

고탄소강 다단 신선 와이어의 표면 잔류응력 예측모델

김대운¹ · 이상곤² · 김병민[#] · 정진영³ · 반덕영³ · 이선봉⁴

Prediction Model of Surface Residual Stress for Multi-Pass Drawn High Carbon Steel Wire

D. W. Kim, S. K. Lee, B. M. Kim, J. Y. Jung, D. Y. Ban, S. B. Lee

(Received February 9, 2010 / Revised April 20, 2010 / Accepted May 4, 2010)

Abstract

During the multi-pass wire drawing process, wires suffer a great amount of plastic deformation that is through the cross-section. This generates tensile residual stress at surface of drawn wires. The generated residual stress on surface is one of the problems for quality of wires so that prediction and reduction of residual stresses is important to avoid unexpected fracture. Therefore, in this study, the effect of process variables such as semi-die angle, bearing length and reduction ratio on the residual stress was evaluated through Finite Element Analysis. Based on the results of the Analysis, a prediction model was established for predicting residual stress on the surface of high carbon steel(AISI1072, AISI1082). To identify the effectiveness of the proposed model, X-ray diffraction is used to measure the residual stresses on the surface. As the result of the comparison between calculated residual stresses and measured residual stresses, the model could be used to predict residual stresses in cold drawn wire.

Key Words : Residual Stress, High Carbon Steel Wire, Cold Drawn Wire, Multi-Pass Wire Drawing, X-ray Diffraction

1. 서 론

고탄소강 와이어는 일반적으로 다단 신선 공정으로 생산된다. 와이어가 다이를 통과할 때 소성 변형은 와이어의 표면에 집중되며 이로 인하여 와이어 중심부와 표면부의 변형량이 달라지게 되며, 이러한 불균일한 소성변형에 의해 와이어에 잔류응력이 발생하게 된다[1].

신선 와이어 표면에 발생하는 잔류응력은 축방향, 원주방향, 그리고 반경방향의 3 가지 성분으로 나누어 진다. 특히 표면부에서 축방향과 원주방향 잔류응력의 경우 인장이며, 일반적으로 축방향 잔류응력이 가장 크다. 인장잔류응력의 경우 와이어

의 인장강도 및 탄성한계 감소, 부식 저항 저하, 크랙 발생 촉진, 피로수명 저하 등 신선 와이어의 품질을 저하시키는 요인이 된다[2, 3].

따라서, 와이어의 기계적 특성을 저하시키는 인장 잔류응력의 발생을 최소화 시키는 것이 중요하다. 이를 위해서는 신선 후 발생하는 잔류응력의 정량적 예측이 선행되어야 한다. 지금까지 신선공정의 잔류응력 평가에 관한 다양한 연구들이 진행되었다. 그러나, 대부분의 연구는 단패스(Single pass)에 대한 단면감소율, 다이 반각, 베어링 길이와 형상 등 각 공정변수가 잔류응력에 미치는 영향평가 등에 국한되었으며, 다양한 공정변수 조합에 따른 다단패스(Multi pass)에 대한 잔류

1. 부산대 대학원 정밀기계공학과
2. 부산대 PNU-IFAM 국제공동연구소
3. 고려제강 기술개발연구원
4. 계명대 기계·자동차공학부
교신저자: 부산대 기계공학부, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

응력 평가 및 예측에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다[4~8].

따라서, 본 연구에서는 탄소성 유한요소해석을 통하여 신선공정변수들에 대한 고탄소강 다단 신선 와이어의 축방향 잔류응력을 평가하였다. 신선 공정변수의 영향도 평가를 통하여 축방향 잔류응력에 영향을 미치는 주요 공정변수를 선정하고, 선정된 공정변수 조합들에 대한 다단 신선공정 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과로부터 각 공정변수 조합에 대한 와이어 표면 잔류응력을 평가하여 다단 신선 와이어의 표면 잔류응력 예측모델을 제안하였다. 제안된 표면 잔류응력 예측모델의 타당성을 검증하기 위해 다단 신선 실험 후 X-ray 회절로 잔류응력을 측정하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 유한요소해석을 통한 공정변수 영향 평가

신선 공정 시 공정변수들이 와이어의 잔류응력 분포에 미치는 영향을 평가하기 위하여 공정변수들을 선정하고, 탄소성 유한요소해석을 통해 각 공정변수 조합에 따른 잔류응력 분포를 평가하였다. 반경방향 잔류응력은 와이어 전체에서 압축으로 와이어에 악영향을 미치지 않는다. 축방향 인장 잔류응력이 가장 크기 때문에 본 연구에서는 축방향 잔류응력만 평가하였다[2]. 먼저, 다이 반각(α), 단면감소율(R), 마찰계수(μ), 베어링 길이(l)를 주요 공정변수로 선정하였다. 선정된 공정변수들이 잔류응력에 미치는 영향도를 평가하기 위하여 직교배열표를 작성한 후 각 공정변수조합에 대한 유한요소해석을 수행하였다. DEFORM-2D를 이용하여 해석하였으며, Fig. 1에 초기 성형해석 모델을 나타내었다.

주요 공정변수들이 잔류응력에 미치는 영향과 각 공정변수간의 교호작용 평가를 위해 Table 1에서 보듯이 3 수준의 각 변수들로 실험계획법(DOE)

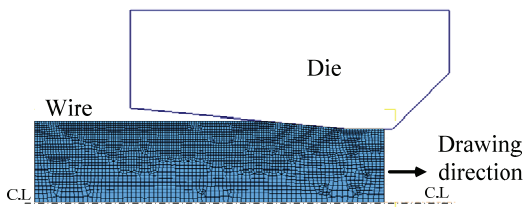


Fig. 1 Initial FE model

Table 1 Main process variables for DOE

Variable	Value
Semi-die angle($^\circ$),(α)	3, 5, 7
Reduction(%),(R)	5, 15, 25
Bearing length(mm),($l=bD$)	0.3D, 0.5D, 0.7D
Friction coefficient(μ)	0.04, 0.08, 0.12

(D = diameter of wire at die inlet)

Table 2 Orthogonal array

Case	α ($^\circ$)	R (%)	l (mm)	μ
1	3	5	0.3D	0.04
2	3	5	0.5D	0.08
3	3	5	0.7D	0.12
4	3	15	0.3D	0.08
5	3	15	0.5D	0.12
6	3	15	0.7D	0.04
7	3	25	0.3D	0.12
8	3	25	0.5D	0.04
9	3	25	0.7D	0.08
10	5	5	0.3D	0.08
11	5	5	0.5D	0.12
12	5	5	0.7D	0.04
13	5	15	0.3D	0.12
14	5	15	0.5D	0.04
15	5	15	0.7D	0.08
16	5	25	0.3D	0.04
17	5	25	0.5D	0.08
18	5	25	0.7D	0.12
19	7	5	0.3D	0.12
20	7	5	0.5D	0.04
21	7	5	0.7D	0.08
22	7	15	0.3D	0.04
23	7	15	0.5D	0.08
24	7	15	0.7D	0.12
25	7	25	0.3D	0.08
26	7	25	0.5D	0.12
27	7	25	0.7D	0.04

을 적용하여 Table 2와 같이 직교배열표를 작성하였다. 작성된 직교배열표의 27가지 공정변수조합에 대한 성형해석을 수행하였다.

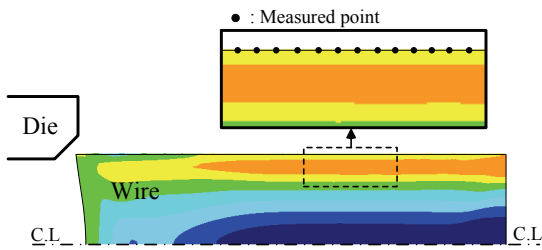


Fig. 2 Residual stress on the drawn wire surface

적용 소재는 AISI1072 5.5mm 고탄소강 와이어이며, 성형해석을 위한 소재의 유동응력 곡선은 인장시험을 통하여 확보하였다. 특히, 대변형 구간에서 보다 정확한 유동응력곡선을 확보하기 위하여 다단 신선 시 각 패스별 와이어에 대한 인장시험 후 고탄소강 와이어의 대변형구간 유동응력곡선을 확보하였다. 각 패스별 인장시험 결과를 토대로 Bridgeman 보정계수(B)[9]를 수정하여 다음의 식(1)로 대변형구간의 유동응력곡선($\bar{\sigma}_B$)을 표현하였다. 식(1)에서 B 는 Bridgeman 보정계수이고 $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형률, K 는 소재의 강도계수, n 은 소재의 가공경화 지수이다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_B &= B \cdot \bar{\sigma} = B \cdot K(\bar{\epsilon})^n \\ B &= 0.83 - 0.186 \cdot \log \bar{\epsilon} \quad (0.15 \leq \bar{\epsilon} \leq 1.0) \\ B &= 0.11 \cdot \bar{\epsilon}^2 - 0.21 \cdot \bar{\epsilon} + 0.93 \quad (\bar{\epsilon} \geq 1.0) \end{aligned} \quad (1)$$

27 가지 공정변수조합에 대한 유한요소해석 후 각 공정변수조합에 따른 와이어 표면 잔류응력을 평가하였다. 잔류응력은 Fig. 2 와 같이 표면상의 20 지점의 값에 대하여 평균값을 취하였다.

해석결과와 다구찌기법(Taguchi method)을 이용하여 축방향 잔류응력에 미치는 각 공정변수의 영향도를 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 축방향 잔류응력은 다이 반각의 변화에 가장 영향을 많이 받으며, 단면감소율, 베어링 길이, 그리고 마찰계수 순으로 영향도가 낮아짐을 알 수 있다. 특히 마찰계수의 경우 잔류응력에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 다이 반각이 증가할 수록, 중심부와 표면부의 변형량 차이 증가로 인하여 표면부 잔류응력이 높아진다. 단면감소율과 베어링 길이는 증가할 수록 표면 잔류응력이 줄어드는 경향을 나타낸다. 단면감소율이 증가할 수록 표면부와 중심부의 변형량 차이가 감소하기 때문이며, 베어링 길이가 증가할 수록

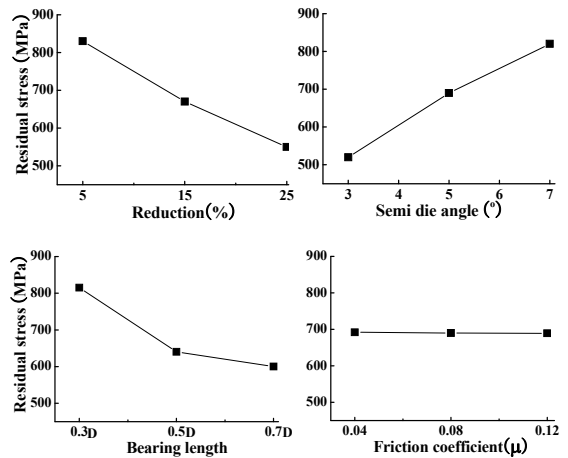


Fig. 3 Effect of variables on axial residual stress

다이 랜드부에서 와이어 표면부에 가해지는 미소 소성변형량이 증가하기 때문이다.

3. 다단 신선 공정 시 잔류응력 예측

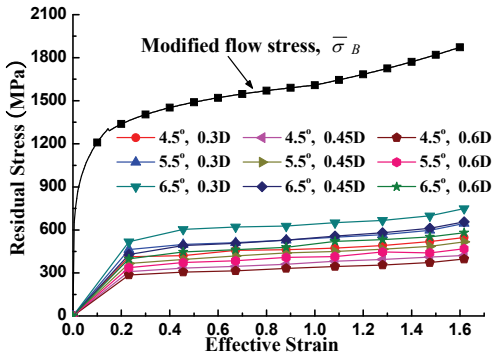
공정변수들과 다단 신선공정에서의 잔류응력 발생과의 정량적인 관계를 규명하기 위하여, 유한요소해석을 통해 다단 신선공정 시 발생하는 표면잔류응력을 평가하였다. 해석결과를 기초로 공정변수들로 표현 가능한 표면잔류응력 예측모델을 제시하였다.

3.1 다단 신선 공정 유한요소해석 조건

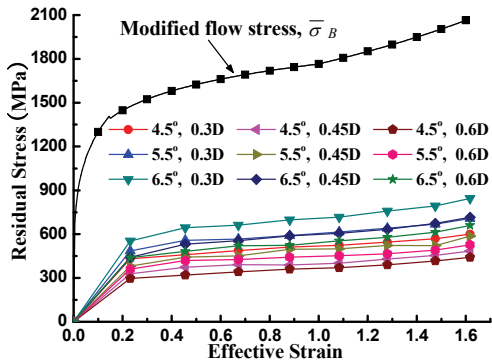
다단 신선해석에 적용된 신선 공정변수 및 범위를 Table 3 에 나타내었다. 공정변수 범위 및 신선조건은 실제현장에서 적용되고 있는 범위를 기초로 하여 설정되었다.

Table 3 Process variables for multi-pass wire drawing

Wire material	AISI1072, AISI1082
Initial Dia.(mm)	5.5
Final Dia.(mm)	2.45
Total passes	8
Total reduction(%)	80.15
Semi-die angle (°)	4.5, 5.5, 6.5
Bearing length(mm)	0.3D, 0.45D, 0.6D
Friction coefficient(μ)	0.06 (constant)
Drawing speed(m/min)	250



(a) AISI 1072



(b) AISI 1082

Fig. 4 Flow stress curve and surface residual stress according to the process variables

다단 신선공정 해석은 이전 패스의 변형이력을 고려하여 연속적으로 수행되었다. 유한요소해석 수행 후 각 패스에 대한 축방향 표면 잔류응력을 평가하였다.

3.2 다단 신선공정 유한요소해석 결과

Fig. 4는 유한요소해석결과 다이반각, 베어링 길이, 그리고 유효변형률에 따라 와이어 표면에 발생하는 잔류응력과 소재의 유동응력을 나타낸 것이다.

Fig. 4의 결과에서 알 수 있듯이 변형량이 증가할수록 표면 잔류응력은 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 변형량 증가와 함께 표면부와 중심부의 변형량 차이가 증가하기 때문이다. 또한, 와이어 표면에 발생하는 잔류응력은 소재의 유동응력과 유사한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이를 토대로 각 패스별 표면 잔류응력과 소재 유동응력의 비를 평가하였다. 그 결과 유효

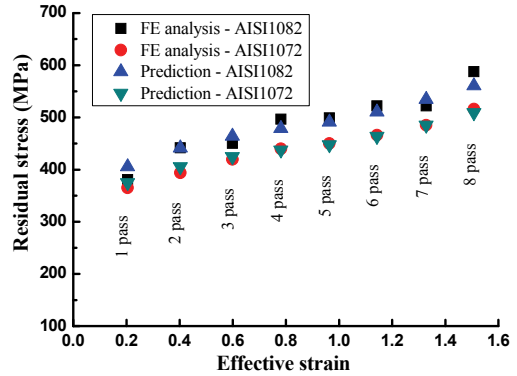


Fig. 5 Comparison of residual stress between FE analysis and prediction model($\alpha=5.5^\circ, l=0.45D$)

변형률, 다이반각, 베어링 길이, 그리고 재질에 따른 표면 잔류응력과 소재 유동응력의 비가 거의 일정함을 알 수 있다.

3.3 잔류응력 예측 모델

다단 신선공정 시 공정변수변화에 따른 축방향 표면 잔류응력($\bar{\sigma}_{AR}$)과 소재 유동응력의 비가 거의 일정한 결과로부터 소재 유동응력식(식(1)), 유효변형률($\bar{\epsilon}$), 다이반각(α), 그리고 초기 선재 직경에 대한 베어링 길이의 비(b)로 표현 가능한 식(2)의 축방향 표면 잔류응력 예측모델을 제시하였다.

$$\bar{\sigma}_{AR} = 0.6 \cdot (9.07 \cdot \alpha + 0.16) \cdot (1.02 - 1.99 \cdot b + 1.66b^2) \cdot B \cdot K(\bar{\epsilon})^n \quad (2)$$

Fig. 5는 AISI1072, AISI1082 와이어, 다이반각 5.5° , 베어링 길이 $0.45D$ 조건에 대한 유한요소해석결과와 예측모델로 평가된 표면 잔류응력을 비교한 그래프이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 각 패스에서 해석결과와 예측모델로 평가된 잔류응력의 오차는 약 $\pm 2.5\%$ 이내로 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 다단 신선와이어 잔류응력 측정

본 연구에서 제시한 다단 신선 와이어 표면 잔류응력 예측모델의 타당성을 검증하기 위하여 다단 신선실험 후 패스별 와이어의 축방향 표면 잔류응력을 측정하였다.

고탄소강의 미세조직은 페라이트와 시멘타이트 층상구조인 펄라이트이며, 특히 시멘타이트의 경

우 적은 양에도 불구하고, 와이어의 기계적 성질에 많은 영향을 미친다[10]. 따라서, 잔류응력도 페라이트와 시멘타이트 잔류응력으로 구분할 수 있다. X-ray 회절 분석을 이용하여 와이어 잔류응력 측정 시 페라이트의 잔류응력은 측정이 가능하지만 시멘타이트의 잔류응력은 소량의 시멘타이트가 회절되는 X-ray 를 산란시켜 명확한 피크가 나타나지 않아 잔류응력 측정이 어렵다[10].

시멘타이트 잔류응력은 X-ray 회절 분석으로 측정할 수 없기 때문에, 이전 연구결과의 시멘타이트 잔류응력 2,000MPa 을 적용하여 펄라이트의 잔류응력을 계산하였다[11]. 잔류응력 계산을 위해 페라이트의 잔류응력(σ_{ij}^α)과 시멘타이트의 잔류응력(σ_{ij}^β), 그리고 시멘타이트 분률(f)을 이용한 다음의 식(3)으로 구할 수 있다[10].

$$\sigma_{ij} = (1-f) \cdot \sigma_{ij}^\alpha + f \cdot \sigma_{ij}^\beta \quad (3)$$

시멘타이트 분률(f)은 Fe-C 상태도에서 식(4)의 지렛대 법칙으로 구할 수 있다.

$$f_{Fe_3C} = (C_o - C_\alpha) / (C_{Fe_3C} - C_\alpha) \quad (4)$$

여기서, C_α 는 0.022 이고 C_{Fe_3C} 는 0.67 이다. 식(4)로 구한 AISI1072 와 AISI1082 와이어의 시멘타이트 분율은 각각 $f_{AISI1072}=0.104, f_{AISI1082}=0.119$ 이다.

Fig. 6 과 Fig. 7 은 두 가지 와이어에 대하여 X-ray 회절 분석으로 측정된 페라이트의 잔류응력과 식(3)으로 계산된 펄라이트 신선 와이어의 표면 잔류응력을 예측모델 결과와 비교한 결과이다. Fig. 6 과 Fig. 7 에서 알 수 있듯이 측정된 잔류응력은 패스가 진행됨에 따라 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, X-ray 회절 분석결과와 예측모델에 의한 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제안한 고탄소강 다단 신선 와이어(AISI1072, AISI1082)의 축방향 표면 잔류응력 예측 모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 고탄소강 신선공정에 대한 탄소성 유한요소해석을 수행하여 주요 공정변수가 신선 와이어의 축방향 표면 잔류응력에 미치는 영향도를 평가하였다. 또한 다단 신선공정에 대한

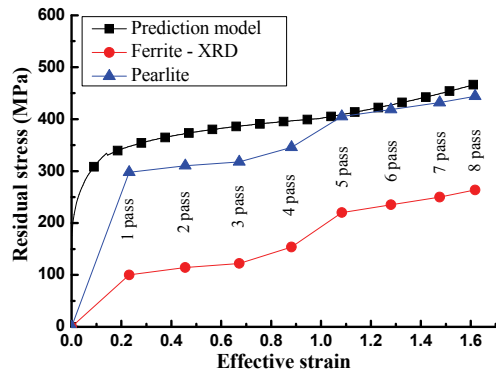


Fig. 6 Comparison of residual stresses between prediction model and XRD for AISI1072

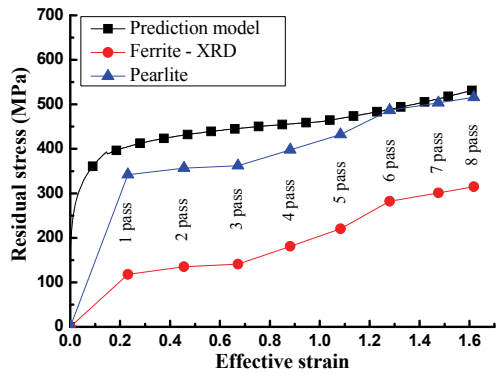


Fig. 7 Comparison of residual stresses between prediction model and XRD for AISI1082

해석결과를 기초로 고탄소강 다단 신선 와이어의 축방향 표면 잔류응력예측 모델을 제안하였다. 이상의 연구를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 신선 시 주요 공정변수인 다이 반각, 단면감소율, 베어링 길이, 그리고 마찰계수가 와이어의 축방향 표면 잔류응력에 미치는 영향도를 평가하였다. 실험계획법 및 다구찌기법을 이용하여 영향도 평가결과 다이 반각(α)이 가장 큰 영향을 미쳤으며, 단면 감소율(R)과 베어링 길이(l)는 그 영향도가 유사하였다. 그러나, 마찰계수(μ)는 잔류응력에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

(2) 각 패스별 와이어에 대한 인장시험결과와 Bridgeman 보정계수를 이용하여 대변형률 구간의 유동응력곡선 모델을 제안하였다.

(3) 각 공정변수 변화에 따른 패스별 축방향 표면 잔류응력 변화를 평가하였다. 그 결과 각 패스에서 발생하는 잔류응력의 형태는 와이어의 유동

응력 곡선과 유사한 형태를 나타내었다. 또한 발생 잔류응력과 유효변형률에 상응하는 유효응력과의 비가 거의 일정함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 다이 반각, 단면감소율, 베어링 길이, 그리고 와이어의 유동응력 곡선을 이용하여 축방향 표면 잔류응력을 정량적으로 예측할 수 있는 모델을 제안하였다.

(4) 예측모델의 타당성을 검증하기 위하여 다단 신선실험 후 X-ray 회절 분석을 통해 실제 와이어의 잔류응력을 평가하였다. 측정결과 예측모델로 예측된 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다

이상의 연구결과로부터 고탄소강 다단 신선 와이어의 축방향 표면 잔류응력의 예측이 가능하게 되었으며, 향후 다양한 고탄소강 와이어의 잔류응력 예측에도 확대 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(NR-2006-K20601000004-09E010 0-00410) 및 (주)고려제강의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Atienza, M. L. Martinez-Perez, J. Ruiz-Hervias, F. J. Mompean, M. Garcia-Hernandez, M. Elices, 2005, Residual Stresses in Cold Drawn Ferrite Rods, *Scr. Mater.*, Vol. 52, pp. 305~3095.
- [2] J. M. Atienza, M. L. Martinez-Perez, J. R. Hervias, F. Mompean, M. G. Hernandez, M. Elices, 2005, Residual stresses in cold drawn pearlite rods, *Scr. Mater.*, Vol. 52, pp. 1223~1228
- [3] Y. S. Yang, J. G. Bae, D. Y. Ban, C. G. Park, 2008, Effect of die design and die series on the surface residual stress of cold drawn eutectoid steel wire, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 15, No. 2, pp. 153~157.
- [4] J. L. Bassani, 1977, Yield characterization of metals with transversely isotropic plastic properties, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 19, pp. 151~156.
- [5] K. Sawamiphakdi, P. K. Kropp, G. D. Lahoti, 1990, Investigation of residual stresses in drawn wire by the finite element method, *J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 112, pp. 231~235.
- [6] M. Akiyama, T. Kuboki, 2002, Reduction in residual stress after cold bar drawing, *Adv. Technol. Plast.* Vol. 1, pp. 361~366.
- [7] M. Asakawa, W. Sasaki, S. Shishido, 2002, Effect of die approach geometry and bearing length on residual stress after bar drawing, *wire J. Int.*, Vol. 29, pp. 68~72.
- [8] D. C. Ko, W. H. Hwang, S. K. Lee, B. M. Kim, 2006, A Study on The Method of Residual Stress Relaxation during Wire Drawing and Evaluation of Residual Stress Using Nano-Indentation Test, *Jour. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 23, No. 5, pp. 162~169.
- [9] Norman E. Dowling, 1999, Mechanical behavior of materials, PRENTICE HALL INTERNATIONAL, Inc., New Jersey, pp. 128~129.
- [10] M. L. Martinez-Perez, F. J. Mompean, J. Ruiz-Hervias, C. R. Borlado, J. M. Atienza, M. Garcia-Hernandez, M. Elices, J. Gil-Sevillano, Ru Lin Peng, T. Buslaps, 2004, Residual stress profiling in the ferrite and cementite phases of cold-drawn steel rods by synchrotron X-ray and neutron diffraction, *Acta. Mater.*, Vol. 52, pp. 5303~5313.
- [11] K. Van Acker, J. Root, P. Van Houtte, E. Aernoudt, 1996, Neutron diffraction measurement of the residual stress in the cementite and ferrite phase of cold-drawn steel wires, *Acta. Mater.*, Vol.44, pp. 4039~4049.