

# 신선가공시 고탄소강 선재 층상구조의 정렬 예측

김현수\*, 김병민#, 배철민\*\*, 이충열\*\*

## Orientation Prediction of Lamella Structure of High Carbon steel in Wire Drawing

Hyun Soo Kim\*, Byung Min Kim#, Chul Min Bae\*\*, Chung Yeol Lee\*\*

### ABSTRACT

The objective of this study was presented with a prediction on the alignment of cementite in pearlite lamella structure of high carbon steel by means of finite-element method(FEM) simulation. Pearlite structure was characterized by its nano-sized microstructure feature of alternation ferrite and cementite. FEM simulations were performed based on a suitable FE model describing the boundary conditions and the material behavior. With the alignment of lamella structure in high carbon pearlite steel wire, material plastic behavior was taken into account on plastic deformation and alignment of cementite. The effects of many important parameters(reduction in area, semi-die angle, initial angle of cementite ) on wire drawing process were predicted by DEFORM-2D. As the results, the possibility of wire fracture could be considerably reduced and the productivity of final product could be more increased than before

**Key Words** : High carbon steel(고탄소강), FEM(유한요소해석), Pearlite(펄라이트), Orientation angle(정렬각), Wiredrawing(신선가공)

### 기호설명

- $\alpha_0(^{\circ})$  = Initial orientation angle of cementite
- $\epsilon$  = True strain
- $\alpha_f(^{\circ})$  = Angle of cementite after drawing process
- $RA(\%)$  = Reduction in area at each pass
- $\alpha(^{\circ})$  = Semi-die angle

### 1. 서론

신선가공은 주로 연속적으로 이루어지며 특히, 고탄소강을 이용한 연속 신선 공정에서는 공정 중의 선재의 내부 유동 변화와 세멘타이트와 페라이트의 신선가공조건에 따른 정렬 변화를 파악하여 단선의 방지와 연성의 확보를 해야한다. 이를 위해서 각 패스에서의 공정변수의 적절한 조합과 패스 스케줄의 재설계를 통하여 선재의 연성을 확보하고 단선을 최대한 억제할 필요가 있다. 그러므로 최종 제품의 기계적 성질의 향상을 위해서는 중요시 되어야 한다.

접수일: 2005 년 1 월 12 일; 게재승인일: 2005 년 8 월 9 일

\* 부산대학교 정밀기계공학과

# 교신저자: 부산대학교 정밀정형및금형가공연구소

E-mail [bmkim@pusan.ac.kr](mailto:bmkim@pusan.ac.kr) Tel. (051) 510-2319

\*\* ㈜POSCO 기술연구소 선재연구그룹

신선가공에 의해서 제조되는 고탄소강 선재는 현수교 와이어, 자동차 타이어, 각종 스프링 등 산업계 및 일상생활에서 쉽게 접할 수 있고 매우 넓은 범위에 사용되어진다. 이러한 고탄소강 선재는 대개  $\phi 5.5 \sim 13 \text{ mm}$  선径의 0.4% C ~ 0.9% C 탄소강 선재를 신선 가공 한 후 최종 제품의 특성에 따라 적합한 열처리 및 도금을 하여 제조된다. 이때 연성을 확보하기 위하여 신선 도중 1~2 회의 열처리를 통하여 미세조직을 제어한다.

이러한 강선 제조 분야의 발전 방향은 스케일 제거, 윤활제 코팅, 열처리 공정 등의 생략, 연속화와 고부가가치를 증대시키기 위한 제품의 고강도화로 크게 분류할 수 있다. 제품의 고강도화는 소재의 고강도화와 신선 가공량의 증대에 의하여 가능하다.<sup>1</sup>

공정의 생략은 현재 사용하는 제품의 물성을 동일하게 확보하면서 생산공정의 일부를 생략하는 개념으로 이러한 두 가지 방법 모두 신선 도중 단선이 발생하지 않아야 하고 최종 제품의 형태로 성형할 때 품질의 문제가 발생하지 않아야 한다.

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 소성학적인 관점에서의 연성저하는 잘 알려져 있지 않다. 따라서 소성학적인 측면에서 연성저하에 대해 신선가공조건이 미치는 영향을 체계적으로 파악하는 것이 중요하다.

이를 위해서는 신선 중의 내부 결함인 cuppy 단선 등의 방지를 위한 선재의 연성확보가 매우 중요하다. 특히, 세멘타이트와 페라이트가 존재하고 고탄소강 선재에서는 신선중에 세멘타이트의 불균일한 변형이 선재의 연성을 저하시키는 주요 원인이 되어 연속적인 후 공정에서 제품의 건전성에 문제가 된다.<sup>2,3</sup>

본 연구에서는 자동차 타이어의 보강재로 주로 사용되고 있는 고탄소강 선재에 대해 다이 반각 및 단면감소율이 세멘타이트의 정렬(orientation)에 미치는 영향과 세멘타이트의 초기 정렬각에 대해서 연속신선공정시 변화 상태를 알아보았다.

우선 펄라이트 조직의 층상구조에 대한 유한요

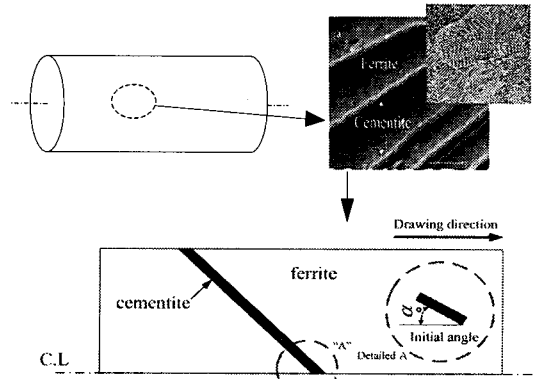


Fig. 1 FE model of lamella structure

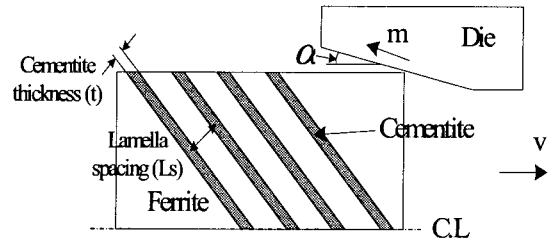


Fig. 2 Drawing process variables of lamella structure

소 모델링 기법을 확립하여 해석을 수행하였고, 신선공정에 따른 층상구조의 세멘타이트 정렬 변화를 관찰하였다. 신선가공조건에 따른 층상구조 내부의 세멘타이트의 변형률을 분석하여 신선가공조건이 펄라이트 조직 층상구조의 연성에 미치는 영향을 비교 및 검토 하였다.

## 2. 유한요소해석 조건 및 모델

### 2.1 유한요소해석 모델

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

Fig. 1 은 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 위한 FE 모델은 Fig. 1 에서처럼 고탄소강 선재의 일부분만을 고려하여 세멘타이트와 페라이트로 이루어진 마이

크로 단위의 층상구조의 평면변형(plane strain) 문제로 가정하였고, 다이스를 통과함으로써 신선공정이 이루어 진다고 하였다. 본 연구는 유한요소해석을 수행하기 위하여 강소성 전용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D 를 사용하였다.<sup>4</sup>

### 2.2 유한요소해석 조건

본 논문에서는 유한요소해석(DEFORM-2D)을 이용하여 펄라이트 조직 층상구조의 조직이 선재의 연성에 미치는 공정조건에 영향을 평가하기 위한 해석을 수행함으로써 실제 신선공정에서 발생할 수 있는 현상을 분석하였고, 다이 반각, 단면감소율 및 세멘타이트의 초기 정렬각 등의 유한요소해석 조건들이 펄라이트 조직의 층상 구조에서 세멘타이트 정렬각 변화와 유효 변형률 분포에 미치는 영향을 평가하였다.

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

### 2.3 재료의 기계적 성질

펄라이트 층상구조의 세멘타이트 정렬변화를 알아보기 위해서는 세멘타이트와 페라이트의 기계

적 성질 확보가 매우 중요하다.

하지만 본 연구의 유한요소해석을 위해서 층상구조의 구성요소로 사용되어진 세멘타이트와 페라이트는 인장 실험이나 나노인덴테이션 실험 등의 기본적인 실험으로 통하여 세멘타이트와 페라이트 펄라이트 조직의 세멘타이트와 페라이트 기계적의 기계적 성질을 확보하기는 매우 힘든 실정이다. 성질 확보에 대한 연구는 아직 미흡한 상태에 이고 계속적으로 연구를 진행하고 있는 중이다. 그러므로 세멘타이트와 페라이트의 기계적 성질을 탄소함유량으로 강도를 예측하여 유동응력식을 어느 정도 예측할 수 있다. 일반적으로 탄소강은 탄소함유량에 따라 탄소강의 강도가 달라지므로, 세멘타이트와 페라이트의 탄소함유량으로 소재의 기계적 성질을 예측할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 세멘타이트의 강도가 페라이트보다 약 3 배 정도 강도가 높다고 고려를 하여 세멘타이트는 고탄소강의 물성, 페라이트는 저탄소강의 물성으로 가정하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 이들 재료의 유동응력식을 Table 2 에 나타내었다.<sup>5</sup>

### 3. 유한요소해석 결과

본 절에서는 세멘타이트의 정렬각 변화에 대한 해석을 수행하였다. 실제의 경우에서는 세멘타이트의 정렬이 축방향으로 일정하게 정렬되어있는 경우도 있으나, 축방향에 평행한 경우보다는 Fig. 1 에서처럼 세멘타이트의 정렬이 초기 정렬각을 가지는 경우가 대부분이고, 축방향으로 초기 정렬각을 가지는 세멘타이트가 신선공정시 소재의 내부 결함 발생에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 해석에서는 초기 정렬각을 가지는 세멘타이트에 대하여 유한요소해석을 수행하였다.

세멘타이트의 초기 정렬각은 세멘타이트의 소성변형과 소재의 결함발생에 중요한 인자이다. 그리고 연속신선공정의 패스 스케줄 작성 시 세멘타이트의 초기 정렬각에 대해서 충분한 고려가 필요하다. 세멘타이트의 초기 정렬각을 고려해야 이유는 초기 신선공정의 공정조건에 따라 세멘타이트의 초기 정렬각의 변화를 제어하여 최종 공정 후의 선재에서 발생하는 결함을 최소화할 수 있기 때문이다. 이러한 세멘타이트 초기 정렬각의 변화를 평가하기 위해서, 본 해석에서는 다이 반각을 6°, 세멘타이트의 두께를 0.05 mm 로 고정하였고,

Table 1 Drawing process conditions of lamella structure

Drawing conditions	Values
Cementite thickness(t)	0.05 mm
Lamella spacing(Ls)	0.3125 mm
Semi-die angle( $\alpha$ °)	6
Reduction in area(RA%)	13, 20
Friction factor(m)	0.1

Table 2 Material properties of cementite and ferrite

Materials		Flow stress – Strain[MPa]
Cementite	AISI 1080	$\bar{\sigma} = 1322.1(\bar{\epsilon})^{0.4}$
Ferrite	AISI 1010	$\bar{\sigma} = 452.8(\bar{\epsilon})^{0.21}$

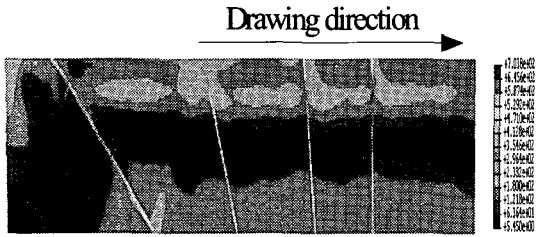


Fig. 3 Distribution of effective stress according to initial angle

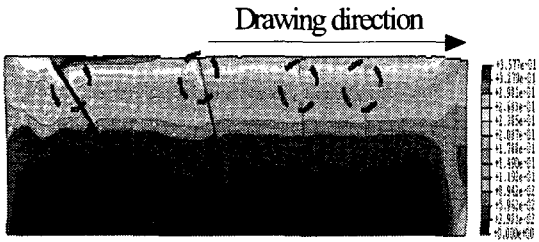


Fig. 4 Distribution of effective stress according to initial angle

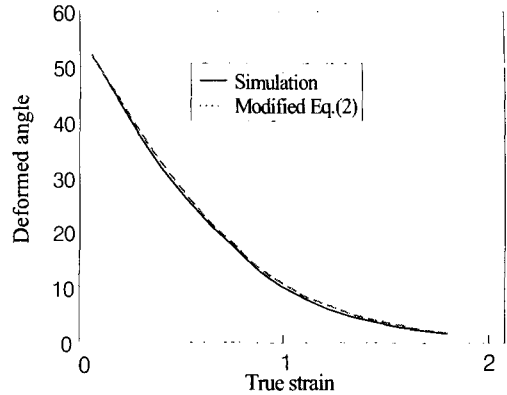
단면감소율을 13 %, 20 %로 변화시키면서 세멘타이트의 초기 정렬각의 변화를 조사하였다.

Fig. 3 과 4 는 유한요소 해석의 결과의 예로써 6°의 다이반각과 13 %의 단면감소율의 공정조건으로 초기 정렬각 60, 80, 90, 100°에 대하여 유효 응력과 유효 변형률의 분포를 나타낸 그림이다.

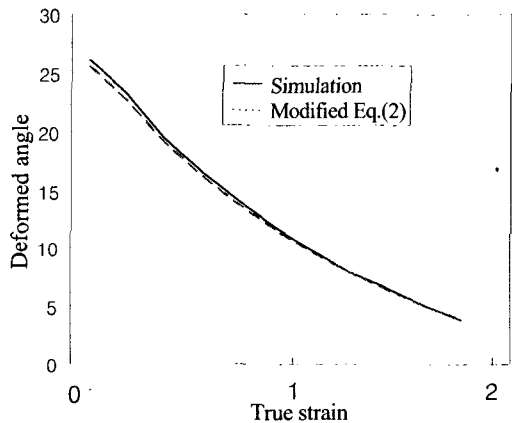
Fig. 3 과 4 에서 초기 정렬각이 60°인 경우 소재 표면부의 세멘타이트에 분포하는 유효 응력과 변형률은 470 MPa 과 0.029 이며, 초기 정렬각이 90~100°인 경우 소재 표면부의 세멘타이트에 분포하는 유효 응력과 변형률은 703 MPa 과 0.178 으로 나타났다. 세멘타이트가 90~100°의 초기 정렬각을 가질 경우 소재의 중심부보다 표면부에서 유효 응력 값과 유효 변형률이 집중적으로 높게 나타난다. 따라서 세멘타이트의 초기 정렬각이 90°에 가까운 값을 가지게 되면, 소재의 중심부보다 표면부의 세멘타이트에서 응력과 변형이 집중적으로 발생하여 공정중 세멘타이트의 분절과 같은 결함의 발생 가능성이 높을 것으로 판단할 수 있다.

### 3.1 초기 정렬각의 변화 예측식 유도

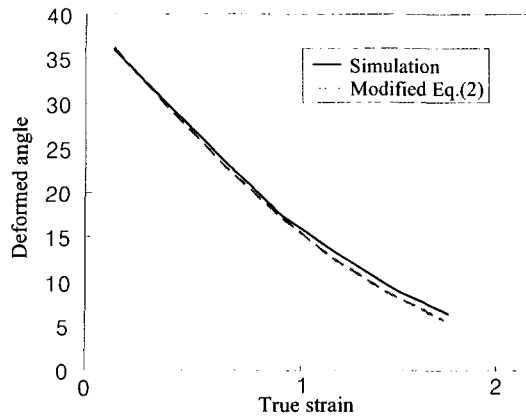
신선공정에 대한 세멘타이트의 초기 정렬각 변화를 조사하기 위해서, 본 해석에서는 단면 감소율을 10, 20 %, 다이 반각을 6, 10°에 대해서 세멘타이트



(a)  $A_0 = 60^\circ$ ,  $RA = 20\%$ ,  $\alpha = 6^\circ$



(b)  $A_0 = 30^\circ$ ,  $RA = 13\%$ ,  $\alpha = 6^\circ$



(c)  $A_0 = 45^\circ$ ,  $RA = 20\%$ ,  $\alpha = 10^\circ$

Fig. 5 Relationship reduction in area and semi-die angle on initial orientation angle of cementite

트의 초기 정렬각을 30, 45, 60°로 변화시켜 가면서 초기 정렬각의 변화에 대해 평가하였고, 이러한 해석결과를 바탕으로 아래의 수정된 식(2)에 적용하였다. Pilarczyk가 제안한 식(1)과 본 연구에서 수정된 식(2)를 아래에 나타내었다.<sup>6</sup>

$$\alpha_f = \tan^{-1}(e^{-1.5\epsilon} \times \tan \alpha_0) \quad (1)$$

$$\alpha_f = \tan^{-1}(e^{-2.05\epsilon} \times \tan \alpha_0) - \alpha_{f-1} \times RA \times \alpha \times 0.025 \quad (2)$$

식(1)은 Pilarczyk가 제시한 정렬각 변화 예측식으로써, 초기 정렬각과 진 변형률의 함수로 나타낸 예측식이다. 이 식(1)은 단면감소율과 다이 반각을 고려하지 않아서 단면감소율과 다이 반각의 변화에 대한 영향에 대해서 살펴보기가 힘들다.

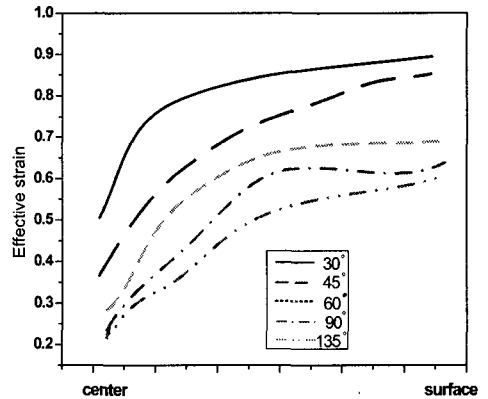
하지만, 식(2)는 식(1)의 수정식으로 패스 당 단면감소율과 다이 반각에 대하여 적용을 하였고, n 번째 정렬각을 구하기 위하여 n-1 번째의 각을 이용하는 방법으로 식(1)을 수정하였다.

Fig. 5는 유한요소해석으로부터 확보한 세멘타이트의 초기 정렬각의 변화와 수정식으로 구한 초기 정렬각의 변화를 비교하여 나타낸 그림이다.

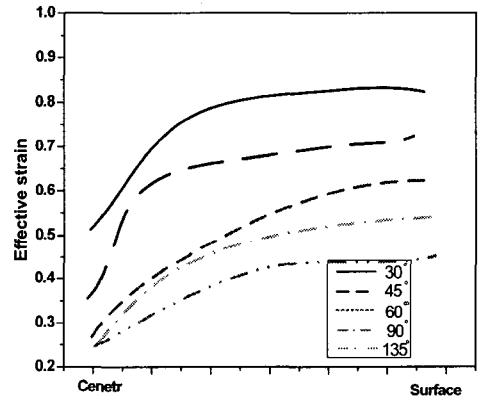
Fig. 4에서 초기 정렬각, 단면감소율, 다이 반각에 대한 정렬각의 변화량은 유한요소해석에서 정렬각의 변화량과 수식상 정렬각의 변화량이 거의 일치하게 나타나고 있다. 따라서, 수정식을 바탕으로 정렬각의 변화를 예측할 수 있으므로, 연속신선공정의 패스 스케줄 작성 시 소재에 발생할 수 있는 결함을 최소화 할 수 있을 것이라고 판단할 수 있다.

### 3.2 초기 정렬각의 변형률 분포 평가

본 절에서는 다양한 초기 정렬각을 가지는 세멘타이트의 유효 변형률 분포를 평가하였다. 세멘타이트의 변형률 분포는 세멘타이트의 소성변형을 평가할 수 있는 중요한 인자로서, 세멘타이트의 유효 변형률이 높아지게 된다면 세멘타이트는 소성변형에 유리하다고 판단할 수 있다. 하지만, 세멘타이트의 유효 변형률이 낮은 값을 가진다면 세멘타이트는 소성변형을 거의 하지 않고 상대적으로 페라이트에서 많은 소성변형을 하므로, 세멘타이트와 페라이트의 경계지역에서 결함발생확률이



(a) RA = 13%



(b) RA = 20%

Fig. 6 Distribution of effective strain of cementite according to reduction area

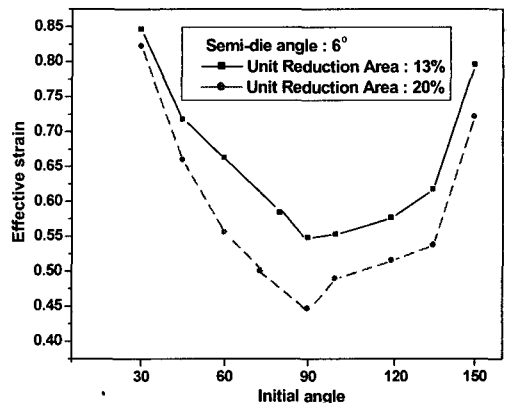


Fig. 7 Relation between initial angle and effective strain on reduction area

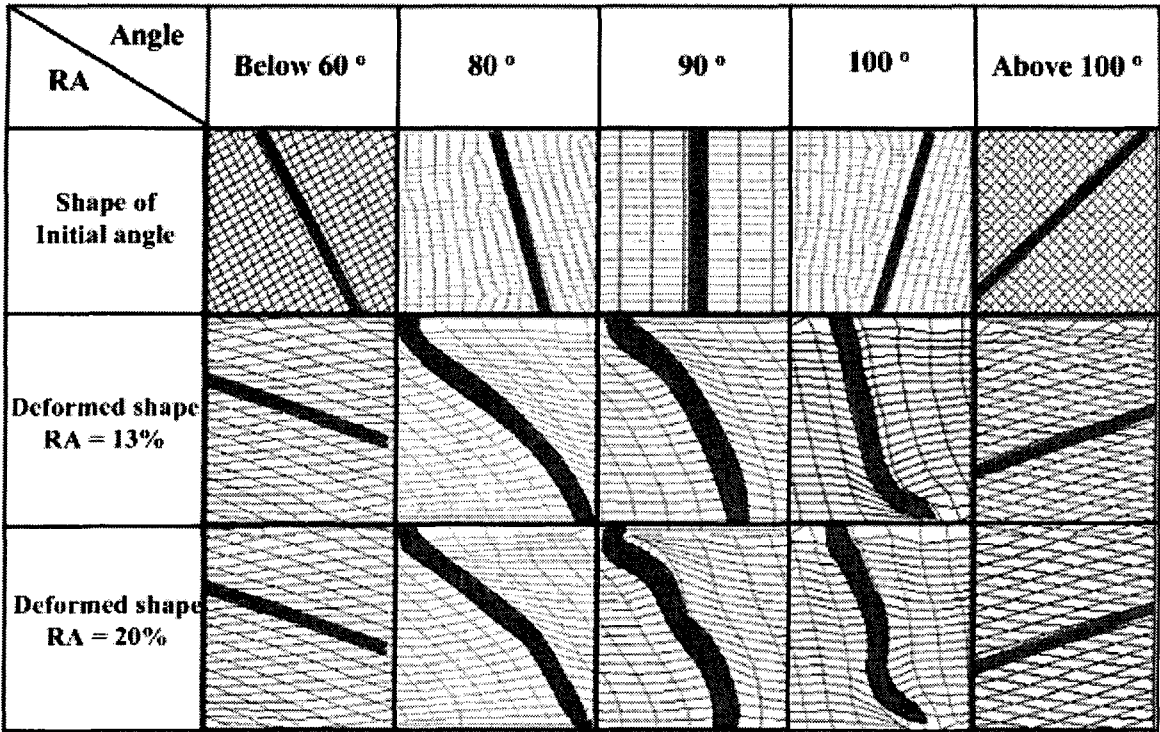


Fig. 8 After drawing process, shape of cementite

높아지게 될 것이다.

따라서 본 해석에서는 초기 정렬각이 30, 45, 60, 80, 90, 100, 120, 135, 150°인 경우에 대해 다이 반각을 6°로 고정하였고, 단면감소율을 13, 20%로 변화시켜 가면서 세멘타이트의 유효 변형률을 평가하였다.<sup>7</sup>

Fig. 6 는 일정한 다이 반각 6°에 대하여, 세멘타이트의 초기 정렬각을 30, 45, 60, 90, 135°로, 단면감소율을 13, 20%로 변화시켜 가면서 해석을 수행하였고, 이에 따른 세멘타이트의 유효 변형률 분포를 나타낸 그림이다.

Fig. 6 에서 세멘타이트의 유효 변형률 분포는 단면감소율이 작아지고, 세멘타이트의 초기 정렬각이 90°미만일 수록 높게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 초기 정렬각이 90°인 경우보다 135°인 경우가 세멘타이트의 유효 변형률 값이 높게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서, 모든 초기 정렬각에 대해서 세멘타이트의 유효 변형률은 단면 감소율이 작을 수록 세멘타이트의 소성변형에 유리한 것을 확인할 수 있다. 또한, 초기 정렬각이 90°인 경우에서 가장 소성변형에 불리하고

세멘타이트가 분절될 가능성이 가장 클 것이라고 확인할 수 있다.<sup>8</sup>

Fig. 7 과 8 은 Fig. 5 와 동일한 공정조건으로 초기 정렬각 30, 45, 60, 80, 90, 100, 120, 135, 150°에 대하여 세멘타이트의 유효 변형률 분포의 평균값과 신선공정 후 초기 정렬각을 가지는 세멘타이트가 단면감소율에 따라 변화된 모습을 나타낸 그림이다.

Fig. 7 에서는 초기 정렬각이 둔각인 경우보다 예각인 경우가 세멘타이트의 유효 변형률이 크게 나타나는 것을 볼 수 있지만, 초기 정렬각이 90°인 경우에서 세멘타이트의 유효 변형률 값이 가장 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 단면감소율이 작은 경우가 큰 경우보다 세멘타이트의 유효 변형률 값이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.<sup>9</sup>

Fig. 8 에서 초기 정렬각의 변화된 모습은 초기 정렬각이 30~60°와 120~150°인 경우에서 축방향으로 정렬이 되는 것을 볼 수 있지만 80, 90, 100°인 경우에는 세멘타이트가 휘어지게 되는 모습을 확인할 수 있다. 따라서, 초기 정렬각은 둔각인 경

우보다 예각인 경우가 세멘타이트의 소성변형과 축방향으로 정렬이 잘 되지만, 80°이상에서 100°이하인 경우에는 세멘타이트의 유효 변형률의 값이 낮게 나타나고 표면부에서 집중적으로 변형을 하므로 표면부의 결합발생확률이 높은 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

고탄소강을 이용한 신선 공정에서 선재의 연성 저하로 인한 단선을 방지 하기 위해서는 각 패스의 적합한 공정 변수의 선정 및 패스 스케줄 설계가 요구된다. 그러나 지금까지는 고탄소강 펄라이트 층상구조의 정렬에 대하여 소성학적인 견해보다는 현장 경험에 의존하여 공정 변수 및 패스 스케줄을 설계하여 선재의 단선을 줄여왔다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 단선 발생 억제 및 신선 공정의 안정화를 위해서 고탄소강 펄라이트 층상구조의 정렬에 대하여 모델링 및 경계조건 등의 유한요소해석 초기 조건을 설정하였고, 유한요소해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 세멘타이트는 초기 정렬각이 작고, 단면감소율과 다이 반각이 작을 수록 시선방향으로 변형이 용이함을 알 수 있고, 상대적으로 세멘타이트의 불균일 변형 또는 분절의 위험이 적어 신선 능력의 향상에 도움이 됨을 알 수 있다.

(2) 동일한 다이 반각과 세멘타이트의 초기 정렬각에 대하여 단면감소율이 작을 수록 세멘타이트의 유효 변형률 분포는 높게 나타나므로 세멘타이트의 소성변형에 유리한 것을 확인할 수 있다.

(3) 동일한 다이 반각과 단면감소율에 대하여 세멘타이트의 초기 정렬각이 90°에 가까워질 수록 세멘타이트의 유효 변형률 값이 낮게 나타나므로 세멘타이트의 소성변형에 불리한 것을 알 수 있다.

(4) 신선 공정후 세멘타이트의 변화된 양상을 유한요소해석 결과로부터 확인하였고, 세멘타이트의 초기 정렬각이 90°에 가까워질 수록 휘어짐이 심해짐을 확인할 수 있었다.

(5) 다이 반각, 단면감소율 등의 공정변수들과 연속공정에서의 세멘타이트의 정렬각 변화를 예측할 수 있는 식을 제안하였으며 수정된 식은 해석을 통하여 검증할 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 선정하는데 도움이 될 것이다.

#### 참고문헌

1. Kim, Y. S., Kim, D. H., Kim, B.M., Kim, M.A., Park, Y.M., "Development of Isothermal Pass schedule Program for the Re-design of a Continuous High Carbon steel Wire Drawing Process," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 5, pp.57-64, 2001.
2. Middlemiss, A., Hague, D. P., "Torsional ductility in carbon steel wire-part 1," Wire Industry, pp. 462-466, 1973.
3. Middlemiss, A., Hague, D. P., "Torsional ductility in carbon steel wire-part 2," Wire Industry, pp. 538-543, 1973.
4. Song, S. H., Kim, C. W., "The Fatigue Behavior and Delamination Properties in Fiber Reinforced Aramid Laminates -Case (I): AFRP/Al Laminates -, " KSME Int. Journal, Vol. 17, No. 3, pp.343-349, 2003.
5. He, S., Van Bael, A., Li, S. Y., Van Houtte, P., Mei, F., Sarban, A., "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, 2003.
6. Jan W., Pilarczyk, "Hydrodynamic drawing effects on wire ASTRO characteristics," Wire Journal International, pp. 70-83, 1997.
7. Enos, D.G., Scully, J.R., "A Critical-Strain Criterion for Hydrogen Embrittlement of Cold-Drawn, Ultrafine Pearlite Steel," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 33A, pp.1151~1166, 2002.
8. Ko, D. C., Kang, B. S., Kim, B. M., Choi, J. C., "A Study on Prevention of General Burst Defects in Wire Drawing," The Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 11, pp.3098-3107, 1994.
9. Todinov, M. T., "Maximum principal tensile stress and fatigue crack origin for compression springs," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, pp. 357-370, 1999.