

고탄소강 펄라이트 조직의 인발 공정 시 전단응력의 해석

김현수¹ · 김병민[#] · 배철민² · 이충열²

Analysis on Shear Stress During Drawing Process of Pearlite Structure of High Carbon Steel

H. S. Kim, B. M. Kim, C. M. Bae, C. Y. Lee

(Received January, 19, 2005)

Abstract

This paper presents a study on defects in pearlite lamella structure of high carbon steel by means of finite-element method(FEM) simulation. High-carbon pearlite steel wire is characterized by its nano-sized microstructure feature of alternation ferrite and cementite. The likely fatigue crack is located on interface of the lamella structure where the maximum amplitude of the longitudinal shear stress and transverse shear stress was calculated during cyclic loading. The FEM is proposed for maximum shear stress from loading of lamella structure, and a method is predicted to analyze the likely fatigue crack generation. It is possible to obtain the important basic data which can be guaranteed in the ductility of high carbon steel wire by using FEM simulation.

Key Words : Pearlite, FEM, Lamella Spacing, Wire Drawing

1. 서 론

지구 환경문제 즉, 지구온난화, 오존층의 파괴 등의 방지 목적으로 자동차경량화를 통한 대기오염물질 배출감소를 위하여 자동차의 타이어의 경량화 및 안전성 향상이 매우 중요하다. 특히, 자동차 타이어 보강재료인 스틸 코드(steel cord) 제품의 고강도화 및 피로수명의 개선이 요구되고 있다.

신선 가공에 의해 제조되는 강선은 산업계 및 일상생활에서 쉽게 접할 수 있는 와이어 현수고, 자동차 타이어, 각종 스프링 등 매우 넓은 범위에서 사용되고 있다. 이러한 선재는 대개 $\phi 5 \sim 13\text{mm}$ 선径의 고탄소강 선재를 신선 가공한 후 최종 제품의 특성에 따라 적합한 열처리 및 도금

을 하여 제조된다. 이때 선재의 연성을 확보하기 위하여 신선 도중 1~2회의 열처리를 통하여 미세조직을 제어한다.

신선 가공된 선재의 연성은 강도와 밀접한 관계가 있다. 특히 강도가 높아질 수록 연성과 내부 거동은 나빠지게 된다. 내부 거동을 평가하기 위해서 중요한 내부 인자는 인발공정 시 발생하는 전단응력의 분포이다. 또한 외부 인자는 부적절한 표면의 상태, 신선공정 시 신선공정조건과 다이스의 표면상태 등 여러 가지 인자들이 존재하고 있다.

이러한 외부인자들 보다는 내부 인자들을 제어하는 것이 더욱 중요하다고 볼 수 있다. 특히, 펄라이트층상구조를 가지는 고탄소강에서는 세멘타이트와 페라이트 사이의 τ_p (수직방향 전단응력)

1. 부산대학교 정밀기계공학과
2. POSCO 기술연구소 선재연구그룹
교신저자: 부산대학교 정밀정형및금형가공연구소
E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

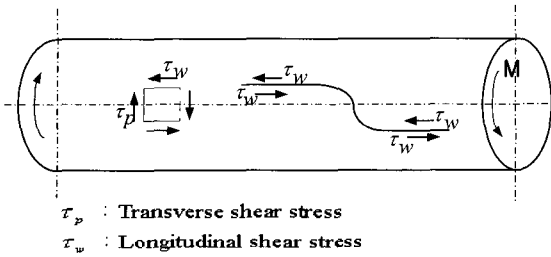


Fig. 1 Expression of shear stress

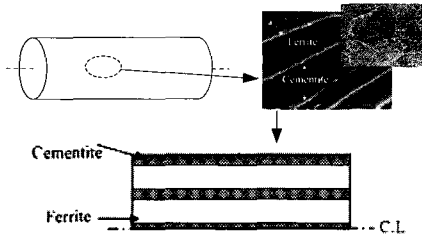


Fig. 2 FE model of lamella structure

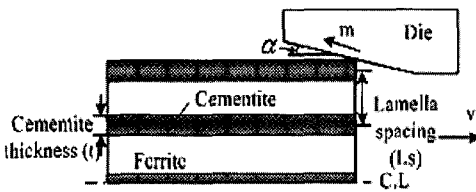


Fig. 3 Drawing process variables of lamella structure

과 τ_w (길이방향 전단응력)의 분포가 선재의 파단을 평가하는 가장 중요한 인자이고, 이러한 인자들을 Fig. 1에 나타내었다.

연성을 지배하는 금속학적인 인자는 어느 정도 알려져 있으나 가공 조건 등 소성학적인 관점에서 연성 저하는 잘 알려져 있지 않다. 따라서 소성학적인 측면에서 선재의 파단에 대해 신선조건이 미치는 영향을 체계적으로 파악하는 것은 매우 중요하다.

실험을 통한 연구는[1~3] 비용과 시간이 많이 소요되므로, 본 논문에서는 유한요소 해석을 통해 신선재의 고강도 및 연성의 향상과 선재의 파단 방지에 대한 연구를 수행하였다. 신선가공조건에 대한 재료 내부의 전단응력을 비교하기 위하여 신선재의 펄라이트 층상구조에 인발공정 유한요소 해석을 수행하였고, 공정조건 및 층상 간격에 대한 전단응력을 분석하여 인발공정 시 발생하는 선재의 파단 발생을 판단할 수 있었다.

Table 1 Process conditions of wire drawing

Drawing conditions	Values
Cementite thickness = t (mm)	0.05
Lamella spacing = Ls (mm)	0.2625, 0.3125
Semi-die angle = α (°)	5, 7, 10, 13
Reduction in area = R.A (%)	10, 15, 20, 25

Table 2 Material properties of cementite and ferrite

Materials		Flow Stress [MPa]
Cementite	AISI 1080	$\bar{\sigma} = 1332.21(\bar{\epsilon})^{0.42}$
Ferrite	AISI 1010	$\bar{\sigma} = 452.8(\bar{\epsilon})^{0.21}$

2. 유한요소해석 모델 및 조건

2.1 유한요소해석 모델

고탄소강의 펄라이트 조직은 세멘타이트와 페라이트의 층상구조로 구성되어있다. 선재 전체의 펄라이트 조직을 모델링을 하기에는 매우 힘들다. 그러므로 Fig. 2에서처럼 선재의 일부분만을 고려하였고, 세멘타이트와 페라이트로 이루어진 층상구조를 평면 변형 문제로 가정하여 FE 모델링을 설정하였고, 다이스를 통과하여 선재가 가공을 받는 것으로 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 상용프로그램인 ABAQUS-2D로 수행하였다.

2.2 유한요소해석 조건

본 해석에서는 선재의 연성에 미치는 공정조건 영향을 평가하기 위한 유한요소해석을 수행하였다. 온도의 영향은 고려하지 않고, 냉간인발 공정조건에서 펄라이트 조직의 층상구조에 대한 해석을 중점적으로 수행하였다.

따라서, 본 논문에서는 유한요소해석을 통해 실제 공정에서 발생할 수 있는 현상을 분석하고, 다이 반각, 단면 감소율, 층상 구조의 층상 간격 등의 유한요소해석 조건들이 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구에서 사용되어지는 공정변수들을 Fig. 3에 나타내었다.

펄라이트 조직의 물성확보에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 세멘타이트와 페라이트의 유동응력식을 탄소함유량으로 어느 정도 예측을 할 수 있다. 세멘타이트는 고탄

소강의 물성으로, 페라이트는 저탄소강의 물성으로 가정을 하여 본 해석에 적용시켰고, Table. 1에 세멘타이트와 페라이트의 물성을 나타내었다[4~5].

3. 유한요소해석 결과

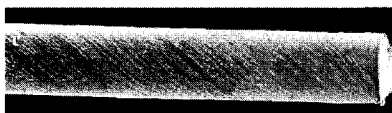
3.1 층상간격 변화에 대한 평가

본 절에서는 층상구조의 τ_p 와 τ_w 을 평가하기 위해서 유한요소해석을 하였다. 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서의 τ_p 와 τ_w 는 결함 발생에 중요한 역할을 한다. 만약 τ_p 가 τ_w 보다 크다면 수직방향으로 결함발생확률이 높아지게 되고, 선재는 신선방향에 직각으로 깨끗한 단면으로 파단을 하게 된다. 하지만 τ_p 가 τ_w 보다 작게 된다면 길이방향으로 결함발생확률이 높아지게 되고, 선재는 결함이 발생하게 된다.

이러한 τ_p 와 τ_w 에 의한 결함발생에 대한 예를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 인발공정 후 선재를 비틀림 실험을 수행 하였을 때, 인발공정에 의하여 τ_p 가 τ_w 보다 크게 된다면 Fig. 4(a)와 같이 신선방향에 직각으로 파단되는 것을 볼 수 있고, τ_p 가 τ_w 보다 작아지게 된다면 Fig. 4(b)와 같이 길이 방향으로 결함이 발생된 경우를 확인할 수 있다.

그러므로 τ_p 와 τ_w 의 분포는 신선재의 연성에 영향을 미치는 중요한 요인으로 작용하기 때문에, 본 해석에서는 단면감소율을 20%, 다이 반각을 7°, 세멘타이트 두께를 0.05mm로 고정하여 층상 간격의 변화에 따른 τ_p 와 τ_w 의 영향을 분석하였고, Fig. 5는 층상간격에 대한 FE 모델을 나타낸 그림이다.

층상구조를 지니고 있는 고탄소강 선재는 주로 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서 결함의



(a) Sound fracture

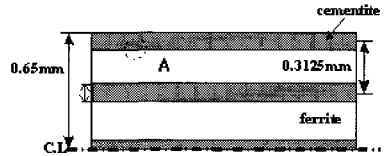


(b) Delamination

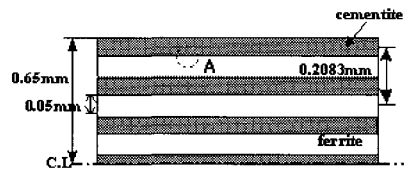
Fig. 4 Fracture mode for twist test

발생이 시작되어지고 결함이 성장하므로, 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서 τ_p 와 τ_w 값을 비교하는 것은 매우 중요하다.

Fig. 6은 층상구조의 전단응력을 분석한 위치를 나타낸 그림으로, 층상간격이 0.3125와 0.2083mm

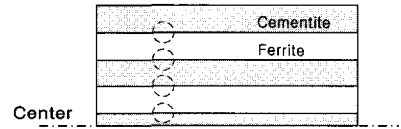


(a) Lamella spacing 0.3125mm

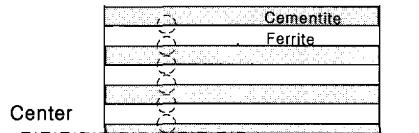


(b) Lamella spacing 0.2083mm

Fig. 5 Condition of lamella spacing



(a) Lamella spacing 0.3125mm



(b) Lamella spacing 0.2083mm

Fig. 6 Location of shear stress analysis according to lamella spacing

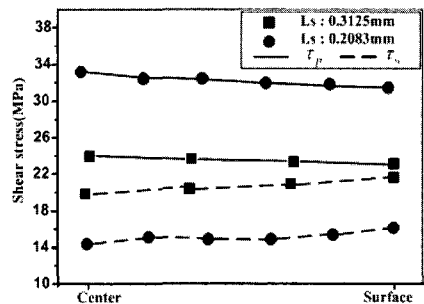


Fig. 7 Relation between lamella spacing and shear stress on location of lamella structure

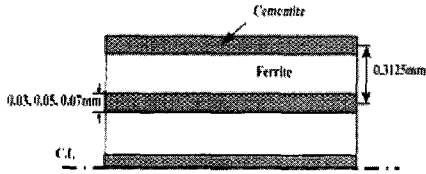


Fig. 8 Condition of cementite thickness

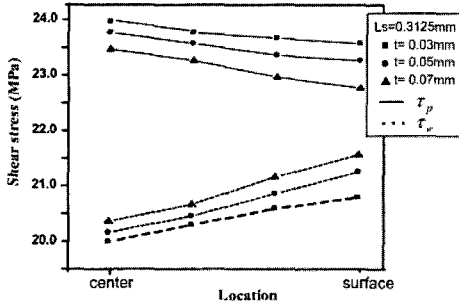


Fig. 9 Relation between cementite thickness and shear stress on location of lamella structure

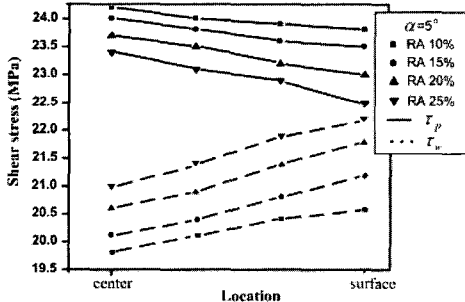


Fig. 10 Relation between Reduction area angle and shear stress on location of lamella

두 경우에 대하여 세멘타이트와 페라이트의 경계점에서 τ_p 와 τ_w 을 조사하였고, Fig. 7은 위와 같은 공정조건으로 층상간격의 변화에 따른 τ_p 와 τ_w 의 변화를 나타낸 그림이고, τ_p 와 τ_w 의 측정위치는 Fig. 6(a)에 나타낸 그림과 같다.

Fig. 7에서 세멘타이트와 페라이트 경계지역의 τ_p 는 층상간격이 커질 수록 낮게 나타나는 것을 볼 수 있고, 세멘타이트와 페라이트 경계지역의 τ_w 는 층상 간격이 커질 수록 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 층상 간격이 작을 수록 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서 수직방향으로 파단될 가능성이 높아지므로, 최종선재의 연성확보와 세멘타이트와 페라이트의 경계면에서 결합방지에 유리할 것이라고 판단할 수 있다[6~8].

3.2 세멘타이트의 두께 변화에 대한 평가
 층상 구조의 세멘타이트 두께에 대한 영향을 평가하기 위해서, 본 해석에서는 층상 간격에 대한 해석과 동일한 인발 공정 조건으로 다이 반각을 5°, 단면감소율을 10%, 층상 간격을 0.3125mm로 고정하였고, 세멘타이트의 두께를 0.03, 0.05, 0.07mm로 변화시켜 가면서 세멘타이트의 두께에 따른 τ_p 와 τ_w 값을 평가하였고, FE 모델은 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 9는 위와 같은 공정조건으로 층상간격의 변화에 따른 τ_p 와 τ_w 의 변화를 나타낸 그림이고, τ_p 와 τ_w 의 측정위치는 Fig. 6(b)에 나타낸 그림과 같다.

Fig. 9에서 세멘타이트와 페라이트 경계지역의 τ_p 는 세멘타이트의 두께가 커질 수록 낮게 나타나는 것을 볼 수 있고, 세멘타이트와 페라이트 경계지역의 τ_w 는 세멘타이트의 두께가 두꺼워질 수록 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 세멘타이트의 두께가 작을 수록 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서 수직방향으로 파단될 가능성이 높아지므로, 신선공정 시 세멘타이트와 페라이트의 경계면에서 결합발생확률이 낮아지게 될 것이라고 판단할 수 있다[9~10].

3.3 인발공정조건 변화에 대한 평가

본 해석에서는 일정한 세멘타이트 두께와 층상 간격에 대하여, 신선공정조건인 단면감소율을 변화시켜 가면서 층상 구조에서 세멘타이트의 τ_p 와 τ_w 에 대하여 유한요소해석을 하였다.

Fig. 10은 다이 반각을 5°, 세멘타이트 두께를 0.05mm, 층상 간격을 0.3125mm의 일정한 조건으로 고정시켰고, 단면감소율을 10, 15, 20, 25%로 변화시켜 가면서 τ_p 와 τ_w 의 변화를 나타낸 그림이고, τ_p 와 τ_w 의 측정위치는 Fig. 6(a)에서 나타낸 위치와 같다.

Fig. 10에서 세멘타이트와 페라이트의 경계지역의 τ_p 는 단면 감소율이 커질 수록 낮게 나타나는 것을 볼 수 있고, 세멘타이트와 페라이트 경계지역의 τ_w 는 단면 감소율이 커질 수록 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 단면 감소율을 10%, 세멘타이트의 두께를 0.05mm, 층상 간격을 0.3125mm로 일정하게 고정하였고, 다이 반각을 5, 7, 9, 13°로 변화시켜 가면서 τ_p 와 τ_w 의 변화를 나타낸 그래프이다.

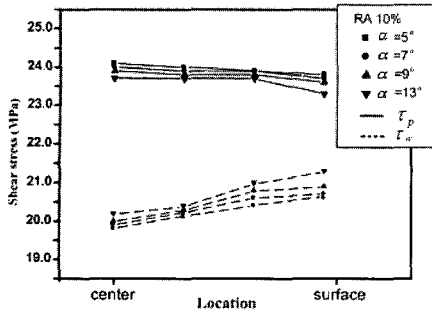


Fig.11 Relation between semi-die angle and shear stress on location of lamella

τ_p 와 τ_w 의 분석위치는 Fig. 6(a)에 나타낸 것과 같다.

Fig. 11에서 세멘타이트와 페라이트의 경계지역의 τ_p 는 다이 반각이 커질 수록 낮게 나타나는 것을 볼 수 있고, 세멘타이트와 페라이트의 경계지역의 τ_w 는 다이 반각이 커질 수록 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 다이스에 가까울 수록 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서 τ_p 와 τ_w 값의 차이가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서, 일정한 세멘타이트의 두께와 층상 간격에 대해서 단면감소율과 다이 반각이 커질 수록 길이 방향의 파단발생확률이 높아지고, 결함(delamination)발생가능성이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

3.4 층상구조에 대한 비틀림 유한요소해석

비틀림 실험은 내부 전단응력을 평가하기 위한 실험중의 하나이다. 본 해석에서는 비틀림 실험을 통하여 층상간격과 세멘타이트의 두께가 비틀림 해석을 통하여 어떠한 영향을 미치는 평가를 하였다. 층상구조에 대한 비틀림 거동을 평가하기 위해서, 본 해석에서는 아래의 Fig. 12와 같이 층상구조를 모델링하였고, 유한요소해석 과정을 나타내었다.

층상구조의 비틀림 해석에서 세멘타이트 두께에 대한 평가를 하기 위하여, 본 해석에서는 층상간격을 0.525mm 로 고정하였고, 세멘타이트의 두께를 0.1, 0.15, 0.2mm 로 변화시켜 가면서 세멘타이트의 가장자리의 τ_p 와 τ_w 분포를 평가하였다. 세멘타이트 가장자리의 τ_p 와 τ_w 를 측정하는 이유는 비틀림실험 동안 파손은 주로 표면부에서 발생되어지므로, 표면부의 τ_p 와 τ_w 의 분석은 비틀림 해석시 가장 중요한 점이라고 말할 수 있다.

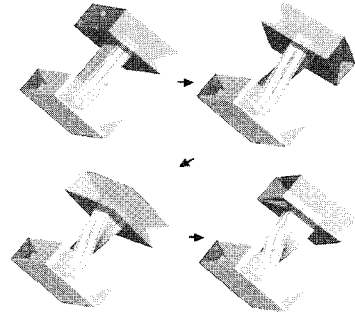


Fig.12 FE model on torsion test

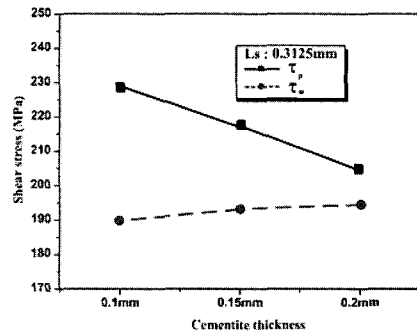


Fig.13 Relation τ_p and τ_w on cementite thickness

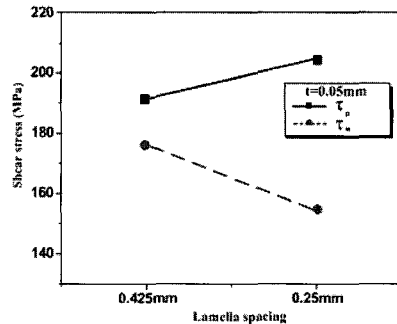


Fig.14 Relation τ_p and τ_w on lamella spacing

Fig. 13은 위와 같은 조건으로 층상구조를 2.28 rad 회전 후 τ_p 와 τ_w 의 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 13에서 모든 측정위치에서 τ_p 와 τ_w 는 세멘타이트 두께의 세 경우 모두에 대해서 τ_p 가 τ_w 보다 크게 나타나고 있다. 세멘타이트의 두께가 작아질 수록 τ_p 의 값은 높게 나타나고, τ_w 의 값은 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 세멘타이트의 두께가 작아질 수록 길이방향의 결함발생확률 보다는 축에 수직인 방향의 결함발생확률이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

층상구조의 비틀림 해석에서 층상간격에 대한 평가를 하기 위하여, 본 해석에서는 세멘타이트의

두께를 0.1mm 로 고정하였고, 층상간격을 0.425, 0.25mm 로 변화시켜 가면서 2.05rad 회전 후 세멘타이트의 τ_p 와 τ_w 분포를 평가하였고, τ_p 와 τ_w 의 측정 위치는 세멘타이트의 두께에 대한 평가와 동일한 위치로 측정을 하였다.

Fig. 14는 위와 같은 조건으로 층상구조를 2.05 rad 회전 후 τ_p 와 τ_w 의 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 14에서 모든 측정위치에서 τ_p 와 τ_w 는 층상간격의 두 경우 모두에 대해서 τ_p 가 τ_w 보다 크게 나타나고 있다. 층상간격이 작아질 수록 τ_p 의 값은 높게 나타나고, τ_w 의 값은 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 층상간격이 작아질 수록 τ_p 와 τ_w 값의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 층상간격이 작아질 수록 길이방향의 결합발생확률 보다는 축에 수직한 방향의 결합발생확률이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

고탄소강 선재는 펠라이트 조직으로 층상 구조로 되어있다. 이러한 층상 구조의 유한요소해석을 위해 모델링 및 경계조건 등을 설정하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 층상 간격의 변화에 대한 경우, 일정한 신선 공정 조건과 세멘타이트의 두께에 대하여 층상간격이 작을수록 τ_p 값은 높게 나타나고 τ_w 값은 낮게 나타나므로 소재의 결합 발생 억제 측면과 연성확보 측면에서 유리하였다.

(2) 세멘타이트 두께의 변화에 대한 경우, 일정한 신선 공정 조건과 층상 간격에 대하여 τ_p 값은 중심부에서 표면부로 갈 수록 높게 나타났다. 세멘타이트의 두께가 작아질수록 τ_p 값은 높게 나타나고 τ_w 값은 낮게 나타나므로 소재의 결합 발생 방지 측면과 연성확보 측면에서 대하여 유리하였다.

(3) 신선가공조건의 경우, 일정한 세멘타이트의 두께와 층상 간격에서는 단면감소율이 작을 수록 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서 τ_p 값은 높게 나타나고 τ_w 값은 낮게 나타나므로 세멘타이트와 페라이트의 경계지역 결합의 방지 측면에서 유리하였다.

(4) 비틀림 해석의 경우, 세멘타이트의 두께와

층상간격이 작아질수록 τ_p 의 값은 τ_w 의 값보다 낮게 나타나므로, 소재의 표면결합의 방지 측면에서 유리하였다.

실제 고탄소강 선재에서 발생할 수 있는 각종 결합발생 기구를 유한 요소 해석을 수행하여 파악하였으며, 해석 결과들을 고려하여 고탄소강 펠라이트 조직의 층상구조에서 결합을 방지할 수 있는 신선 공정 조건을 선정할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] A. Middlemiss, D. P. Hague, July 1973, Torsional ductility in carbon steel wire-part 1, WIRE INDUSTRY, pp. 462~466.
- [2] A. Middlemiss, D. P. Hague, July 1973, Torsional ductility in carbon steel wire-part 2, WIRE INDUSTRY, pp. 538~543.
- [3] W. Van Raemdonck, et al, June 1994, Torsion tests as a tool for high strength wire evaluation, WIRE JOURNAL INTERNATIONAL, pp. 68~75.
- [4] A. Nadai, 1950, Theory of Flow and Fracture of Solids," McGraw-Hill Book Company, 2d ed., vol. I, pp. 347~349.
- [5] Jan W. Pilarczyk, 1997, Hydrodynamic drawing effects on wire ASTRO characteristics, WIRE JOURNAL INTERNATIONAL, pp. 70~83.
- [6] Kenichi SHIMIZU, Nozomu KAWABE, 2001, Size Dependence of Delamination of High-carbon Steel Wire, ISIJ International, vol. 41, No. 2, pp. 183~191.
- [7] T. Umemoto et al, 2001, Production and Characterization of Bulk Cementite, CAMP-ISIJ, vol. 14, pp. 1110~1113.
- [8] M. T. Todinov, 1999, Maximum principal tensile stress and fatigue crack origin for compression springs, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 41, pp. 357~370.
- [9] 남원중, 2004, 신선가공한 고탄소 강선의 연성에 영향을 주는 미세조직 인자, 한국소성가공학회, Vol.13, No. 8, pp. 713~715.
- [10] J. W. Pilarczyk, H. Dyja, B. Golis, Tabuda, 1998, Effect of roller die drawing on structure, texture and other properties of high carbon steel wires, Metals and Materials Inter., Vol .4, pp. 727~731.