

실린더 내벽의 버니싱 공정에 대한 유한요소해석

박종진[#]

Finite Element Analysis of a Burnishing Process for the Inner Surface of a Cylinder

J. J. Park

(Received August 23, 2010 / Revised October 1, 2010 / Accepted October 1, 2010)

Abstract

Elasto-plastic finite element analysis was performed for a burnishing process for the inner surface of a cylinder by mandrel. Three different configurations in roughness of the inner surface, two different thicknesses of the cylinder wall, and five different diameters of the mandrel were selected for the present investigation. Although the surface roughness was improved with the increase of the mandrel diameter, defects of folding occurred as the mandrel diameter exceeded certain limits. Improvements in the surface roughness, distributions of effective strain, effective stress and residual circumferential stress, and the variation of mandrel force were also investigated.

Key Words : Burnishing, Cylinder, Surface Roughness, Hardness, Residual Stress

1. 서 론

일반적으로 기계부품들은 선반, 밀링 등의 절삭 작업을 통하여 부품의 형상과 치수를 구현한다. 이러한 부품의 표면은 요철, 즉 돌출부와 침하부가 불규칙하게 분포되어 있다. 표면이 거칠수록 기계적 성질, 특히 내마모성과 피로강도가 저하된다. 표면 거칠기를 개선시키기 위하여 버니싱, 연삭, 호닝, 폴리싱 등의 후처리 작업을 하는데, 버니싱은 경도가 높은 재료로 제작된 볼이나 롤러 형상의 공구를 사용하여 표면에 압축소성변형을 가하여 요철의 차이를 완화시켜 치수 정밀도의 개선과 응력집중의 감소, 가공경화에 의한 표면경도의 증가, 그리고 압축잔류응력에 의한 피로강도의 향상을 도모한다.

이와 관련된 기존의 연구 결과들을 요약하면 다음과 같다. Hassan 등[1~3]은 선반에서 원기둥 시편의 볼 버니싱을 수행하였다. 버니싱 시간이

증가될수록 표면 거칠기는 지속적으로 향상되었으나, 어느 정도 이상에서는 표면 경화의 효과는 거의 없었다. 롤러 버니싱에 대한 연구도 수행하였는데, 버니싱 하중이 동일한 경우에는 볼 버니싱에 의한 효과가 크게 나타났다. 이는 접촉면적이 상대적으로 작으므로 버니싱 압력이 크게 되어 상대적으로 소성변형이 증가되었기 때문이다. 또한 최적의 표면 거칠기와 이에 필요한 버니싱의 하중과 회수를 이론적으로 구하였다. Klocke와 Liermann[4]은 볼 버니싱에 의하여 표면 거칠기를 30~50% 정도 향상시키고, 압축잔류응력을 유발시키는 데 필요한 하중은 초기의 표면 거칠기에 크게 영향을 받는다는 것을 알아내었다. 그리고 가공경화가 지나치면 도리어 연성이 감소하여 피로강도가 저하될 수 있음을 밝혔다. El-Axir[5]는 롤러 버니싱을 통하여 표면 거칠기를 $R_a 4.5\mu\text{m}$ 에서 $0.5\mu\text{m}$ 로 향상시켰고, 최대 압축잔류응력을 유발시키는 데 필요한 버니싱 하중을 구하였다.

[#] 교신저자: 홍익대학교 기계시스템디자인공학과,
E-mail: jjpark@hongik.ac.kr

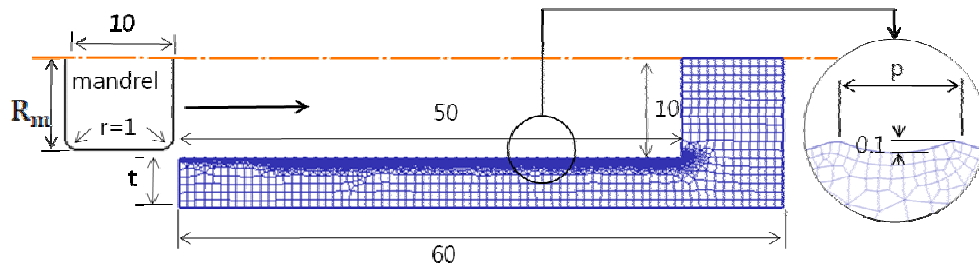


Fig. 1 Schematic of a burnishing process for the inner surface of a cylinder (mm)

El-Khabeery 와 El-Axir[6, 7]는 밀링에서의 롤러 버니싱에 대한 수학적 모델을 구하였다. 버니싱 속도가 낮고, 버니싱 깊이가 클수록 효과는 향상되었다. 버니싱 속도가 높아질수록 공구의 채터로 인하여 효과가 저하됨을 알아내었다. 또 원기둥 시편의 경우에는 단면 형상과 지름의 변화가 버니싱의 깊이와 시간에 크게 의존함을 밝혔다. El-Axir 와 Ibrahim[8]은 선반의 센터 레스트(center rest)에 버니싱 볼 세 개를 장착하여 버니싱 실험을 수행하였는데, 속도가 1.5m/s 이상이 되면 공구의 채터에 의하여 표면 거칠기와 단면 형상이 함께 저하되는 것을 알 수 있었다. Luca 등[9]은 볼을 수압으로 지탱할 수 있도록 버니싱 공구를 제작하여 버니싱 하중, 볼의 회전, 볼과 표면 사이의 윤활을 일정하게 유지할 수 있었다. Yen 등[10]은 롤러 버니싱에 대한 모델링과 유한요소해석을 수행하여 표면에서의 변형, 유효변형률과 잔류응력의 분포를 예측하였다. 이는 유한요소망 재구성의 자동화 기술에 의하여 가능하였다. 이와 같이 버니싱에 대한 연구는 주로 실험과 그 결과의 분석을 통하여 진행되어왔다.

2. 버니싱 공정

최근 탄소성 변형의 유한요소해석과 요소망 재구성의 자동화 기술이 발전됨에 따라 버니싱에 대한 더 정확한 분석이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 이 기술을 응용하여 맨드릴에 의한 실린더 내벽의 버니싱 작업에서 발생하는 표면 거칠기, 표면 경도, 잔류응력 등의 변화를 재연하고 그 결과를 분석하였다. 이 과정에서 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM 을 사용하였으며, 실린더는 탄소성으로, 맨드릴은 강체로 가정하였다.

이 작업에서 실린더에서 발생하는 역학 현상은

축대칭으로 나타난다. 실린더의 소재는 Al-1100 으로 가정하였으며, 이 소재의 항복강도는 36MPa, 탄성계수는 68,900 MPa, 포아송 비는 0.33, 유동응력은 $\sigma=36+117.5e^{0.385}$ MPa 이었다. 맨드릴 표면과 실린더 내부 표면에는 윤활을 충분히 하였다고 간주하고 접촉면에서의 마찰계수 m 은 0 으로 가정하였다.

Fig. 1 에 맨드릴과 실린더 단면의 하반부를 나타내었다. 맨드릴의 길이는 10mm, 코너 반경은 1 mm 이며, 실린더 내부의 깊이는 50mm, 반지름은 10mm 이다. 맨드릴의 반지름(R_m)은 10.00, 10.01, 10.02, 10.03, 10.04mm 의 다섯 가지로, 실린더 벽의 두께(t)는 5, 10mm 의 두 가지로 변화시켰다. 실린더 내부의 표면에는 물결 모양의 요철을 분포시켰으며, 요철의 깊이는 0.1mm 로 일정하나, 피치는 0.5, 1, 2mm 의 세 가지로 변화시켰다. 해석의 정확성을 추구하기 위하여 표면 부근에는 미세한 유한요소를 분포시켰다.

3. 유한 요소 해석

위에서 언급한 실린더 벽의 두께(t), 요철의 피치(p), 맨드릴의 지름(R_m)의 여러 조합에 대한 유한요소해석을 수행하고, 그 결과를 표면 거칠기의 효과가 우수한 경우, 보통인 경우, 접힘 결함이 발생하는 경우의 세 가지로 분류하여 Table 1에 정리하였다. 실린더 벽의 두께가 5mm인 경우, 피치가 0.5mm일 때에는 맨드릴의 반지름이 10.01mm 에서, 피치가 1 또는 2mm일 때에는 모두 맨드릴의 반지름이 10.03mm에서 우수하게 나타났다. 실린더 벽의 두께가 10mm인 경우, 피치가 0.5mm일 때에는 맨드릴의 반지름이 10.01mm 에서, 피치가 1 또는 2mm일 때에는 모두 맨드릴의 반지름이 10.02mm에서 우수하게 나타났다. 이 결과들을

Table 1. Limits of R_{Tm} by occurrence of folding(mm)

| t | R_{Tm} | 10.00 | 10.01 | 10.02 | 10.03 | 10.04 |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | p=0.5 | △ | ○ | × | × |
| p=1.0 | | △ | △ | △ | ○ | × |
| p=2.0 | | △ | △ | △ | ○ | × |
| 10 | R_{Tm} | 10 | 10.01 | 10.02 | 10.03 | 10.04 |
| | p=0.5 | △ | ○ | × | × | × |
| | p=1.0 | △ | △ | ○ | × | × |
| | p=2.0 | △ | △ | ○ | × | × |

(○: best, △: good, ×: folding)

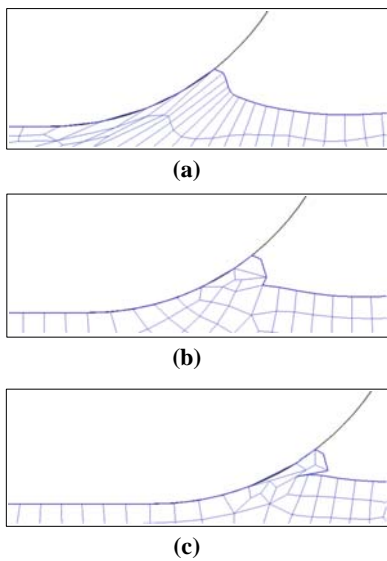
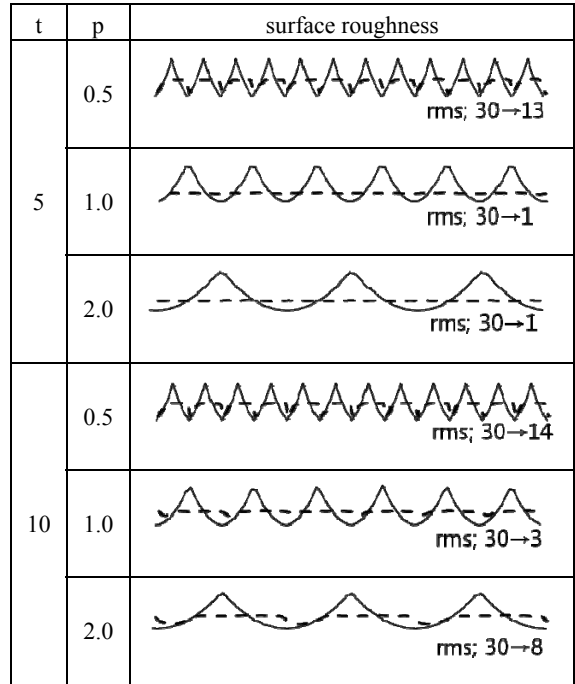


Fig. 2 Development of a folding defect

종합하여 보면 피치가 클수록 돌출부의 접힘 현상이 덜 발생하므로 맨드릴 지름을 증가시켜 표면 거칠기를 향상시킬 수 있었다. 실린더 벽의 두께가 10 mm 인 경우는 접힘 현상이 촉진되어 5 mm 인 경우에 비하여 버니싱이 가능한 맨드릴 지름이 작아졌다. Fig. 2 에 접힘 결함이 발달하는 과정을 나타내었는데, 변형이 심하여 지면서 요소망이 재구성된 것을 볼 수 있다. 버니싱 깊이와 돌출부 높이의 차이가 클수록 접힘 결함이 쉽게 발생하게 된다.

Fig. 3 에는 Table 1 의 우수한 경우(O 표시)에서 나타난 표면 거칠기의 개선과 rms(root mean square)

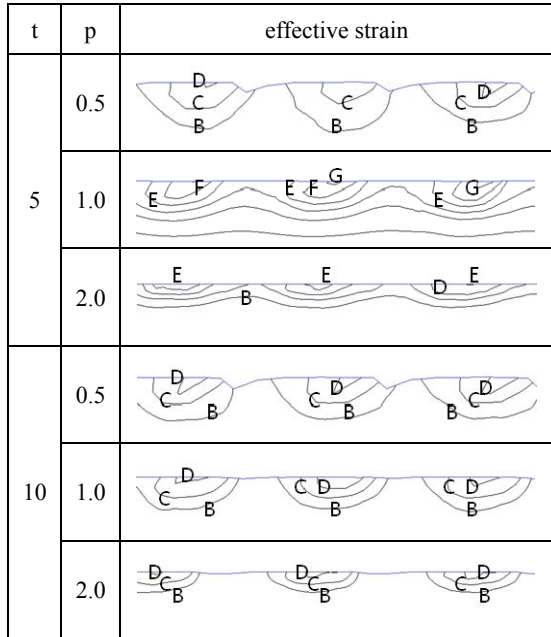


(— initial surface, --- burnished surface)

Fig. 3 Improvements in the surface roughness by the burnishing process (μm); rms stands for the root mean square

또는 R_q 의 값을 나타내었다. 여섯 경우에서 모두 초기의 표면 거칠기는 $30\mu\text{m}$ 이었다. 실린더 벽의 두께가 5mm 인 경우, 피치가 0.5mm 일 때에는 $13\mu\text{m}$ 이었으나, 피치가 1 또는 2mm 일 때에는 모두 $1\mu\text{m}$ 로 개선되었다. 하지만 실린더 벽의 두께가 10mm 인 경우, 피치가 0.5mm 일 때에는 $14\mu\text{m}$ 로, 피치가 1mm 일 때에는 $3\mu\text{m}$ 로, 2mm 일 때에는 $8\mu\text{m}$ 로 나타났다. 이로부터 표면 거칠기는 맨드릴의 지름이 클수록 개선되나, 개선의 정도는 초기의 피치 크기에 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

이 여섯 경우에서 실린더 입구에서 25mm 거리의 내벽 위치에 발생한 유효변형률과 잔류원주응력을 각각 Figs. 4 와 5 에 나타내었다. 표면에서 0.3~0.4mm 의 깊이까지 분포되어 있다. 유효변형률의 분포는 불균일하지만 규칙적인데, 돌출부는 침하부에 비하여 많은 변형을 받기 때문이다. 실린더 벽의 두께가 5mm 인 경우, 피치가 1 또는 2mm 일 때에는 맨드릴의 반지름이 10.03mm 이므로 다른 경우에 비하여 표면에 발생된 유효변형률도 크게 나타났다. 잔류원주응력의 분포도 불균일 하

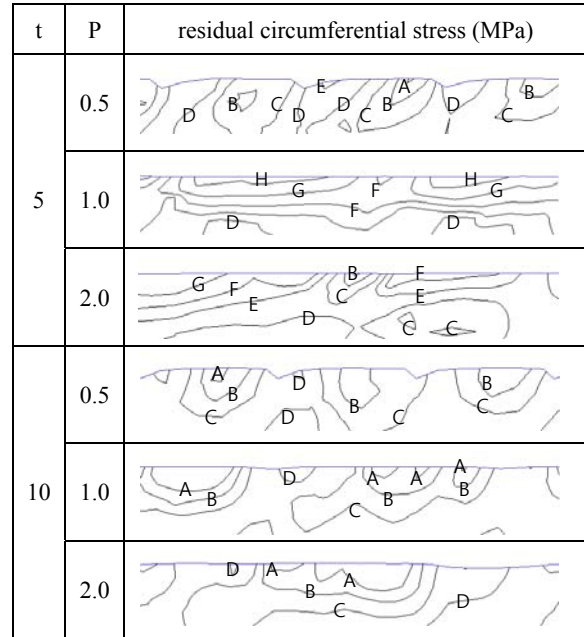


(B=0.20,C=0.40,D=0.61, E=0.81, F=1.0, G=1.2)

Fig. 4 Distributions of the effective strain near the surface

지만 규칙적인 것을 볼 수 있다. 실린더 벽의 두께와 무관하게 피치가 0.5mm 인 경우에는 돌출부 위치에서 -80MPa 이하로 나타나는데, 이 때에 사용된 맨드릴의 반지름은 10.01mm 이었다. 실린더 벽의 두께가 5mm 인 경우, 피치가 1 또는 2mm 일 때에는 표면에는 -65~24MPa 의 값이 나타나고 있다. 이 때에 사용된 맨드릴의 반지름은 10.03mm 이었다. 실린더 벽의 두께가 10mm 인 경우, 피치가 1 또는 2mm 일 때에는 표면에 -110~40MPa 의 값이 나타나고 있는데, 이 때의 맨드릴 반지름은 10.02mm 이었다. 이로부터 잔류원주응력의 분포는 맨드릴 지름에 크게 의존한다는 것을 알 수 있었다.

이 내용을 종합하여 보면, 표면 거칠기는 실린더 벽의 두께가 5mm 이고 피치가 1 또는 2mm 인 경우에서 우수하나, 표면 경도는 실린더 벽의 두께가 5mm 이고 피치가 1mm 인 경우에서 더 우수하였다. 반면에 잔류원주응력은 실린더 벽의 두께가 10mm 이고 피치가 2mm 인 경우가 가장 우수하였다. 따라서 내압 없이 내면의 내마모성이 중요한 경우에는 실린더 벽의 두께가 5mm 이고 피치가 1mm 인 경우가 가장 우수할 것으로 판단된



(A=-100, B=-83, C=-65, D=-47, E=-30, F=-13, G=5, H=23)

Fig. 5 Distributions of the residual circumferential stress near the surface

다. 반면에 내압을 받아 벽에 원주방향으로 인장응력이 유발되는 경우에는 실린더 벽의 두께가 10mm 이고 피치가 2mm 인 경우가 가장 우수할 것으로 판단된다. 버니싱에 의하여 지나치게 많은 소성변형을 받은 표면은 연성이 부족하여 비늘처럼 벗겨지기도 한다.

Fig. 6 에 실린더 벽의 두께가 5mm, 맨드릴의 반지름이 10.03mm, 피치가 1mm 인 경우에서의 하중곡선을 나타내었다. 맨드릴이 표면의 돌출부를 누르면서 지날 때마다 하중이 급격히 증감되므로 전진할 때의 하중곡선은 상단부와 하단부 사이의 진동 형태로, 후진할 때는 거의 0 에 가까운 값을 나타낸다. 여섯 가지 경우에서 맨드릴의 전진행정에서의 하중곡선의 상단부와 하단부의 값을 Table 2 에 비교하였다. 이들은 맨드릴의 반지름과 피치의 크기에 따라 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 하지만 그림에 도시한 경우의 상, 하단부는 다른 경우에 비하여 모두 크게 나타났음을 볼 수 있다. 이 경우는 맨드릴의 전진에 의하여 전진방향으로 밀리는 전단변형의 영역이 맨드릴의 전방까지 넓게 퍼지고, 또 맨드릴과 실린더 내면 사이에는 완전한 접촉이 유지되므로 변형영역이 넓

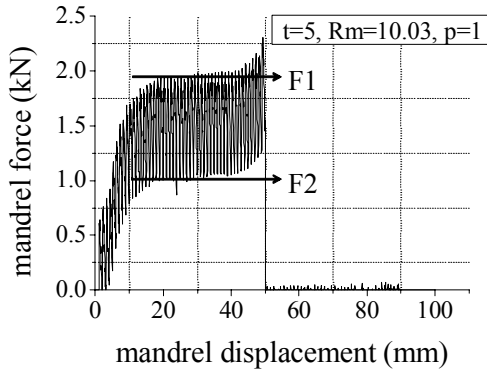


Fig. 6 Variation of the mandrel force

Table 2 Upper and lower limits of the mandrel force(kN)

| t | 5 | | | 10 | | |
|----|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| p | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 0.5 | 1.0 | 2.0 |
| F1 | 0.489 | 1.94 | 1.34 | 0.486 | 0.847 | 1.011 |
| F2 | 0.05 | 1.05 | 0.334 | 0 | 0 | 0 |

어지게 되어 결국 버니싱 하중이 크게 나타났다. 또한 피치가 1mm와 2mm인 경우에서의 맨드릴 진행방향으로의 누적면적을 비교하여 보면, 초기 1mm까지는 전자가 후자에 비하여 누적면적이 더 크므로 전단변형 영역이 맨드릴 전방으로 더 확대되었고, 이 현상은 후기 1mm에서도 지속되는 것을 알 수 있었다.

4. 최적 공정 설계

위에서는 맨드릴의 일 회 왕복에 의한 버니싱 작업에서 나타내는 현상을 분석하였다. 하지만 실제는 맨드릴을 수 차례 왕복시켜 버니싱 효과의 향상을 도모할 수 있다. 실린더 벽의 두께가 5 mm, 피치가 1mm 인 경우에서, 맨드릴 지름을 접힘 결함이 발생하지 않는 한도 내로 증가시키면서 유한요소해석을 수행해 본 결과, 10.03, 10.05, 10.07mm 로 증가시키면서 각 일 회씩 왕복시키면 버니싱 효과가 크게 향상되는 것을 알 수 있었다. Fig. 7 에 실린더 입구에서 25mm 의 위치에서 발생한 유효변형률의 분포를 도시하였다. 표면에서는 0.75, 2.2, 3.4 로 크게 증가한 반면에, 깊이 방향으로 급격히 감소하여 0.3~0.4mm 이상에서는 증가가 미미한 것을 볼 수 있다. Fig 8 에는 동일한 지점에서 깊이 방향으로 발생한 잔류원주응력의

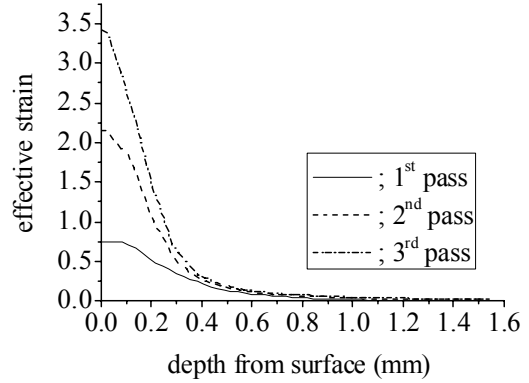


Fig. 7 Variations of the effective strain along the depth from surface

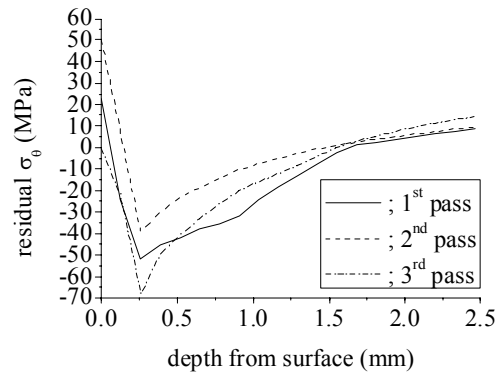


Fig. 8 Variations of the residual circumferential stress along the depth from surface

분포를 도시하였다. 왕복횟수가 증가되면서 표면에서는 24, 50, 0MPa 로 변화하나, 깊이 0.25mm 지점에서는 -52, -38, -68MPa 로 변화하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9 에는 동일한 지점의 표면에서 발생한 반지름, 축, 원주 방향으로의 잔류응력을 비교하였다. 맨드릴이 세 번의 왕복 운동을 하는 동안 이 응력들은 변화하는 것을 볼 수 있다. 반지름 방향 잔류응력은 맨드릴이 그 지점을 지나갈 때 마다 -60, -98, -235MPa로 감소하나, 나머지 동안은 거의 0이었다. 축 방향 잔류응력은 맨드릴이 지나갈 때 마다 -130, -178, -157MPa로 감소하나, 나머지 동안에는 90~160MPa이었다. 원주 방향 잔류응력은 맨드릴이 지나갈 때 마다 -96, -138, -165MPa로 감소하나, 나머지 동안에는 0~80MPa이었다. 크랙이 발생할 가능성도 검토하였는데, 손상지수[11]가 0.1 정도로 이 소재의 파괴한계 0.24에 미치지 못하였다.

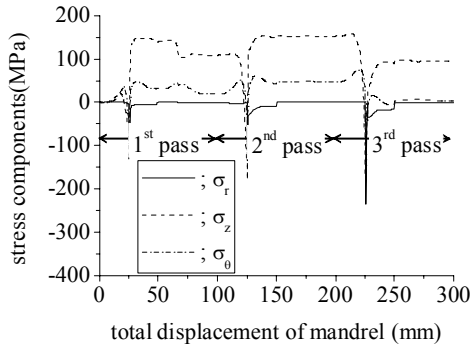


Fig. 9 Variations of stress components during three passes of the mandrel

5. 결론

맨드렐에 의한 실린더 내벽의 버니싱에 대한 탄소성 유한요소해석을 수행하고, 표면의 거칠기와 강도, 잔류응력분포 등을 예측하였다. 맨드렐의 지름을 증가시킬수록 표면 거칠기는 초기 30 μm에서 최고 1μm로 향상될 수 있었다. 하지만 맨드렐의 지름이 너무 커지면 접힘 결함이 발생되므로 유의하여야 한다. 또 표면에서의 유효변형률도 증가하였는데, 이 소재의 유동곡선으로부터 0.6~0.8 이상에서는 가공경화 효과는 미미하고 연성만 비례적으로 감소됨을 예측할 수 있다. 맨드렐 세 번 왕복 후 원주 방향 잔류응력은 표면에서는 0MPa를, 약 0.25mm 깊이에서는 최저 -68 MPa의 값을 나타내었다.

실린더 벽의 두께가 5mm, 피치가 1mm인 경우, 내마모성이 중요하다면 지름 10.03mm인 맨드렐로 일 회 왕복하는 공정이 바람직하다. 하지만 동적 내압을 견디는 능력이 중요하다면, 원주 방향 잔류응력이 낮아야하므로 위에서 언급한 최적공정을 적용하는 것이 바람직하다.

후 기

이 논문은 2009학년도 홍익대학교 학술연구진 흥비에 의하여 지원받았습니다. 그림과 표의 작성을 도와준 김자람 군에게 감사를 전합니다.

참 고 문 헌

- [1] A. M. Hassan, A. S. Al-Bsharat, 1996, Improvements in some properties of non-ferrous metals by the application of the ball-burnishing process, *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 59, pp. 250~256.
- [2] A. M. Hassan, 1997, The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals, *J. Mat. Process. Technol.*, Vol.72, pp. 385~391.
- [3] A. M. Hassan, H. F. Al-Jalil, A. A. Ebied, 1998, Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components, *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 83, pp. 176~179.
- [4] F. Klocke, J. Liermann, 1998, Roller burnishing of hard turned surfaces, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 38, pp. 419~423.
- [5] M. H. El-Axir, 2000, An investigation into roller burnishing, *Int. J. of Mach. Tools Manufact.*, Vol.40, pp. 1603~1617.
- [6] M. M. El-Khabeery, M. H. El-Axir, 2001, Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity, *Int. J. of Mach. Tools Manufact.*, Vol. 41, pp. 1705~1719.
- [7] M. H. Ex-Axir, M. M. El-Khabeery, 2003, Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials, *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 132, pp. 82~89.
- [8] M. M. El-Axir, A. A. Ibrahim, 2005, Some surface characteristics due to center rest ball burnishing, *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 167, pp. 47~53.
- [9] L. Luca, S. Neagu-Ventzel, I. Marinescu, 2005, Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels, *Precision Engineering*, Vol. 29, pp. 253~256.
- [10] Y. C. Yen, P. Sartkulvanich, T. Altan, 2005, Finite element modeling of roller burnishing process, *CIRP Annals*, Vol. 54, pp. 237~240.
- [11] S. I. Oh, C. C. Chen, S. Kobayashi, 1979, Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing, *Trans. ASME, J. Engr. Ind.*, Vol. 101, pp. 36~43.