

< 논문 >

신선가공조건에 따른 고탄소강 선재 Pearlite 층상구조의 유한요소해석

김병민[†] · 김현수* · 배철민** · 이충열**

(2004년 9월 17일 접수, 2004년 12월 30일 심사완료)

FEM analysis of Pearlite Lamella Structure of High Carbon Steel on Drawing Process Conditions

Byung-min Kim, Hyun-soo Kim, Chul-min Bae, Choong-yeol Lee

Key Words: Pearlite(펄라이트), FEM(유한요소법), Lamella Spacing(층상 간격), Wiredrawing(신선 가공), High Carbon Steel(고탄소강)

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. FEM simulation was performed based on a suitable FE model describing the boundary conditions and the exact material behavior. Due to the lamella structure in high carbon pearlite steel wire, material plastic behavior was taken into account on deformation of ferrite and cementite. The effects of many important parameters(reduction in area, semi-die angle, lamella spacing, cementite thickness) on wire drawing process can be predicted by DEFORM-2D. 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.

1. 서 론

신선가공에 의해 제조되는 강선은 와이어 현수교, 자동차 타이어, 각종 스프링 등 산업계 및 일상생활에서 쉽게 접할 수 있는 매우 넓은 범위에서 사용되고 있다. 특히, 지구 환경문제 즉, 지구온난화, 오존층의 파괴 등의 방지 목적으로 자동차경량화를 통한 대기오염물질 배출감소를 위하여 자동차의 타이어의 경량화 및 안전성 향상이 매우 중요하다. 따라서, 자동차 타이어 보강재료

인 스틸 코드 제품의 고강도화 및 피로수명의 개선이 요구되고 있다.⁽¹⁾

이러한 강선은 대개 $\Phi 5.5\sim 1.3\text{mm}$ 선경의 0.4% C ~0.9% C 탄소강 선재를 신선 가공한 후 최종 제품의 특성에 따라 적합한 열처리 및 도금을 하여 제조된다. 이 때 연성을 확보하기 위하여 신선도중 1~2회의 열처리를 통하여 미세조직을 제어한다.

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 신소재의 고강도화 및 중간 열처리 생략이 크게 요구되고 있다.⁽²⁾

[†] 책임저자, 회원, 부산대학교 정밀정형및금형가공연구소
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2319 FAX : (051)514-7640

* 부산대학교 정밀기계공학과

** (주)POSCO 기술연구소 선재연구그룹

고탄소강 선재의 경우에 이러한 현상이 현저하기 때문에 고강도화를 위해 주로 합금원소를 첨가함으로써 해결하고 있으나, 신선공정의 공정인자의 제어에 의한 연성확보를 위한 연구는 아직까지 만족할만한 단계에 이르지 못하고 있다.

이러한 연성을 지배하는 금속학적 인자는 어느 정도 알려져 있으나, 가공 조건 등 소성학적 관점에서의 연성저하는 잘 알려져 있지 않다. 따라서 소성학적인 측면에서 연성저하에 대해 신선가공조건이 미치는 영향을 체계적으로 파악하는 것이 중요하다.

이를 위해서는 신선중의 내부결함 및 단선 등의 방지를 위한 신선재의 연성확보가 매우 중요하다. 그러나 가공량이 증가하면 선재의 연성저하에 의한 결함이 발생되어 후공정에서 제품의 건전성에 문제가 된다.

따라서 본 논문에서는 신선가공조건에 따른 선재의 고강도 및 연성향상, 결함 방지를 위하여 다음과 같은 연구를 하였다.

우선 펄라이트 조직의 층상구조에 대한 유한요소 모델링 기법을 확립하여 해석을 수행하였고, 신선공정에 따른 층상구조의 변화를 관찰하였다. 신선가공조건에 따른 층상구조 내부의 유동응력과 변형률을 분석하여 신선가공조건이 펄라이트

조직 층상구조의 연성에 미치는 영향을 비교 및 검토 하였다.⁽³⁾

2. 유한요소해석 모델 및 조건

2.1 유한요소해석 모델

펄라이트 조직에 대한 신선가공 유한요소해석을 수행하기 위해서는 해석에 필요한 물성치 확보가 가장 중요하고, FE 모델링, 해석 조건 설정, 해석방법 등이 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 1은 펄라이트 조직 층상구조의 FE 모델을 나타내었다. 펄라이트 조직은 세멘타이트와 페라이트의 층상구조로 되어있고, 나노단위로 매우 미세한 구조이기 때문에 일반적인 선재 신선가공 해석 방법으로 수행하는 것은 매우 어렵다.

따라서 유한요소해석을 수행하기 위하여 FE 모델은 Fig. 1에서처럼 고탄소강 선재의 일부분만을 고려하여 세멘타이트와 페라이트로 이루어진 마이크로 단위의 층상구조의 평면변형(plane strain) 문제로 가정하였고, 다이스를 통과함으로써 신선공정이 이루어진다고 하였다. 본 연구는 유한요소해석을 수행하기 위하여 강소성 전용프로그램인 DEFORM-2D를 사용하였다.⁽⁴⁻⁶⁾

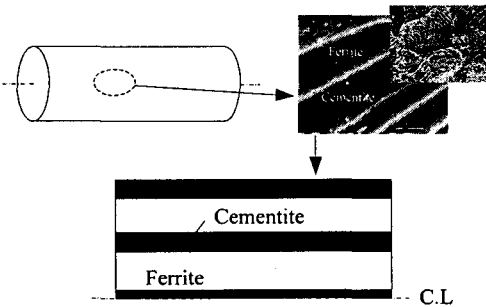


Fig. 1 FE model of lamella structure

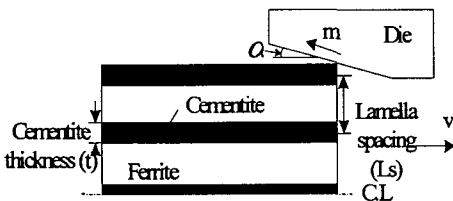


Fig. 2 Drawing process variables of lamella structure

Table 1 Drawing process conditions of lamella structure

Drawing conditions	Values
Cementite thickness (t)	0.03, 0.05, 0.07mm
Lamella spacing (Ls)	0.2625, 0.3125mm
Semi-die angle (α°)	5, 7, 9, 13
Reduction in area (RA %)	10, 15, 20, 25
Friction factor (m)	0.1

Table 2 Material properties of cementite and ferrite

Materials		Flow stress-strain(MPa)
Cementite	AISI 1080	$\bar{\sigma} = 1322.1 (\bar{\epsilon})^{0.41}$
Ferrite	AISI 1010	$\bar{\sigma} = 452.8 (\bar{\epsilon})^{0.21}$

2.2 유한요소해석 조건

본 논문에서는 유한요소해석(DEFORM-2D)을 이용하여, 펄라이트 조직의 층상구조가 선재의 연성에 미치는 공정조건 영향을 평가하기 위한 해석을 수행하여, 실제공정에서 발생할 수 있는 현상을 분석하였고, 다이 반각, 단면 감소율, 층상 구조의 층상 간격 및 세멘타이트의 두께 등의 유한요소해석 조건들이 미치는 영향을 평가하였다.⁽⁷⁻⁹⁾

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 공정변수들을 나타낸 그림이고, 해석에 사용되는 공정조건을 Table. 1에 나타내었다.

2.3 재료의 기계적 성질

펄라이트조직 층상구조의 유한요소해석을 수행하기 위하여, 기계적 물성의 확보는 매우 중요하다.

하지만 유한요소해석을 위해서 층상구조의 구성요소로 사용되어진 세멘타이트와 페라이트는 인장실험이나 나노인덴테이션실험 등의 실험으로 통하여 유동응력식을 확보하기는 매우 힘든 실정이다. 펄라이트 조직의 물성확보에 대한 연구는 아직 미흡한 상태에 있지만, 세멘타이트와 페라이트의 탄소함유량으로 강도를 어느 정도 예측할 수 있다. 일반적으로 탄소강은 탄소함유량에 따라 탄소강의 강도가 달라지므로, 세멘타이트와 페라이트의 탄소함유량으로 소재의 물성치를 예측할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 세멘타이트의 강도가 페라이트보다 약 3배 정도 강도가 높다고 고려하여 세멘타이트는 고탄소강의 물성, 페라이트는

저탄소강의 물성으로 가정하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용되어진 이들 재료의 유동응력식을 Table. 2에 나타내었다.⁽⁹⁾

3. 유한요소해석 결과

3.1 연성파괴이론

일반적으로 유한요소 해석을 통하여 단선 발생 가능성을 평가하는 기준은 손상값(Damage value)와 정수압 응력의 분포와 크기로 판단할 수 있다. 손상값을 산정하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서 유한요소 해석을 통하여 얻기 위한 값은 Cockroft & Latham이 제안한 모델을 사용하였다.⁽¹⁰⁾

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\bar{\epsilon} = \int_0^{\bar{\epsilon}_{ms}} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\bar{\epsilon} + \int_{\bar{\epsilon}_{ms}}^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

$$= \bar{\epsilon}_{UTS} + \int_{\bar{\epsilon}_{ms}}^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\bar{\epsilon}$$

여기서, $\bar{\epsilon}_f$ 는 파단시의 유효변형률, σ^* 는 최대 인장응력, $\bar{\epsilon}_{UTS}$ 는 넥킹 발생시의 유효변형률이다.

신선 중의 단선 발생은 크게 내부적인 원인과 외부적인 원인으로 대별할 수 있다. 외부적으로는 신선 중의 단선의 문제는 현장적인 경험, 신선 공정 분위기의 청결도 및 원소재(Wire rod)의 청정도 등에 달려 있으므로 공정 변수의 적절한 조합을 통한 해결에는 그 한계가 있다. 그러나 내부적인 원인에 의해 발생하는 단선, 즉 내부 결함(Central burst)에 의한 단선은 문제 발생 시 다이의 형상, 기계적 변수 및 페이스스케줄에 따라서 그 해결이 가능해 진다.

Fig. 3은 층상구조의 유한요소해석 결과인 손상값과 변형률의 분포를 나타낸 그림이다. 변형률은 중심부에서 표면부로 갈수록 높아지는 것을 확인할 수 있지만, 손상값은 인장응력에 의하여 중심부에서 최대값을 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한, 세멘타이트의 변형률이 페라이트보다 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

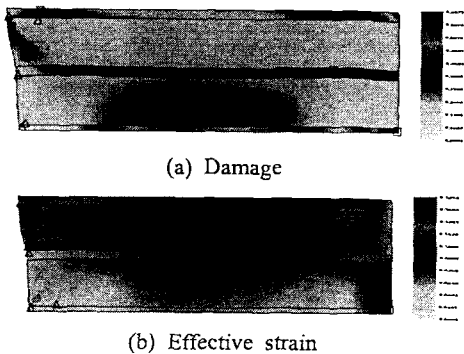


Fig. 3 Distribution of damage and effective strain

3.2 층상간격에 대한 평가

층상 구조의 층상 간격에 대한 영향을 평가하

기 위해서, 층상 간격을 변화시켜 가면서 손상값과 변형률을 평가하였다. 층상 구조의 세멘타이트와 페라이트의 손상값이 크다는 것은 연성파괴가 일어날 확률이 높다는 것을 의미한다. 또한, 세멘타이트와 페라이트의 경계면에서 변형률의 차이가 작을 수록 경계면 특성이 좋고, 경계면의 결합이 없이 좋은 연성을 얻을 수 있다.

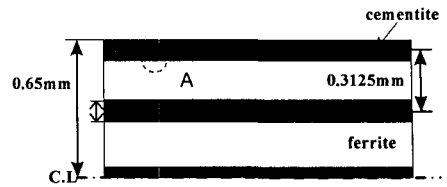
그러므로 손상값이 작고 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서의 변형률 차이가 작은 조건을 가지는 층상 간격이 연성향상을 위한 좋은 조건이라고 말할 수 있다.

Fig. 4는 층상 간격에 대한 FE 모델을 나타낸 그림이다. 세멘타이트의 두께를 0.05mm, 신선 공정 조건인 다이 반각을 5°, 단면감소율을 10%로 고정하였고, 층상 간격을 0.3125, 0.2083mm로 변화시켜가면서 신선재의 연성에 영향을 미치는 세멘타이트의 손상값과 세멘타이트와 페라이트의 경계지역(A)의 변형률 차이를 평가하였다.⁽¹¹⁾

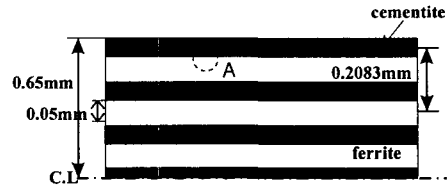
Fig. 5는 위와 같은 공정조건에 대한 세멘타이트의 손상값을 나타낸 그림이다. 손상값은 소재의 중심부로 갈 수록 높게 나타나고, 층상 간격이 작을 수록 낮게 나타나고 있다. 그러므로 층상간격이 커질 수록 결합발생 가능성이 높아지는 것을 확인할 수 있다.⁽¹²⁾

Fig. 6은 세멘타이트와 페라이트 경계지역(A)에서의 변형률 차이를 나타낸 그림이다. 세멘타이트의 변형률보다는 페라이트의 변형률이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 세멘타이트보다 페라이트의 소성변형이 잘 일어나는 것으로 판단할 수 있다. 층상 간격이 커질 수록 세멘타이트와 페라이트의 변형률 값은 높게 나타나고 있으나, 경계지역에서의 변형률 차이는 층상간격이 0.3125mm 일 때는 0.02028이고, 0.2083mm일 때는 0.01875로 작게 나타나고 있다. 그러므로 층상 간격이 커질 수록 세멘타이트와 페라이트의 경계면 결합 즉, 기공(void)이나 분절(fragmentation) 등과 같은 결합발생 가능성이 높아지므로 신선재의 연성향상 확보에 불리한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 7은 층상 간격에 대한 소재 중심부의 세멘타이트의 정수압응력을 나타낸 그림으로써, 층상 간격이 커질수록 정수인장응력이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.⁽¹³⁾ 즉, 소재 내부에 각종 결합이 존재할 때, 층상간격이 작을수록 결합의 성장 방지측면에서 유리한 것으로 판단할 수 있다.



(a) Lamella spacing 0.3125mm



(b) Lamella spacing 0.2083mm

Fig. 4 Condition of lamella spacing

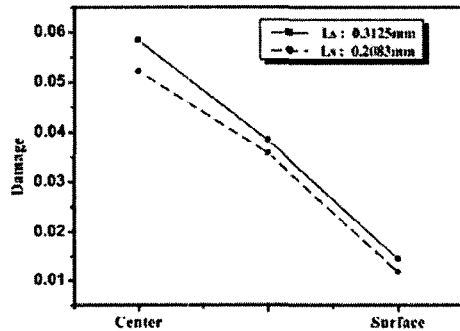


Fig. 5 Distribution of damage on cementite

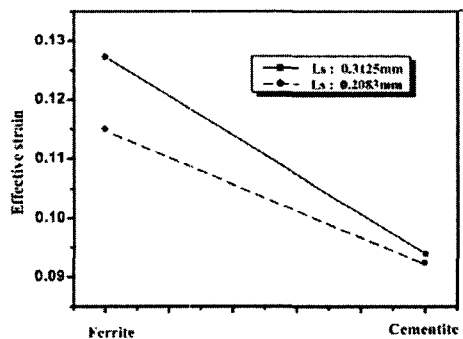


Fig. 6 Difference of effective strain at A

3.3 세멘타이트 두께 변화에 대한 영향 평가

층상 구조의 세멘타이트 두께에 대한 영향을 평가하기 위해서, 본 해석에서는 층상 간격에 대한 해석과 동일한 신선 공정 조건으로 다이반각을 5°, 단면감소율을 10%, 층상 간격을 0.3125mm로 고정하였고, 세멘타이트의 두께를 0.03, 0.05,

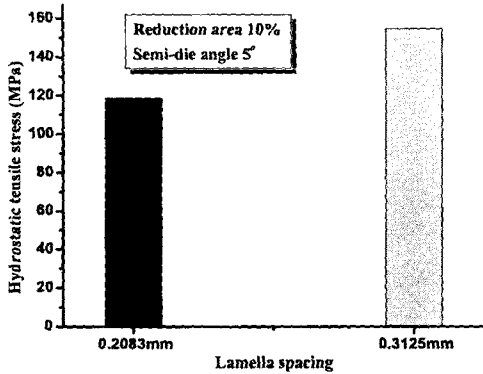


Fig. 7 Relationship between hydrostatic stress and lamella spacing

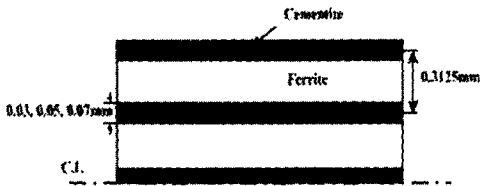


Fig. 8 Condition of cementite thickness

0.07mm로 변화시켜 가면서 세멘타이트의 두께 따른 손상값, 변형률, 정수압 응력을 평가하였고, FE 모델은 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 9는 일정한 단면 감소율, 다이 반각, 층상 간격에 대하여 세멘타이트의 두께 증가에 따른 손상값을 나타낸 그림이다. 세멘타이트의 두께에 따른 손상값의 분포를 보면, 층상 구조의 세멘타이트 손상값은 표면으로 갈 수록 낮아지며, 세멘타이트의 두께 변화에 대해서 거의 동일한 값을 보인다.⁽¹⁴⁾

따라서 손상값은 세멘타이트 두께의 변화에 대한 영향이 층상 간격의 변화에 대한 영향보다는 적은 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9와 같은 공정조건으로 층상 간격에 대하여 세멘타이트 두께의 변화에 따른 변형률의 분포와 측정위치를 나타낸 그림이다. 변형률은 세멘타이트의 두께의 변화에 대하여 전체적인 값은 거의 비슷하나, 경계지역 1, 2, 3, 4 지점의 변형률의 값은 세멘타이트의 두께가 커질수록 차가 커지는 것을 알 수 있다. 표면부에서 변형률의 차이를 살펴보면, 세멘타이트의 두께가 0.03mm 일 때, 차이는 0.01466이고, 0.07mm 일 때는 차이는 0.02517인 것을 알 수 있다.

따라서, 경계지역에서 변형률의 차가 커지는

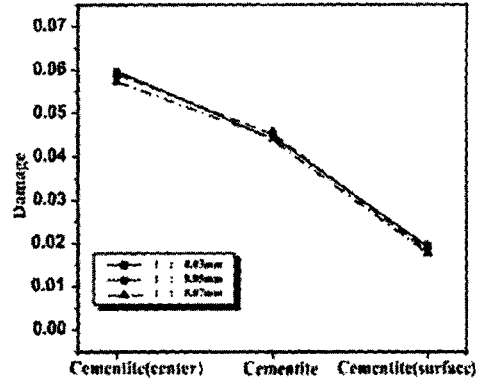
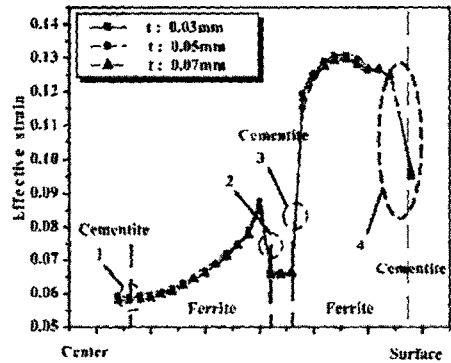
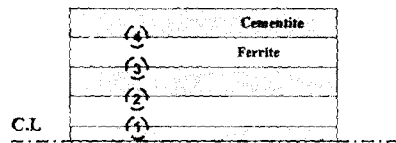


Fig. 9 Distribution of damage according to cementite thickness



(a) Distribution of effective strain



(b) Location of boundary

Fig. 10 Distribution of effective strain according to cementite thickness

것은 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서 접합특성이 나빠지는 것을 의미하고 이로 인해 접합면의 불균일한 변형률의 차이 때문에 경계지역에서 기공이나 분절의 확률이 높아진다. 그리고 이러한 결합존재 시에는 더욱 나쁜 영향을 줄 것이다.⁽¹⁵⁾

Fig. 11은 세멘타이트 두께에 대한 층상 구조의 중심부 세멘타이트의 정수압응력을 나타낸 그림이다. 정수인장응력은 일정한 공정조건에서 세멘타이트의 두께가 작아질 수록 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다.

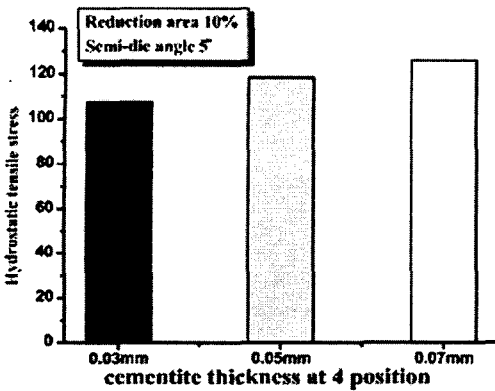


Fig. 11 Relationship between hydrostatic stress and cementite thickness

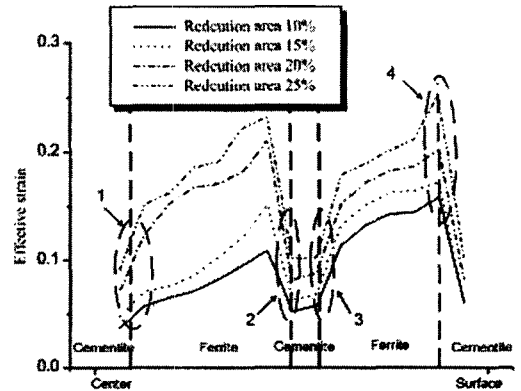


Fig. 13 Distribution of effective strain according to reduction in area

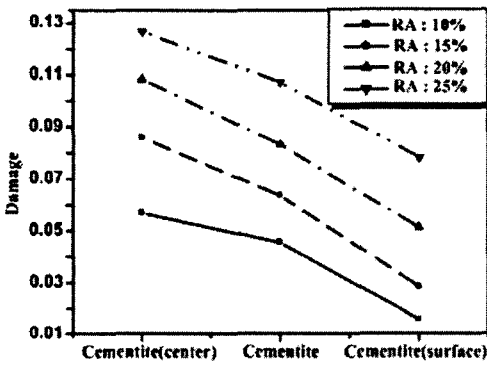


Fig. 12 Distribution of damage according to reduction area

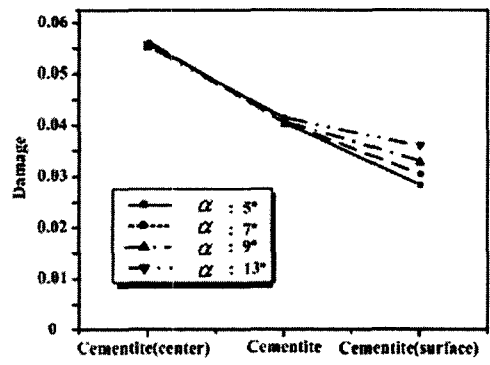


Fig. 14 Distribution of damage according to semi-die angle

따라서, 세멘타이트의 두께가 얇아질 수록 결함발생가능성은 낮아지는 것으로 확인할 수 있다.

3.4 신선 공정 변수에 대한 영향 평가

층상 구조의 신선 공정 변수에 대한 영향을 평가하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 층상 구조에서 세멘타이트의 결함을 최소화과 세멘타이트와 페라이트 경계면의 특성이 중요한 요인으로 작용하기 때문에 적절한 공정변수의 설정은 중요하다.

따라서 본 연구에서는 각 공정 변수들에 대한 세멘타이트와 페라이트의 결함발생에 대한 영향을 평가하기 위하여 손상값의 영향을 분석하였다. 또한, 세멘타이트와 페라이트의 계면 특성을 평가하기 위하여, 세멘타이트와 페라이트 계면에서의 변형률 차이를 분석 평가하였다. 우선 일정

한 층상 간격과 세멘타이트의 두께로 공정 변수들의 변화에 대한 각종 손상값, 변형률 등의 영향을 분석하였다.

3.4.1 단면감소율의 변화에 대한 영향 평가

단면감소율에 따른 영향을 평가하기 위해서, 본 해석에서는 층상 간격을 0.3125mm, 세멘타이트의 두께를 0.05mm, 다이 반각을 5°로 고정하였고, 단면 감소율을 10, 15, 20, 25%로 변화시켜가면서 신선 공정 변수의 변화에 따른 영향을 평가하였다.

Fig. 12는 위와 같은 공정조건에 대하여 손상값의 분포를 나타낸 그림으로, 손상값의 분포는 일정한 다이 반각에 대해 단면 감소율이 클 수록 세멘타이트에서 발생하는 손상값이 높아지는 것을 볼 수 있다. 또한 표면부에서 중심부로 갈 수록 세멘타이트에서 발생하는 손상값이 증가하는

경향을 확인할 수 있다.

따라서, 일정한 다이 반각에 대하여 단면 감소율이 커지고, 중심부로 갈 수록 세멘타이트의 결합발생 가능성이 높아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 단면 감소율의 변화에 대한 층상 구조의 변형률 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 13에서 세멘타이트와 페라이트의 경계지역 위치는 Fig. 10(b)와 같은 위치에서 비교하였다. 일정한 세멘타이트 두께와 층상간격에 대하여 단면 감소율이 커질 수록 변형률은 전체적으로 높게 나타나고 있다. 하지만 세멘타이트와 페라이트 경계지역에서 변형률의 차이는 단면 감소율이 작을 수록 작게 나타나고 있다. 변형률의 차이가 가장 크게 나타나는 곳은 표면에 가장 가까운 경계지역 4 지점으로 이는 세멘타이트와 페라이트의 경계지역 변형률 차이는 중심부에서 표면부로 갈 수록 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 경계지역 결합은 중심부보다는 표면부에서, 단면감소율이 커질 수록 계면 분리의 발생 가능성이 높아지는 것으로 판단할 수 있다.

3.4.2 다이 반각의 변화에 대한 영향 평가

다이 반각에 대한 영향을 평가하기 위해서, 본 해석에서는 단면감소율의 평가와 동일한 경우로, 단면감소율을 10%, 세멘타이트의 두께를 0.05mm, 층상 간격을 0.3125mm로 고정하였고, 다이 반각을 5, 7, 9, 13°로 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다.

Fig. 14는 위와 같은 공정 조건으로 다이 반각의 변화에 대한 손상값의 분포를 나타낸 그림이다. 손상값의 분포는 표면부로 갈 수록 손상값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 다이 반각의 크기에 상관없이 중심부의 손상값은 비슷하나, 다이 반각이 커질 수록 표면부 세멘타이트의 손상값이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 다이 반각이 커질 수록 소재의 중심부보다는 표면부의 세멘타이트의 결합발생 가능성이 높아지는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 15는 다이 반각의 변화에 대하여 소재의 중심부부터 표면부까지의 변형률 분포를 나타낸 그림이다. 세멘타이트와 페라이트 경계지역의 측정위치는 Fig. 10(b)와 같은 위치로 변형률의 분포를 비교하였다. 변형률의 분포는 일정한 단면 감소율에 대해 다이 반각이 커질 수록 중심부보

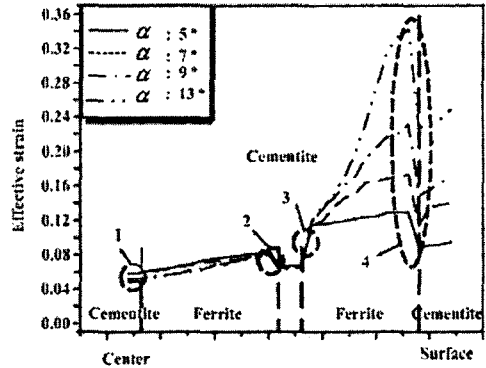


Fig. 15 Distribution of effective strain according to semi-die angle

다는 표면부에서 즉, 경계지역 4에서 세멘타이트와 페라이트의 변형률의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 일정한 단면감소율, 세멘타이트 두께, 층상 간격에 대해 다이 반각이 커질 수록 접합면의 계면분리에 의한 가공 생성과 세멘타이트와 페라이트 경계지역에서의 결합발생 확률이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

고탄소강 선재는 펄라이트 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 층상 간격이 작을수록 손상 값과 정수인장응력이 낮게 나타나므로 소재의 결합 발생 억제 측면에서 유리하였다.

층상간격이 작을수록 표면부에서의 세멘타이트와 페라이트 경계지역 변형률의 차이도 작게 나타나므로 경계면의 결합으로 인한 선재의 파단 방지 측면에서 유리하였다.

(2) 세멘타이트 두께의 변화에 대한 경우, 일정한 신선 공정 조건과 층상 간격에 대하여 손상값은 표면부에서 중심부로 갈 수록 높게 나타났다. 세멘타이트의 두께가 작아질수록 정수인장응력은 낮게 나타나므로 소재의 내부 결합 발생 방지 측면에 대하여 유리하였다.

세멘타이트와 페라이트의 경계지역 변형률 차이가 작게 나타므로 경계면 결합 방지 측면에서도 유리하였다.

(3) 신선가공조건의 경우, 일정한 세멘타이트의 두께와 층상 간격에서는 단면감소율이 작을 수록 층상 구조의 손상값이 낮게 나타나고 특히, 다이반각이 작을 수록 표면부 세멘타이트의 손상값이 낮게 나타나므로, 표면부 결합을 방지 측면에서 유리하였다.

또한, 다이 반각과 단면 감소율이 작을 수록 세멘타이트와 페라이트 경계면에서 변형률의 차이가 작아지므로 결합 발생 가능성이 낮아짐을 알 수 있었다.

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

후 기

본 연구는 한국산업기술재단(KOTEF)에서 지원하는 지역혁신 인력양성사업 연구과제인 "고기능, 고정도 판재성형 및 금형설계 기술개발 인력양성"(TS-32)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Middlemiss, A. and Hague, D. P., 1973, "Torsional Ductility in Carbon Steel Wire-Part 1," *WIRE INDUSTRY*, pp. 462~466.
- (2) Middlemiss, A. and Hague, D. P., 1973, "Torsional Ductility in Carbon Steel Wire-Part 2," *WIRE INDUSTRY*, pp. 538~543.
- (3) Van Raemdonck, W., et al, 1994, "Torsion Tests as a Tool for High Strength Wire Evaluation," *WIRE JOURNAL INTERNATIONAL*, pp. 68~75.
- (4) Nadai, A., 1950, "Theory of Flow and Fracture of Solids," McGraw-Hill Book Company, 2d ed., Vol. I, pp. 347~349.
- (5) Pilarczyk, Jan W. 1997, "Hydrodynamic Drawing Effects on Wire Astro Characteristics," *WIRE JOURNAL INTERNATIONAL*, pp. 70~83.
- (6) Song, S.H. and Kim, C.W., 2003, "The Fatigue Behavior and Delamination Properties in Fiber Reinforced Aramid Laminates -Case (I): AFRP/Al Laminates -," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 3, pp.343~349.
- (7) Kenichi SHIMIZU and Nozomu KAWABE, 2001, "Size Dependence of Delamination of High-carbon Steel Wire," *ISIJ International*, Vol. 41, No. 2, pp. 183~191.
- (8) Umemoto, T., et al, 2001, "Production and Characterization of Bulk Cementite," Vol. 14, pp.1110~1113.
- (9) VAN ACKER, K., et al, 1996, "Neutron Diffraction Measurement of the Residual Stress in the Cementite and Ferrite Phase of Cold-Drawn Steel Wire," *Acta Metall*, Vol. 44, No.10, pp. 4039~4049.
- (10) Takuda, H., Mori, K. and Hatta, N., 1999, "The Application of Some Criteria for Ductile Fracture to the Prediction of the Forming Limit of Sheet Metal," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 95, pp.116~121.
- (11) He, S., Van Bael A., et al, 2003, "Residual Stress Determination in Cold Drawn Steel Wire by FEM Simulation and X-ray Diffraction," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 346, pp. 101~107.
- (12) Kawabe, N. and Murai, T., 1998, "Effect of Hydrogen on Ductility and Toughness in Heavily Drawn Steel Wire," *WIRE JOURNAL INTERNATIONAL*, pp. 82~90.
- (13) Su, Y.Y. and Shemenski, R.M., 2000, "Torsion Test: in-Depth Characterization and Microscopic Analysis," *WIRE JOURNAL INTERNATIONAL*, pp. 128~138.
- (14) Ko, D.C., Kang, B.S., Kim, B.M. and Choi, J.C., 1994, "A Study on Prevention of General Burst Defects in Wire Drawing," *The Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 11, pp. 3098~3310.
- (15) ENOS, D.G. and SCULLY, J.R., 2002, "A Critical-Strain Criterion for Hydrogen Embrittlement of Cold-Drawn, Ultrafine Pearlite Steel," *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*, Vol. 33A, pp. 1151~1166.