

자긴가공된 후육실린더의 잔류응력 해석에 관한 연구

A Study on Residual Stress Analysis of Autofrettaged Thick-walled Cylinders

김재훈^{1,✉}, 심우성¹, 이영신¹, 차기업², 홍석균²
 Jae Hoon Kim^{1,✉}, Woo Sung Shim¹, Young Shin Lee¹, Ki Up Cha² and Suck Kyun Hong²

¹ 충남대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National Univ.)

² 국방과학연구소 (Propulsive Group, Agency of Defense Development.)

✉ Corresponding author: kimjhoon@cnu.ac.kr, Tel: 042-821-6645

Manuscript received: 2009.2.25 / Revised: 2009.7.14 / Accepted: 2009.9.30

Thick-walled cylinders, such as a cannon or nuclear reactor, are autofrettaged to induce advantageous residual stresses into pressure vessels and to increase operating pressure and the fatigue lifetimes. As the autofrettage level increases, the magnitude of compressive residual stress at the bore also increases. However, the Bauschinger effect reduces the compressive residual stresses as a result of prior tensile plastic strain, and decreases the beneficial autofrettage effect. The purpose of the present paper is to predict the accurate residual stress of SNCM8 high strength steel using the Kendall model which was adopted by ASME Code. The uniaxial Bauschinger effect test was performed to decide BEF, then this constant was used in calculation. There were some differences between theoretical solution and modified solution.

Key Words: Autofrettage (자긴가공), Residual Stress(잔류응력), Bauschinger Effect (바우싱거 효과), Tangential Residual Stress (반경방향 잔류응력)

기호설명

σ_{θ} = Tangential residual stress

ρ = Plastic-elastic diameter

$\sigma_{\theta,B}$ = Tangential residual stress corrected for the Bauschinger effect

1. 서론

반복적으로 높은 내압을 받는 두꺼운 실린더는 여러 산업분야에서 사용되는 구조물로서 작용하중과 사용 조건하에서도 안전하게 운전되도록 설계·제작되어야 한다.¹ 이러한 구조부재는 내경에서 인장방향으로 가장 큰 접선응력이 발생하고 이 응력은 내·외경비 및 작용하는 내압이 커질수록 증가

하며 이로 인해 내경에서 균열이 생성·진전 될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 자긴가공이라는 방법을 보편적으로 사용한다. 자긴가공이란 두께에 따른 불균일한 탄성회복에 의하여 내경에는 압축 잔류응력을, 외경에는 인장방향으로 잔류응력을 발생시킨다. 자긴가공에 의하여 유도된 접선 방향의 압축 잔류응력은 내압에 의하여 발생하는 인장 접선응력을 상쇄하는 작용을 함으로써 사용 압력의 한도를 증가시키며, 내경에서 발생할 수 있는 균열의 생성·진전을 효과적으로 막아 피로 수명을 보다 증가시킬 수 있다.² 두꺼운 실린더가 보다 높은 압력을 받을 수 있도록 하기 위하여 자긴가공 방법 외에도 억지 끼워맞춤 방법 (shrink fitting), 묶음방법(wrapping) 등을 이용하여 내경에서의 접선인장응력 수준을 낮추고 있으나³

단일 방법으로는 자긴가공이 가장 널리 쓰이고 있다.

Hill⁴은 완전 탄소성 모델에 대하여 기본적인 자긴가공 모델을 제안하였다. 그러나 실제 재료에서는 바우싱거 효과와 가공 경화 현상 등으로 인하여, 대부분의 재료는 완전 탄소성 가정을 따르지 않는다. 바우싱거 현상은 1881년 프랑스의 공학자⁵에 의하여 밝혀졌다. 초기 바우싱거 효과 실험은 Milligan⁶ 등에 의하여 AISI 4340 고강도 강에 대해 바우싱거 효과 실험을 실시하였으며, 처음으로 바우싱거 효과 크기의 척도가 되는 바우싱거 효과 계수(BEF)에 대하여 언급하였다. 2003년 Troiano⁷ 등은 다양한 고강도강에 대하여 바우싱거 효과 특성 시험을 다양한 변형률 조건하에서 실시하였다. 실험결과 바우싱거 효과 계수는 소성 변형률에 의존함을 밝혔다. 2006년 J. Perry⁸ 등은 다양한 포신용 고강도강에서 바우싱거 효과가 항복강도, 탄성계수 그리고 포아송의 비에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 실험 결과 항복강도 및 탄성계수는 소성 변형률에 크게 영향을 받고, 포아송의 비는 이에 전혀 영향을 받지 않는 것으로 밝혀졌다. 다양한 재료에 대하여 바우싱거 특성 실험 결과를 토대로 하여 많은 저자에 의하여 실제 재료의 거동에 따른 정확한 자긴가공 잔류응력을 예측하는 다양한 방법이 제시되었다.

본 연구에서는 압력용기용 강인 SNCM8 고강도강의 인장 및 바우싱거 효과 실험을 수행하였다. 실험으로부터 얻은 기계적 특성과 바우싱거 효과 계수를 이용하여, 자긴도에 따른 단일 실린더의 자긴가공 해석을 유한요소 프로그램 및 이론식을 이용하여 구하였다. 또한 ASME 규정에서 정한 방법을 이용하여 잔류응력 분포를 예측한 값과 비교하였다.

2. 본문

2.1 자긴가공

자긴가공이란 직접적 또는 간접적으로 유압이나 기계적인 힘을 두꺼운 실린더의 내경에 일시적으로 작용한 후 제거하여 벽 두께에 따른 불균일한 탄성회복에 의하여 내경 측에 압축 잔류응력을 유도하는 방법이다. 주로 유압식이나 렌드렐을 이용한 스웨이징 방식이 이용된다.

내압 P_i 를 받는 두꺼운 실린더가 Fig. 1과 같을 때, 실린더 내에서의 응력은 다음과 같은 Lamé

식으로 표현된다.⁹

$$\sigma_r = \frac{P_i a^2}{b^2 - a^2} \left[1 - \frac{b^2}{r^2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_i a^2}{b^2 - a^2} \left[1 + \frac{b^2}{r^2} \right] \quad (2)$$

여기서 σ_r , σ_θ 는 반경방향(radial direction) 및 접선방향(tangential direction) 잔류응력이고, a, b는 각각 실린더의 내, 외경, ρ 는 소성반경을 나타낸다. P_i 는 실린더에 작용하는 내압, r은 임의의 반경이다. 양단이 뚫린 실린더의 경우에는 평면응력상태(plane stress) 조건에 의하여 σ_z 으로 가정하였다. 재료의 완전 탄-소성거동(elastic-perfectly plastic behavior) 및 Tresca 항복 조건을 가정하면 임의의 자긴도로 가공할 때 자긴압력은 다음 같이 얻을 수 있다.

$$P_y = Y \left[\ln(\rho/a) + (b^2 - \rho^2)/2b^2 \right] \quad (3)$$

여기서 Y는 재료의 항복강도이다. 소성변형이 시작되는(0% OS, $\rho=a$) 압력과 완전 자긴가공(100% OS, $\rho=c$)의 압력은 다음과 같다.

$$P_{0\%,OS} = Y(b^2 - a^2)/2b^2 \quad (4)$$

$$P_{100\%,OS} = Y \ln(b/a) \quad (5)$$

여기서 $P_{0\%,OS}$ 는 내경에서 항복이 일어나는데 필요한 압력이며, $P_{100\%,OS}$ 는 실린더의 외경까지 항복이 일어나는데 필요한 압력이다.⁵ 한편, Fig. 1과 같은 두꺼운 실린더에 큰 내압을 작용시켜 반경 $r=\rho$ 까지 소성변형이 이루어진 후 그 압력이 제거되었을 때 재료의 완전 탄-소성거동과 Tresca 항복조건을 가정하면 다음과 같은 이론적 탄-소성 해를 얻을 수 있다.⁴

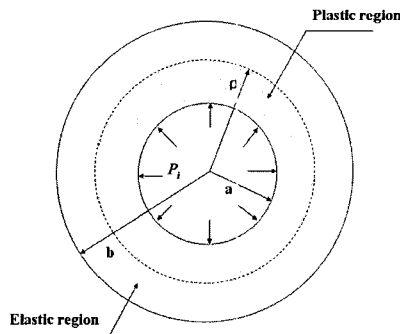


Fig. 1 Autofrettaged thick-walled cylinder

$$\sigma_o = \sigma_y \left\{ \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \left[\frac{\rho^2 - b^2}{2b^2} - \ln \frac{\rho}{a} \right] + \left[\frac{\rho^2 + b^2}{2b^2} - \ln \frac{\rho}{r} \right] \right\}$$

for $a \leq r \leq \rho$

$$\sigma_r = \sigma_y \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \left[\frac{\rho^2}{2b^2} + \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left\{ \frac{\rho^2 - b^2}{2b^2} - \ln \frac{\rho}{a} \right\} \right] \quad (6)$$

for $\rho \leq r \leq b$

2.2 바우싱거 효과

일축 인장-압축 시험에서 인장항복 응력 이상으로 인장하중을 가한 후, 하중을 제거하고 다시 압축 하중을 가하면, 원래 재료의 압축항복응력보다 훨씬 낮은 점에서 소성변형이 시작된다. 즉 하중을 가하여 소성변형 시킨 후, 다시 하중을 제거하고 역방향으로 하중을 가하면 소성변형이 시작되는 항복값이 낮아지는 현상을 바우싱거 효과라 한다. Fig. 2 는 전형적인 일축 인장-압축시험에 의한 응력-변형률 선도를 보여주고 있다. 구간 O-A 는 초기 인장 하중을 가하는 구간이다. 점 A 는 미리 정의된 오프셋 방법에 의해 결정된 항복점이다. 재료는 변형률 구간 ϵ_{el} 까지 탄성적으로 거동한다. 이때의 탄성계수는 E_1 이다. 그 후 재료는 변형률 구간 ϵ_{pl} 즉, A-B 구간에서 소성적으로 거동하게 된다. 이 구간을 변형률 경화 구간(strain hardening)이라 한다. 일정 변형률 범위까지 하중을 가한 후, 하중을 제거하여 C 점까지 도달 후, 이 후부터는 압축 하중이 작용하게 된다. 재료는 D 점까지 탄성적으로 거동한다. 이 때 탄성계수는 E_2 이다. 바우싱거 효과의 크기는 인장 항복응력에 대한 압축 항복응력의 비인 바우싱거 효과 계수(BEF)로 나타낼 수 있다.

이러한 바우싱거 효과가 왜 발생하는지에 대한 최근의 연구방향은 전위론에 기초를 둔 전위의 집

적(pile-up of dislocation)에 의한 역응력(back stress)의 영향과 전위숲 경화(dislocation forest hardening)에 의한 슬립장애물의 이방성에 의한 영향으로 바우싱거 효과를 해석하고 있다.¹¹

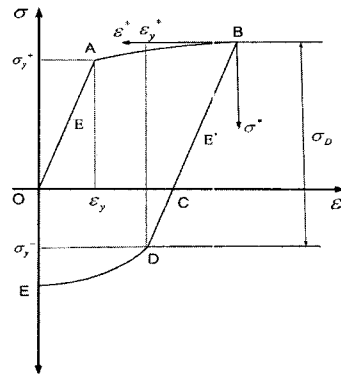


Fig. 2 Schematic of Bauschinger Effect

2.3 바우싱거 효과를 고려한 이론식

바우싱거 효과를 고려한 내경에서의 잔류응력은 ASME Code 집에¹² 다음과 같이 규정되어 있다.

$$\sigma_{\theta,B} / \sigma_y = -0.4 + 0.5(\sigma_{\theta} / \sigma_y + BEF) \quad (7)$$

여기서 σ_{θ} 는 이론적 접선방향 잔류응력이며, $\sigma_{\theta,B}$ 는 바 0 바우싱거 효과를 고려하였을 경우의 접선방향 잔류응력이다. BEF 는 시험결과 얻은 바우싱거 효과 계수이며 상수 0.4 를 사용하였고, 다른 압력 용기용 강도 비슷한 값을 가진다. $\sigma_{\theta} / \sigma_{\theta,B}$ 가 -0.4 보다 큰 경우 바우싱거 효과를 고려하지 않으며 -0.4 보다 작은 경우에 식 (7)을 이용하여 내경에서 유도되는 압축 잔류응력을 구한다.

또한 ASME Code 집에서 규정한 Kendall 모델을 이용하여 자기가공에 의한 잔류응력을 추정하였다. σ_{θ} 와 σ_r 의 크기가 같은 반경을 r_z 라고 정의할 때, 구간 $a < r < r_z$ 에서 잔류응력분포는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta,B}} = \frac{r_z [\ln(r/a) + 1] + a - 2r}{r_z - a} \quad (8)$$

3. 실험방법

3.1 재료

본 연구에 사용된 소재는 압력용기용 SNCM8 고강도 강이다. 본 시험편의 화학적 조성은 Table 1 과 같으며, Table 2 는 기계적 특성을 보여준다. 인장시험 결과 얻은 데이터를 이용 가공경화를 고려하여 유한요소 및 이론식에 이용하였다.

Table 1 Chemical composition of SNCM8 (wt%)

C	0.36~0.43	Cr	0.60~1.00
Si	0.15~0.35	Mo	0.15~0.30
Mn	0.60~0.90	Ni	1.60~2.00
P	≤ 0.03	S	≤ 0.30

Table 2 Mechanical properties of SNCM8

Young's modulus, E(GPa)	202.2
Tensile strength, σ_u (MPa)	1272
Yield strength, σ_y (MPa)	1129
Elongation, EL(%)	19
Reduction of area, RA(%)	59.2
Poisson's ratio, μ	0.29

3.2 바우싱거 실험방법

연구에 사용된 시험기는 MTS 사의 10 톤 용량의 만능재료 시험기이다. SNCM8 고강도강의 바우싱거 효과를 알아내기 위하여 일축 인장-압축 시험을 수행하였다. 일정 변형률 속도 하에서 변형률 제어 실험을 수행하였다. 수행한 전변형률 범위는 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 3%, 4%으로 선택적으로 시험하였다. Fig. 4 는 전변형률 범위에 따른 SNCM8 강의 응력-변형률 선도이다.

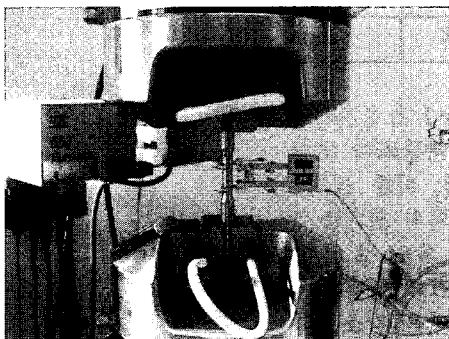


Fig. 3 Photo of MTS 810 for experiment of uniaxial tension-compression test

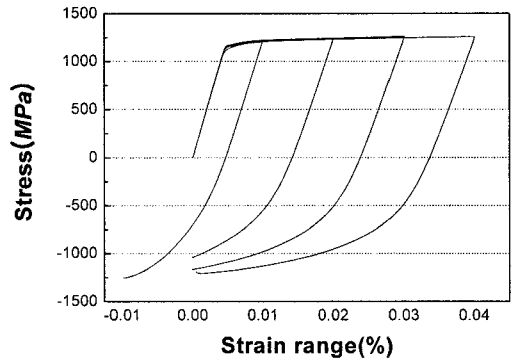


Fig. 4 Stress-strain curve of SNCM8

4. 결과 및 고찰

4.1 기계적 특성 및 바우싱거 효과

SNCM8 을 이용하여 인장 실험으로부터 탄성계수, 항복강도, 인장강도, 연신율 및 단면수축률 등의 다양한 기계적 특성을 얻었다. 본 결과를 이용하여 자진도에 따른 실린더의 자진가공 압력을 계산하였으며, 유한요소 해석에 이용하였다. 바우싱거 실험을 통하여 소성 변형률이 압축항복강도의 저하에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 각각의 실험을 오프셋 방법을 이용하여 탄성구간과 소성구간으로 나누었다.

Table 3 Results of experimental data by offset method

$\epsilon_{plastic}$	Yield strength (MPa)		BEF
	Tension	Compression	
0.448	1164	670	0.575
1.433	1178	483	0.41
2.433	1180	486	0.411
3.444	1143	433	0.378

Table 3 은 0.1% 오프셋 방법에 의하여 인장 및 압축 항복강도의 비인 바우싱거 효과계수(BEF)를 나타낸다. 이들 결과 값을 이용하여 소성 변형률과 BEF 와의 관계를 Fig. 5 에 나타내었다. 0% 에서 약 1.5% 의 소성 변형률 구간에서 BEF 는 소성 변형률에 크게 영향을 받아 소성 변형률이 증가할수록 BEF 값은 감소한다. 그러나 소성 변형률 2% 이상의 구간에서 소성 변형률은 BEF 에 큰 영향을 미치지 않고 일정함을 알 수 있다. 본 그림을 커

브피팅(curve fitting)하여 식으로 표현하면 다음 식 (9)와 같다. 여기서 0.399 는 SNCM8 고강도강의 바우싱거 효과계수이다.

$$f = 0.399 + 0.591 \exp\left(-\frac{\epsilon_p}{0.323}\right) \quad (9)$$

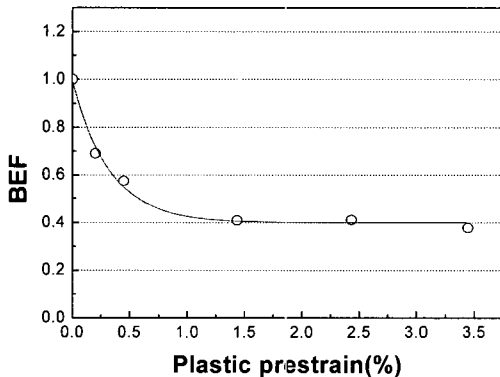


Fig. 5 Bauschinger effect factor as a function of plastic strain

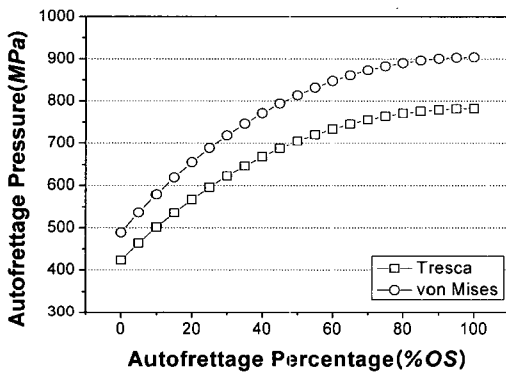


Fig. 6 Autofrettage pressure for each overstrain level

4.2 단일실린더에서 자긴가공

본 연구에서 자긴가공 공정을 해석하기 위하여 ABAQUS 6.6 을 사용하였다.¹³ 모델은 4 절점 요소를 적용하였으며 전체 6430 여개의 요소를 사용하여 다양한 자긴가공 조건하에서 해석하였다.

Eq. 3 의 결과를 이용하여 각각 자긴도에 따른 잔류응력 이론 식과 유한요소 프로그램을 이용한 자긴가공 해석을 수행하였다. Fig. 6 은 자긴도에 따른 자긴가공 압력을 나타낸다. Tresca 와 von Mises

항복조건에 의하여 동일한 자긴도에서 자긴압력은 약 1.155 배 차이가 난다.

Fig. 7 은 SNCM8 에 대하여 자긴가공 후에 내경에서 접선방향의 이론적 압축 잔류응력과 Eq. 7 의 바우싱거 효과를 고려한 경우의 압축 잔류응력을 나타낸 것이다. ASME 규정에 의하여 내경에서 압축 잔류응력과 항복강도의 비가 -0.4 이하인 경우, 바우싱거 효과에 의하여 실제로는 이론식에 의한 계산 결과보다 낮은 압축 잔류응력이 유도된다. 또한 자긴도가 증가하면 최대 소성 변형률은 증가한다. 바우싱거효과 실험에서 바우싱거 효과는 소성 변형률에 따라 크게 영향을 받고 있으며, 이는 자긴도에 따른 소성 변형률의 증가에 의하여 더욱 큰 바우싱거 효과가 발생함을 의미한다. 자긴가공에 의한 잔류응력 분포 이론식과 유한요소 해석결과는 잘 일치함을 확인하였다.

Fig. 8 은 SNCM8 에 대하여 완전 탄-소성 모델을 가정하였을 경우 이론식을 이용하여 자긴가공 후에 구한 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 9 는 Kendall 모델을 이용하여 바우싱거 효과를 고려하였을 경우의 잔류응력 분포도를 나타내고 있다. 그리고 Fig. 10 은 SNCM8 에 대하여 자긴 가공도의 변화에 따른 이론식과 Fig. 9 의 Kendall 모델을 이용하여 구한 잔류응력 분포를 Fig. 8 의 이론식으로부터 구한 잔류응력 분포를 비교한 것이다. 계산 결과 자긴도 증가에 비례하여 자긴가공 효과가 감소되는 것을 확인하였다. 30%, 50%, 70%의 자긴가공 시, 시험편의 내경에서 압축 잔류응력의 크기는 이론식과 비교하여 각각 40MPa, 150MPa, 220MPa 씩 감소되는 것을 확인하였다.

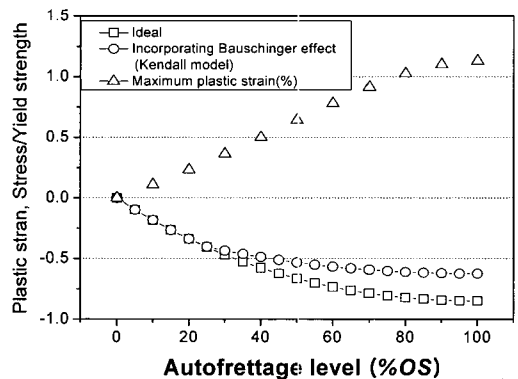


Fig. 7 Bore residual stress versus autofrettage percent for ideal and Bauschinger effect distribution

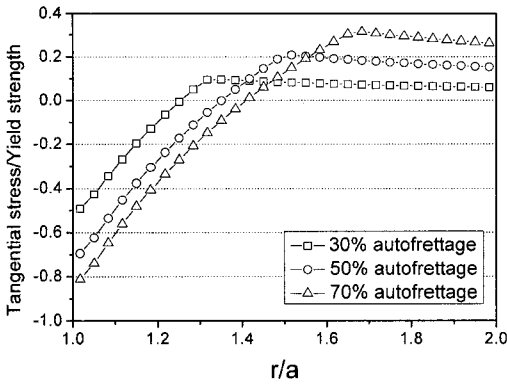


Fig. 8 Tangential residual stress distribution by FE analysis

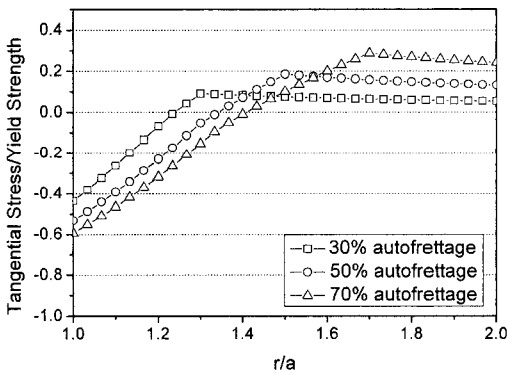


Fig. 9 Tangential residual stress distribution by Kendall Model

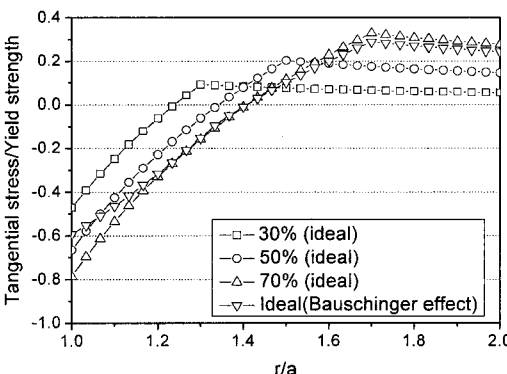


Fig. 10 Tangential residual stress distribution

5. 결론

SNCM8 고강도강의 기계적 특성 및 바우싱거 효과를 이용하여 가공 압력에 따른 단일 실린더에

서 자긴가공 잔류응력 분포 해석을 이론식 및 유한요소 프로그램을 이용하여 수행하였으며 결론은 다음과 같다.

1) SNCM8 강에서 바우싱거 실험에 의하여 인장 소성 변형률에 의하여 압축에서 항복강도가 줄어드는 현상을 확인하였다. 0~1.5% 소성 변형률 구간에서 BEF 는 소성 변형률에 크게 영향을 받고, 1.5% 이상에서는 소성 변형률이 BEF 에 큰 영향을 미치지 않는다.

2) 후육실린더에서 이론식과 유한요소 해석결과는 거의 일치하고 있다. 자긴가공 압력이 증가할수록 내경에서 유도되는 압축 잔류응력의 크기는 증가한다.

3) 자긴도의 증가에 따라 소성 변형률의 크기 또한 커진다. 이는 자긴도가 증가함에 따라 얻을 수 있는 압축잔류응력의 크기가 바우싱거 효과에 의해서 상대적으로 작아질 수 있음을 의미한다.

4) 내경에서 압축 잔류응력의 크기는 항복강도와 비가 0.4 보다 작은 경우 바우싱거 효과를 고려하며 자긴도가 높아질수록 완전 탄-소성 이론식과 바우싱거 효과를 고려하였을 경우 내경에서의 압축잔류응력의 차이는 커진다.

5) 30%, 50%, 70% 자긴가공 시, 압축 잔류응력의 크기는 각각 40MPa, 150MPa, 220MPa 의 차이를 보인다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다. (계약 번호 UD060011AD)

참고문헌

1. Park, J. H. and Lee, Y. S., "Machining Analysis of the Autofrettaged Compound Cylinder," Trans. of the KSME, Vol. 7, No. 7, pp. 800-807, 2007.
2. Huang, X. P. and Cui, W. C., "Effect of Bauschinger effect and Yield Criterion on Residual Stress Distribution of Autofrettaged Tube," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 128, No. 2, pp. 212-216, 2006.
3. Koh, S. K., Song, W. J., Seo, K. S. and Choi, H. S., "Autofrettage of Fuel Injection Pipe for Diesel Engine," Proc. of the KSME Autumn Conference, pp.

- 1823-1828, 2007.
4. Hill, R., "The Mathematical Theory of Plasticity," Oxford University Press, pp. 114-127, 1950.
 5. Bauschinger, J., "Ueber die Veränderung der Elasticitätsgrenze und dea Elasticitாமoduls Verschiedener Metalle," Zivilingenieur, pp. 289-348, 1881.
 6. Milligan, R. V., Koo, W. H. and Davidson, T. E., "The Bauschinger Effect in a High-Strength Steel," ASME Journal of Basic Engineering, Vol. 88, No. 2, pp. 480-488, 1966.
 7. Toriano, E., Parker, A. P. and Underwood, J. H., "Experimental Data, Numerical Fit and Fatigue Life Calculations Relating to the Bauschinger Effect in High-Strength Armament Steels," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 125, No. 3, pp. 330-334, 2003.
 8. Perry, J., Pearl, M., Shneck, R. and Haroush, S., "The Influence of the Bauschinger Effect on the Yield Stress, Young's Modulus, and Poisson's Ratio of a Gun Barrel Steel," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 128, No. 2, pp. 179-184, 2006.
 9. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., "Theory of Elasticity," McGraw-Hill, 1970.
 10. Majzoobi, G. H., Farrahi, G. H. and Mahmoudi, A. H., "A Finite Element simulation and an experimental study of autofrettage for strain hardened thick-walled cylinders," Materials Science and Engineering A, Vol. 359, No. 1-2, pp. 326-331, 2003.
 11. Park K. S. and Chugn I. S., "Thinking about the Bauschinger effect," Journal of Korean Institute of Metals and Materials, Vol. 20, No. 9, pp. 794-801, 1982.
 12. ASME, "Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 3, Appendix D," 2001.
 13. Habbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., "ABAQUS version 6.6 User Manual," 2004.