

# 고탄소강 와이어의 냉간 인발 시 다이 디자인과 다이 시리즈가 표면 잔류 응력에 미치는 영향

배종구<sup>1</sup>· 양요셉<sup>1</sup>· 반덕영<sup>2</sup>· 박찬경<sup>#</sup>

## The Effects of Die Design and Die Series on the Surface Residual Stress of Cold Drawn Eutectoid Steel Wire

S. G. Bae, Y. S. Yang, D. Y. Ban, C. G. Park

(Received October 6, 2005)

### Abstract

In this study, the die design and die series on the surface residual stress of cold drawn eutectoid steel wire have been investigated. Test pieces were fabricated using die series with different mean and final reduction ratios. Surface residual stresses in the axial direction were measured by X-ray diffraction, Bruker's 2-dimensional GADDS system. The results were compared with stress profiles that were calculated by 3D and 2D finite element simulations, ABAQUS 6.4 program in finite element analysis(FEA). By means of the FEA method, optimal die shape considering delta-parameter were induced and applied in order to determine die sequence designs. Balance of the drawing stresses was also introduced to optimize die sequence.

**Key Words :** Cold Drawing, Residual Stress, Die Design, Die Series, FEA(finite element analysis), X-ray Diffraction

### 1. 서 론

와이어 로프, 타이어 스틸 코드 및 호스 와이어 등 다양한 용도에 사용되는 고 탄소 강선은 0.4 wt.% 이상의 탄소강을 소재로 하여 상온에서 냉간 인발 가공을 통해 제조된다. 공석강을 소재로 하여 제조한 경우, 직경 0.04mm를 갖는 강선은 5700MPa 이상 강도급을 갖는 것으로 보고되며, 인발 변형량을 증가시키면 강선의 강도는 지속적인 증가를 보일 것으로 예상된다[1]. 높은 강도 특성을 부여하는 냉간 인발 공정은 96~98% 이상 강선을 감면하는 가혹한 가공 조건이기 때문에 표면 결함, 개재물 등이 없는 우수한 품질의 원소재가 요구된다. 또한, 경량화 추세는 지속적인 강도

증가를 유도하였으며 이는 강선의 직경을 더욱 미세화시켜 강선의 미세 조직 및 표면 응력 상태 등에 대한 이해가 절실이 요구되고 있는 상황이다.

냉간 인발 제조는 강선의 물성[2], 윤활제 특성 [3], 다이 형상 및 다이 시리즈 조건[4~5] 등의 다양한 인자에 의해 영향을 받으며 이들의 복합적인 상호 작용에 의해 결정된다. 특히, 다이 형상 및 다이 시리즈 공정 조건은 중간재 특히, 최종품의 표면 응력 상태, 응력 분포 등을 제어하여 이는 기계적 특성을 향상 또는 감소시키는 역할을 한다.

냉간 인발 시 강선의 표면에 형성되는 인장 및 압축 잔류 응력은 불균일한 소성 변형으로 인하

1. 포항공과대학교 신소재공학과  
2. 고려강선 (주) 기술 연구소  
# 교신저자 : 포항공과대학교 신소재공학과,  
E-mail : cgpark@postech.ac.kr

여 형성된다. 표면 인장 잔류 응력은 반복 적인 응력이 작용 시 응력 집중을 야기 시키는 역할을 하여 균열 형성 자리로 작용한다. 형성된 표면 균열은 급 힘, 비틀림 응력이 존재하는 인발 및 연선 제조 시 단선, 형태 안정성 불안 등의 문제점을 노출시킨다. 그러나 표면 압축 잔류 응력은 외력에 의한 응력과 동일하게 여겨질 수 있기 때문에, 외력에 의한 인장 응력을 감소시킴과 동시에 파괴가 일어날 확률을 감소시켜 강도, 피로 등의 기계적 특성을 향상시킨다. 일부에서는, 열처리(bluing), 솟 피닝(shot peening) 등 후속 처리를 통하여 표면에 압축 잔류 응력을 형성시켜 기계적 특성을 향상시키고 있다[6]. 그러므로 우수한 품질의 강선 생산 및 생산 단가 저하 등을 위해서는 냉간 인발 시 강선 표면에 형성된 잔류 응력의 크기, 응력 분포 등에 대한 연구가 시급한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 냉간 인발 시 크게 영향을 미치는 다이 디자인(die design)과 다이 시리즈(die series)를 변화시켜 와이어의 표면에 작용하는 응력 평가 및 미치는 영향 등을 고찰하였다. 회절 분석법(X-ray measurement)과 유한요소해석(FEA)법이 사용되었으며, 측정된 결과를 바탕으로 최적의 다이 디자인과 다이 시리즈 조건을 제시하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 0.8wt.%C의 탄소강을 시험편으로 사용하였으며 이를 상온에서 냉간 인발하였다. 이의 기타 합금 조성을 Table 1에 나타내었다. 5.5mm 직경의 봉상 타입의 강선(wire rod)을 3.05mm 직경의 중간선으로 1차 인발하였으며, 연성을 부여하기 위하여 열처리를 570°C에서 수초간 유지시켰다. 1.69mm 직경의 열처리선까지 동일한 인발 및 열처리 공정 조건을 거쳐 도금선으로 제조하였다. 냉간 인발 제조 조건이 표면 잔류 응력의 크기, 분포 등에 미치는 영향을 평가하기 위하여 동일한 조건에서 제조된 도금선에 대해 다이 시리즈 변화를 통한 패스 당 평균 감면율( $\varepsilon_{mean}$ ) 및 최종 감면율( $\varepsilon_{final}$ )에 차이를 두어 직경 0.3mm의 최종 인발선을 제조하였다. 다이 시리즈 변화에 따른 제조 조건을 Table 2에 나타내었다. 시편 A는 현재 산업용으로 쓰이는 방법으로 25개의 다이스를 사용하여 제조된 기준 인발선이며, 시편 B는 22개의 다이스를 사용하여 평균 감면율

**Table 1 Chemical composition of eutectoid steel wire (wt.%)**

C	Si	Mn	S	P	Fe
0.807	0.204	0.5	0.004	0.01	Bal.

**Table 2 The fabrication of eutectoid steel wires**

Seri es	Number of dies (n)	* $\varepsilon_{total}$ (%)	$\varepsilon_{mean}$ (%)	$\varepsilon_{final}$ (%)
A	25	n	3.47	0.14
		n-1	3.38	0.14
		n-2	3.24	0.14
B	22	n	3.47	0.16
		n-1	3.88	0.16
		n-2	3.22	0.16
C	25	n	3.47	0.14
		n-1	3.42	0.14
		n-2	3.29	0.14

( $\varepsilon_{mean}$ )을 증가시킨 인발선, 마지막으로 시편 C는 25개의 다이스를 사용하여 최종 다이스의 각을 감소시켜 최종 감면율( $\varepsilon_{final}$ )을 낮춘 인발선이다. 각 시편 조건 별 n, (n-1), (n-2) 번째에 해당하는 인발선을 제취하여 대한 잔류 응력 분석을 또한 시행하였다. 최종 인발선의 표면 잔류 응력은 X-ray 회절법을 이용한 분석(GADDS)과 유한요소법(ABAQUS 6.4)을 이용한 분석이 이루어졌다. 유한요소해석 시기하학적 비 선형성, 해석 결과 수렴 곤란성 등의 문제가 다발적으로 존재한다. 이를 해결하기 위해 동적 및 충격 해석을 위해 개발된 explicit code를 이용하였으며, Lagrangian-Eulerian 방법을 사용하는 adaptive meshing으로 주기적으로 메쉬(mesh)를 재조정하였다. 표면에 외력을 최소화함과 동시에 균일한 분포를 갖게 하는 최적의 다이 형상 및 다이스 시리즈는 감면율(R)과 다이스 각도( $\alpha$ )가 고려된 델타 파라메터(Delta parameter,  $\Delta$ )와 형성 에너지(forming energy)를 최소화하는 방법[7]을 유한요소법에 적용하여 분석을 시도하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 회절 분석법을 이용한 와이어의 표면 잔류 응력

Table 3은 회절 분석법을 이용하여 인발선의 축

**Table 3 Distribution of residual stress in axial direction measured by X-ray**

series	Number of dies (n)	Residual stress (MPa)
A	25	n $452.5 \pm 212.0$
		n-1 $298.5 \pm 195.2$
		n-2 $428.5 \pm 185.1$
B	22	n $305.8 \pm 202.3$
		n-1 $495.0 \pm 276.9$
		n-2 $442.5 \pm 319.0$
C	25	n $849.5 \pm 116.0$
		n-1 $613.5 \pm 229.1$
		n-2 $695.5 \pm 113.2$

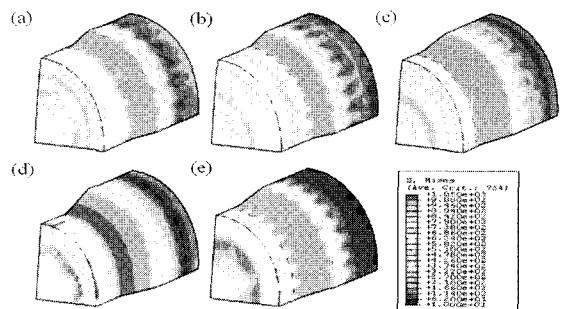
**Table 4 Test series parameters for simulation of die design**

	$\Delta$	$\alpha(^{\circ})$	R	$\mu$	$\sigma_d$ (MPa)
I	2.64	6.15	0.15	0.1	242.8
II	2.31	6.15	0.17	0.1	278.9
III	1.41	4.0	0.18	0.1	357.0
IV	1.47	7.5	0.30	0.1	493.4
V	1.41	4.0	0.18	0.05	269.8

방향으로 존재하는 표면 잔류 응력을 분석한 결과를 나타낸다. 모든 시험편에서 축 방향으로 표면 인장 잔류 응력이 존재하였으며, 평균 감면율을 0.16만큼 증가시켜 제조한 최종 인발선 (B)의 경우 표면 인장 잔류 응력이 증가함을 확인하였다. 그러나, 최종 감면율을 0.05로 낮추어 제조된 최종 인발선 (C)의 경우 전체적으로 다른 경우에 비해 높은 인장 잔류 응력을 갖는 것으로 관찰되었다. 이는 C 시리즈를 통해 제조될 때 각 다이스에 작용하는 인발 응력이 A, B 두 조건에 비해 불균일하여 이로 인해 영향을 받은 것으로 사료된다.

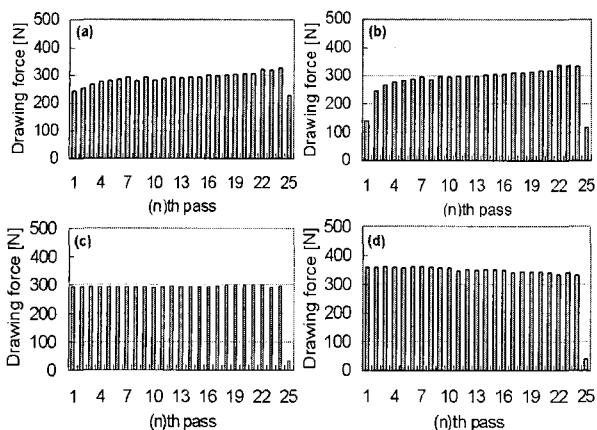
### 3.2 유한 요소법을 이용한 와이어의 표면 잔류 응력

본 연구에서는 최적화된 냉간 인발 제조 조건을 얻기 위하여 유한 요소법을 이용하여 최종 인발선의 응력 값 및 분포를 측정하였다. 최적의 다이 형상 조건을 설정하기 위하여 어프로치 각도( $\alpha$ ), 감면율(R), 마찰계수( $\mu$ ), 델타 파라메터( $\Delta$ ), 인발력( $\sigma_d$ )를 다르게 설정하였으며 각 조건을 Table 4에

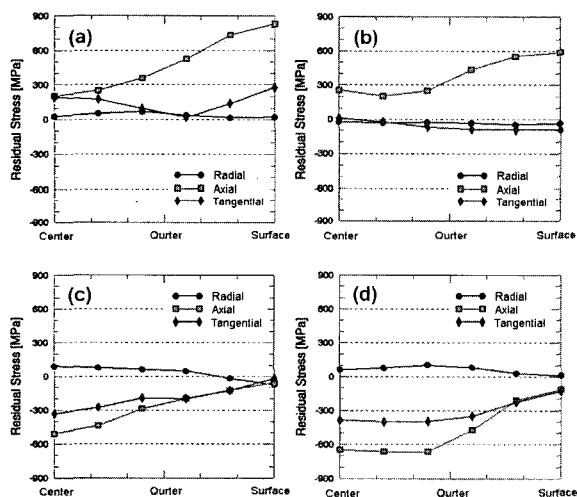
**Fig. 1 Mises Stress distributions of wires after passing the one die: (a) die shape I, (b) die shape II, (c) die shape III, (d) die shape IV, (e) die shape V****Table 5 Test series parameters for simulation of die series**

	$\Delta$	$\alpha(^{\circ})$	$R_{\text{mean}}$	$R_{\text{final}}$	$\sigma_d$ (MPa)
i	2.64	6.15	0.15	0.09	301.2
ii	2.64	6.15	0.14	0.05	300.2
iii	2.17	6.15	0.16	0.01	299.8
iv	1.41	4	0.14	0.01	357.5

나타내었다. Table 4의 조건을 만족하는 다이스를 와이어가 한번 통과했을 때 형성된 유효 응력의 분포를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 델타 파라메터가 가장 높게 설정된 다이 디자인 I의 응력 분포를 나타낸다. 다른 조건에 비해 단면에서의 응력 산포가 가장 큰 것으로 사료된다. 표면에서의 응력 산포를 줄이기 위하여 감면율을 높이고, 어프로치 각도를 줄인 즉, 델타파라메터를 감소시킨 다이 디자인 III의 경우 안정적인 응력 산포를 갖는 것을 Fig. 2(c)를 통해 확인하였다. 그러나 이 때의 인발력 값은 약 357MPa로 I 조건에 비해 큰 것으로 계산되었다. 이 조건 하에서 제조가 이루어질 경우, 인발 속도 증가로 인해 동일 시간에 많은 양의 와이어가 생산 될 것으로 판단되나, 다이스에 표면 결함을 발생시킬 수 있어 안정적인 생산 조건으로는 적합하지 않다. 기존의 감면율( $R=0.18$ )을 유지할 경우, 현재 조업 조건에서 요구하는 1.5 이하의 델타 파라메터를 충족시키기 위해서는 4°의 어프로치 각도를 가져야 한다. 이 조건은 다이 디자인 III에 해당되며, 이때 계산된 인발력 값은 도금선 항목 강도의 약 44%에 해당되는 493MPa이다.



**Fig. 2 Distribution of calculated drawing force after passing through dies: (a) die design i, (b) die design ii, (c) die design iii, (d) die shape iv**



**Fig. 3 Distribution of residual stress calculated by FEM in drawn steel wire: (a) die design i, (b) die design ii, (c) die design iii, (d) die shape iv**

Safety value 를 60%로 할 때 허용 가능하지만, 윤활능의 향상 등으로 마찰계수를 건식 윤활 수준으로 낮춘다면 디자인 (I) 또는 (II)에서 적용되는 수준의 인발력으로도 제조가 이루어질 것으로 사료된다.

최적의 다이 시리즈 조건을 설정하기 위하여 어프로치 각도( $\alpha$ ), 최종 감면율( $R_{final}$ ), 평균 감면율( $R_{mean}$ ), 마찰계수( $\mu$ ), 델타 파라메터( $\Delta$ )을 다르게

설정하였으며 각 조건을 Table 5에 나타내었다. Fig 2는 최종 인발 중 인발선에 작용하는 응력 분포를 나타낸다. Fig. 2(a)와 (b)는 인발 시 와이어에 불균일한 응력이 작용하는 것을 보여준다. 이러한 결과로, 기존의 제조 조건에서는 균일한 인발 응력이 작용하지 않음을 확인하였다. Fig. 3은 최종 인발선에서 유한 요소법에 의해 계산된 3축 방향에서의 표면 잔류 응력 분포를 보여준다. 유한 요소법으로 계산된 표면에서의 잔류 응력치는 회절분석법을 통해 분석된 결과와는 다소 차이가 있음을 확인하였다. 이는 관상이 아닌 구형상에 의한 오차 발생, 심한 가공에 의해 조직 내부에 존재하는 국부적인 응력 문제, 유한요소 모델 작성 중 부피 분율이 큰 페라이트 단을 고려한 모델의 부적합성 등에 의해 발생한 것으로 판단된다. 실 조업 조건 하에서 시뮬레이션 한 결과 인발선의 축 방향에서의 잔류 응력치는 600~800 MPa이며, 이때의 응력 상태는 인장 임을 확인하였다. 이상적인 조업 조건으로 설정한 iv 번 시리즈에서 시뮬레이션 한 결과 위와 마찬가지로 인장 잔류 응력이 존재하나 응력치는 거의 0에 가까운 것으로 확인되었다. 이러한 경향은 iii번 시리즈를 통해 제조된 경우와 매우 비슷하다. 그러나 내부에서의 응력 분포를 비교했을 때 iv의 경우가 더 낮은 압축 응력 상태를 보이는 것으로 미루어 가장 안정적인 잔류 응력 상태를 갖는 것으로 판단된다. 그러므로 잔류 응력 분포를 안정적 또는 기계적 특성을 향상시키는 방향으로 인발 제조를 개선하기 위해서는 어프로치 각도를 낮추는 동시에 델타 파라메터를 감소시켜야 할 것이다.

#### 4. 결 론

최종 인발 조건 변경에 따른 고 탄소강 와이어의 표면 잔류 응력을 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) X-ray 회절 분석법을 이용하여 냉간 인발한 와이어의 표면 잔류 응력을 측정한 결과 축 방향으로 450MPa 정도의 높은 인장 잔류 응력을 갖는 것으로 확인하였다. 평균 감면율을 높인 경우는 잔류 응력 변화가 크지 않았으나, 응력 분포가 넓어졌으며, 최종 감면율을 4.6%로 낮춘 인발 시에는 표면 잔류 응력의 개선 효과가 전혀 나타나지 않는 것으로 확인하였다. 이러한 결과

는 인발 응력 균형이 고려 되지 않은 결과로 판단하였다.

(2) 유한 요소법을 이용하여 다이 디자인과 다이 시리즈가 표면 잔류 응력에 미치는 영향을 시뮬레이션 해 본 결과는 다음과 같다. 다이 디자인에서 감면율은 유지하고 다이 반각을 4°로 낮출 때  $\Delta$  파라메터는 1.41 이 된다. 이러한 조건으로 인발시 다이 어프로치 및 베어링 존을 통과할 때 발생하는 급격한 응력 변화를 감소시킬 수 있었으며 인발 후 표면 잔류 응력과 내부 잔류 응력 산포를 동시에 낮출 수 있었다. 다이 시리즈는 가공 경화를 고려하여 계산된 인발 응력을 균일하게 하는 조건과 최종 pass 에서 1% 감면율을 동시에 적용할 경우 와이어의 표면에서 압축 잔류 응력으로 유도가 가능하고 또한 내부의 잔류 응력 산포를 낮출 수 있었다.

## 후기

본 연구는 고려 강선㈜의 고 탄소강 와이어의 시편 제조와 한국 산업 기술 재단의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- [1] M. Dollar, I. M. Bernstein, A. W. Thompson, M.Shemenski, 1988, Influence of Deformation Substructure on Flow and Fracture of Fully Pearlitic Steel, *Acta Metall.*, Vol. 36, pp. 311~320.
- [2] M. Shemenski, 1999, Wire Drawing by Computer Simulation, *Wire J. Int.*, Vol. 45, pp. 24~33.
- [3] L. Lazarptto, 1997, Identification of Coulom's Friction Coefficient in Real Contact Conditions Applied to a Wire Drawing Process, *Wear*, Vol. 221, pp. 54~63.
- [4] N. Vemlata, P. M. Dixit, G. K .Lal, 1995, Die Design for Asymmetric Extrusion, *J. Mater. Proc. Technology*, Vol. 55, pp. 331~339.
- [5] G. Celano, 2001, The Application of AI Techniques in the Optimal Design of Multi-Pass Cold Drawing Process, *J. Mater. Proc. Technology*, Vol. 113, pp. 680~685.
- [6] K. Katagri, 1999, Effects of Post-Drawing Treatments on the Fatigue Strength of Eutectoid Steel Wire, *Fatigue Fracture Engng. Mater. Struct.*, Vol. 22, pp. 753~760.
- [7] R. N. Wright, 1979, Mechanical Analysis and Die Desing, *Wire J. Int.*, Vol. 25, pp. 47~59.