

## 타이어 코드용 고탄소강선의 원형집합조직

嚴慶根<sup>ab</sup>, 安重圭<sup>a</sup>, 鄭孝泰<sup>b</sup>, 李東寧<sup>ab</sup>

### Circular Texture of Drawn High-Carbon Steel Wire for Tire Cord

Kyung-Keun Um<sup>ab</sup>, Joong-Kyu An<sup>a</sup>, Hyo-Tae Jeong<sup>b</sup> and Dong Nyung Lee<sup>ab</sup>

#### Abstract

The texture of a 0.25mm dia high-carbon(0.73%) steel wire made by drawing the patented and brass coated 1.4mm wire through 22 dies with a die-angle of 12° has been measured. The ideal fiber texture was obtained in the center layer, while the circular texture and the near fiber texture having  $\{111\}\langle 110 \rangle$  and weak  $\{112\}\langle 110 \rangle$  components were obtained in the intermediate and surface layers, respectively. The circular texture was approximated by  $\{110\}\langle 110 \rangle$  plus  $\{110\}\langle 114 \rangle$ . The texture could be predicted by the Taylor-Bishop-Hill theory coupled with FEM for deformation.

#### 1. 서론

금속 선재를 제조하는 가장 일반적인 방법은 압출과 인발이 있다. 압출과 인발 가공에서 재료는 일축인장 변형을 하게 된다. 따라서, 일축인장 변형에 의해 재료 내의 결정들은 선재 축에 대칭을 이루도록 배열된다. 즉, 결정의 특정한 방향, 예를 들어 BCC 금속인 경우에는  $\langle 110 \rangle$  방향이, FCC 금속인 경우에는 강한  $\langle 111 \rangle$  + 약한  $\langle 100 \rangle$  방향이 선재 축에 나란하게 된다. 이를 섬유집합조직(fiber texture)이라고 한다[1].

그러나, 모든 가공에 의한 변형에는 형상 변화에 필요한 균일 변형(homogeneous deformation) 이외에도 전단 변형이 존재하게 되어 불균일변형이 발생한다. 즉, 변형되는 재료와 공구 사이의 마찰이나 변형되는 형상에 의한 구속 등에 의해 잉여 변형(redundant deformation)이 발생하게 된다.

압연된 판재의 경우에는 롤과의 마찰에 의해 표면부에 전단 변형이 발생하여 전단집합조직이 관찰된다. 이에 대해서는 오래 전부터 롤 지름과 판재 두께 등의 형상 인자 등을 고려한 연구들이 많이 이루어져 왔으며 이를 공업적으로 이용하려는

노력들도 이루어지고 있다[2-3].

금속 선재의 경우에 있어서도, 전단 변형에 의해 선재에서의 위치에 따라 집합조직이 달라진다. 일반적으로 선재의 표면과 중심부에서는 이상적인 섬유 집합조직에 가까운 집합조직이 얻어지며, 선재 표면 아래 중간층에서는 원통형 집합조직(Cylindrical texture) 또는 원형 집합조직(Circular texture)이라고 불리는 전단 집합조직이 발달한다고 알려져 있다. 즉, 선재 축방향으로 특정한 결정 방향이 나란할 뿐만 아니라 특정 결정면도 선재 표면과 나란한 방향을 가진다. BCC 금속선재의 경우에는  $\langle 110 \rangle\langle 110 \rangle$  성분이[4-6], FCC 금속선재의 경우에는  $\langle 111 \rangle\langle 112 \rangle$  성분이 발달한 원형집합조직이 관찰된다[7-8].

타이어 코드용이나 교량의 케이블용으로 사용되는 고탄소 강선의 경우에 원형집합조직은 기계적 성질을 떨어뜨린다고 알려져 있다[9]. 일반적으로 인발된 강선들은 연선공정에서 여러 가닥을 꼬아서 코드의 형태로 제조된다. 이 때 강선은 인장 변형 이외에 강한 비틀림 변형을 받게 되는데 비틀림 특성이 나쁜 경우에는 선재 길이 방향으로 균열이 발생한다. 이를 층분리 현상(delamination)이라고 한다. Heinzmann[10] 등에 의하면, 원형집합조직이 발달할수록 층분리 횟수가 증가한다는 것을 보고하였다. 또한, 다이각의 증가에 의해서 원형집합조직이 더욱 발달한다고 보고하였다.

a 서울대학교 재료공학부

b 서울대학교 박막가공 및 결정성장 연구센터

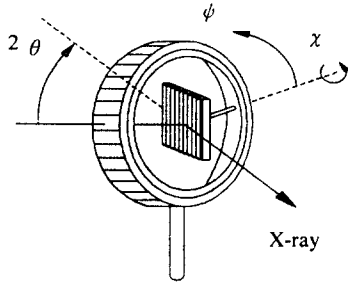


Fig. 1. Definition of sample angles of  $\psi$  and  $\chi$ .  
Present position :  $\psi = 0^\circ$  and  $\chi = 90^\circ$ .

이 연구에서는 인발된 강선에서 원형집합조직의 측정하여 이를 유한요소해석과 결정방위회전 계산에 의한 예측을 비교하였다.

## 2. 실험 방법

일반적으로 선재의 집합조직의 측정은 선재를 축방향에 수직인 방향으로 절단하고 이를 다발 형태로 만든 후 선재 축 방향으로 측정한다. 그러나, 이때에는 선재 전체의 집합조직의 평균 상태를 알 수 있다. 따라서, 선재에서의 위치에 따른 집합조직의 차이를 측정하려면, 선재의 옆면에서 측정해야만 한다.

선재의 직경이 약 4-5mm 이상으로 굵은 경우에는 드릴링으로 중심부를 제거하여 관 형태로 만든 후 이를 퍼서 판상의 시편을 제작하여 측정한다[7]. 그러나, 직경이 작아 드릴링 작업이 어려운 경우에는 이 방법을 사용하기 어렵다. 세선의 경우에는 에칭에 의해 목적하는 층을 노출시키고 선재를 나란히 붙여 집합조직을 측정하는 방법이 사용되고 있다(그림 1). 그러나, 이 때, 선재의 옆면은 압연재와 같이 평면이 아니라 곡면을 규칙적인 곡면을 이루므로 회절법의 강도가 변하게 되므로 이에 대한 보정이 필요하게 된다[11-12].

이 연구에서는 Houtte[11] 등에 의해 제안된 형상 보정 식을 선재의 집합조직 측정에 적용하였다.

실험에 사용된 고탄소강선은 페이팅된 1.5mm 직경의 강선을 97%의 총 단면 감소율로 직경이 0.25mm 까지 인발한 것이다. 그림 2는 직경이 0.25mm 인 강선에서의 형상에 의한 회절강도를 나타내는 극점도이다. 그림에서 회절된 강도는 이웃한 강선에 의한 가려짐이 가장 작은  $\chi = 90^\circ$  에서 최대

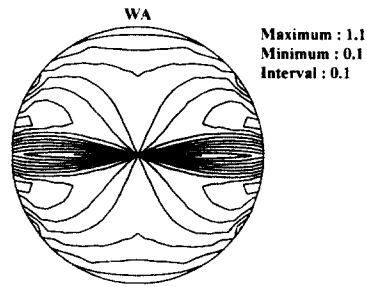


Fig. 2. Geometric (110) pole figure of 0.25mm wire.

값을 가진다.

따라서, 실제 시편에서 측정된 강도를 계산된 형상에 의한 강도로 나누어주면 집합조직에 의한 회절 강도를 구할 수 있다.

인발된 강선에서 반지름 방향으로의 위치에 따른 집합조직의 영향을 관찰하기 위해 초기 0.25mm 강선을 질산 용액으로 에칭하여 직경이 각각 0.20mm, 0.165mm, 0.15mm 그리고 0.10mm 까지 제거하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 에칭된 강선의 표면에서 측정된 (110) 극점도이다. 그림에서 강선의 중심부( $s=0.4$ )에서는 BCC 금속의 인장변형에 의한 집합조직인  $\langle 110 \rangle$  섬유집합조직이 관찰된다. 그러나, 중심부에서부터 표면쪽으로 갈수록 원형집합조직이 나타남을 알 수 있다. 그림 3-(b)-(d)의 극점도에서 (110) $\langle 110 \rangle$  원형집합조직성분이 발달함을 알 수 있고,  $s = 0.7$  일 때 가장 발달함을 알 수 있다. 또한, 표면층( $s=1.0$ )에서는 (112) $\langle 110 \rangle$  성분이 다소 발달하기는 하지만 섬유집합조직에 가깝다. 이에 대해서 Heinzmann 등은 표면층에서는 (112) $\langle 110 \rangle$  성분이 발달한 원형집합조직이라고 하였다.

인발된 강선의 원형집합조직의 발달원인에 대해서, Houtte[13] 등은 상계해석법으로 인발공정중에 발생하는 전단변형을 구하고 이에 따른 결정방위회전을 계산하여 원형집합조직이 발달함을 보였다. 그러나, 상계해석법으로는 표면과 표면 아래층에서의 집합조직의 차이를 설명하지 못한다. 따라서, 이 연구에서는 유한요소법[14-15]에 의해 인발에 의한 강선의 변형거동을 계산하여 집합조직을 예측하였다. 그림 4는 계산에 사용된 초기 유한 요소망과 84%의 단면

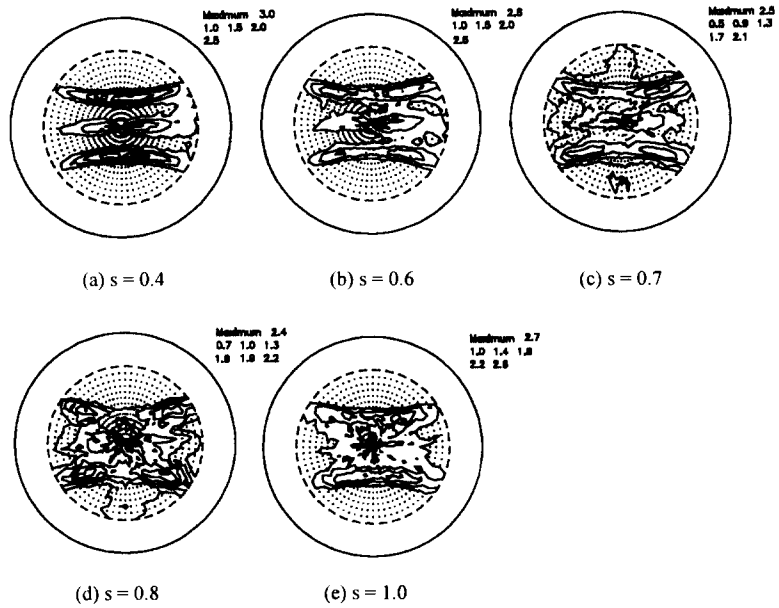


Fig.3. Measured (110) pole figures of various layers of 96.8% drawn high-carbon steel wire.

감소율로 인발된 상태에서의 유한요소망을 나타낸다. 강선은 탄-소성 거동을 한다고 가정하였으며, 강선의 물성값으로  $K=1575\text{MPa}$ ,  $n=0.2$ 를 사용하였다. 또한, 다이각은  $24^\circ$ 로 가정하였다. 그림에서 강선의 중심부보다 표면부에서 전단변형이 증가함을 알 수 있다. 또한,  $s$ 에 따른 변형률 증분의 분포를 그림 5-(a)에 나타내었다. 그림에서 강선의 중심부는 표면부보다 전단변형률이 작음을 알 수 있고, 또한 강선의 표면부에서는 다이 입구에서는 옴의 전단변형률 증분을 가지며 다이를 나오는 동안에는 다시 양의 증분을 가짐을 알 수 있다. 그러나, 그림 5-(b)의 변형률분포를 보면, 강선의 표면에서는 다

이 출구에서의 양의 전단변형률이 표면 아래보다 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 강선의 표면부는 다이와의 직접 접촉에 의한 구속으로 표면 아래보다 전단변형률이 작아졌다고 생각된다. 유한요소해석에 의한 변형률 증분에 따른 결정방위회전의 계산결과를 그림 6에 나타내었다. 실험에서처럼 강선의 중심부에서는  $\langle 110 \rangle$  섬유집합조직이 발달하며 표면 아래에서는 원형집합조직이 발달함을 알 수 있다. 표면에서는  $\langle 112 \rangle \langle 110 \rangle$  성분이외에도  $\langle 111 \rangle \langle 110 \rangle$  성분이 발달함을 알 수 있다. 따라서, 인발된 강선에서의 원형 집합조직은 다이형상에 의한 전단변형의 분포에 의해서 발달한다고 생각된다.

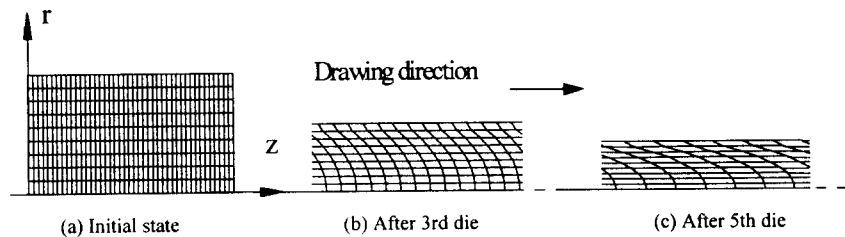


Fig.4. Initial and deformed FEM meshes of wire after passing through 3rd and last 5th dies.

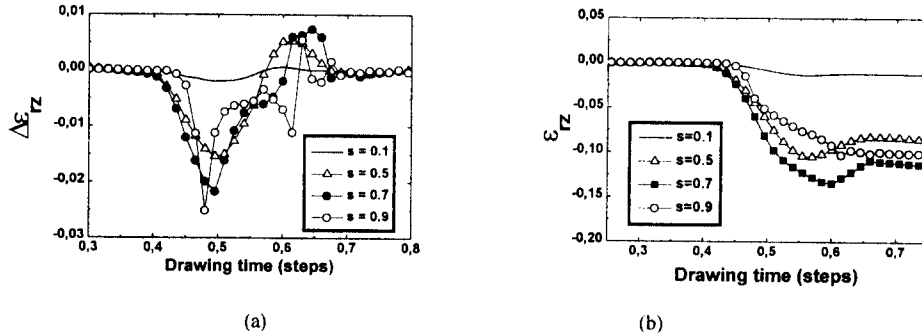


Fig.5. (a) Shear strain increment and (b) accumulated shear strain distributions in wire drawn through first 24° die.

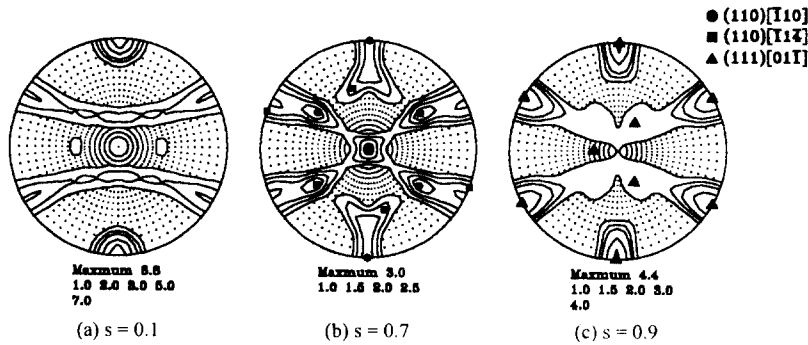


Fig.6. Calculated (110) pole figures of different layers in high carbon steel wire drawn by 84% through five 24° dies.

#### 4. 결론

인발된 타이어 코드용 고탄소강선은 반지름 방향으로의 위치에 따라서 집합조직이 달라진다. 표면과 중심에서는 <110> 섬유집합조직이 표면 아래층에서는 (110)<110> 원형집합조직이 발달하였다. 원형 집합조직은 강선이 다이를 통과할 때 발생하는 전단변형의 분포에 의해 발달한다.

#### 참고문헌

- Structure of Metals, C.S.Barrett and T.B.Massalski, 1966 McGraw-Hill
- 최창희, 홍승현, 권재욱, 오규환, 이동녕, 한국소성가공학회지 4(4), 1995, pp 353-364
- 김근환, 최창희, 이동녕, 압연기술의 현재와 미래(제2회 압연심포지엄 논문집, 1996.9.12-13일, 대한금속학회, 한국소성가공학회 주최, 포항산업과학연구원), 황상무, 이준정 편, pp.11-24.
- S.Lever, Trans.ASM Vol.53 pp.697-
- T.Montesin and J.J.Heinzmann, J.Appl.Cryst. 1992 25 665-673
- D.N.Lee, K.-K.Um and J.-K.An, POSCO technical report, 96C011, 1996
- G.Linssen, H.D.Mengelberg and H.P.Stuwe, Z. Metallkd., 55 (1964), 600-
- E.Aernoudt, I.Kokubo and H.P.Stuwe, Z.Metallkd., 57 (1966), 216-
- Yutaka Kanetsuki, R-D 신호제강 기술보 Vol.35 No.2 P.63-
- J.J.Heinzmann, C.Laueille, A.Vadon and A. Abdellaoui, Texture of materials, Vol.1, ( ICOTOM 11 ) p.266-273
- F.Langouche, E.Aernoudt, P.Van Houtte, J. Appl. Cryst. 1989 22, 533-538
- T.Montesin, Ph.D. Thesis.1991, Universite de Metz
- P.Van Houtte, P.Watte, E.Aernoudt, J.Gil Sevillano, L.Lefever and W.Van Raemdonck, Material Science Forum Vol. 157-162 (1994) p 1881
- K.J.Bathe, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice Hall, 1982
- J.W.Kwon, Ph.D. Thesis. 1995, Seoul National University