀌게 된다. 내경이 기계가공후 자진가공된 복합실린더의 응력 성분은 다음과 같이 바뀐다.

소성영역($d \leq r \leq \rho$)에서의 반경 및 접선방향응력은

$$\sigma_r^{p1} = \sigma_Y \left[\ln \frac{r}{\rho} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{c^2} \right) \right] \quad (8a)$$

$$\sigma_\theta^{p1} = \sigma_Y \left[\ln \frac{r}{\rho} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho^2}{c^2} \right) \right] \quad (8b)$$

탄성영역($\rho \leq r \leq c$)에서의 반경 및 접선방향응력은

$$\sigma_r^{p2} = \sigma_Y \frac{\rho^2}{2c^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (9a)$$

$$\sigma_\theta^{p2} = \sigma_Y \frac{\rho^2}{2c^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (9b)$$

탄성회복응력은 Lamé 식으로부터 다음과 같이 바뀐다.

$$\sigma_r^e = -\sigma_Y \left[\ln \frac{\rho}{d} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{c^2} \right) \right] \frac{d^2}{c^2 - d^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (10a)$$

$$\sigma_\theta^e = -\sigma_Y \left[\ln \frac{\rho}{d} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{c^2} \right) \right] \frac{d^2}{c^2 - d^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (10b)$$

내부, 외부실린더의 접촉면에 작용하는 압력을 바탕으로 열박음 응력분포가 다음과 같이 바뀐다.

내부실린더에서의 열박음 응력분포는($d \leq r \leq b$)

$$\sigma_r^{s1} = -\frac{E\delta}{2b} \frac{c^2 - b^2}{c^2 - d^2} \left(1 - \frac{d^2}{r^2} \right) \quad (11a)$$

$$\sigma_\theta^{s1} = -\frac{E\delta}{2b} \frac{c^2 - b^2}{c^2 - d^2} \left(1 + \frac{d^2}{r^2} \right) \quad (11b)$$

외부실린더에서의 열박음 응력분포는($b \leq r \leq c$)

$$\sigma_r^{s2} = \frac{E\delta}{2b} \frac{b^2 - d^2}{c^2 - d^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (12a)$$

$$\sigma_\theta^{s2} = \frac{E\delta}{2b} \frac{b^2 - d^2}{c^2 - d^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (12b)$$

외경기계가공. 외경이 기계가공후 자진가공된 복합실린더의 응력성분도 다음과 같이 바뀌게 된다.

소성영역($a \leq r \leq \rho$)에서의 반경 및 접선방향응력은

$$\sigma_r^{p1} = \sigma_Y \left[\ln \frac{r}{\rho} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{d^2} \right) \right] \quad (13a)$$

$$\sigma_\theta^{p1} = \sigma_Y \left[\ln \frac{r}{\rho} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho^2}{d^2} \right) \right] \quad (13b)$$

탄성영역($\rho \leq r \leq d$)에서의 반경 및 접선방향응력은

$$\sigma_r^{p2} = \sigma_Y \frac{\rho^2}{2d^2} \left(1 - \frac{d^2}{r^2} \right) \quad (14a)$$

$$\sigma_\theta^{p2} = \sigma_Y \frac{\rho^2}{2d^2} \left(1 + \frac{d^2}{r^2} \right) \quad (14b)$$

탄성회복응력은 Lamé 식으로부터 다음과 같이 바뀐다.

$$\sigma_r^e = -\sigma_Y \left[\ln \frac{\rho}{a} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{d^2} \right) \right] \frac{a^2}{d^2 - a^2} \left(1 - \frac{d^2}{r^2} \right) \quad (15a)$$

$$\sigma_\theta^e = -\sigma_Y \left[\ln \frac{\rho}{a} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{d^2} \right) \right] \frac{a^2}{d^2 - a^2} \left(1 + \frac{d^2}{r^2} \right) \quad (15b)$$

내부, 외부실린더의 접촉면에 작용하는 압력을 바탕으로 열박음 응력분포가 다음과 같이 바뀐다.

내부실린더에서의 열박음 응력분포는($a \leq r \leq b$)

$$\sigma_r^{s1} = -\frac{E\delta}{2b} \frac{c^2 - b^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (16a)$$

$$\sigma_\theta^{s1} = -\frac{E\delta}{2b} \frac{c^2 - b^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{d^2}{r^2}\right) \quad (16b)$$

외부실린더에서의 열박음 응력분포는($b \leq r \leq d$)

$$\sigma_r^{s2} = \frac{E\delta}{2b} \frac{b^2 - a^2}{d^2 - a^2} \left(1 - \frac{d^2}{r^2}\right) \quad (17a)$$

$$\sigma_\theta^{s2} = \frac{E\delta}{2b} \frac{b^2 - a^2}{d^2 - a^2} \left(1 + \frac{d^2}{r^2}\right) \quad (17b)$$

내·외경기계가공. 내경, 외경이 모두 기계가공된 경우에는 위와 같은 방법으로 응력성분을 구할 수 있고, 이때의 소성가공도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon^{pm} = \frac{\rho - d_{int}}{d_{ext} - d_{int}} \cdot 100 \text{ percent} \quad (18)$$

여기서 d_{int} 는 내경이 기계가공된 실린더의 내반경을 나타내고, d_{ext} 는 외경이 기계가공된 실린더의 외반경을 나타낸다.

기계가공된 복합실린더의 잔류응력. 내외경이 기계가공된 복합실린더의 잔류응력은 영역에 따라 중첩하여 다음과 같이 구할 수 있다.⁽⁵⁾

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

①내부실린더 소성영역에서의 잔류응력 ($a \leq r \leq \rho$)

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{p1} + \sigma_r^e + \sigma_r^{s1} \quad (19a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{p1} + \sigma_\theta^e + \sigma_\theta^{s1} \quad (19b)$$

여기서 상첨자 A는 자간가공 잔류응력을 나타낸다.

②내부실린더 탄성영역에서의 잔류응력 ($\rho \leq r \leq b$)

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{p2} + \sigma_r^e + \sigma_r^{s1} \quad (20a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{p2} + \sigma_\theta^e + \sigma_\theta^{s1} \quad (20b)$$

③외부실린더 탄성영역에서의 잔류응력 ($b \leq r \leq c$)

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{p2} + \sigma_r^e + \sigma_r^{s2} \quad (21a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{p2} + \sigma_\theta^e + \sigma_\theta^{s2} \quad (21b)$$

•소성영역이 외부실린더에 있는 경우($b \leq \rho \leq c$)

①내부실린더 소성영역에서의 잔류응력 ($a \leq r \leq \rho$)

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{p1} + \sigma_r^e + \sigma_r^{s1} \quad (22a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{p1} + \sigma_\theta^e + \sigma_\theta^{s1} \quad (22b)$$

②외부실린더 소성영역에서의 잔류응력 ($b \leq r \leq \rho$)

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{p1} + \sigma_r^e + \sigma_r^{s2} \quad (23a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{p1} + \sigma_\theta^e + \sigma_\theta^{s2} \quad (23b)$$

③외부실린더 탄성영역에서의 잔류응력 ($\rho \leq r \leq c$)

$$\sigma_r^A = \sigma_r^{p2} + \sigma_r^e + \sigma_r^{s2} \quad (24a)$$

$$\sigma_\theta^A = \sigma_\theta^{p2} + \sigma_\theta^e + \sigma_\theta^{s2} \quad (24b)$$

이와 같은 잔류응력 장은 내·외경 기계가공한 경우에 공통적으로 적용할 수 있는 응력식이다.

3. 이론해석 및 유한요소해석결과

복합실린더의 자간가공에 대한 수치해석을 하기 위해서는 소성에너지가 전파한 소성반경 ρ 를 결정하는 것이 중요하다. 이러한 소성반경 ρ 는 유한요소법의 소성일에너지 해석을 통해 에너지가 전파한 절점까지를 소성반경이라 정할 수 있었다.

3.1 유한요소모델

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하여 유한요소 모델링을 수행하였다. Fig. 4는 실제 해석에 사용될 평면 유한요소 모델을 나타낸다. 두 실린더 사이에서 0.1 mm 공차로 인한 간섭으로 반력을 받고 있는 상태를 나타낸다. 이러한 모델은 ANSYS 유한요소 프로그램의 2차원 4절점 사각형요소를 이용하여 얻어졌으며, 간섭을 받고 있는 접촉면은 2차원 접촉요소(2-D contact element)를 이용하여 모델링 되었다. 내·외경 기계가공해석을 위한 모델링은 내경, 외경의 수치를 바꾸어가면서 해석을 수행하였다.

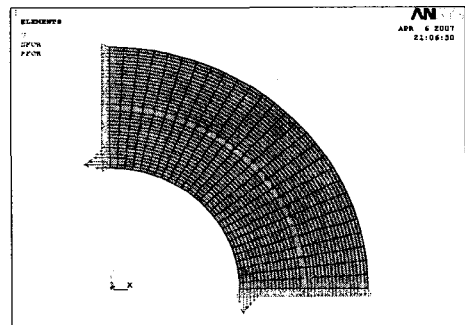


Fig. 4 Boundary condition and reaction of 2-D quarter model of compound cylinder

3.2 유한요소해석결과

시행착오법(trial-error method)을 적용하여 20 %, 40%, 60 % 자진가공에 대한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7은 차례로 내경이 기계가공된 복합실린더의 20 %, 40 %, 60 % 자진가공시, 복합실린더 전체 두께의 20 %, 40 %, 60 %만큼의 소성일에너지가 전파한 상태를 보여준다. Fig. 8은 소성가공도의 변화의 따라 소성일에너지의 분포를 보여준다. 해석의 결과로 20 % 자진가공시 내압은 560 MPa이며, 40 % 자진가공시 내압은 620 MPa이다. 또한, 60 %로 자진가공 할 때 필요한 내압은 675 MPa이 얻어졌다.

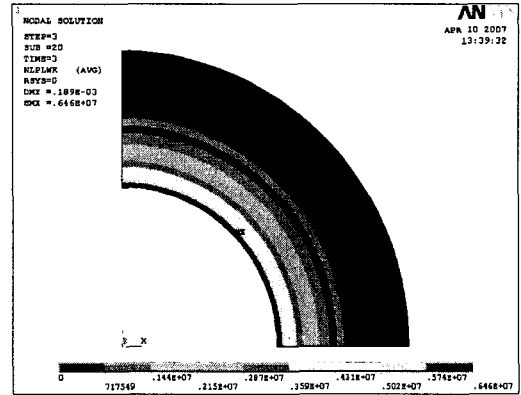


Fig. 7 Plastic work energy contour plot of 60 % overstrain internally machined cylinder

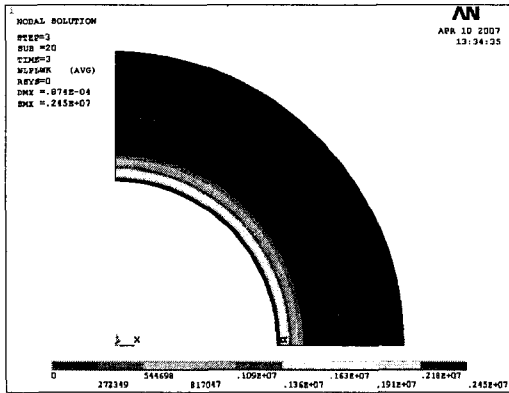


Fig. 5 Plastic work energy contour plot of 20 % overstrain internally machined cylinder

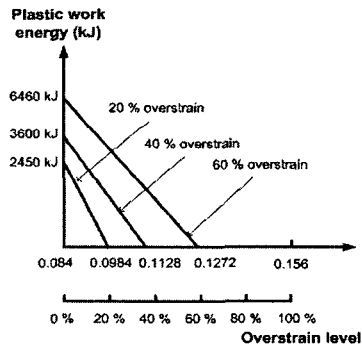


Fig. 8 Plastic work energy graph across the thickness of internally machined cylinder varying overstrain level

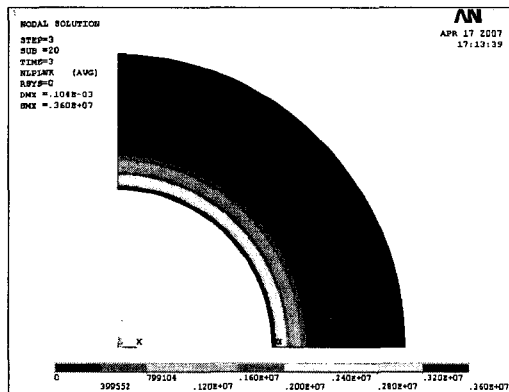


Fig. 6 Plastic work energy contour plot of 40 % overstrain internally machined cylinder

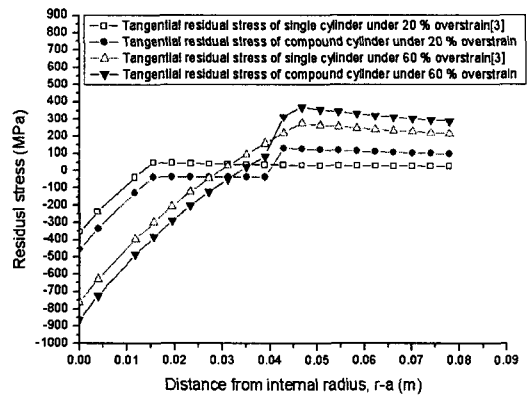


Fig. 9 The distribution of the tangential residual stress through the wall of single and compound cylinder

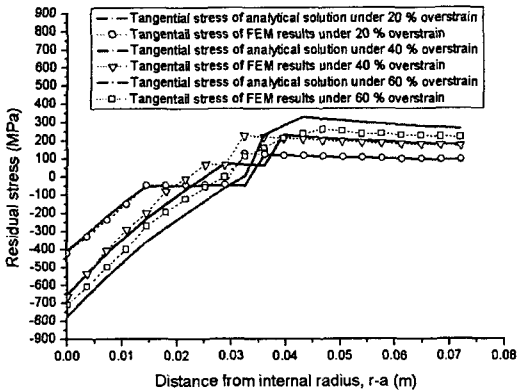


Fig. 10 The distribution of the tangential residual stress through the wall of a partially autofrettaged, internally machined cylinder($a=84$ mm, $b=117$ mm, $c=156$ mm, $d_{int}=84$ mm)

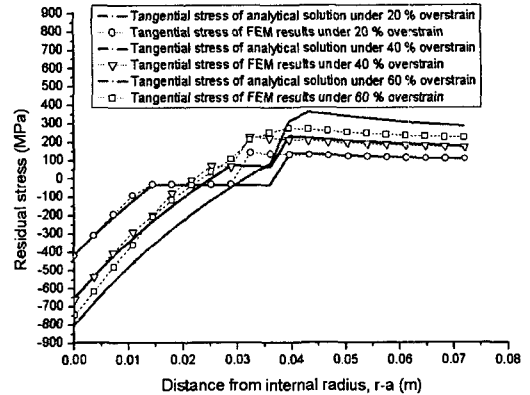


Fig. 11 The distribution of the tangential residual stress through the wall of a partially autofrettaged, externally machined cylinder($a=78$ mm, $b=117$ mm, $c=156$ mm, $d_{ext}=150$ mm)

Fig. 9는 같은 내경과 두께를 갖는 단일실린더⁽³⁾와 복합실린더의 접선방향 잔류응력분포를 나타낸 그래프이다. 자기가공된 단일실린더에 대한 응력 및 피로수명예측은 고승기 등⁽³⁾에 의해 수행되었다. 이 그래프에서 알 수 있듯이, 복합실린더가 단일실린더보다 내부실린더에서는 100~250 MPa 정도 높은 압축잔류응력을 보이고, 외부실린더에서는 평균 70~100 MPa 정도의 높은 인장잔류응력을 보인다. 이는 복합실린더의 열박음으로 인해 잔류응력분포의 차이가 생기는 것이다. Fig. 10는 내경에서 6 mm를 제거해 기계가공한 복합실린더의 이론해석 및 유한요소해석 접선방향 잔류응력분포를 나타낸다. Fig. 11는 외경에서 6 mm를 제거해 기계가공한 복합실린더의 이론해석 및 유한요소해석 접선방향 잔류응력분포를 나타낸다.

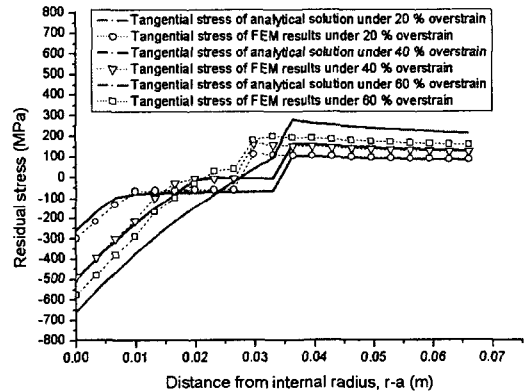


Fig. 12 The distribution of the tangential residual stress through the wall of a partially autofrettaged, internally and externally machined cylinder ($a=78$ mm, $b=117$ mm, $c=156$ mm, $d_{int}=84$ mm, $d_{ext}=150$)

세 그래프에서 볼 수 있듯이 내경, 외경의 기계가공에 따른 응력분포의 차이는 거의 나지 않지만, Fig. 12의 내경, 외경을 둘 다 함께 기계가공한 경우에는 복합실린더의 두께가 얇아지므로 한쪽만 기계가공한 경우보다 최대 100 MPa 정도 작은 분포를 나타내는 것을 알 수 있다.

위 그래프를 보면 세 그래프 모두 20%, 40% 자기가공 시에는 이론해석과 유한요소해석 잔류응력분포는 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 물론, 실린더가 이중으로 되는 과정에서 생기는 불연속면에서는 약간의 오차가 나타난다. 하지만, 60% 자기가공 시에는 50~100 MPa 정도의 오차가 나

타나는 것을 알 수 있다. 이것은 소성반경 ρ 를 결정하는 과정에서 불연속면으로 인한 정확한 소성반경의 결정이 어렵기 때문에 이러한 오차가 나타나는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 자기가공된 이중 후속실린더의 응력해석에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 내·외경 기계가공된 복합실린더의 이론해석을 수행하였다.

다음으로는 내·외경 기계가공된 복합실린더의 유한요소해석을 수행하였다. 이러한 이론해석과 유한요소해석 결과는 거의 일치하였고, 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

(1) 내경과 두께를 갖는 단일실린더와 복합실린더의 접선방향 잔류응력분포에서 복합실린더가 단일실린더보다 내부실린더에서는 100~250 MPa 정도 높은 압축잔류응력을 보이고, 외부실린더에서는 평균 70~100 MPa 정도의 높은 인장잔류응력을 보인다. 이는 복합실린더의 열박음으로 인해 잔류응력분포의 차이가 생기는 것이다.

(2) 내경, 외경의 기계가공에 따른 응력분포의 차이는 거의 나지 않지만, 내경, 외경을 둘 다 함께 기계가공한 경우에는 복합실린더의 두께가 얇아지므로 한쪽만 기계가공한 경우보다 최대 100 MPa 정도 작은 분포를 나타내는 것을 알 수 있다.

(3) 20 %, 40 % 자긴가공시에는 이론해석과 유한요소해석 잔류응력분포는 거의 일치하지만, 60 % 자긴가공시에는 50~100 MPa 정도의 오차가 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 소성반경 ρ 를 결정하는 과정에서 불연속면으로 인한 정확한 소성반경의 결정이 어렵기 때문에 이러한 오차가 나타나는 것으로 보인다.

후 기

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

참고문헌

(1) Hill, R., Lee, E.H. and Tupper, S.J., 1947, "The Theory of Combined Plastic and Elastic Deformation with Particular Reference to a Thick tube under Internal Pressure," *Proc. Royal Society, London, Ser. A.*, Vol. 191, pp. 278~303.
 (2) 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.
 (3) 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.
 (4) 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.
 (5) 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.
 (6) Perl, M., 2000, "The Change in Overstrain Level Resulting from Machining of an Autofrettaged Thick-Walled Cylinder," *Trans. of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, pp. 9~14.
 (7) 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.
 (8) Jahed, H., Farshi, B. and Karimi, M., 2006, "Optimum Autofrettage and Shrink-Fit Combination in Multi-Layer Cylinders," *Trans. of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 128, No. 2, pp. 196~200.
 (9) 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.
 (10) Ugural, A.C. and Fenster, S.K., 1995, "Advanced Strength and Elasticity Third Edition," N.Y.