

자긴가공된 SCM440 고강도강의 잔류응력 및 미세구조 분석에 관한 연구

김재훈[†], 심우성*, 이영신**, 차기업***, 홍석균***

A Study on the Residual Stress and Microstructure of Autofrettaged SCM440 High Strength Steel

Shim W.S, Kim J.H., Lee. Y.S., Cha K.U. and Hong. S.K.

Key Words: Autofrettage(자긴가공), Residual Stress(잔류응력), Bauschinger Effect(바우싱거 효과) Scanning Electron Microscope(주사전자현미경)

Abstract

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. The purpose of the present paper is to predict the accurate residual stress of SCM440 high strength steel using the Kendall model which was adopted by ASME Code. Hydraulic pressure process was applied and thick-walled cylinders were autofrettaged up to 30% overstrain levels. Electro polishing was performed to get more accurate data. Residual stresses were measured by X-ray diffraction method. The autofrettaged surface which was plastically deformed analyzed using a scanning electron microscope(SEM). Although there were some differences in measured residual stress and numerical, there is a tendency to agree.

1. 서 론

반복적으로 높은 내압을 받는 두꺼운 실린더는 여러 산업분야에서 사용되는 구조물로서 작용중과 사용 조건하에서도 안전하게 운전되도록 설계·제작되어야 한다⁽¹⁾. 이러한 구조부재는 내경에서 인장방향으로 가장 큰 접선응력이 발생하고 이 응력은 내·외경비 및 작용하는 내압이 커질수록 증가하며 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 역시 끼워맞춤 방법(shrink fitting), 묶음방법(wrapping) 등을 이용하여 내경에서의 접선인장응력 수준을 낮추고 있으나⁽³⁾ 단일 방법으로는 자긴가공이 가장 널리 쓰이고 있다.

그러나 실제 재료에서의 자긴가공은 바우싱거

† 김재훈, 충남대학교 기계설계공학과
E-mail : kimjhoon@cnu.ac.kr
TEL : (042)821-6645 FAX : (042)821-8894

* 충남대학교

** 국방과학연구소

효과에 의하여 이론값에 비하여 상대적으로 작은 크기의 압축 잔류응력이 발생하므로 자긴가공에 의한 효과는 떨어진다. 따라서 실제 재료에 대한 자긴가공과 이론값에 대한 비교가 필요하다.

본 연구에서는 압력용기용 강인 SCM440 고강도강을 여러 조건하에서 자긴가공 시험을 수행하였다. 자긴가공 결과 소성 변형된 금속의 미세구조를 SEM을 통하여 확인하였다. 또한 기존의 완전탄소성 이론식과 ASME 규정에서 정한 이론식을 이용한 결과와 실제 실험값과 비교를 하였다.

2. 본론

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 멘드렐을 이용한 스웨징 방식이 이용된다.

내압 P_i 를 받는 두꺼운 실린더가 Fig. 1과 같을 때, 실린더 내에서의 응력은 다음과 같은 Lamé 식으로 표현된다⁽⁴⁾.

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

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

여기서 σ_r , σ_θ 는 반경방향(radial direction) 및 접선 방향(tangential direction) 잔류응력이고, a , b 는 각각 실린더의 내, 외경, ρ 는 소성반경을 나타낸다. P_i 는 실린더에 작용하는 내압, r 은 임의의 반경이다. 양단이 뚫린 실린더의 경우에는 평면응력상태(plane stress) 조건에 의하여 $\sigma_z = 0$ 으로 가정하였다. 재료의 완전 탄-소성거동(elastic-perfectly plastic behavior) 및 Tresca 항복조건을 가정하면 임의의 자긴도로 가공할 때 자긴압력은 다음 같이 얻을 수 있다.

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

여기서 Y 는 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⁽⁶⁾.

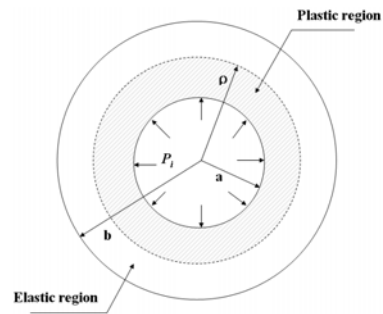


Fig. 1 Autofrettaged thick walled cylinder

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

for $a \leq r \leq \rho$

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

for $\rho \leq r \leq b$ (6)

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. 2는 전형적인 일축 인장-압축 시험에 의한 응력-변형률 선도를 보여주고 있다. 구간 O-A는 초기 인장 하중을 가하는 구간이다. 점 A는 미리 정의된 오프셋 방법에 의해 결정된 항

복점이다. 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 C점까지 도달 후, 이 후부터는 압축 하중이 작용하게 된다. 재료는 D점까지 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 집적(pil-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⁽⁷⁾.

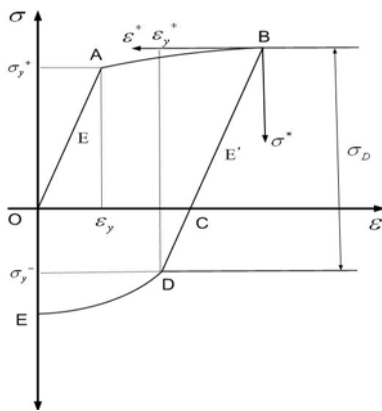


Fig. 2 Schematic of Bauschinger effect

2.3 바우싱거 효과를 고려한 이론식

바우싱거 효과를 고려한 내경에서의 잔류응력은 ASME Code에⁽⁸⁾ 다음과 같이 규정되어 있다.

$$\sigma_{\theta,B}/\sigma_y = -0.4 + 0.5(\sigma_{\theta}/1.15\sigma_y + 0.4) \quad (7)$$

여기서 σ_{θ} 는 이론적 접선방향 잔류응력이며, $\sigma_{\theta,B}$ 는 바우싱거 효과를 고려하였을 경우의 접선방향 잔류응력이다. 상수 0.4는 실험결과 얻은 SCM440강의 바우싱거 효과 계수이며, 다른 압력용기용 고강도강도 비슷한 값을 가진다. σ_{θ}/σ_y

가 -0.4 보다 큰 경우 바우싱거 효과를 고려하지 않으며 -0.4 보다 작은 경우에 Eq. 7을 이용하여 내경에서 유도되는 압축 잔류응력을 구한다.

또한 ASME Code에서 규정한 Kendall 모델을 이용하여 자긴가공에 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.

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

3. 실험방법

3.1 자긴가공 실험

본 자긴가공 연구에 사용된 재질은 압력용기용 SCM440 고강도강이다. 열처리 이후 항복강도는 1018 MPa, 인장강도는 1109 MPa이다. 본 시험편 실린더의 절단면은 내경 14 mm, 외경 27 mm로 내외경비는 1.93인 후육 실린더이다. 잔류응력 측정은 내경에서 외경 방향으로 측정하였다. 본 재료의 치수 및 기계적 특성을 Eq. 3을 이용하여 자긴도에 따른 자긴가공 압력을 구하면 Fig. 3과 같은 자긴가공도에 따른 자긴가공 압력 그래프를 얻을 수 있다. 자긴가공 압력을 높게 할수록 높은 자긴도를 얻을 수 있다. von Mises 항복조건에 의한 자긴가공 압력은 Tresca 항복조건인 Eq. 3에 상수 $2/\sqrt{3}$ 을 곱하여 얻을 수 있다.

Fig. 4는 자긴가공용 시험편을 보여준다. 3개의 시험편에 각각 압력조건을 달리하여 시험하였다. 시험편에 가한 자긴가공 압력은 각각 504 MPa, 536 MPa, 620 MPa이다. 본 압력은 Tresca 항복조건에 의해서는 23%, 30%, 56%의 자긴도이고, von Mises 항복조건에 의해서는 10%, 15%, 30%의 자긴도를 가진다. 시험편의 한쪽 끝단을 막은 후 한쪽에 압력을 가하여 시험편의 내부에 고압력을 가함으로써 자긴가공을 수행하였다. 자긴가공 압력까지 이르는 승압시간, 유지시간, 자긴가공 반복 횟수 등은 결과에 큰 영향을 미치지 못하므로⁽³⁾ 실험은 가압은 1회만 실시하였다. 보다 신뢰성 높은 데이터를 얻기 위하여 평행부 190 mm에서 시험 조건 당 각각 3개씩 절단하여 채취하였다. 전해연마(Electro polishing)는 가공 표면에 가공 경화층을 생성하지 않는다. 따라서 자긴가공된 시험편의 커팅과정에 유입되는 불필요한 잔

류응력을 없애고 자긴가공에 의하여 유도되는 접선방향 압축 잔류응력 측정하기 위하여 전해연마를 하였다. Fig. 5는 X-ray 회절법에 의한 접선방향 잔류응력을 측정하는 모습을 나타낸다. 잔류응력 측정용 팁 사이즈가 1 mm로 시편 사이즈에 비하여 크편이므로 0.5 mm 간격으로 겹쳐서 12 ~ 13개소에서 측정하였다. 또한 사이즈로 인하여 시편의 최내경에서 측정을 하지 못하고 최내경에서 0.5 mm 벗어난 곳에서부터 측정하였다.

3.2 미세구조 분석

Fig. 6은 30% 자긴가공 후 전해 연마 처리된 시편에 대하여 내경부터 반경방향을 따라 표면을 SEM 사진 촬영한 것이다. SEM사진 촬영 결과 실린더는 자긴가공 처리 시 큰 유압에 의하여 실린더의 내경방향에서 크게 소성변형되어 이그러진 상태를 알 수 있다. 이에 의하여 접선방향으로 유효한 압축잔류응력이 발생하게 된다. 이론상 소성변형 반경은 약 1.9 mm 까지 구간이나, 육안 상으로는 약 0.2 mm 의 변형을 확인할 수 있다. 정확한 소성반경을 구하기 위해서는 에칭을 통한 grain boundary의 관찰을 필요로 한다. 소성변형은 외경부로 갈수록 줄어 중간 및 외경부에서는 변형이 되지 않은 탄성 상태임을 확인할 수 있다.

4. 시험결과

본 연구에서는 각기 다른 자긴가공 압력 조건이 잔류응력에 미치는 영향을 파악하기 위하여 바우싱거 효과를 고려한 이론식과 실제 실험을 통하여 얻은 잔류응력 측정 결과를 비교, 검토하였다.

Fig. 7은 Eq. 7에 의하여 계산된 후속 실린더의 최내경(a=0)에서 자긴도에 따른 접선방향 압축잔류응력의 크기를 나타낸다. 그래프상에서 검은 솔리드는 바우싱거 효과를 고려하지 않은 재료의 완전탄소성 거동을 고려하였을 경우의 잔류응력 값이고, 붉은 솔리드는 바우싱거 효과를 고려하였을 경우의 잔류응력 값이다. 계산결과 자긴도 약 20% 이상에서는 바우싱거 현상에 의하여 내경부위에서 역항복이 발생하여 완전탄소성 이론값보다 상대적으로 작은 잔류응력 값을 가짐을 알 수 있다. 자긴가공 압력이 증가할수록 바우싱거 효과 또한 커져 자긴가공에 의한 유용한 효과

는 줄어든다. 따라서 자긴가공을 이용한 압력용기 설계 시 이점이 고려되어야만 한다. Fig. 8은 각각의 자긴가공 압력에서 유도된 잔류응력을 X-ray 회절법을 이용하여 측정한 결과이다. Fig. 9~11은 각각 504 MPa, 536 MPa, 620 MPa의 압력조건하의 자긴가공 실험결과와 이론값의 비교를 나타낸 그림이다. 자긴가공 압력이 높아질수록 내경에서 유도되는 압축잔류응력의 크기는 커지며, 외경에서의 인장 잔류응력의 크기 또한 커짐을 확인하였다.

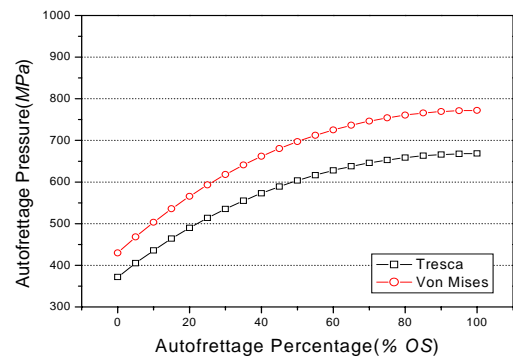


Fig. 3 Autofrettage pressure for each overstrain level



Fig. 4 Specimens for autofretting process



Fig. 5 Residual stress measurement by X-ray diffraction

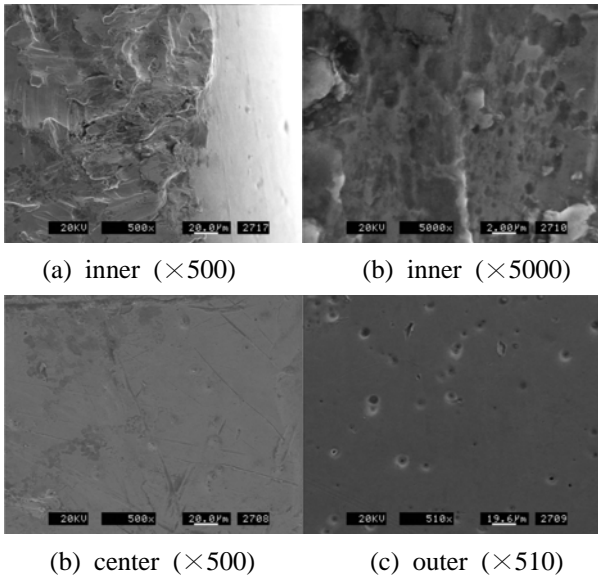


Fig. 6 SEM images of the autofretted specimen after electropolishing

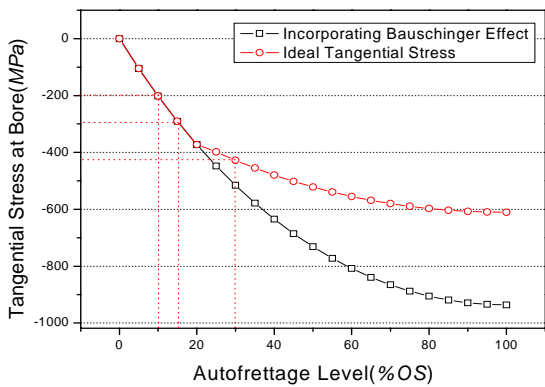


Fig. 7 Tangential residual stress at inner radius

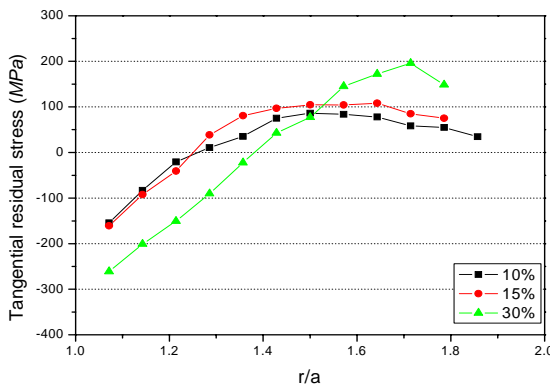


Fig. 8 Comparison of tangential residual stress at each condition

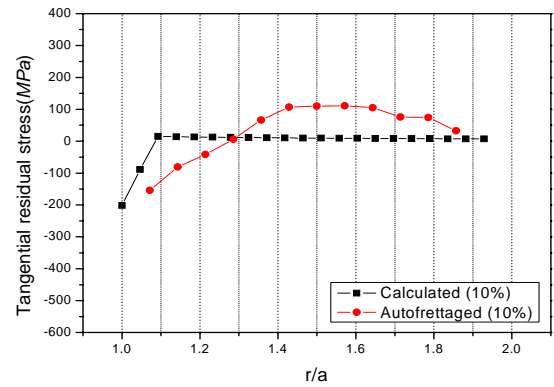


Fig. 9 Tangential residual stress at an autofrettage pressure of 504 MPa

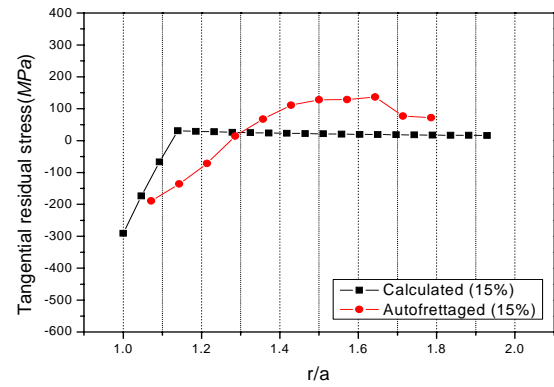


Fig. 10 Tangential residual stress at an autofrettage pressure of 536 MPa

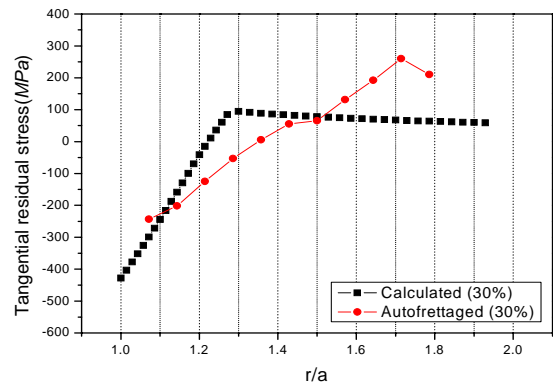


Fig. 11 Tangential residual stress at an autofrettage pressure of 620 MPa

5. 결론

고압관에 사용되는 SCM440 고강도강의 자긴가공 압력에 따른 단일 실린더에서 자긴가공 잔류응력 분포 해석을 이론식 및 SEM을 통해 미세구조를 관찰하였으며 결론은 다음과 같다.

1. 자긴도의 증가에 따라 내경에서 유도되는 압축잔류응력의 크기와 외경에서 유도되는 인장접선응력의 크기는 커진다.
2. σ_θ/σ_y 가 -0.4 보다 작은 경우에 바우싱거 효과가 나타나며 본 실험에서 10%, 15%에서는 바우싱거 효과가 나타나지 않으며, 30% 이상에서 바우싱거 효과가 나타나 자긴가공의 효과가 감소한다.
3. SEM에 의한 미세조직 관찰결과 내경부에서는 소성변형이 크게 진행됨을 확인하였으며 중심 및 외경부에서는 소성 변형되지 않은 탄성 상태임을 확인하였다.
4. 내경에서 유도되는 압축잔류응력의 크기는 유사하게 예측되나, 실험에서 외경쪽에서의 인장잔류응력의 크기는 상대적으로 크게 유도된다. 이는 추후 연구에서 더욱 고려해야할 사항이다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Jae-Hyun Park, Young-Shin Lee, 2007, "Machining Analysis of the Autofrettaged Compound Cylinder," Trans. of the KSME, Vol. 7, No. 7, pp. 800~807.
- (2) X. P Huang, W. C. Cui, 2006, "Effect of Baushinnger effect and Yield Criterion on Residual Stress Distribution of Autofrettaged Tube," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol 128, Issue 2, pp. 212~216.
- (3) Koh, S.K., Song, W.J., Seo, K.S. and Choi, H.S., 2007, "Autofrettage of Fuel Injection Pipe for Diesel Engine," Trans. of the KSME, pp. 1823~1828.
- (4) Timoshenko, S.P. and Goodier, J. N., 1970, "Theory of Elasticity," McGraw-Hill, New York.
- (5) G. H. Majzoubi, G. H. Farrahi and A. H. Mahmoudi, 2003, "A Finite Element simulation and an experimental study of autofrettage for strain hardened thick-walled cylinders," Materials Science and Engineering A, Volume 359, Issues 1-2, pp. 326~331.
- (6) Hill, R., 1950, "The Mathematical Theory of Plasticity," Oxford University Press, London.
- (7) Kwang-Soon Park, In-Sang Chugn, 1982, "Thinking about the Baushinger effect," Journal of Korean Institute of Metals, Vol. 20, No. 9.
- (8) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2001, Section VIII, Division 3, Appendix D.