

유한요소법을 이용한 곡관의 자긴가공 해석

박찬중[†] · 고승기* · 나의균* · 백태현*

Autofrettage Analysis of Pipe Bend using Finite Element Method

Park, C.J.[†], Koh, S.K.* , Na, E.G.* , Baek, T.H.*

Key Words: Autofrettage(자긴가공), Pipe Bend(곡관), Overstrain Level(자긴도), Residual Stress(잔류응력)

Abstract

Autofrettage analysis of a bend in the fuel injection pipe has been performed to investigate the distribution of residual stresses due to pipe bending and autofrettage processes. The pipe bending was simulated by metal forming analysis using finite element method, and residual stress distribution after bending was found. Autofrettage following the pipe bending was performed by applying the hydrostatic internal pressures of 603 MPa, 535 MPa, 500 MPa on the pipe bend, corresponding to theoretical 26 %, 14 %, 9 % overstrain levels, respectively. Residual stress distributions due to bending and autofrettage were evaluated.

1. 서 론

내압의 영향을 받는 두꺼운 압력관의 내경에서는 가장 큰 접선인장응력이 발생하므로 내경에서 균열이 형성, 개시된다. 이러한 압력관을 대상으로 반복적인 높은 내압을 받을 수 있도록 하기 위해서 억지 끼워 맞춤(shrink fit), 묶음(wrapping) 등의 방법을 이용하여 내압으로 인한 내경에서 발생하는 접선인장응력 수준을 낮추고 있으나 견딜 수 있는 압력한도가 낮기 때문에 더 효과적으로 압력관의 강도를 높일 수 있는 자긴가공 방법이 개발되어 사용되고 있다.⁽¹⁾

두꺼운 압력관을 자긴가공 하였을 때 압력관에는 비선형적인 탄성회복에 의하여 내경부근에서는 압축 잔류응력, 그리고 외경 부근에서는 인장

잔류응력이 발생한다. 자긴가공에 의하여 압력관 내경에 존재하는 접선방향의 압축 잔류응력은 내압에 의하여 발생하는 접선인장응력을 상쇄하는 작용을 함으로써 반복적인 높은 내압환경하의 압력관이 부담할 수 있는 내압한도를 증가시킬 수 있으며, 내경으로부터의 균열발생 및 균열진전을 억제하고 지연시켜 압력관의 강도증가와 수명향상에 크게 기여한다.^(2,3)

한편 자긴가공 방법으로 압력관을 제작하기에 앞서 굽힘 공정을 수반하게 되는데 이러한 과정에서 발생하는 압력관의 변형은 압력관 단면의 편평률 등의 형상변화뿐만 아니라, 압력관에 소성변형에 의한 잔류응력을 남기게 된다. 이러한 잔류응력은 압력관의 물성치에 영향을 끼치게 되어, 가공 전 소재의 물성치와는 물론 압출·인발 등의 생산과정을 거친 압력관의 물성치와도 많은 차이를 나타내게 된다.⁽⁴⁾

따라서 본 연구에서는 105MPa의 운전 내압을 반복적으로 받는 두꺼운 연료분사관을 대상으로 향상된 탄성강도를 확보할 수 있도록 굽힘 가공 공정을 수반한 자긴가공 잔류응력해석을 수행하

† 책임저자, 회원, 군산대학교 기계공학과

E-mail : mildsaint@hanmail.net

TEL : (063)469-4717 FAX : (063)469-4727

* 군산대학교 기계자동차공학부

였다. 해석 결과를 기초로 굽힘 공정으로부터 발생하는 잔류응력분포와 더불어 자긴가공으로 발생하는 잔류응력분포에 대하여 분석 평가하였다.

2. 유한요소해석

2.1 재료물성치

해석에 사용된 부재는 현재 선박용 디젤엔진 연료분사관으로 많이 사용되고 있는 SCM440강을 사용하였다. 굽힘 공정 이후 내경에 두께 방향에 따라 소성변형을 일으킬 수 있을 정도의 충분히 높은 정수압을 내경에 일시적으로 작용시킨 후 압력을 제거하여 잔류응력을 생성시키는 자긴가공을 병행하므로 탄소성 해석을 수행하여야 한다.

탄소성 물성치를 얻기 위해서 시편을 제작하여 인장시험을 수행하였고 이로부터 결정된 다음의 공칭응력 및 공칭변형률로부터 계산된 탄성-소형 변형경화특성을 지닌 Table 1의 진응력과 소성진변형률 관계를 입력하여 해석하였다.

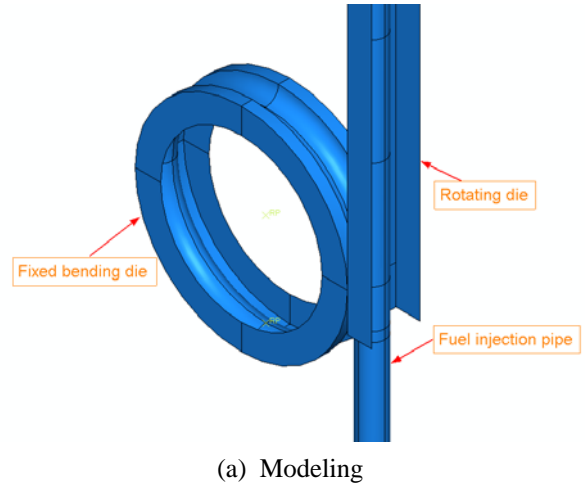
Table 1 True stress and true plastic strain relationship used for elastic-plastic finite analysis

Nominal stress, S (MPa)	Nominal strain, e	True stress, σ (MPa)	True strain, ϵ	True plastic strain, ϵ_t
1108	0.01	1028	0.01	0
1109	0.05	1164	0.049	0.0432

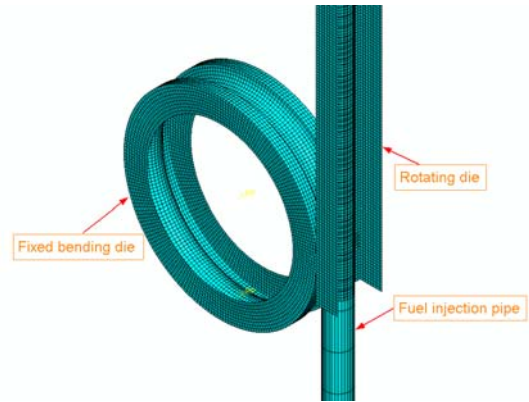
2.2 해석조건

본 연구의 해석 대상은 내·외경이 각각 14 mm, 27 mm(내외경비, $K=b/a=1.93$)이고 Fig. 1(a)과 같은 형상의 연료분사관이며 모델링 및 해석은 ABAQUS 6.7 프로그램을 사용하였다. Fig. 1(b)는 유한요소해석을 위해 모델링한 Fig. 1(a)를 유한요소모델로 나타낸 것이다.

유한요소모델은 완전 구속되어 이상적인 강체(rigid body)로 모델링된 고정지그와 이를 중심으로 원 운동하여 연료 분사관을 굽히는 운동지그, 그리고 변형체(deformable body)로 모델링되어 굽힘 변형이 발생하는 연료 분사관으로 구성되어 있다. Fig. 2에서는 해석에 필요한 경계조건을 나타내었다.



(a) Modeling



(b) FE model

Fig. 1 Modeling and FE model of fuel injection pipe

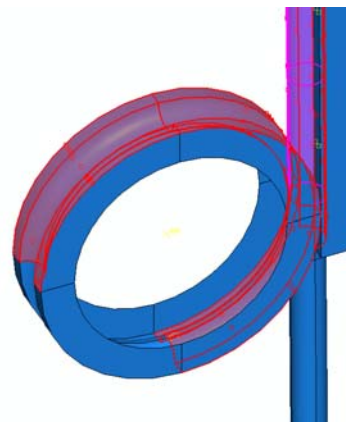


Fig. 2 Contact conditions for FE analysis

2.3 해석방법 및 절차

연료분사관은 고정지그와 운동지그를 이용하여 요구되어지는 굽힘각을 만족하게 하는 굽힘 공정을 수행한 후 von Mises 항복조건식에 근거한 자긴압력 계산식 (1)를 이용하여 26 %, 14 %, 9 %의 자긴도(전체 관 두께에 대한 소성변형된 두께의 비율)를 예상하여 각각 603 MPa, 535 MPa, 500 MPa의 자긴압력으로 자긴가공 해석을 수행하였다.⁽⁵⁾

$$P_u = \frac{2\sigma_{ys}}{\sqrt{3}} \left[\frac{b^2 - \rho^2}{2b^2} + \ln \frac{\rho}{a} \right] = \frac{\sigma_{ys}}{\sqrt{3}} \left[\left(1 - \frac{\rho^2}{b^2} \right) + 2 \ln \frac{\rho}{a} \right] \quad (1)$$

연료 분사관의 굽힘가공 및 자긴가공 해석을 위해서 네 개의 해석단계를 정의하였다. 첫 번째 해석단계는 강제인 운동지그를 고정지그를 따라 강제 회전 원 운동 시킴으로써 연료분사관의 굽힘 성형이 일어날 수 있도록 하는 단계이고, 두 번째 해석단계는 굽힘 성형 이후 고정지그와 운동지그를 제거하는 단계이다. 그리고 세 번째 해석단계는 연료 분사관 내에 소성변형을 유도하는 자긴압력을 작용하고, 네 번째 해석단계에서는 가해진 압력을 제거하는 단계이다.

해석을 수행하기 위해서 몇 가지 가정을 하였는데 가공 시 발생하는 열변형 및 열전달은 무시하였고, 소재와 다이 사이에 발생하는 마찰은 쿨롱 마찰(Coulomb friction)로 설정하여 냉간 가공에 일반적으로 적용하는 0.1을 마찰 계수로 사용하였다. 굽힘 공정 단계에서는 spring back현상을 고려하여 굽힘각을 알맞게 재조정 하였다. Table 2에 해석에 적용한 조건을 정리하여 나타내었다.

Table 2 Input parameter for analysis

Autofrettage pressure (MPa)	Element type	Friction factor	Bending angle (°)	Overstrain Level (%)
603	solid	0.1	123	26
535	solid	0.1	123	14
500	solid	0.1	123	9

3. 유한요소해석 결과

3.1 굽힘 공정 해석

유한요소해석 프로그램을 이용한 굽힘 공정 해

석은 각각의 자긴압력으로 자긴가공을 하기 전 단계의 해석이므로 동일하다.

Fig. 3에 나타난 것과 같이 굽힘 공정에 의해 발생하는 접선 방향 잔류응력은 연료 분사관의 내경 뿐만 아니라 외경 부분에서도 발생하며 대체적으로 내경에서는 압축, 외경에서는 인장응력이 작용하는 것을 확인할 수 있다. 굽힘각 123°로 회전 굽힘을 받은 연료 분사관 곡관의 중간 부위 단면에 대한 접선 잔류응력 분포는 Fig. 4와 같으며, Fig. 4에서 각각 A-A', B-B', C-C' 구간에 대한 접선 잔류응력 분포는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5로부터 내경부근에서 잔류응력의 크기는 약 -150 MPa ~ -239 MPa 수준을 나타내었고 외경부근에서는 약 230 MPa ~ 36 MPa의 잔류응력 수준이 얻어졌다.

연료 분사관의 측면은 중립축으로써 굽힘 공정이 진행되는 동안 발생하는 응력의 크기가 부재의 항복응력 대비 적게 나타났으며 등가 소성 변형률을 Fig. 6에 나타내었다.

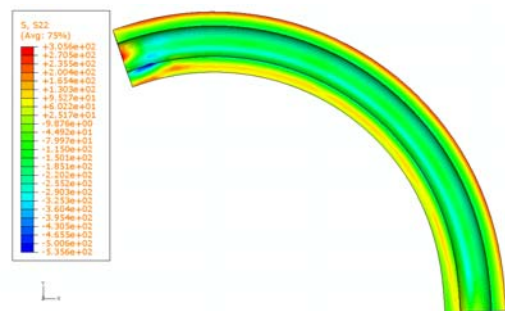


Fig. 3 Tangential residual stress contour of the pipe bend due to bending

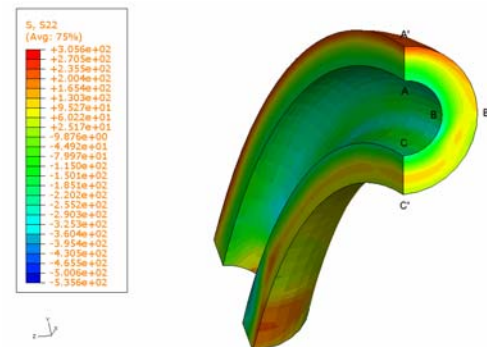


Fig. 4 Tangential residual stress contour at the arc center of the pipe bend due to bending

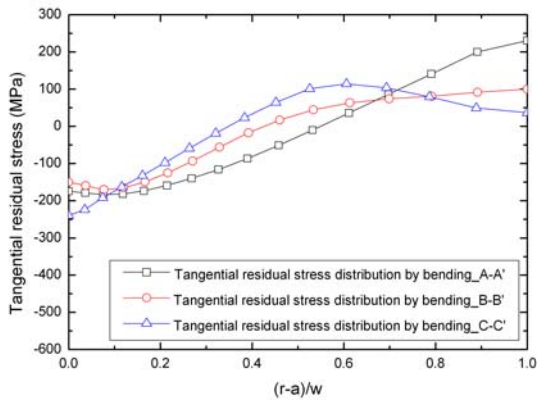


Fig. 5 Tangential residual stress distribution of the pipe bend due to bending

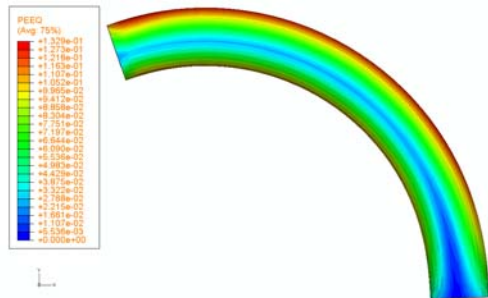


Fig. 6 Equivalent plastic strain distribution

3.2 자긴가공 해석

연료 분사관은 고정지그와 운동지그에 의해 굽힘가공을 받은 직후 각각의 자긴압력 조건으로 가압하고 이후 압력을 제거함으로써 자긴가공 공정이 이루어진다.

Figs. 7~9는 각 자긴압력으로 발생한 접선 방향 잔류 응력분포를 나타내고 있으며, 자긴압력이 증가할수록 연료 분사관 내경에 존재하는 접선 방향 압축 잔류응력의 크기가 커짐을 확인할 수 있다. 이것은 자긴가공 공정 동안 연료 분사관 내경에 가해지는 자긴압력으로 인해 굽힘 공정으로 발생한 접선 방향 잔류응력에 영향을 미쳐 응력의 재분포가 발생함을 알 수 있다. 또한 연료 분사관의 측면 내측에서 큰 압축 잔류 응력분포가 나타났는데 이는 굽힘 가공 공정 동안 중립축을 유지함으로써 큰 소성변형이 발생하지 않아 상대적으로 작은 크기의 잔류응력이 생성되었다가 이후 적용된 자긴 압력으로 인하여 발생하는 접선방향의 압축 잔류응력에 기인한다.

연료 분사관 곡관의 중간 부위의 각각 A-A',

B-B', C-C' 구간에 대한 자긴가공에 의한 접선 잔류응력 분포는 Figs. 10~12와 같다.

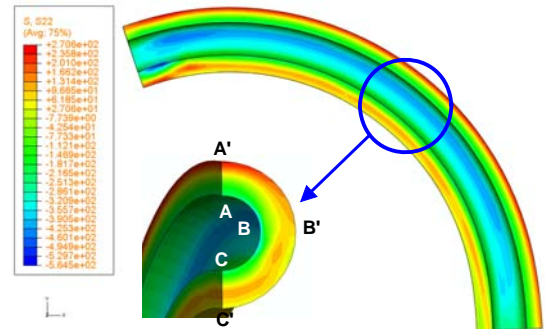


Fig. 7 Tangential residual stress contour of the autofrettaged pipe bend for an autofrettage pressure of 500 MPa

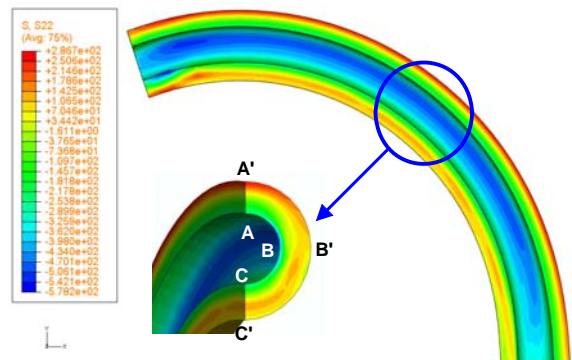


Fig. 8 Tangential residual stress contour of the autofrettaged pipe bend for an autofrettage pressure of 535 MPa

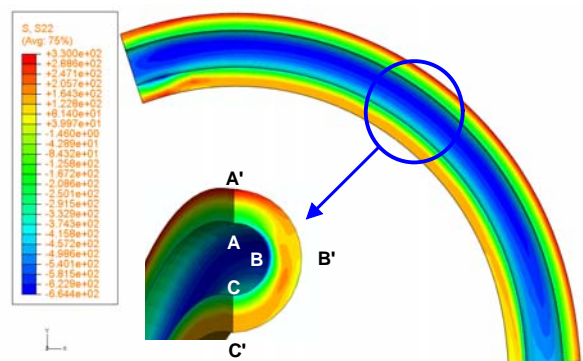


Fig. 9 Tangential residual stress contour of the autofrettaged pipe bend for an autofrettage pressure of 603 MPa

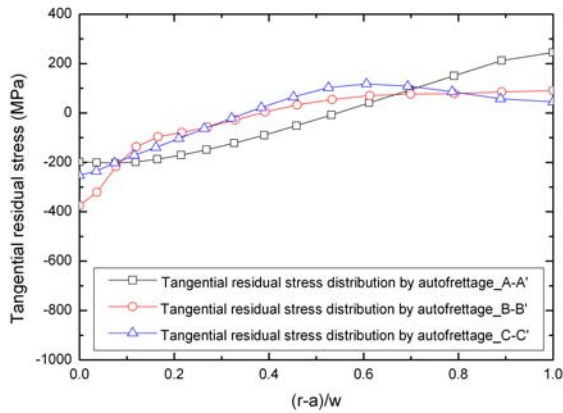


Fig. 10 Tangential residual stress distribution of the autofrettaged pipe bend for an autofrettage pressure of 500 MPa

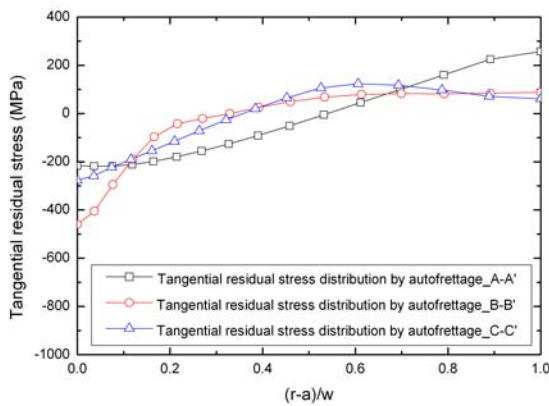


Fig. 11 Tangential residual stress distribution of the autofrettaged pipe bend for an autofrettage pressure of 535 MPa

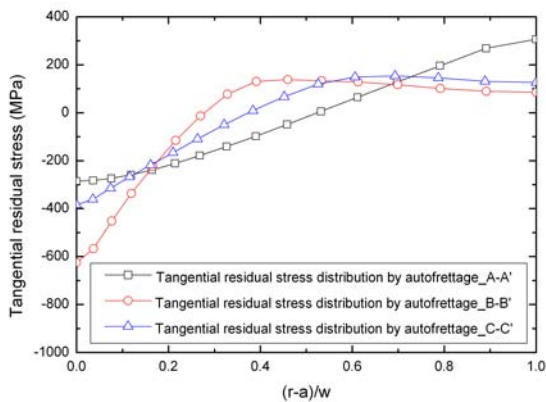


Fig. 12 Tangential residual stress distribution of the autofrettaged pipe bend for an autofrettage pressure of 603 MPa

4. 고찰

연료 분사관의 곡관부위를 고정지그와 운동지그로 굽힘 가공을 하였을 때 가공이 끝나는 부분에서 응력의 최대치를 나타냈는데, 이는 가공 중에 소성변형이 일어나는 부분과 일어나지 않는 부분의 경계로써 응력의 재분포가 이루어지기 직전의 상태이기 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 이는 자긴가공 공정 후에도 지속적으로 관찰되어진다. 따라서 이러한 현상에 대해 추후 연구 진행이 필요할 것으로 여겨진다.

비교적 낮은 자긴 압력으로 자긴가공 하였을 경우 나타나는 접선 잔류 응력의 크기는 측면을 제외한 부분에서 굽힘 공정으로부터 발생하는 접선 잔류응력과 큰 차이를 나타내지는 않았지만 높은 자긴 압력으로 자긴가공 하였을 경우 내경에서 발생하는 접선 방향 잔류응력의 크기가 커짐을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 연료 분사관 곡관부위의 굽힘 가공과 더불어 연료 분사관의 정적 강도를 확보하기 위한 자긴가공을 수행하였으며, 굽힘과 자긴 공정을 통하여 발생하는 잔류응력 분포를 계산하였다. 연료 분사관을 603 MPa, 535 MPa, 500 MPa의 압력으로 자긴가공하였을 경우 굽힘 공정으로 발생한 잔류응력을 재분포시켰고, 자긴압력이 증가할수록 내경부근에서 발생하는 압축잔류응력이 증가하는 경향을 확인하였다. 이러한 경향은 운전 내압(105 MPa)에 의하여 내경에 발생하는 인장응력 182 MPa를 충분히 상쇄함으로써 연료분사관의 정적 강도 및 내구수명을 향상시킬 수 있을 것으로 평가하였다.

참 고 문 헌

- (1) Davidson, T. E., Barton, C. S., Reiner, A. N., and Kendall, D. P., 1962, "New Approach to the Autofrettage of High-strength Cylinder," *Experimental Mechanics*, Vol. 2, No. 2, pp. 33~40.
- (2) Davidson, T. E., Eisenstadt, R., and Reiner, A. N., 1963, "Fatigue Characteristic of Open-End Thick-walled Cylinders Under Internal Pressure," *Journal of Basic Engineering*, pp. 555~565.
- (3) 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(A)*, Vol. 22, No. 2, pp. 321~329.
- (4) S. G. Jeon, J. H. Kim, J. Y. Sin, S. G. Lee, "A Study on Improvements of Residual Stress of Pipe Bending By X-Ray Diffractometer Test", *KSAE*, 04-F0177, pp. 1111~1116, 2004.
- (5) Hill, R., 1950, "The Mathematical Theory of Plasticity," Oxford University Press, London.