

인발 선재의 잔류응력에 미치는 공정변수의 영향 및 잔류응력 완화

이상곤¹ · 황원호¹ · 김병민[#] · 배철민²

Influence of Process Parameters on Residual Stress and Reducing Residual Stress in Drawn Wire

S. K. Lee, W. H. Hwang, B. M. Kim, C. M. Bae

(Received August 19, 2005)

Abstract

The influence of process parameters in drawn wire on residual stresses was investigated. Based on a FE-simulation of the wire drawing process, the effects of process parameters such as semi-die angle, reduction, friction coefficient and bearing length on the residual stresses were investigated. The validity of the FE-simulation results was verified by the comparison of the previous simulated results with experimental data. In this study, semi-die angle and die reduction have significant effect on the residual stresses at the surface of drawn wire. Several methods such as, addition of axial tension, application of skin pass, straightening in multi-roll straightener etc, were suggested in the previous studies to reduce the residual stresses. In this study, the results show that the concurrent application of skin pass with low die reduction and low semi-die angle at the final stage of drawing operation reduces dramatically the both axial and hoop residual stresses after drawing

Key Words : Residual Stress, Wire Drawing, Process Parameters, FE-Simulation, Skin Pass, Low Semi-Die Angle

1. 서 론

인발공정은 봉재, 선재 혹은 관재를 하나 혹은 여러 개의 다이스 사이로 잡아 당겨 단면적을 줄이는 가공법으로 현수교의 케이블, 자동차 타이어 보강용 스틸 코드 생산 등 산업적으로 광범위하게 사용되고 있다[1~2]. 인발공정 시 다이스를 통과한 소재는 표면부 부근에 변형이 집중되어 중심부와 표면부 사이의 변형을 분포가 불균일하다. 이로 인하여 인발된 소재의 표면부에 잔류응력이 발생하게 된다. 특히, 표면부에서 발생하는 인장 잔류응력의 경우 제품의 진작도 저하, 응력부식균

열(SSC) 촉진 및 피로수명 저하를 야기시켜 제품의 기계적 성질 및 제품수명을 현저히 단축시킨다[3~7]. 따라서, 인발공정 시 제품의 잔류응력을 감소시키는 것이 상당히 중요하다. 인발 후 잔류응력은 공정변수에 많은 영향을 받으며, 이에 관한 몇몇 연구도 진행되었다[8~12].

본 연구에서는 탄소성 유한요소해석을 통하여 인발공정 시 주요 공정변수인 다이 반각, 감면율, 마찰계수, 그리고 다이 베어링 길이가 잔류응력에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

또한, 인발 후 잔류응력 감소를 위해 기존 연구에서 제시한 마지막 스킨패스(skin pass) 공정에 대

1. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
2. POSCO 선재연구그룹
교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소,
E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

하여 감면율에 따른 잔류응력 감소효과, 그리고 마지막 패스의 다이 반각에 따른 잔류응력 감소 효과를 평가 하였다[13~14]. 뿐만 아니라, 위의 두 방법을 동시에 적용한 경우에 있어서도 잔류응력 감소 효과를 평가 하였다.

2. 유한요소해석

인발 후 강선의 잔류응력을 평가하기 위하여 본 연구에서는 유한요소 해석 S/W DEFORM-2D[15] 탄소성 해석을 이용하였다. Fig. 1 에 유한요소 해석 모델을 나타내었다.

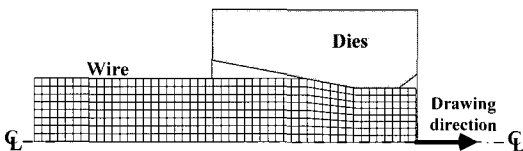


Fig. 1 2D-axisymmetric FE model for wire drawing

본 연구에서는 우선 탄소성 유한요소해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 J. M. Atienza 등[1]이 수행한 해석 및 중성자 회절로 측정된 잔류응력 분포 결과에 대하여 동일한 조건으로 탄소성 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 비교 하였다. Fig. 2 는 축방향 잔류응력분포 결과를 비교한 것으로, 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

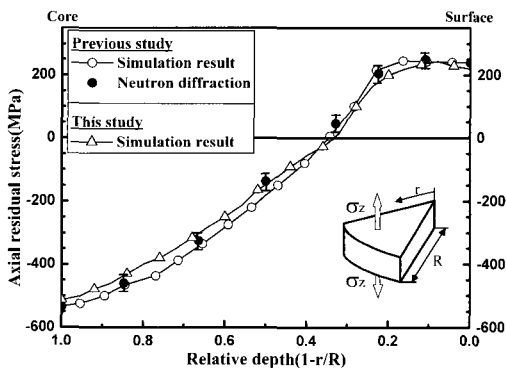


Fig. 2 Comparison of axial residual stress between previous and this study

2.1 소재 물성치

본 연구에서 적용한 강선은 타이어 보강재로 사용되는 고탄소강 AISI1075 로 초기 직경은

2.0mm 이다. Table 1 에 화학성분을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition range of the initial wire

Chemical element	Percent %
C	0.70 ~ 0.75
Si	0.15 ~ 0.25
Mn	0.40 ~ 0.60
S	0.02↓
P	0.02↓

소재는 등방성으로 가정하였으며, MTS 를 이용한 단축인장시험을 통하여 확보한 초기 강선의 유동응력식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 2194.5\bar{\epsilon}^{0.205} [MPa] \quad (1)$$

잔류응력은 소재가 다이를 완전히 빠져나와 다 이와의 접촉이 전혀 없는 상태에서 측정하였다.

2.2 공정변수

인발 후 강선의 잔류응력에 영향을 미치는 공정변수로 본 연구에서는 다이 반각, 감면율, 마찰계수, 그리고 베어링 길이를 채택하였다. 초기 직경 2.0mm 에 대하여 공정변수 조건에 대한 해석을 수행하여, 축방향 및 원주방향 잔류응력 분포를 평가하였다.

다이 반각(°) : 다이 반각이 잔류응력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 다이 반각을 3°에서 13°까지 2°씩 증가시켜 해석을 수행하였다. 이때, 감면율(R), 마찰계수(μ), 베어링 길이는 각각 15.0%, 0.08, 그리고 0.3D₀(D₀:초기 선경)로 설정하였다.

다이 감면율(R) : 5%에서 30%까지 감면율을 5%씩 증가시켜 잔류응력에 미치는 영향을 평가하였다. 다이 반각(°), 마찰계수(μ), 베어링 길이는 각각 7°, 0.08, 그리고 0.3D₀이다.

마찰계수(μ) : 마찰계수의 영향을 평가하기 위하여 다이 반각 7°, 감면율 15.0%, 베어링 길이 0.3D₀에 대하여 실제 습식 인발작업 시 마찰계수 범위인 0.04 에서 0.1 까지 0.02 씩 마찰계수를 증가시켜 잔류응력을 평가하였다.

베어링 길이(mm) : 베어링 길이는 초기 강선 직경(D₀)에 대하여 0.3 D₀, 0.4 D₀, 0.5 D₀로 설정하여 그 영향을 평가하였다. 이때, 다이 반각은 7°, 감면율은 15.0%, 그리고 마찰계수는 0.08 로 설정하였다.

3. 유한요소 해석 결과

Fig. 3 과 Fig. 4 에 다이 반각에 따른 축방향 및 원주방향 잔류응력 분포를 나타내었다. 결과로부터 다이 반각이 작을수록 축방향 및 원주방향 모두 잔류응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 특히, 축방향의 표면 인장잔류응력의 경우 다이 반각이 작아질수록 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다.

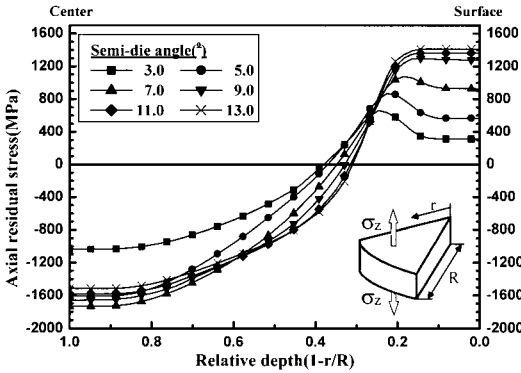


Fig. 3 Distribution of axial residual stress for different semi-die angle(°)

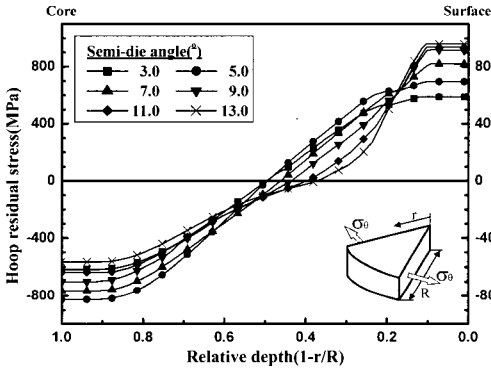


Fig. 4 Distribution of hoop residual stress for different semi-die angle(°)

Fig. 5 와 Fig. 6 은 다이 감면율에 따른 축방향 및 원주방향 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5 의 결과에서 감면율 5%~25%에서는 감면율이 증가할수록 축방향 잔류응력은 감소하는 경향을 나타내고 있으나, Fig. 6 의 원주방향 잔류응력의 경우, 축방향과 반대로 감면율이 높을수록 증가하는 경향을 나타내고 있다.

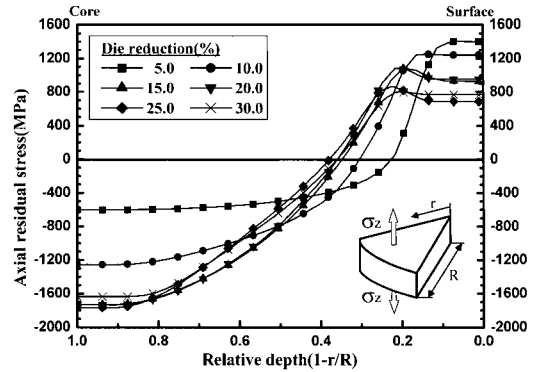


Fig. 5 Distribution of axial residual stress for different die reduction(%)

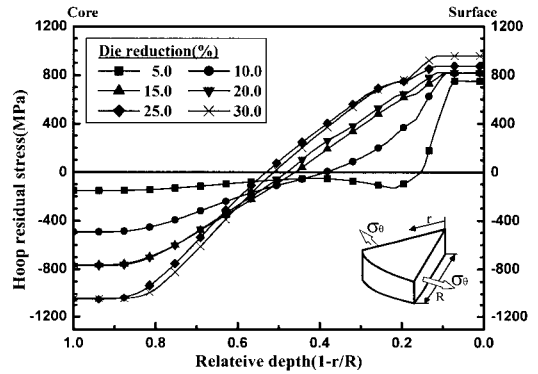


Fig. 6 Distribution of hoop residual stress for different die reduction(%)

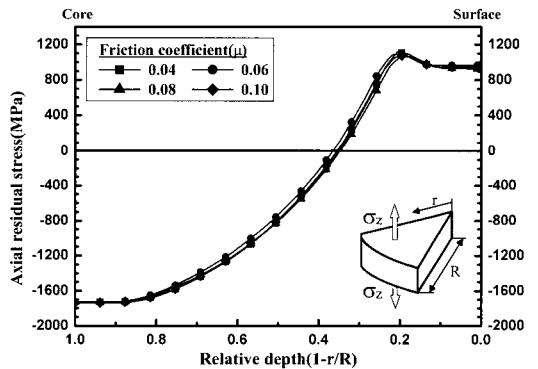


Fig. 7 Distribution of axial residual stress for different friction coefficient(μ)

Fig. 7 과 Fig. 8 은 마찰계수 변화에 따른 축방향 및 원주방향 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 해석결과 마찰계수 변화에 따른 잔류응력분포의 변

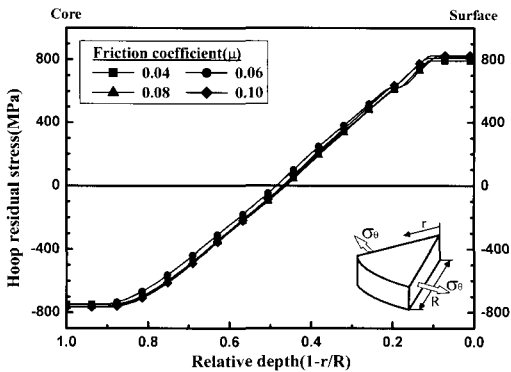


Fig. 8 Distribution of hoop residual stress for different friction coefficient(μ)

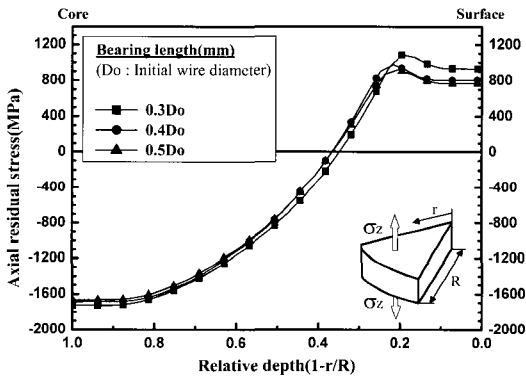


Fig. 9 Distribution of axial residual stress for different bearing length(mm)

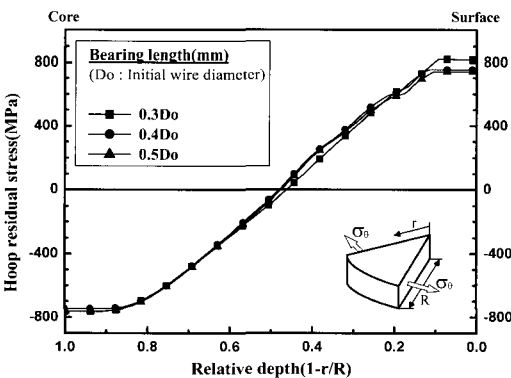


Fig.10 Distribution of hoop residual stress for different bearing length(mm)

화는 거의 없음을 알 수 있다. 따라서, 마찰계수의 경우 다이 반각 및 다이 감면율에 비해 상대적으로 잔류응력 변화에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

다이 베어링 길이 변화에 따른 잔류응력 변화는 Fig. 9 와 Fig. 10 에 나타내었다. Fig. 9 와 Fig. 10 에서 베어링 길이가 길어질수록 축방향 및 원주 방향의 표면 인장 잔류응력이 다소 감소함을 알 수 있다.

이상의 결과에서 인발공정에 있어서 다이 반각과 다이 감면율이 인발 후 잔류응력 분포 및 크기에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서, 적절한 다이 반각과 다이 감면율 설정을 통하여 인발 후 제품의 잔류응력을 감소시킬 수 있을 것이다.

4. 잔류응력 감소 방법

기존의 연구결과에서 인발 후 제품의 잔류응력 감소를 위한 몇 가지 방법이 제시되었다[10-11]. 그 대표적인 방법으로 스킨패스(skin pass) 적용, 스트레이트닝 롤러(straightening roller) 적용, 저 다이 반각(low semi-die angle) 적용 등이 있다.

본 연구에서는 인발 후 제품의 잔류응력 감소를 위하여 다음의 세 가지 방법에 대한 잔류응력 감소 효과를 비교·평가 하였다.

4.1 스킨패스 적용

Table 2 Simulation conditions for the effect of skin pass

Process	Process conditions	Value
1 st drawing	Semi-die angle(°)	7
	Friction Coeff.(μ)	0.08
	Bearing length(mm)	0.3D ₀
	Reduction(%)	15.0
Skin pass	Semi-die angle(°)	7
	Friction Coeff.(μ)	0.08
	Bearing length(mm)	0.3D ₀
	Reduction(%)	1, 2, 3, 5

마지막 스킨패스가 잔류응력 완화효과에 미치는 영향을 평가하기 위하여 직경 2.0mm 의 초기 강선을 감면율 15.0%로 1 차 인발을 수행한 후, 2 차 스킨패스 공정의 감면율을 1%, 2%, 3%, 5%로 변화시켜 잔류응력 감소 효과를 평가하였다. Table 2 에 스킨패스 효과를 평가하기 위한 해석 조건을 나타내었다.

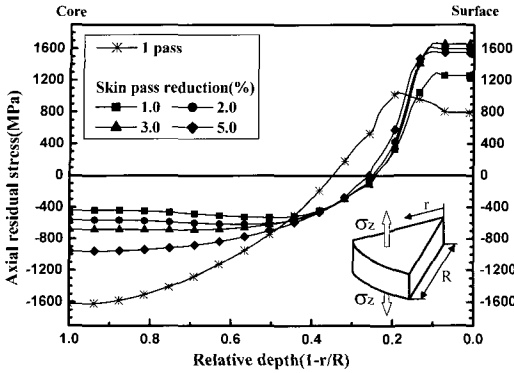


Fig. 11 Distribution of axial residual stress for different skin pass reduction(%)

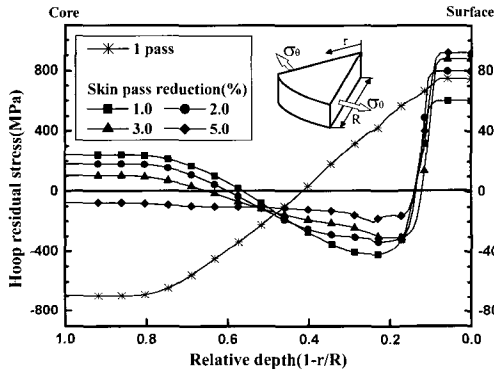


Fig. 12 Distribution of hoop residual stress for different skin pass reduction(%)

Fig. 11 과 Fig. 12 는 스킨패스의 감면율에 따른 축방향 및 원주방향 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 11 에서 축방향 잔류응력의 경우 감면율 1%~5% 사이에서 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 12 의 원주방향 잔류응력의 경우 감면율이 1%로 낮은 경우에는 감소하였지만, 2% 이상인 경우 오히려 증가함을 알 수 있었다.

4.2 저 다이 반각 적용

저 다이 반각을 적용한 경우의 잔류응력 완화 효과를 평가하기 위하여 초기 직경 2.0mm 강선에 대하여 우선 다이 감면율 15.0%로 1 차 인발을 수행하고 다시 감면율 15.0%로 2 차 인발을 실시하였다. 이때 2 차 인발공정에 있어서 다이 반각을 1°, 2°, 3°, 5°로 설정하여 잔류응력 분포를 평가하였다. Table 3 에 저 다이 반각 적용을 위한 해석 조건을 나타내었다.

Table 3 Simulation conditions for low semi-die angle

Process	Process conditions	Value
1 st drawing	Semi-die angle(°)	7
	Friction Coeff.(μ)	0.08
	Bearing length(mm)	0.3D _o
	Reduction(%)	15.0
2 nd drawing	Semi-die angle(°)	1, 2, 3, 5
	Friction Coeff.(μ)	0.08
	Bearing length(mm)	0.3D _o
	Reduction(%)	15.0

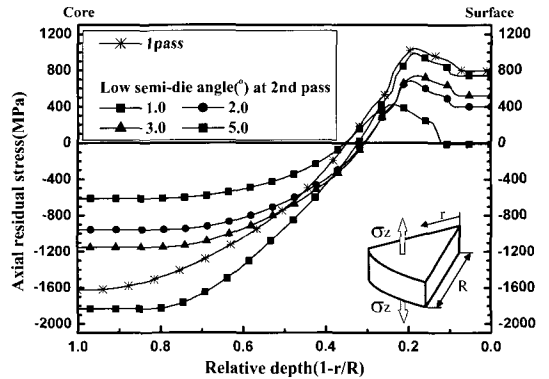


Fig. 13 Distribution of axial residual stress for different low semi-die angle(°)

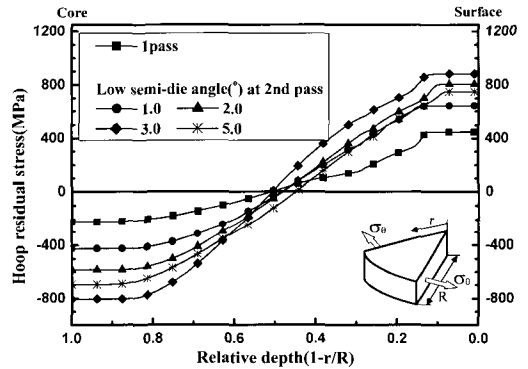


Fig. 14 Distribution of hoop residual stress for different low semi-die angle(°)

Fig. 13 과 Fig. 14 는 저 다이 반각에 따른 축방향 및 원주방향 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 다이 반각이 작아질수록 잔류응력은 감소하는 것을 알 수 있었다. 특히, 다이 반각 1°를 적용할 경우 표면에서의

축방향 잔류응력이 zero 부근까지 완화 됨을 알 수 있다.

4.3 스킨패스와 저 다이 반각 동시 적용

이상의 결과에서 알 수 있듯이 감면율이 낮은 스킨패스를 적용할 경우 원주방향의 잔류응력 완화 효과는 있지만 축방향 잔류응력의 경우 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 저 다이 반각을 적용할 경우, 축방향의 잔류응력은 거의 zero 에 가까운 값을 나타내었지만, 원주방향의 잔류응력 완화 효과는 상대적으로 적었다. 따라서, 본 연구에서는 스킨패스와 저 다이 반각을 동시에 적용한 경우에 대한 잔류응력 완화 효과를 평가하였다. 초기 직경 2.0mm 강선에 대하여 15.0%와 14.1%로 각각 1차, 2차 인발 후 마지막 3번째 패스에서 감면율 1%, 다이 반각 1°로 스킨패스를 적용한 후 잔류응력 분포를 평가하였다. Table 4에 해석 조건을 나타내었다.

Table 4 Simulation conditions for the effect of skin pass with light die reduction and low semi-die angle

Process	Process conditions	Value
Two passes drawing	Semi-die angle(°)	7
	Friction Coeff.(μ)	0.08
	Bearing length(mm)	0.3Do
	Reduction (%)	1 st drawing: 15.0 2 nd drawing: 14.1
Skin pass	Semi-die angle(°)	1
	Friction Coeff.(μ)	0.08
	Bearing length(mm)	0.3Do
	Reduction(%)	1.0

Fig. 15와 Fig. 16에 스킨패스와 저 다이 반각을 동시에 적용한 경우에 대한 축방향 및 원주방향 잔류응력 분포를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 두 방법을 동시에 적용할 경우 축방향 및 원주방향 잔류응력을 모두 현저히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 특히, 제품의 수명에 직접적인 영향을 미치는 표면부 인장 잔류응력이 거의 zero에 가까움을 알 수 있다.

Fig. 18과 Fig. 19에 저 다이 반각을 스킨패스

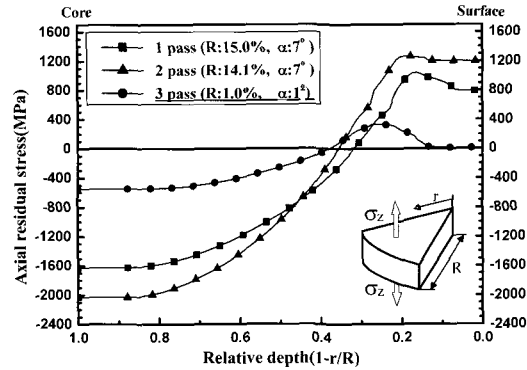


Fig.15 Distribution of axial residual stresses for skin pass with low semi-die angle

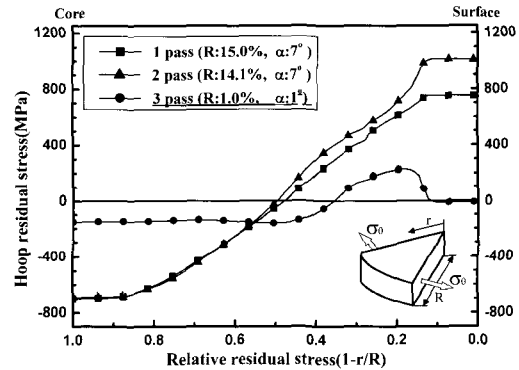
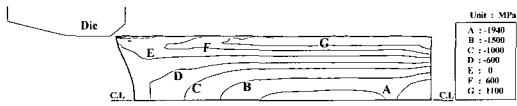


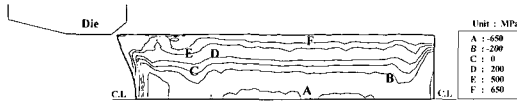
Fig.16 Distribution of hoop residual stresses for skin pass with low semi-die angle

공정을 적용하지 않은 경우와 적용한 경우에 대한 잔류응력 분포를 나타내었다. Fig. 18은 초기 직경 2.0mm 강선을 15.0%의 감면율로 2 패스 인발한 최종 직경 1.7mm 강선의 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 18에서 축방향 및 원주방향 모두 표면부에서 인장 잔류응력이 상당히 높음을 알 수 있다. Fig. 19는 동일한 총단면감소율에 대하여 Table 4의 조건으로 인발한 강선의 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 저 다이 반각과 저감면율 스킨패스를 동시에 적용할 경우 표면부의 인장 잔류응력이 상당히 낮아짐을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 기존 연구에서 제시한 스킨패스와 저 다이 반각을 각각 적용하는 것 보다도 두 방법을 동시에 적용할 경우 축방향 및 원주방향의 잔류응력을 현저히 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

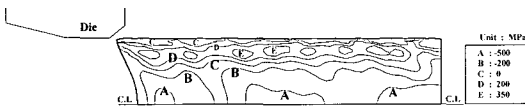


(a) Axial residual stress after two pass

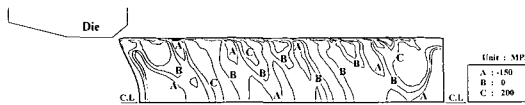


(b) Hoop residual stress after two pass

Fig.18 Distribution of residual stress after two passes



(a) Axial residual stress after skin pass with low semi-die angle



(b) Hoop residual stress after skin pass with low semi-die angle

Fig.19 Distribution of residual stress after skin pass with low semi-die angle

5. 결론

이상의 연구로부터 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 인발과정 시 마찰계수와 베어링 길이에 비해 다이 반각과 다이 감면율이 인발 후 강선의 잔류응력 크기 및 분포가 큰 영향을 미친다.

(2) 다이 반각이 작을수록 인발 후 잔류응력이 감소하였다.

(3) 5%~30%의 다이 감면율에 대하여 감면율이 증가함에 따라 축방향 잔류응력은 감소하였지만, 원주방향 잔류응력의 경우 표면부에서 증가하였다.

(4) 스킨패스를 적용한 경우 감면율이 1%인 경우에 있어서 원주방향 잔류응력은 다소 감소하였으나, 축방향 잔류응력의 경우 오히려 증가하였다.

(5) 다이 반각이 1°인 저 다이 반각을 적용한

경우 두 방향 잔류응력이 모두 감소하였으며, 특히, 축방향 잔류응력의 경우 표면부에서 거의 zero에 가까운 값을 나타내었다.

(6) 감면율 1%, 다이 반각 1°를 동시에 적용한 경우 스킨패스와 저 다이 반각을 각각 적용한 경우보다도 잔류응력 완화 효과가 월등히 우수하였다.

참고 문헌

- [1] J. M. Atienza, J. Ruiz-Hervias, M. L. Martinez-Perez, F. J. Mompeam, M. Garcia-Hernandez, M. Elice, 2005, Residual stresses in cold ferritic rods, *Scrip. Mater.* Vol. 52, pp. 305~309.
- [2] Y. Shiota, Y. Tomota, A. Moriai, T. Kamiyama, 2005, Structure and mechanical behavior of heavily drawn pearlite and martensite in a high carbon steel, *Metals and Materials Int.*, Vol. 11, No. 5, pp. 371~376.
- [3] P. Renz, W. Steuff, R. Kopp, January 1996, Possibilities of influencing residual stress in drawn wires and bars, *Wire J. Int.*, pp. 64~69.
- [4] S. S. Vijayakar, November 1995, Optimization of die geometry and drawing parameters in high-strength cord production, *Wire J. Int.*, pp. 79~85.
- [5] E. Arnoudt, March 1989, Materials response to wiredrawing, *Wire J. Int.*, pp. 79~85.
- [6] G. Baker, R. Wright, April 1992, Drawing research with high speed single die block, *Wire J. Int.*, pp. 71~80.
- [7] Z. Zimmerman, R. Henry, September 1984, Drawing fine wire on wet wiredrawing machines, *Wire J. Int.*, pp. 134~140.
- [8] N. Kunntani, M. Asakawa, 1984, Analysis of residual stress induced by bar and wire drawing, *J. of JSTP*, Vol. 38, pp. 43~49.
- [9] A. Nakagiri, K. Mathukawa, S. Watanabe, Y. Sasagawa, 1998, Influence of die-wire contact length ratio on chevron crack and optimum drawing condition in wire drawing, *J. of JSTP*, Vol. 39, pp. 90~97.
- [10] T. Kuboki, M. Akiyama, Y. Neishi, K. Kuroda, 2001, Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 28, pp. 65~71.

- [11] T. Kuboki, H. Yoshikawa, Y. Meishi, K. Kuroda, M. Akiyama, 2001, Influence of back-tension on effect of skin pass in minimizing residual stress levels after cold rod drawing, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 28, pp. 117~121.
- [12] M. Akiyama, T. Kuboki, 2002, Optimization of method for residual stress after cold bar drawing, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 9, pp. 101~106.
- [13] Skolyszewski, J. Luksza, M. Paćko, 1996, Some problems of multi-stage fine wire drawing of high-alloy steels and special alloys, *J. of Mat. Process. Tech.* Vol. 60, pp. 155~160.
- [14] M. Akiyama, T. Kuboki, 2002, Reduction in residual stress after cold bar drawing, *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 361~366.
- [15] SFTC, 1995, DEFORMTM-2D.