[논문] 한국소성가공학회지, 제 26 권 제 3 호, 2017
Transactions of Materials Processing, Vol.26, No.3, 2017
https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.3.162

수치해석을 이용한 탄소강 다단 신선 와이어 표면 잔류응력 예측

이선봉[1] · 이인규[2] · 정명식[2] · 김병민[3] · 이상곤[#]

Prediction of Surface Residual Stress of Multi-pass Drawn Steel Wire Using Numerical Analysis

S. B. Lee, I. K. Lee, M. S. Jeong, B. M. Kim, S. K. Lee
(Received March 20, 2017 / Revised April 26, 2017 / Accepted May 18, 2017)

Abstract

The tensile surface residual stress in the multi-pass drawn wire deteriorates the mechanical properties of the wire. Therefore, the evaluation of the residual stress is very important. Especially, the axial residual stress on the wire surface is the highest. Therefore, the objective of this study was to propose an axial surface residual stress prediction model of the multi-pass drawn steel wire. In order to achieve this objective, an elastoplastic finite element (FE) analysis was carried out to investigate the effect of semi-die angle and reduction ratio of the axial surface residual stress. By using the results of the FE analysis, a surface residual stress prediction model was proposed. In order to verify the effectiveness of the prediction model, the predicted residual stress was compared to that of a wire drawing experiment.

Key Words : Multi-pass Drawn Wire, Surface Residual Stress, Prediction Model, Finite Element Analysis

1. 서 론

다단 신선(multi-pass drawing)공정은 초기 와이어를 여러 개의 다이(die)를 통과시켜 원하는 직경의 와이어를 제조하는 성형공정이다. 스틸(steel) 와이어의 경우 교량용 케이블, 타이어 코드(tire cord), 스프링(spring) 등에 폭넓게 활용된다[1~6]. 인발공정의 경우, 다이 통 시 다이와 접촉하는 소재 표면부와 중심부의 변형량 차이로 인한 불균일한 변형, 그리고 발생열 등으로 인해 와이어 표면 및 내부에 잔류응력(residual stress)이 발생하게 된다[7].

지금까지 인발공정 시 와이어에 발생하는 잔류응력에 관한 다양한 연구들이 수행되었다. Atienza 등은 XRD 를 이용하여 신선된 와이어의 3 방향에 대한 잔류응력을 평가하였다[8]. Ö verstam 는 유한요소해석을 통해 다이 랜드부 길이가 잔류응력에 미치는 영향을 평가하였다[9]. Kuboki 등은 잔류응력 발생 기구를 설명하였으며, 잔류응력 완화를 위한 다이 형상을 제안하였다[10~12]. Ko 등은 유한요소해석을 이용하여 공정변수가 잔류응력에 미치는 영향을 평가하였다[13]. Lee 등은 신선된 고탄소강 와이어의 잔류응력을 평가하였다[14].

신선 후 와이어 내부에 발생하는 잔류응력은 Fig. 1 에서 보듯이, 축방향 잔류응력(axial residual stress), 원주방향 잔류응력(hoop residual stress), 그리고 반경방향 잔류응력(radial residual stress)으로 구분되며, 세 성분 중 표면부의 축방향 잔류응력이 가장 크다.

와이어 내부 혹은 표면에 인장잔류응력 발생 시

1. 계명대학교 기계자동차공학과
2. 한국생산기술연구원 극한가공기술그룹
3. 부산대학교 기계공학부
Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology, E-mail: sklee@kitech.re.kr

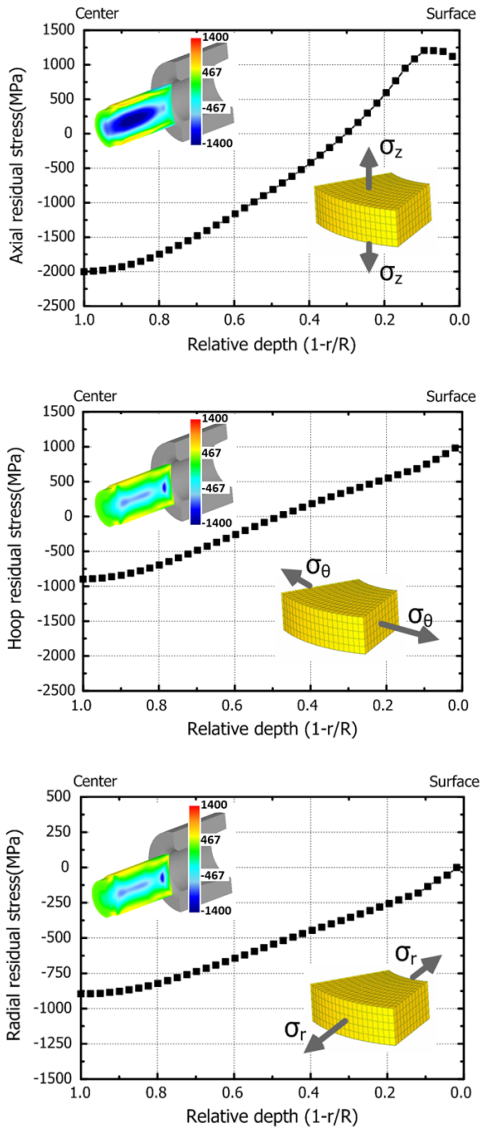

Fig. 1 Distribution of residual stress in drawn wire

와이어 강도저하 등 기계적 성질을 저하시킨다. 따라서, 잔류응력예측이 가능할 경우 와이어의 기계적 성질 평가를 위한 데이터로 활용 가능하다.

따라서, 본 연구에서는 탄소강 와이어 다단 신선공정 시 와이어 표면에서 발생하는 축방향 잔류응력 예측 모델을 제안하였다. 이를 위해 먼저, 탄소성(elastoplastic) 유한요소해석을 통해 감면율(reduction ratio)과 다이 반각(semi-die angle)이 와이어 표면 잔류응력에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 해석결과를 이용하여 감면율과 다이 반각으로 표현되는 표면 잔류응력 예측식을 제안하였으며, 신선 와이어의 잔류응력을 측정하여 그 타당성을 검증하였다.

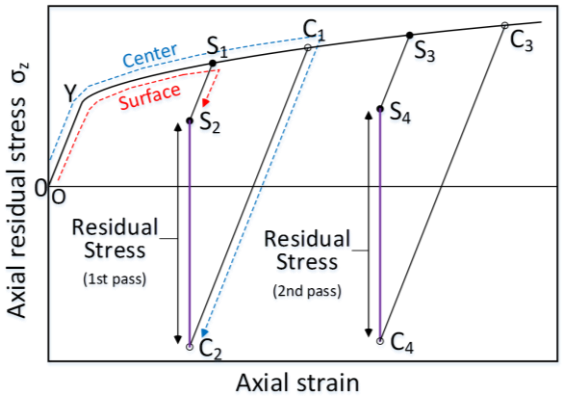

Fig. 2 Mechanism of axial residual stress of multi-pass drawn wire

2. 신선 와이어 잔류응력

Fig. 1 의 와이어 잔류응력 분포에서 알 수 있듯이, 축방향 잔류응력과 원주방향 잔류응력은 중심부에서 압축(compressive)이지만 표면부로 갈수록 인장(tensile)으로 바뀌며, 표면에서 최대 인장응력이 발생한다. 반경방향 잔류응력은 중심부에서 압축이지만, 표면부의 경우 경계조건(boundary condition)으로 인해 잔류응력은 제로(zero)다.

와이어(drawn wire) 잔류응력 성분 중 표면부에 발생하는 인장잔류응력은 와이어의 인장강도 저하, 표면 크랙 진전(crack propagation) 등 와이어의 기계적 성질을 저하시키는 원인이다. 따라서, 와이어 표면부에 발생하는 인장잔류응력의 예측 및 저하는 매우 중요하다.

Akiyama 등은 신선 후 와이어에 발생하는 축방향 잔류응력 발생 기구를 설명하였다[15]. Fig. 2는 축방향 잔류응력 발생기구를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 점 S와 C는 각각 와이어의 표면부과 중심부를 나타낸다. 신선 시 축방향 변형량은 다이와 직접적인 접촉이 발생하지 않는 중심부가 표면부 보다 높다. 따라서, 와이어가 첫 다이를 통과하는 동안 표면부 변형은 O → Y → S_1으로, 중심부는 O → Y → C_1으로 변한다. 이후 와이어가 첫 번째 다이를 완전히 통과한 후에는 표면부와 중심부의 불균일한 변형이 탄성적 균형을 맞추기 위해서 표면부는 S_1에서 S_2로, 중심부는 C_1에서 C_2로 이동된다. Fig. 2에서 보듯이, S_2와 C_2는 균형이 이루어진 지점이다. 이와 같이 축방향 변형량이 많은 중심부와 변형량이 적은 표면부가

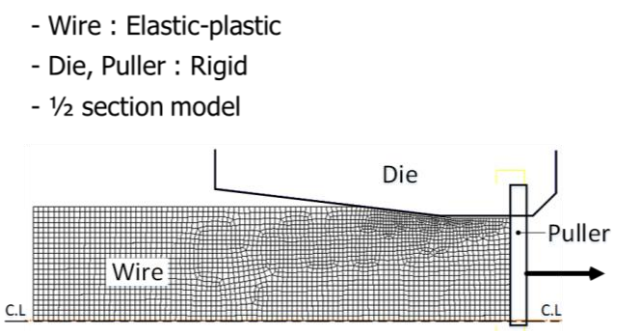

Fig. 3 Initial FE analysis model

Table 1 Conditions for FE analysis

Conditions	Value
Number of passes	23
Wire material	AISI 1072
Initial wire diameter (mm)	1.050
Final wire diameter (mm)	0.188
Bearing length of die (mm)	0.3 × initial wire diameter
Semi-die angle (^{o})	5.0, 6.0, 7.0, 8.0
Flow stress of initial wire (MPa)	$\bar{\sigma} = 2194.5 \cdot \bar{\varepsilon}^{0.205}$
Yield strain	0.0056
Young's modulus (GPa)	210.0
Poisson's ratio (ν)	0.3

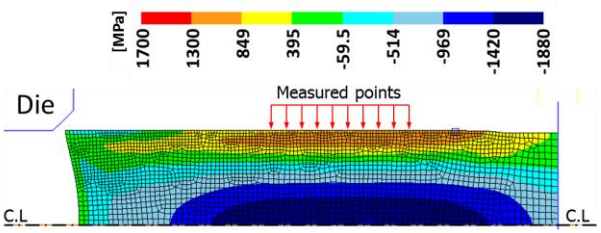

Fig. 4 Surface axial residual stress after drawing

변형 균형을 맞춤으로 인해 중심부는 압축 잔류응력이, 그리고 표면부는 인장 잔류응력이 발생하게 된다. 두 번째 다이 통과 후에서 첫 번째 다이 통과 시와 동일한 기구로 잔류응력이 발생하게 된다. 따라서, 표면부는 $S_2 \rightarrow S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4$ 로, 중심부는 $C_2 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$로 이동하게 된다.

3. 다단 신선공정 탄소성 유한요소해석

이전 연구결과들에 의하면 잔류응력은 공정변수에 많은 영향을 받는다[10,11,13]. 특히, 다이 반각

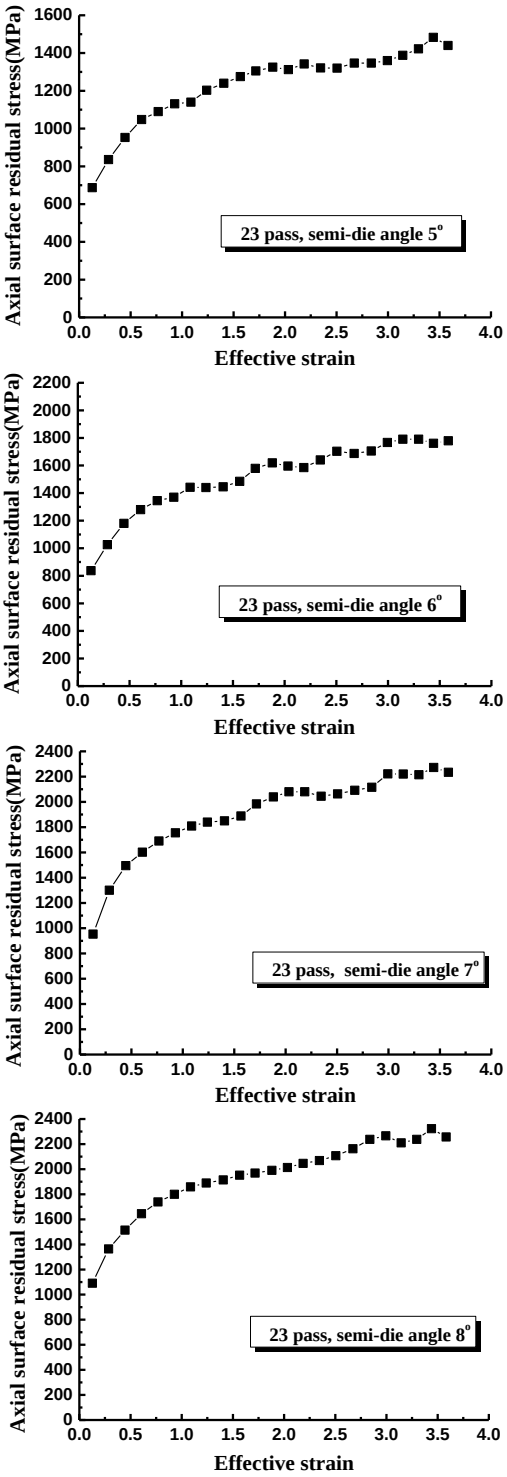

Fig. 5 Surface axial residual stress in accordance with strain and semi-die angle

(semi-die angle), 감면율(reduction ratio), 그리고 소재 유동응력(flow stress curve)가 많은 영향을 미친다.

먼저, 본 연구에서는 탄-소성 유한요소해석을 통

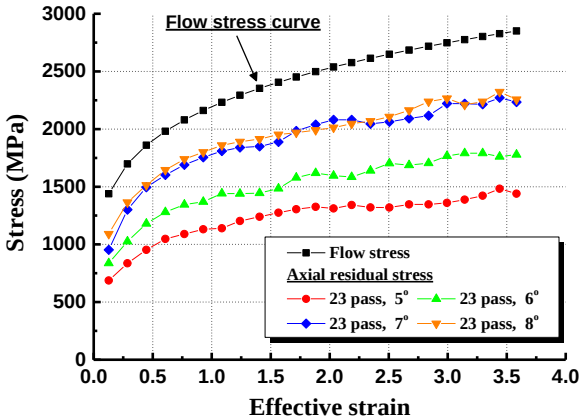

Fig. 6 Flow stress and surface axial residual stress

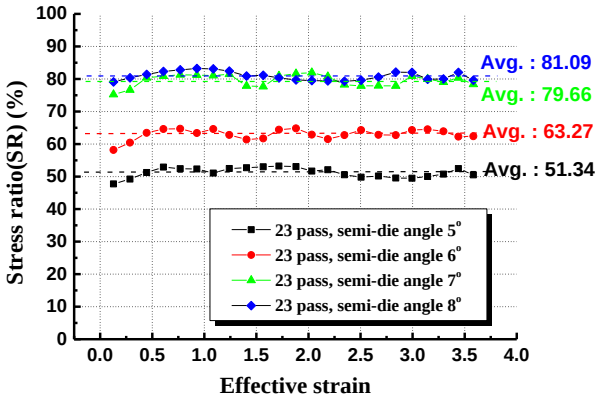

Fig. 7 Stress ratio between flow stress and surface axial residual stress

해 다단 신선공정 시 와이어 표면에 발생하는 축방향 잔류응력을 평가하였다. 유한요소해석은 상용해석 소프트웨어인 DEFORM-2D로 수행되었다. 적용 소재는 AISI 1072 고탄소강 와이어이며, 23패스 공정이 적용되었다. 초기 선재직경과 최종 선재직경은 각각 1.050 mm와 0.188 mm이다. Fig. 3에 초기 유한요소해석 모델을 나타내었으며, 기타 유한요소해석 조건은 Table 1에 나타내었다.

해석 후 잔류응력은 Fig. 4에서 보듯이 와이어가 다이를 완전히 통과한 후 와이어 표면부 10 포인트에 대한 평균값으로 평가하였다.

Fig. 5에 각 해석조건에 따른 표면 축방향 잔류응력(surface axial residual stress)를 나타낸 것이다. 패스 증가에 따른 변형률이 증가할수록 잔류응력이 증가함을 알 수 있다. 또한, 동일한 변형률에 대하여 다이 반각이 높을수록 잔류응력이 높음을 알 수 있다. 이는 다이 반각이 높을 경우 와이어 표면부와 중심부의 변형 불균일이 증가하기 때문이다.

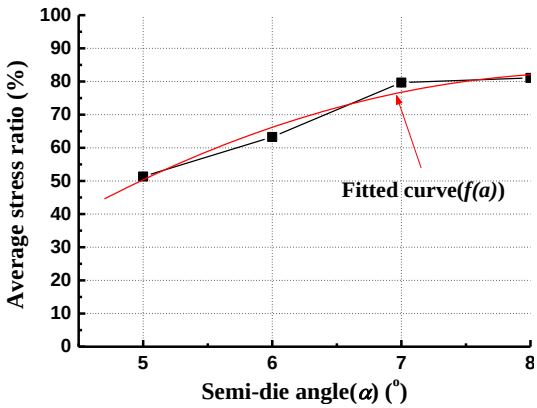

Fig. 8 Average stress ratio according to semi-die angle

4. 축방향 표면 잔류응력 예측 및 평가

Fig. 6 은 초기 와이어의 유동응력(flow stress curve)과 잔류응력을 함께 나타낸 그래프이다. Fig. 6 에서 보듯이 잔류응력은 소재의 유동응력과 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 식(1)과 같이 유동응력과 잔류응력의 비(ratio)인 응력비(stress ratio: *SR*)를 나타낸 것이다.

$$SR[\%] = ES / RS \times 100 \tag{1}$$

여기서, *ES*는 유효응력(effective stress), *RS*는 표면부 축방향 잔류응력(surface axial residual stress)이다. Fig. 7 에서 다이 반각 변화에 따라 *SR*은 거의 일정한 값을 나타내고 있다. *SR*의 평균값은 다이반각 5°, 6°, 7°, 그리고 8°일 때 각각 51.34%, 63.27%, 79.66%, 그리고 81.09%였다.

Fig. 8 은 Fig. 7 로부터 도출된 다이 반각에 따른 *SR* 의 평균값을 나타낸 것이다. 평균값은 다이 반각(α)이 증가함에 따라 증가하다가 7° 이상부터 일정한 값을 나타내었다. Fig. 8 의 응력비 평균값은 다음의 식(2)와 같이 다이 반각 함수로 표현될 수 있다.

$$f(\alpha) = (-2.63\alpha^2 + 44.72\alpha - 100.84)/100 \tag{2}$$

따라서, 표면부 축방향 잔류응력(σ_{axial})은 식(2)와 소재의 유동응력 곡선으로부터 다음의 식(3)으로 표현 가능하다.

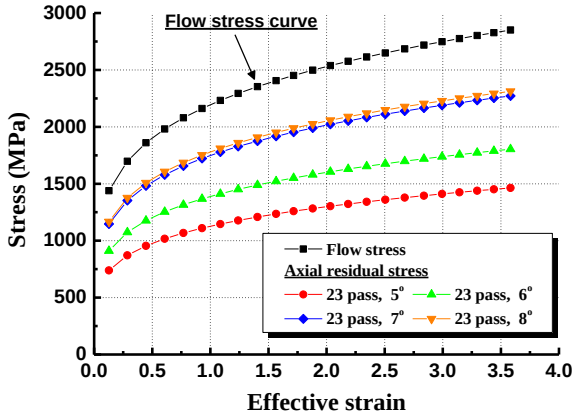

Fig. 9 Flow stress and the predicted residual stress

Table 2 Conditions for wire drawing experiment

Conditions	Value
Wire material	AISI 1080
Initial wire diameter (mm)	2.0
Final wire diameter (mm)	1.7
Bearing length of die (mm)	0.3 × initial wire diameter
Semi-die angle (°)	5.0
Drawing speed (mm/s)	5.0
Flow stress of initial wire (MPa)	$\bar{\sigma} = 3007.8 \cdot \bar{\varepsilon}^{0.317}$
Yield strain	0.0046
Young's modulus (GPa)	210.0
Poisson's ratio (ν)	0.3

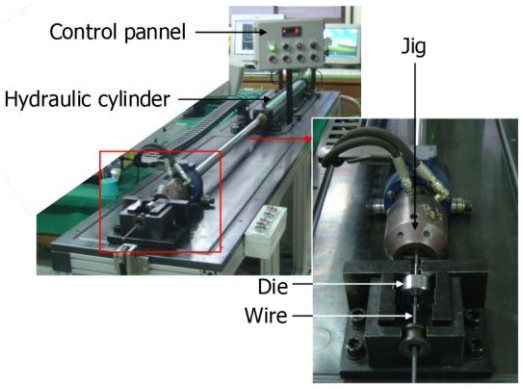

Fig.10 Drawing machine

$$\sigma_{axial} = f(\alpha) \cdot K\bar{\varepsilon}^n = \frac{-2.63\alpha^2 + 44.72\alpha - 100.84}{100} \cdot K\bar{\varepsilon}^n \quad (3)$$

여기서, K 는 강도계수(strength coefficient), n 은 가공 경화지수(strain-hardening exponent)이다.

Fig.11 Nano-indenter

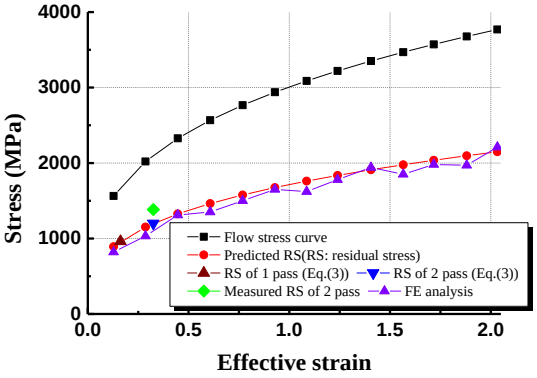

Fig.12 Comparison of surface axial residual stress

Fig. 9 는 유동응력과 식(3)으로 계산된 표면 축방향 잔류응력을 나타낸 것이다. Fig. 6 과 매우 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

제안된 예측모델에 대하여 기존 연구결과와 비교하여 그 타당성을 평가하였다[13]. 신선 실험에 적용된 와이어 소재는 AISI 1080 이며, 초기소재 직경은 2.0mm 이다. 2 패스 신선 후 최종 1.7mm 와이어의 표면 잔류응력을 평가하였다. 실험조건은 Table 2 에 나타내었으며, 신선 실험은 Fig. 10 의 실험용 인발기로 수행되었다.

신선실험 후 2 번째 패스를 통과한 와이어에 대하여 표면부 잔류응력을 평가하였다. 잔류응력은 Fig. 11 의 나노인덴터(nano-indenter)를 이용하여 Lee 등이 제안한 나노인덴터이션 테스트(nano-indentation test)를 통해 측정되었다[16].

Fig. 12에 잔류응력 평가결과를 나타내었다. 식(3)의 예측식을 적용한 경우 2번째 패스 와이어 잔류응력은 1199.4MPa 이었다. 그리고 나노인데터를 이용해 측정한 2번째 패스 와이어의 표면 잔류응력은 1383.8MPa 이었다[13]. 예측결과와 측정결과는 약 184MPa의 차이가 발생하고 있다. 측정결과 기준으로 약 13.3%의 오차가 발생하였으나 예측결과가 타당함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 탄소성 유한요소해석을 이용해 탄소강 다단 신선공정 시 와이어 표면에 발생하는 축방향 잔류응력을 평가하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 탄소성유한요소해석을 통해 AISI1072 다단 신선공정 시 다이 반각와 감면율이 표면부 축방향 잔류응력에 미치는 영향을 평가하였다. 해석결과 잔류응력은 소재의 유동응력 곡선과 유사한 형태를 나타내었다. 또한, 다이 반각과 감면율 변화에 따른 잔류응력의 크기는 유동응력과 일정한 비율을 나타냄을 알 수 있었다.

(2) 탄-소성 유한요소해석 결과를 토대로 소재 유동응력, 다이 반각, 그리고 감면율로 표현되는 표면 잔류응력 예측 모델을 제안하였다.

(3) 제안된 모델을 이용하여 AISI1080 와이어에 대한 2패스 신선 실험 후 잔류응력을 평가한 결과, 예측결과와 측정결과는 각각 1199.4MPa과 1383.8MPa로 서로 유사한 결과를 나타내었다.

REFERENCES

[1] C. S. Kim, K. S. Hong, M. K. Kim, 2005, Nonlinear Robust Control of a Hydraulic Elevator, Control Eng. Pract., Vol. 13, No. 6, pp. 789~803.

[2] R. S. Chandel, S. R. Bala, 1986, Effect of Welding Parameters and Groove Angle on the Soundness of Root Beads Deposited by the SAW Process, Proc. Of Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee, USA, pp. 479~485.

[3] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, 1992, Manufacturing Processes for Engineering Materials, Second Ed. Addison-Wesley Publishing Company, New York, USA.

[4] C. F. Yu, Z. L. Xue, W. T. Jin, 2016, Precipitation and Solid Solution of Titanium Carbonitride Inclusions in Hypereutectoid Tire Cord Steel, J. Iron, Steel Res. Int. Vol. 23, No. 4, pp. 338~343.

[5] S. K. Lee, B. M. Kim, 2005, Analysis of Multi-pass Wet Drawing Process and Its Application, Trans. Mater. Process., Vol. 14, No. 8, pp. 689~695.

[6] J. Toribio, M. Lorenzo, D. Vergara, 2016, Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Prestressing Steel Wires: the Role of the Cold-drawing Conditions, Procedia Struct. Integrity, Vol. 2, pp. 626~631.

[7] S. K. Lee, D. W. Kim, M. S. Jeong, B. M. Kim, 2012, Evaluation of Axial Surface Residual Stress in 0.82wt% Carbon Steel Wire During Multi-pass Drawing Process Considering Heat Generation, Mater. Des., Vol. 34, pp. 363~371.

[8] J. J. Atienza, M. L. Martinez-Perez, J. Ruiz-Hervias, F. Mompean, M. Garcia-Hernandez, M. Elices, 2005, Residual Stress in Cold Drawn Ferritic Rods, Scr. Mater., Vol. 52, No. 4, pp. 305~309.

[9] H. Överstam, 2006, The Influence of Bearing Geometry on the Residual Stress State in Cold Drawn Wire, Analysed by the FEM, J. Mater. Process. Technol., Vol. 171, No. 3, pp. 446~450.

[10] T. Kuboki, M. Akiyama, Y. Neishi, K. Kuroda, 2000, Effect of Final Drawing with Light Reduction on the Leveling of Residual Stress Distribution in Cold Bar Drawing, Proc. Inst. Mech. Eng. Prat C, Vol. 214, No. 11, pp. 1389~1399.

[11] T. Kuboki, I. Kawakami, M. Neishi, K. Kuroda, M. Akiyama, 2001, A Study on the Influence of Mechanical Properties on the Distribution of Axial Residual Stress after Cold Drawing of Metallic Bars, Mater. Sci. Res. Int., Vol. 7, No. 1, pp. 41~46.

[12] T. Kuboki T, M. Akiyama M, Y. Neishi, K. Kuroda, 2001, Effect of Die Geometry on Residual Stress Level Present after Bar Drawing, Ironmaking Steelmakaking, Vol. 28, No. 1, pp. 65~71.

[13] D. C. Ko, S. K. Lee, W. H. Hwang, B. M. Kim, C. M. Bae, 2007, The Evaluation of Residual Stress on the Drawn Wire using Nano-indentation Test, J. Mater. Process. Technol., Vol. 191, No. 1, pp. 64~67.

[14] J. Toribio, M. Lorenzo, D. Vergara, L. Aguado, 2016, Residual Stress Redistribution Induced by Fatigue in Cold-drawn Prestressing Steel Wires, Constr. Build. Mater., Vol. 114, pp. 317~322.

[15] M. Akiyama, T. Kuboki, 2002, Optimisation of Method for Residual Stresses after Cold Bar Drawing, Ironmaking Steelmaking, Vol. 29, No. 2, pp. 101~106.

[16] Y. H. Lee, D. I. Kwon, 2003, Measurement of Residual Stress Effect by Nanoindenatation on Elastically Strained (100) W, Scr. Mater., Vol. 49, No. 5, pp. 459~465.