

고변형을 영역의 유효응력-변형을 곡선을 고려한 고탄소강 다단 신선 와이어 축방향 잔류응력 평가

Evaluation of Axial Residual Stress in Multi-Pass Drawn High Carbon Steel Wire Considering Effective Stress-Strain Curve at High Strain

이상곤¹, 김대운², 김병민^{3,✉}, 정진영⁴, 반덕영⁴, 이선봉⁵
Sang Kon Lee¹, Dae Woon Kim², Byung Min Kim^{3,✉}, Jin Young Jung⁴, Duk Young Ban⁴
and Seon Bong Lee⁵

¹ 부산대학교 부산대-IFAM 국제공동연구소 (PNU-IFAM JRC, Pusan National Univ.)

² 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 (Graduate School of Precision Manufacturing System Division, Pusan National Univ.)

³ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

⁴ 고려제강 기술개발연구원 (Technical Development Institute, KISWIRE)

⁵ 계명대학교 기계자동차공학과 (Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University)

✉ Corresponding author: bmkim@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2319

Manuscript received: 2010.1.25 / Revised: 2010.5.5 / Accepted: 2010.5.25

The aim of this study is to evaluate the axial residual stress in multi-pass drawn high carbon steel wire by using FE analysis and XRD. When FE analysis is applied to evaluate the residual stress in drawn wire of multi-pass drawing process, obtaining the reliable effective stress-strain curve at high strain is very important. In this study, a model, which can express the reliable effective stress-strain curve at high strain, is introduced based on the Bridgman correction and tensile test for multi-pass drawn high carbon steel wires. By using the introduced model, FE analysis was carried out to evaluate the axial residual stress in the drawn wires. Finally, the effectiveness of the FE analysis with the introduced stress-strain relation was verified by the measurement of residual stress in the drawn wires through XRD. As a result, the evaluated residual stress of FE analysis shows good agreement with the measured residual stress.

Key Words: Axial Residual Stress (축방향 잔류응력), Multi-pass Drawn Wire (다단 신선 와이어), Stress-strain Curve (유효응력곡선), FE Analysis (유한요소해석), XRD (X선 회절분석)

기호설명

B = Bridgman correction

f = volume fraction of cementite

$\bar{\epsilon}$ = effective strain

$\bar{\sigma}$ = effective stress

$\bar{\sigma}_B$ = stress of Bridgman correction

σ_{RS} = residual stress of pearlite

σ_f = stress of ferrite

σ_c = residual stress of cementite

1. 서론

신선공정은 초기 와이어를 여러 개의 다이로 통과시켜 원하는 직경을 가진 와이어를 생산하는 대표적인 냉간 소성가공공정이다. 신선공정의 경

우 변형이 집중되는 와이어 표면부와 상대적으로 변형량이 적은 중심부의 불균일한 변형으로 인하여 신선된 와이어에 잔류응력이 발생한다.¹ 신선 후 와이어에 발생하는 잔류응력은 축방향 잔류응력(Axial stress), 원주방향 잔류응력(Hoop stress), 그리고 반경방향 잔류응력(Radial stress)으로 구분된다.^{1,2} 특히, 와이어 표면에 발생하는 인장잔류응력의 경우 와이어 인장강도 저하, 표면 크랙 생성 및 전진 촉진, 피로수명 저감, 부식 등 와이어의 기계적 성질을 저하시키는 주원인으로 잔류응력의 저감이 중요하다.^{3,4} 따라서, 이를 위해서는 신선 후 와이어에 발생하는 잔류응력의 정량적인 평가가 선행되어야 한다. 지금까지 신선공정 잔류응력 평가에 관한 다양한 연구들이 진행되었다. 그러나, 대부분 2~3 패스 이내의 실험실 수준에 국한되어 있었다.⁵⁻⁷ 본 연구에서는 탄소강 유한요소해석을 통하여 다단 신선 와이어의 축방향 잔류응력을 평가하였다. 다단 신선공정의 경우 일반적으로 변형률이 1.0 이상으로, 유한요소해석을 이용해 보다 정확한 잔류응력 평가를 위해서는 고변형률에서의 유효응력-변형률 곡선의 확보가 매우 중요하다. 본 연구에서는 Bridgman 보정계수와 다단 신선 와이어의 인장시험결과를 이용하여 고탄소강 신선 와이어의 고변형률에 대한 유효응력-변형률 곡선의 표현이 가능한 모델을 제안하였다. 제안된 모델을 적용한 유한요소해석을 통해 고탄소강 다단 신선공정 와이어의 축방향 잔류응력을 평가하였으며, XRD 로 잔류응력을 측정하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 유효응력-유효변형률 곡선

2.1 Bridgman 보정계수

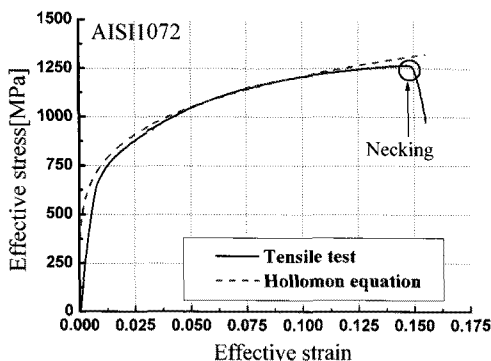


Fig. 1 Stress-strain curve by Hollomon equation

일반적으로 냉간가공 시 소재의 유효응력-유효변형률 곡선모델로 Hollomon 식이 널리 사용되고 있다. Hollomon 식은 Fig. 1 에서 보듯이 단축인장시험으로 확보한 유효응력-유효변형률 곡선의 균일연신구간을 이용하여 구할 수 있다. 그러나 인장시험 시 넥킹 발생 이후의 정확한 유효응력-변형률 곡선을 확보할 수 없다.

단축인장시험을 통해 확보된 Hollomon 식을 이용한 유효응력-유효변형률 곡선은 Fig. 2 에서 보듯이 변형률이 증가함에 따라 지속적으로 증가하게 된다. 이로 인하여 고변형률 영역에서 신뢰성 있는 유효응력-유효변형률 곡선을 확보할 수 없기 때문에 유한요소해석에 적용하기에는 다소 무리가 있음을 알 수 있다.⁸

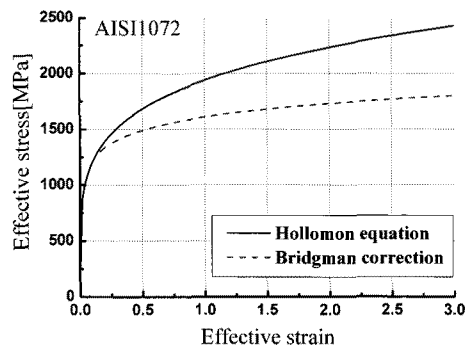


Fig. 2 Hollomon equation and application of Bridgman correction

탄소강의 고변형률 구간 유효응력-유효변형률 곡선 오차를 보정하기 위하여 Bridgman 은 식(1)의 보정계수를 도입하였다.⁹

$$\bar{\sigma}_B = B \cdot \bar{\sigma}$$

$$B = 0.83 - 0.186 \cdot \log \bar{\epsilon} \quad (0.15 \leq \bar{\epsilon} \leq 3.0) \quad (1)$$

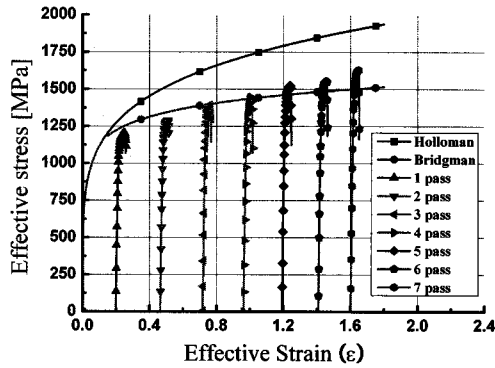
Fig. 2 에서 알 수 있듯이 Hollomon 식과 Bridgman 보정계수를 적용한 경우 고변형률 구간에서 큰 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

2.2 수정된 Bridgman 보정계수

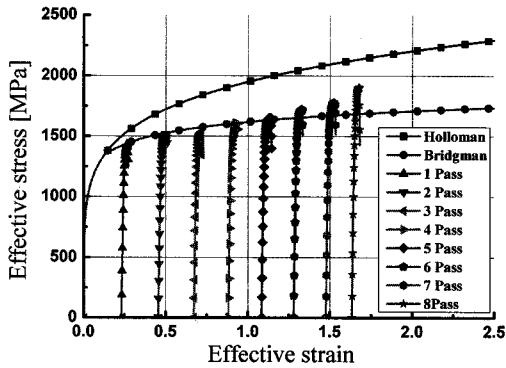
본 연구에서는 Bridgman 보정계수의 타당성을 검증하기 위하여 Table 1 의 3 가지 고탄소강 다단 신선공정에 대하여 각 패스 와이어에 대한 인장시험을 수행하였다. 각 패스 별 인장시험결과로 확보된 유효응력-유효변형률 곡선과 Bridgman 보정

Table 1 Multi-pass drawing condition

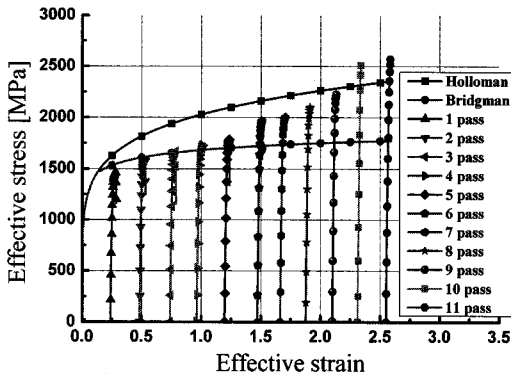
No.	Material	Initial Dia.	Final Dia.	Pass No.
1	AISI1072	5.50	2.45	7
2	AISI1082	5.50	2.45	8
3	AISI1082	3.40	1.50	11



(a) AISI1072 (diameter : 5.5mm)



(b) AISI1082 (diameter : 5.5mm)



(c) AISI1082 (diameter : 3.4mm)

Fig. 3 Flow stress curves

계수를 적용하여 확보한 유효응력-유효변형률 곡선을 비교평가하였다. 인장시험 시 각 패스 신선 후 와이어에 축적된 예비변형률(Pre-strain, $\bar{\epsilon}_p$)은 식(2)로 계산되는 평균 유효변형률을 적용하였다.

$$\bar{\epsilon}_p = 2 \cdot \ln(r_i / r_o) \quad (2)$$

여기서, r_i 는 초기 와이어 반경, r_o 는 각 패스 다이 출구부 와이어 반경이다.

Fig. 3에 각 소재별 비교결과를 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 유효변형률 1.0 이상에서는 Bridgman 보정계수를 적용한 결과와 실제 각 패스별 인장시험결과의 차이가 커짐을 알 수 있다.

이는 고탄소강 와이어의 경우 페라이트와 시멘타이트 층상구조로 저변형률에서는 변형이 주로 페라이트에 집중되지만 고변형률 영역에서는 시멘타이트도 함께 변형되어 강도가 급격히 증가하기 때문이다.¹⁰ 따라서, 고탄소강 와이어의 고변형률에서의 유효응력-유효변형률 관계를 Bridgman 보정계수로 표현하기에는 한계가 있음을 알 수 있다.

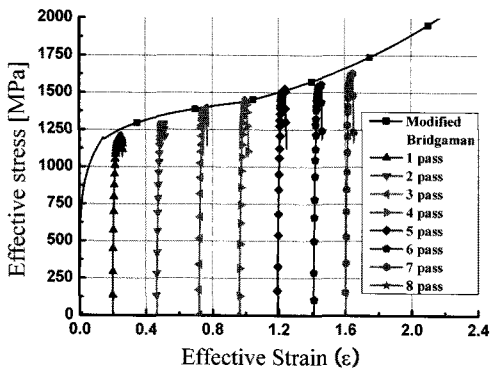
따라서, 본 연구에서는 각 패스별 인장시험결과를 이용하여 고탄소강 와이어의 고변형률에서의 유효응력-유효변형률 곡선을 표현하기 위한 수정된 모델을 제안하였다. 수정된 모델은 유효변형률 1.0 이상의 영역에 적용이 되며, 식(3)과 같이 유효변형률의 2차함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_B &= B \cdot \bar{\epsilon} \\ B &= 0.83 - 0.186 \cdot \log \bar{\epsilon} \quad (0.15 \leq \bar{\epsilon} \leq 1.0) \\ B &= 0.11 \cdot \bar{\epsilon}^2 - 0.21 \cdot \bar{\epsilon} + 0.93 \quad (\bar{\epsilon} > 1.0) \end{aligned} \quad (3)$$

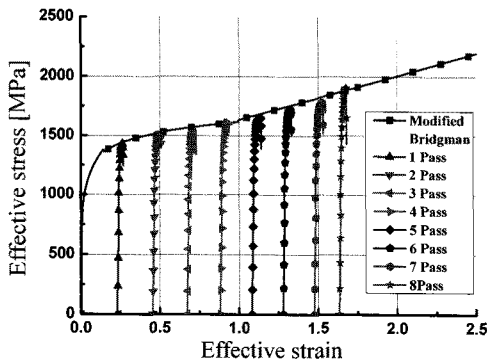
Fig. 4에 각 소재에 대한 수정된 Bridgman 보정계수를 적용한 결과를 각 패스별 인장시험결과와 함께 나타내었다. 수정된 Bridgman 보정계수를 적용할 경우 유효변형률 1.0 이상에서도 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

3. 다단 신선공정 유한요소해석

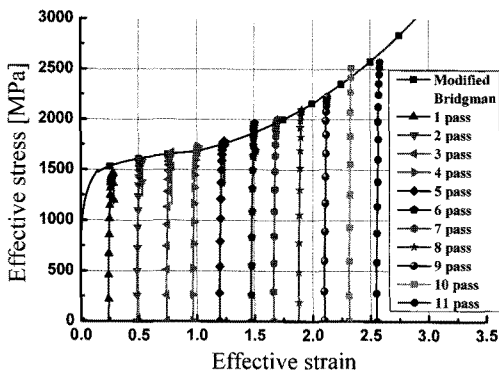
수정된 Bridgman 보정계수로 확보된 유효응력-유효변형률 곡선을 적용하여 고탄소강 다단 신선공정에 대한 냉간 탄소성 유한요소해석을 수행하여 축방향 잔류응력을 평가하였다. 해석은 상용 유한요소해석 소프트웨어 DEFORM-2D를 이용하였다.



(a) AISI1082 (diameter : 5.5mm)



(b) AISI1082 (diameter : 5.5mm)



(c) AISI1082 (diameter : 3.4mm)

Fig. 4 Application of modified Bridgman correction

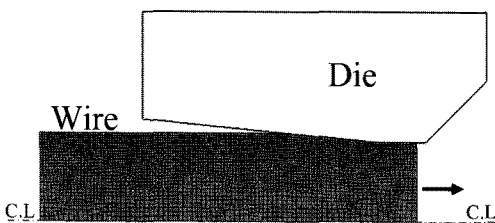


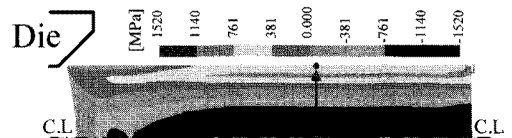
Fig. 5 Initial model and condition for FE analysis

Fig. 5 에 초기 해석모델을 나타내었다. 적용된 소재는 AISI1072, 초기선경 5.5 mm, 최종선경 2.45 mm, 다이반각(α) 6.0°, 탄성계수(E) 205 GPa, 프아송비(ν) 0.3, 그리고 다이와 와이어 사이의 마찰계수 (μ)는 0.06 인 총 7 패스 공정이다. Table 2 에 각 패스별 와이어 직경을 나타내었다. 해석 시 모든 패스의 신선속도는 300 mm/s 로 설정하였다.

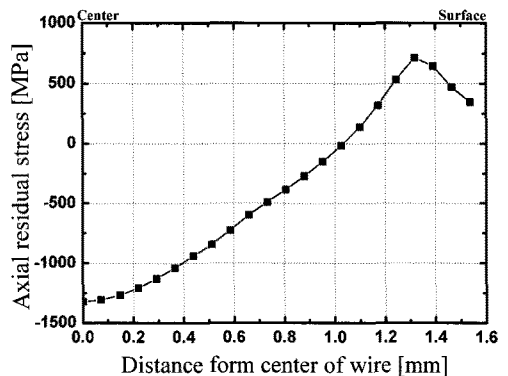
Table 2 Diameter of wire at each pass

Pass No.	Diameter[mm]
1	4.96
2	4.26
3	3.80
4	3.45
5	2.98
6	2.61
7	2.45

일반적으로 신선 시 발생하는 3 가지 잔류응력 성분 중 축방향 잔류응력이 가장 크기 때문에 본 연구에서는 해석결과로부터 와이어에 발생하는 축방향 잔류응력을 평가하였다.



(a) Result of FE analysis



(b) Residual stress from center to surface of wire

Fig. 6 Axial residual stress of 1st pass

Fig. 6 은 첫 번째 패스 통과 후 와이어 중심부에서 표면부까지의 축방향 잔류응력 분포를 나타

낸 것이다. 신선과정 시 다이와의 접촉으로 인해 표면부보다 중심부의 축방향 소재유동이 빠르며, 이로 인하여 다이를 통과한 후 표면부에는 인장잔류응력, 중심부에는 압축잔류응력이 발생하게 된다.

각 패스의 와이어 표면에 발생하는 축방향 잔류응력을 Fig. 7 에 나타내었다. Fig. 7 에서 알 수 있듯이 패스가 진행됨에 따라 변형량의 증가로 인하여 잔류응력이 점진적으로 증가함을 알 수 있다.

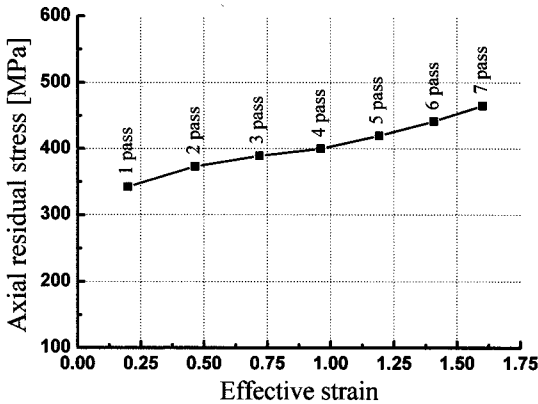


Fig. 7 Result of FE analysis (surface residual stress)

4. 다단 신선실험 및 축방향 잔류응력 측정

고변형률 영역의 유효응력-유효변형률 곡선을 적용한 잔류응력 해석결과의 타당성을 검증하기 위하여, 먼저 다단 신선실험을 수행하였다. 실험은 Fig. 8 의 실험용 드로벤치를 이용하여 실시하였으며, 신선속도는 해석조건과 동일한 300 mm/s 이다. 각 패스 별 신선 후 잔류응력 평가를 위한 시편을 확보한 후 후속 패스에 대한 신선을 실시하였다.

다단 신선실험 후 XRD 를 이용하여 각 패스의 와이어에 대한 축방향 잔류응력을 측정하였다. 먼저 {211}면의 α-페라이트 잔류응력을 측정한 후 식(4)를 이용하여 페라이트와 시멘타이트 층상조직인 고탄소강 펄라이트의 잔류응력을 계산하였다.¹¹

$$\sigma_{RS} = (1 - f) \cdot \sigma_f + f \cdot \sigma_c \quad (4)$$

AISI1072 소재의 $f=0.104$, 그리고 $\sigma_c=2,000$ MPa 을 적용하였다.¹²

Fig. 9 에 XRD 결과로 계산된 축방향 잔류응력과 유한요소해석결과 잔류응력을 함께 나타내었다. 실제 실험에서도 잔류응력은 패스가 진행됨에 따

라 점진적으로 증가함을 알 수 있었으며, 최종 와이어의 축방향 잔류응력은 약 469 MPa 이었다. 특히, 기존 Bridgman 보정계수를 적용한 경우 5 패스 이후의 고변형률 영역에서 실험결과와 해석결과의 차이가 큼을 알 수 있다. 그러나, 본 연구에서 적용한 수정된 Bridgman 보정계수를 적용할 경우 해석결과와 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

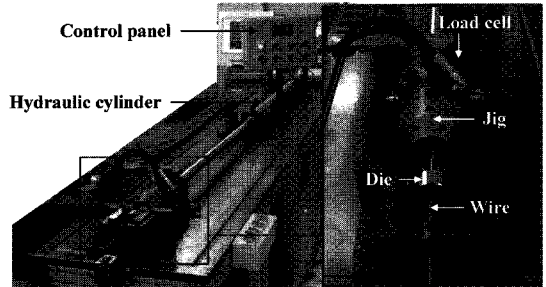


Fig. 8 Equipment of drawing experiment

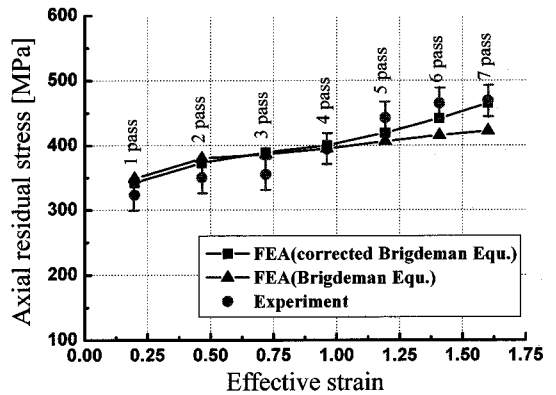


Fig. 9 Comparison of axial residual stress

5. 결론

본 연구에서는 고탄소강 와이어의 고변형률 영역에서의 유효응력-유효변형률 곡선모델 및 탄소성 유한요소해석을 이용하여 고탄소강 다단 신선 와이어의 축방향 잔류응력을 예측하고 평가하였으며, 이를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 다단 신선공정의 경우 일반적으로 변형률이 1.0 이상의 고변형률 가공으로, 초기 와이어의 인장시험결과로 도출된 Hollomon 식을 이용하여 고변형률 구간의 정확한 유효응력-유효변형률 곡선을 표현하기에는 한계가 있다.
- (2) 또한, 고탄소강 와이어의 경우 변형률 1.0

이상의 고변형률 영역에서 페라이트 뿐만 아니라 시멘타이트의 변형발생으로 인하여 와이어의 강도가 급격히 증가하게 된다. 따라서, 초기 와이어의 인장시험결과를 이용한 Hollomon 식, 그리고 고변형률 영역의 오차를 보정하기 위한 Bridgman 보정계수를 적용하여도 1.0 이상의 고변형률에서의 유효응력-유효변형률 곡선을 표현하기에는 한계가 있다.

(3) 본 연구에서는 고탄소강의 고변형률 영역 ($\bar{\epsilon} > 1.0$)에서의 보다 정확한 유효응력-유효변형률 곡선을 표현하기 위해 유효변형률의 2 차 함수로 표현되는 수정된 Bridgman 보정계수를 도입하였다. 다단신선 패스 별 와이어에 대한 인장시험을 통하여 수정된 보정계수의 유용성을 확인할 수 있었다.

(4) 수정된 Bridgman 보정계수를 적용한 유효응력-유효변형률 곡선과 탄소성 유한요소해석을 이용하여 고탄소강 다단 신선 와이어에 대한 축방향 잔류응력을 평가하였다. 그 결과 축방향 잔류응력은 패스가 진행됨에 따라 점진적으로 증가함을 알 수 있었다.

(5) 예측된 축방향 잔류응력의 타당성을 검증하기 위하여 다단신선 실험을 수행하였다. 실험 후 XRD 를 이용하여 각 패스 와이어의 잔류응력을 측정 후 유한요소해석 결과와 비교하였다. 비교 결과 수정된 Bridgman 보정계수를 적용한 경우 실험결과와 잔류응력이 잘 일치함을 알 수 있었다. 이를 통하여 수정된 Bridgman 보정계수를 적용한 고변형률 영역의 유효응력-유효변형률 곡선을 적용한 경우 보다 정확한 잔류응력 해석이 가능함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2009 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(NR-2006-K20601000004-09E0100-00410) 및 ㈜고려제강의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Atienza, J. M., Martinez-Perez, M. L., Ruiz-Hervias, J., Mompean, F. J., Garcia-Hernandez, M. and Elices, M., "Residual Stresses in Cold Drawn Ferrite Rods," Scripta Materialia, Vol. 52, No. 2, pp. 305-309, 2005.
2. Atienza, J. M., Ruiz-Hervias, J., Martinez-Perez, M. L., Mompean, F. J., Garcia-Hernandez, M. and Elices,

- M., "Residual Stresses in Cold Drawn Pearlitic Rods," Scripta Materialia, Vol. 52, No. 12, pp. 1223-1228, 2005.
3. Atienza, J. M. and Elices, M., "Influence of Residual Stress in The Tensile Test of Cold Drawn Wires," Materials and Structures, Vol. 36, No. 8, pp. 548-552, 2003.
4. Elices, M., Ruiz, J. and Atienza, J. M., "Influence of Residual Stresses on Hydrogen Embrittlement of Cold Drawn Wires," Materials and Structures, Vol. 37, No. 5, pp. 305-310, 2004.
5. Kuboki, T., Kawakami, I. and Neishi, Y., "A Study on The Influence of Mechanical Properties on The Distribution of Axial Residual Stress after Cold Drawing of Metallic Bars," Materials Science Research International, Vol. 7, No. 1, pp. 41-46, 2001.
6. Born, M. and Wolf, E., "Principles of Optics 7th Edition," Cambridge University Press, pp. 517-521, 1990.
7. Ko, D. C., Hwang, W. H., Lee, S. K. and Kim, B. M., "A Study on The Method of Residual Stress Relaxation during Wire Drawing and Evaluation of Residual Stress Using Nano-Indentation Test," Journal of KSPE, Vol. 23, No. 5, pp. 162-169, 2006.
8. Eom, J. G., Jee, C. W. and Joun, M. S., "Suggestion of a New Constitutive Law for Modeling True Stress-Strain Curves over Large Strain," Proc. of KSME Fall Conference, pp. 13-18, 2006.
9. Bridgman, P. W., "Studies in Large Flow and Fracture," McGraw-Hill, 1956.
10. Sevillano, J. G., "Room Temperature Plastic Deformation of Pearlitic Cementite," Materials Science and Engineering, Vol. 21, pp. 221-225, 1975.
11. Martinez-Perez, M. L., Mompean, F. J., Ruz-Hervias, J., Borlado, C. R., Atienza, J. M., Garcia-Hernandez, M., Elices, M., Gil-Sevillano, J., Peng, R. L. and Buslaps, T., "Residual Stress Profiling in the Ferrite and Cementite Phase of Cold-Drawn Steel Rods by Synchrotron X-ray and Neutron Diffraction," Acta Materialia, Vol. 52, No. 18, pp. 5303-5313, 2004.
12. Van Acker, M., Root, J., Van Houtte, P. and Aernoudt, E., "Neutron Diffraction Measurement of The Residual Stress in The Cementite and Ferrite Phases of Cold-Drawn Steel Wires," Acta Meterialia, Vol. 44, No. 10, pp. 4039-4049, 1996.