

# 고탄소강 와이어의 냉간 인발시 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<sup>1</sup>, Y. S. Yang<sup>1</sup>, D. Y. Ban<sup>2</sup> and C. G. Park<sup>\*</sup>

### Abstract

In this study, the die design and die series on the surface residual stress of cold drawn eutectoid steel wire has been investigated. Test pieces were fabricated using die series with different mean and final reduction ratio. Surface residual stresses in the axial direction were measured by X-ray diffraction, Bruker's 2-dimensional GADDS system. Results were compared with stress profiles which were calculated by 3D and 2D finite element simulation, Hibbitt's ABAQUS 6.4 program in Finite Element Analysis. By means of 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

냉간 인발한 펄리틱 (pearlitic) 스틸 와이어는 철강 재료로 이루어진 스틸 와이어 중에서 가장 높은 강도를 나타낸다. 이는 강도가 다른 재료와는 다르게 인발 변형율(strain,  $\epsilon$ )에 지수적으로 증가하기 때문이다.<sup>(1)</sup> 수십 나노 크기의 페라이트(ferrite)와 세멘타이트(cementite)로 이루어진 와이어는 기계적 특성 중 우수한 강도, 내 피로성을 갖기 때문에 로프 와이어 (rope wire), 타이어 스틸 코드 (tire steel cord), 호스 와이어 (hose wire) 등의 구조용 재료로 널리 사용되고 있다. 우수한 기계적 특성을 부여하는 냉간 인발 공정은 와이어의 물성, 윤활제 특성, 다이 디자인, 가공설계 등이 고려되어 최적인 상태에서 이루어진다. 냉간 인발 제조를 거치게 되

면 와이어 표면에 불 균일한 소성변형으로 인장 인장 및 압축 응력 잔류 응력이 형성된다. 잔류 응력은 열처리나 기계가공 후 국부적인 응력 집중을 야기시키고 그이는 마이크로 단위의 균열이 형성된다. 이러한 와이어 표면의 균열들은 특히 굽힘, 비틀림 응력이 가해지는 신선, 연선 제조 시 크게 영향을 미치게 되며 결국 단선, 형태 안정성 불안 등의 문제점을 나타낸다.<sup>(1,2)</sup> 그러나 인장 잔류 응력과는 다르게 압축 잔류 응력은 소폭의 강도 및 피로 특성을 향상 시키는 것으로 보고<sup>(3)</sup> 되어 샷 피닝 (shot peening) 등의 방법을 사용하여 이를 증가시키고 있는 실정이다. 그러므로 냉간 인발 시 형성된 와이어의 표면에 형성된 잔류 응력의 크기, 분포 등을 분석하여 생산 능력 및 제품 품질에 미치는 영향에 대한 고찰이 시급한 것으로 판단된다.

1 포항공과대학교 신소재공학과

2 고려강선㈜ 기술연구소

\* 포항공과대학교 신소재공학과 cgpark@postech.ac.kr

본 실험에서는 최종 냉간 인발 공정에서 다이 디자인 (die design)과 다이 시리즈 (die series)를 변화시켜 인발된 와이어의 축 방향 (axial direction) 표면 잔류 응력을 회절 분석법 (X-Ray)과 유한 요소 해석 (FEA) 법을 이용하여 측정하였다. 이를 기반으로 다이스 형상, 인발 시 마찰 계수, 감면율 등을 고려한 최적 다이 디자인을 3D 시뮬레이션 결과로 제시하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 현재 보강재로 사용되는 탄소 함량을 실험재로 선택하였으며 이의 화학 조성을 표 1에 나타내었다. 와이어 제조에 2차례의 열처리와 3차례의 냉간 인발이 시도되었으며 다음과 같다. 와이어 로드(5.5mm  $\phi$ )를 중간선 (intermediated wire, 3.05mm  $\phi$ )까지 1차 인발한 후 570° C 에서 수십초간 유지시켰다. 후 열처리선 (patented wire, 1.69mm  $\phi$ ) 까지 동일 과정을 적용했으며 최종 인발을 통하여 최종선 (0.298mm  $\phi$ )을 제조하였다. 최종 습식 인발 공정이 표면 잔류 응력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 동일한 조건으로 제조된 열처리선을 이용하였으며 다이 시리즈 변화를 통한 pass당 평균 감면율과 최종 감면율을 주요인자 정하여 표 2 제시하였다. 다이 시리즈 A를 기준으로 평균 감면율 ( $\epsilon_{ave}$ )을 증가시킨 B, 최종 다이스의 각을 감소시켜 최종 감면율을 낮춘 C( $\epsilon_n$ )를 제조하여 시리즈 별 n, n-1, n-2 최종 인발선에 대한 분석을 시도하였다.

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. Test pieces manufacturing conditions

# of die	series	$\epsilon_{total}$	$\epsilon_n$	$\epsilon_{ave}$
n=25	n	3.47	0.09	0.14
	n-1	3.38	0.14	
	n-2	3.24	0.13	

n=22	n	3.47	0.09	0.16
	n-1	3.88	0.16	
	n-2	3.22	0.15	
n=25	n	3.47	0.05	0.14
	n-1	3.42	0.14	
	n-2	3.29	0.14	

표면 잔류 응력은 X-ray 의 회절 분석 (2D detector GADDS)<sup>(3)</sup>과 유한 요소법 (ABAQUS 6.4)을 이용하여 측정하였다. 기하학적 비선형성 문제와 해석 결과의 수렴 곤란성 등의 문제를 해소하기 위하여 본 연구에서는 explicit code 를 사용하였으며 Lagrangian-Eulerian method 를 사용하는 adaptive meshing 으로 주기적으로 mesh 를 재조정하였다. 와이어는 인발시 축대칭 변형을 하므로 분석시간 단축 및 처리속도 향상을 위해 그림 1 과 같이 single die pass 에 대해서는 3 차원 1/4 model 로 하였고 22~25 multi-pass 에 대해서는 2 차원 1/2 model 을 사용하여 해석을 실시하였다.

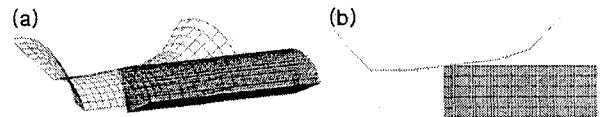


Fig.1. FEM modeling: (a) 3 D drawing 1/4 model and (b) 2 D drawing 1/2 model

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 X-ray 회절 분석법을 이용한 표면 잔류 응력 분석

표 3 은 냉간 인발된 와이어의 축 방향 표면 잔류 응력을 X-ray 회절법에 의해 분석한 결과이다. 모든 시편에 걸쳐 축 방향으로의 표면에 인장 잔류 응력이 존재하는 것으로 측정되었고, 평균 감면율을 증가 (B) 시키면 표면 인장 잔류 응력이 증가되었다. 그러나, 최종 감면율을 낮추어 제조한 경우 (C) 전체적으로 다른 경우에 비해 높은 인장 잔류응력을 보여주는데 이는 불 균일

한 인발 응력 균형(balance)가 영향을 미친 것으로 사료된다.

Table 3. Residual stress results depending on die series measured X-ray diffraction method

# of die	series	R.A (%)	Residual stress (MPa)
n=25	n	9.2	452.5±212.0
	n-1	13.6	298.5±195.2
	n-2	13.3	428.5±185.1
n=22	n	9.2	305.8±202.3
	n-1	16.0	495.0±276.9
	n-2	15.4	442.5±319.0
n=25	n	4.6	849.5±116.0
	n-1	13.9	613.5±229.1
	n-2	14.2	695.5±113.2

### 3.2 유한요소법을 이용한 표면 잔류 응력 분석

#### 다이 디자인 변화에 의한 영향

델타 ( $\Delta$ ) 파라메타를 고려한 단일 다이의 시뮬레이션 조건은 표 4와 같으며 이때의 인발 와이어에 대한 유효 응력(Mises stress) 분포를 그림 2에 제시하였다.  $\Delta$ 가 높은 (a)의 경우 단면에서 응력산포가 가장 높게 나타났으며, 동일 조건에서 감면율을 증가시키고 어프로치 각도를 줄인 경우 응력산포는 양호하였으나 인발 응력이 (a)의 조건보다 2배 이상 높게 나타났다. 기존의 감면율을 유지할 경우  $\Delta$ 를 1.5이하로 관리하기 위한 어프로치 각도는  $4^\circ$ 로 낮아지는 (d) 조건이 되는데 이때 인발응력이 도금선의 항복강도의 약 40%에 이르게 된다. safety value를 60%로 할 때 허용 가능하지만, 윤활능 향상으로 마찰 계수를 건식 윤활 수준으로 낮춘다면 (a)나 (b)와 같은 수준의 인발 응력으로 가공이 가능할 것이다. 그림 3에 다이 존 (die zone)별 축 방향과 원주 방향의 잔류 응력 분포를 나타냈었으며, 중심부에서의 높은 잔류 응력과 표면 부에서 낮은 잔류 응력 분포를 보이는 것으로 확인하였다. 마찰계수가 동일할 때 단면의 잔류응력 변화는 D조건에서

Table 4. Variations of mises stress on surface depending on modeling condition simulated by FEA method

	$\Delta$	$\alpha(^{\circ})$	r	$\mu$	$\sigma_d$ (MPa)
A	2.64	6.15	0.15	0.1	242.8
B	2.31	6.15	0.17	0.1	278.9
C	1.47	7.5	0.30	0.1	493.4
D	1.41	4.0	0.18	0.1	357.0
E	1.41	4.0	0.18	0.05	269.8

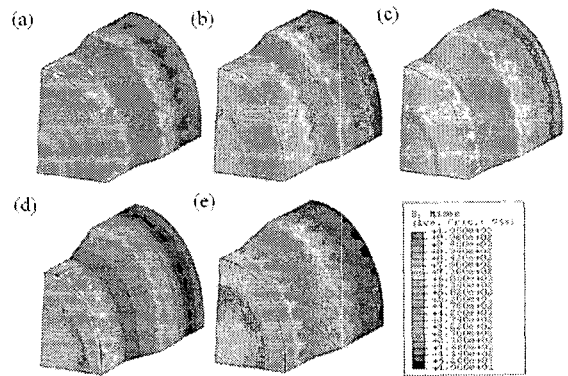


Fig.2. Mises Stress distributions depending on modeling conditions: (a) die shape A, (b) die shape B, (c) die shape C, (d) die shape D and (e) die shape E

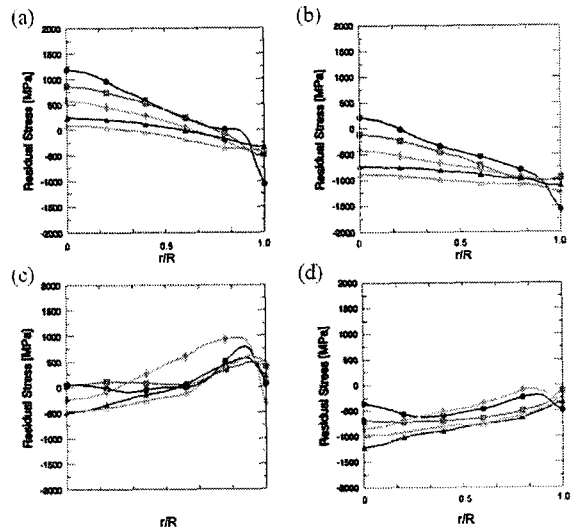


Fig. 3. Residual stress distributions in approach zone (AZ) and bearing zone (BZ): (a) AZ (axial direction), (b) AZ (radial direction), (c) BZ (axial direction) and (d) BZ (radial direction)

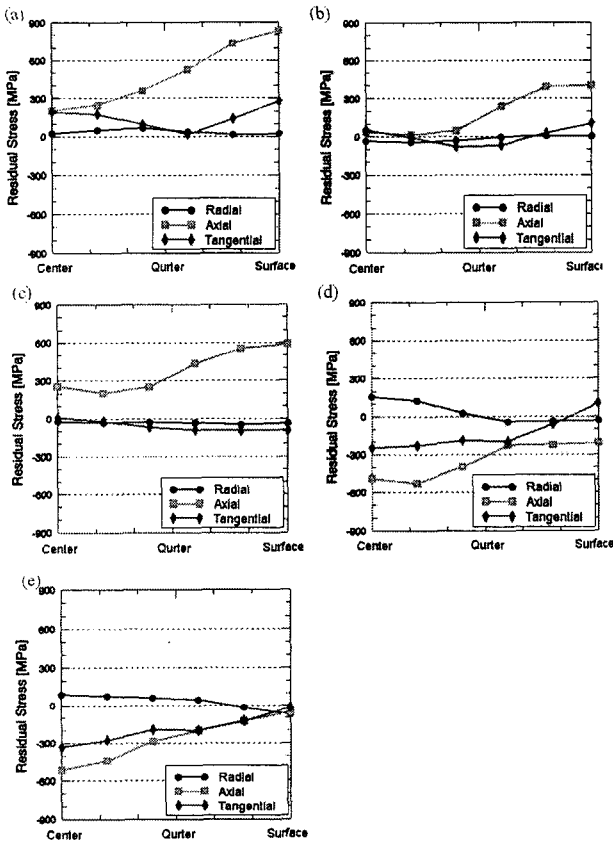


Fig. 4. Residual stress distribution after cold drawing: (a) die series A, (b) die series B, (c) die series C, (d) die series D and (e) die series E

가장 적었으며 베어링 존 (bearing zone)에서 반대로 중심에서 잔류응력이 가장 낮고 표면 아래에서 가장 높은 분포를 나타내었고, 어프로치 존과 마찬가지로 D조건에서 단면의 잔류응력 변화가 가장 낮게 나타났다. 따라서, D 조건에서 내부의 잔류응력이 가장 완만하게 인발 할 수 있음을 알 수 있으며 마찰계수를 감소시킬 경우 더욱 균일하게 가공이 가능하다.

#### 다이 시리즈 변화에 의한 영향

다이 시리즈 변화에 따른 표면에서의 잔류 응력 분포의 2D 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. 이 결과는 X-ray 회절 분석법에 의한 결과와 다소 상이한 것을 확인하였다. 먼저 X-ray 회절법의 측정결과가 심한 변형 조직을 가지는 냉간 인발 와이어의 특성상 편차가 매우 컸다는 점

과 페라이트에서만 측정을 하여 세멘타이트에의 영향을 고려하지 못한 것과, 균일한 유한요소 모델이 펄라이트의 2상 거동을 적절히 재현하지 못한 것에도 원인이 있는 것으로 보인다. 유한요소 모델의 결과를 살펴보면 평균 감면율이 높은 (b) 조건에서 표면 인장 잔류응력이 가장 낮지만 여전히 300MPa 이상의 높은 인장력을 나타내며 다른 방향의 잔류응력과의 편차가 크다. 그러나, 최종 감면율을 1%로 낮게 관리한 (d)의 경우 잔류응력의 분포를 크게 낮출 수 있었다. 인발 응력 균형을 일정하게 관리한 (e)의 경우 표면에서 3가지 방향의 잔류응력 산포를 감소시킬 수 내부의 잔류응력 분포를 압축응력으로 개선하는 효과가 있었다.

#### 4. 결론

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

1. X-ray 회절 분석법을 이용하여 냉간 인발한 와이어의 표면 잔류 응력을 측정된 결과 축 방향으로 450MPa 정도의 높은 인장 잔류응력을 갖는 것으로 확인하였다. 평균 감면율을 높인 경우는 잔류응력 변화가 크지 않았으나, 응력 분포가 넓어졌으며, 최종 감면율을 4.6%로 낮춘 인발 시에는 표면 잔류응력의 개선효과가 전혀 나타나지 않는 것으로 확인하였다. 이러한 결과는 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  $\Delta$  파라미터는 1.41 이 된다. 이러한 조건으로 인발시 다이 어프로치 및 베어링 존을 통과할 때 발생하는 급격한 응력변화를 감소시킬 수 있었으며 인발 후 표면 잔류응력과 내부 잔류응력 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 잔류응력 산

포를 낮출 수 있었다.

## 5. 후 기

본 연구는 고려강선 (주)의 고 탄소강 와이어의 시편 제조와 한국 산업 기술 재단의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- (1) M.Elices, "Influence of residual stresses in the performance of cold-drawn pearlitic wires", Kluwer Academic Publishers, (2004)
- (2) K.KATAGRI, "Effects of post-drawing treatments on the fatigue strength of eutectoid steel wires", Fatigue fract Eng. Mater. Struct Vol. 22, 753-760
- (3) Bruker AXS, "General Area Detector Diffraction System(GADDS) user's Manual", Bruker AXS Inc., Ver 4.0
- (4) Hibbitt, Karlsson & Sorensen. "ABAQUS user's manual Version 6.4", Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc 2003
- (5) R.N.Wright, "Mechanical analysis and die design", Wire J. Int. , Oct 1979
- (6) Robert M.Shemenski, "Wiredrawing by computer simulation", Wire J. Int., April, (1999)
- (7) G.Celano, "The application of AI techniques in the optimal design of multi-pass cold drawing processes", J. Mater.Proc.Tech. 113 (2001) 680-685
- (8) H.O.Fuchs, "Metal Fatigue in Engineering", Wiley, NY. (1980) p.69-71