

고탄소강 펄라이트 조직의 인발 공정 시 전단응력의 해석

김현수* · 김병민** · 배철민*** · 이충열***

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

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

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(펄라이트), FEM(유한요소법), Lamella Spacing(층상간격), Wiredrawing(신선가공)

1. 서론

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 현수교, 자동차 타이어, 각 종 스프링 등 매우 넓은 범위에서 사용되고 있다. 이러한 선재는 대개 5 ~ 13mm ϕ 선径의 고탄소강 선재를 신선 가공 후 최종 제품의 특성에 따라 적합한 열처리 및 도금을 하여 제조된다. 이때 선재의 연성을 확보

하기 위하여 신선 도중 1~2 회의 열처리를 통하여 미세조직을 제어한다. 신선 가공된 선재의 연성은 강도와 밀접한 관계가 있다. 특히 강도가 높아질수록 연성과 내부 거동은 나빠지게 된다. 내부 거동을 평가하기 위해서 중요한 내부 인자는 인발 공정 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, 펄라이트 층상구조를 가지는 고탄소강에서는 세멘타이트와 페라이트 사이의 τ_p (수직방향 전단응력)과 τ_w (길이방향 전단응력)의 분포가 선재 표면의 파단을 평가하는 가장 중요한 인자이고 Fig.1 에 나타내었다.

* 부산대학교 정밀기계공학과
** 부산대학교 기계공학부
*** (주)POSCO 기술연구소 선재연구그룹

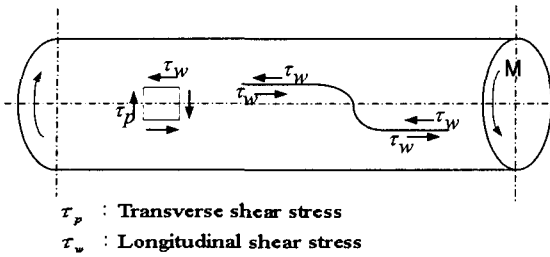


Fig. 1 Expression of shear stress

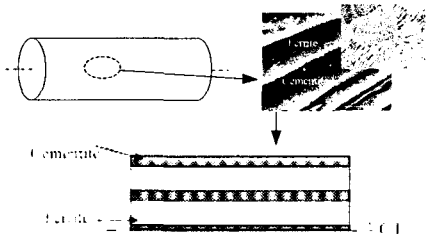


Fig. 2 FE model of lamella structure

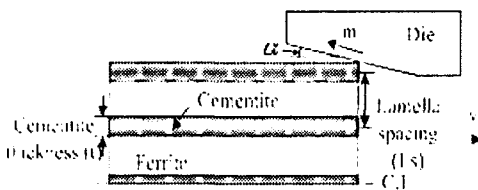


Fig. 3 Drawing process variables of lamella structure

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

따라서 본 논문에서는 선재의 고강도 및 연성의 향상과 선재의 파단에 대한 방지를 위하여 다음과 같은 연구를 하였다. 펄라이트 조직에 대한 모델링과 유한요소해석을 수행 하였고, 선재가 공조건에 대한 재료 내부의 전단응력을 비교하였고, 선재의 펄라이트 층상구조에 인발공정 유한요소해석을 수행하여 공정조건, 층상 간격에 대한 전단응력을 분석하여 인발 시 발생하는 선재의 파단 발생을 판단할 수 있었다.⁽¹⁻³⁾

2. 유한요소해석 모델 및 조건

2.1 유한요소해석 모델

Table. 1 Process conditions of wire drawing

Drawing conditions	Values
Cementite thickness = t (mm)	0.05
Lamella spacing = Ls (mm)	0.2625, 0.3125mm
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	$\bar{\sigma} = 452.8(\bar{\epsilon})^{0.21}$

고탄소강의 펄라이트 조직은 세멘타이트와 페라이트로 구성되어있다. 선재 전체의 펄라이트 조직을 모델링을 하기에는 매우 힘들다. 그러므로 Fig. 2 에서처럼 선재의 일부분만을 고려하여 세멘타이트와 페라이트로 이루어진 층상구조의 평면 변형 문제로 가정하여 FE 모델링을 하였고, 다이스를 통과하여 선재가 가공을 받는 것으로 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 상용프로그램인 ABAQUS-2D를 사용하였다.

2.2 유한요소해석 조건

본 해석에서는 선재의 연성에 미치는 공정조건의 영향을 평가하기 위한 해석을 수행하였다. 실제 실험을 통한 연구는 비용과 시간이 많이 드는 단점이 있다. 그러므로 펄라이트 조직의 층상구조를 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 고탄소강의 물성으로, 페라이트는 저탄소강의 물성으로 가정하여 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 에 대하여 유한요소해석을 하였다. 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서의 τ_p 와 τ_w 는 표면결합 발생에 중요한 역할을 한다. 만약 τ_p 가 τ_w 보다 크다면 수직방향으로 결합발생확률이 높아지게 되고, 선재는 신선방향에 직각으로 깨끗한 단면으로 파단을 하게 된다. 하지만 τ_p 가 τ_w 보다 작게 된다면 길이방향으로 결합발생확률이 높아지게 되고, 선재는 결합이 발생하게 된다. 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 분석하였다.

Fig.4는 위와 같은 공정조건으로 층상간격의 변화에 따른 τ_p 와 τ_w 의 변화와 측정 위치를 나타낸 그림이다.

Fig. 4에서 세멘타이트와 페라이트 경계지역의 τ_p 는 층상간격이 커질수록 τ_p 의 값이 낮게 나타나는 것을 볼 수 있고, 세멘타이트와 페라이트 경계지역의 τ_w 는 층상 간격이 커질수록 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 층상 간격이 작을수록 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서 수직방향으로 파단될 가능성이 높아지므로, 신선공정 시 결합발생확률(delamination)이 낮아지게 될 것이라고 판단할 수 있다. (6~8)

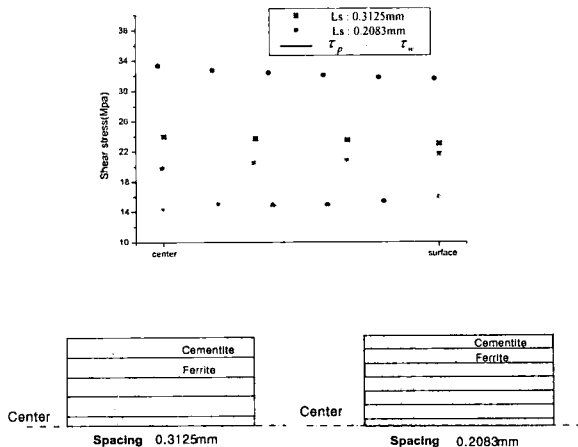


Fig. 4 Relation between lamella spacing and shear stress on location of lamella

3.2 단면감소를 변화에 대한 평가

본 해석에서는 일정한 세멘타이트 두께와 층상 간격에 대하여 신선공정조건을 변화시켜 가면서 층상 구조의 τ_p 와 τ_w 에 대하여 유한요소해석을 하였다.

Fig. 5는 다이 반각을 5°, 세멘타이트 두께를 0.05mm, 층상 간격을 0.3125mm에 대하여 단면감소율을 10, 15, 20, 25%로 변화시켜 가면서 τ_p 와 τ_w 의 변화를 나타낸 그래프이다.

Fig. 5에서 세멘타이트와 페라이트의 경계지역의 τ_p 는 단면 감소율이 커질수록 τ_p 의 값이 낮게 나타나는 것을 볼 수 있고, 세멘타이트와 페

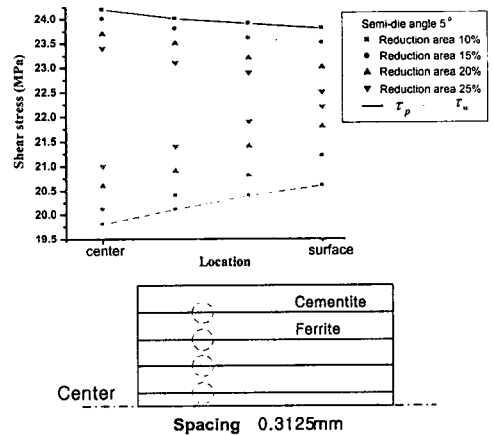


Fig. 5 Relation between Reduction area angle and shear stress on location of lamella

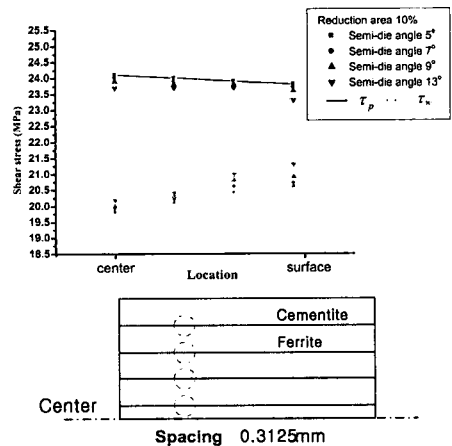


Fig. 6 Relation between semi-die angle and shear stress on location of lamella

라이트 경계지역의 τ_w 는 단면 감소율이 커질 수록 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6 은 일정한 단면 감소율(10%), 세멘타이트의 두께(0.05mm)와 층상 간격(0.3125mm)에서 다이 반각을 5, 7, 9, 13° 로 변화시켜 가면서 τ_p 와 τ_w 의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 6 에서 세멘타이트와 페라이트의 경계지역의 τ_p 는 다이 반각 커질 수록 τ_p 의 값이 낮게 나타나는 것을 볼 수 있고, 세멘타이트와 페라이트의 경계지역의 τ_w 는 다이 반각이 커질 수록 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 표면부 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 길이방향의 결합 발생확률이 높아지고, 결합(delamination)발생가능성이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

신선 가공된 제품의 연성은 소재의 물성 뿐 아니라 신선 가공 조건에 크게 좌우되어 적정 신선 가공 조건의 설정이 매우 중요하다. 그러나 대부분의 신선가공업체들의 경우는 가공 조건을 경험에 의하여 설정하고 있어 부적절한 가공조건에 의하여 단선과 같은 결함 뿐만 아니라 소재의 연성 확보가 곤란한 경우가 있다. 또한 최근 신선재의 고강도화 및 중간 열처리 생략이 크게 요구되고 있다.

이를 위해서는 신선중의 단선 방지를 위한 신선재의 연성확보가 매우 중요하다. 그러나 가공량이 증가하면 선재의 연성저하에 의한 단선이 발생되어 steel cord, rope, spring 등과 같은 후공정에서 제품의 건전성에 문제가 된다. 태경 선재의 경우에 이러한 현상이 현저하기 때문에 고강도화를 위해 주로 합금원소를 첨가함으로써 해결하고 있으나, 신선공정의 공정인자의 제어에 의한 연성확보를 위한 연구는 아직까지 만족할만한 단계에 와 있지 않다.

본 연구에서는 이 문제의 해결을 위해 신선 가공 조건에 따른 연성향상과 결함을 방지할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 고탄소강 선재는 펄라이트 조직으로 층상 구조로 되어있다. 이러한 층상 구조의 유한요소해

석을 위해 모델링 및 경계조건 등을 설정하여 층상 구조의 유한요소해석 기법을 확립하였다.

(2) 층상 구조에서, 세멘타이트에서 발생하는 τ_p 와 τ_w 를 조사함으로써 세멘타이트의 길이방향 결합과 수직방향 결합을 예측할 수 있었다. 층상 간격이 작을 수록 τ_p 의 값이 커지고, τ_w 의 값이 작아지므로 세멘타이트 자체의 길이방향 결합 가능성이 작아지므로, 세멘타이트에서 결합방생에 의한 결함의 방지측면에서 유리하다.

실제 고탄소강 선재에서 발생할 수 있는 각종 결함발생 기구를 유한 요소 해석을 수행하여 파악하였으며, 해석 결과들을 고려하여 고탄소강 펄라이트 조직의 층상구조에서 결함을 억제할 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 and 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," 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.