

고탄소강 인발제의 잔류응력 예측 Prediction of Residual Stress for High Carbon Steel Drawn Wire

*이상곤¹, 고대철², #김병민³

*S. K. Lee¹, D. C. Ko², #B. M. Kim(bmkim@pusan.ac.kr)³

¹ 부산대학교 정밀기계공학과, ² 부산대학교 산학협력단, ³ 부산대학교 기계공학부

Key words : Residual Stress, High Carbon Steel Wire, Prediction Model, FE-Simulation

1. 서론

인발공정은 봉재, 선재 혹은 관재를 하나 혹은 여러 개의 다이를 통과시켜 원하는 단면형상의 제품을 얻는 공정으로 케이블, 자동차 타이어 보강재 등 산업적으로 광범위하게 사용되고 있다¹. 인발공정의 경우 가공 후 소재는 표면부에 변형이 집중되어 중심부와 표면부 사이의 변형률 분포가 불균일하다. 이로 인하여 인발된 제품의 표면부에 잔류응력이 발생하게 된다. 특히, 표면부에서 발생하는 인장 잔류응력의 경우 제품의 진직도, 응력부식균열 촉진 및 피로수명을 저하시켜 제품의 기계적성질 및 제품수명을 단축시킨다. 따라서, 인발공정 시 제품의 잔류응력을 감소시키는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 연속 인발공정 시 선재 표면에 발생하는 잔류응력을 예측하기 위하여 잔류응력 축적 메커니즘 및 유한요소해석을 이용하여 잔류응력 예측모델을 제안하였다. 또한, 인발제 표면의 잔류응력 완화를 위하여 다단 인발공정에 대하여 각 패스에 대하여 다이스 감면율이 작은 스킨 패스와 저 다이반각을 적용한 경우에 대한 잔류응력완화를 평가하였다.

2. 인발제 표면부의 잔류응력 축적

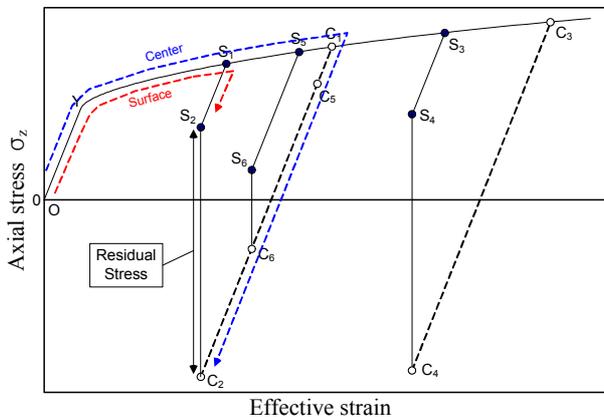


Fig. 1 Mechanism of residual stress after drawing

Kuboki 등은 인발 시 선재의 중심부와 표면부의 축방향 잔류응력 분포를 재료의 물성과 관련하여 Fig. 1의 모델을 제안하였다². Fig. 1에서 첫 번째 인발공정에서 소성변형 중 변형률이 작은 선재 중심부에서의 응력은 $O \rightarrow Y \rightarrow C_1 \rightarrow C_2$ 로 변하며, 변형률이 큰 표면부의 응력은 $O \rightarrow Y \rightarrow S_1 \rightarrow S_2$ 로 변한다. 첫 번째 인발공정 후 축방향 변형률이 높은 중심부와 변형률이 낮은 표면부에 있어 탄성적인 균형을 이루려는 재료의 성질에 의해 선재의 중심부에서는 압축응력 C_2 가 잔류응력으로 분포하게 되고, 표면부에서는 S_2 가 잔류응력으로 분포하게 된다. 만약 두 번째 인발공정의 단면감소율이 소재의 탄성변형을 무시할 수 있을 정도로 충분히 큰 경우에는 첫 번째 인발공정과 동일한 메커니즘으로 잔류응력이 발생하게 된다. 그러나, 두 번째 인발공정의 단면감소율이 탄성변형을 무시할 수 없을 정도로 충분히 작은 경우에 선재 표면부의 응력은 $S_2 \rightarrow S_1 \rightarrow S_5$ 로 변하고 압축응력 상태인 중심부의 응력은 변형률이 소성영역에 들

기에는 충분히 크지 않기 때문에 탄성영역으로 남게 되어 $C_2 \rightarrow C_5 \rightarrow C_6$ 로 변하게 된다.

3. 유한요소해석을 통한 잔류응력 예측

본 연구에서는 연속 인발공정에 대한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 2는 다이스 반각(a)과 변형률에 따른 인발제 표면부의 잔류응력 해석 결과이다. Fig. 3은 Fig. 2의 결과에 대한 유효변형률과 인발제 표면 잔류응력의 비율을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 다이스 반각에 따라 표면 잔류응력이 거의 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 3으로부터 표면부 잔류응력은 다음의 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\sigma_{rs} = f(a) \cdot K \cdot \bar{\epsilon}_{res} \quad (1)$$

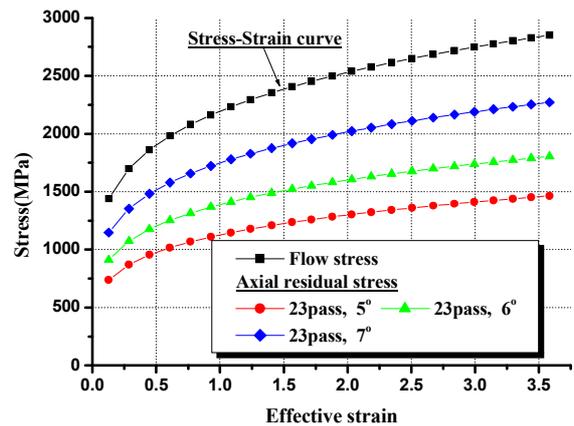


Fig. 2 Residual stress according to strain and semi-die angle

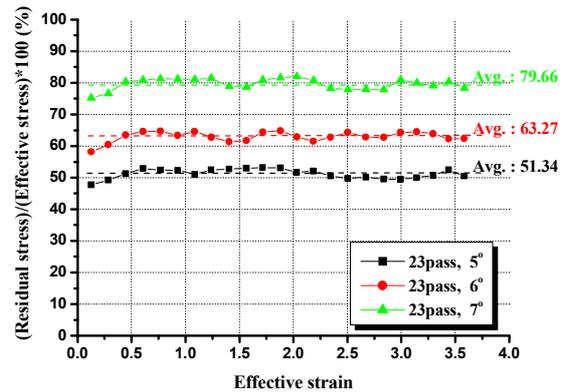


Fig. 3 Relationship between effective and residual stress

식(1)에서 $f(a)$ 와 $\bar{\epsilon}$ 다음과 같다.

$$f(a) = (2.63^2 + 44.72a - 107.54)/100 \quad (2)$$

$$\bar{\epsilon} = 2 \ln(D_o / D_i) = \ln(1 / (1 - (RA/100))) \quad (3)$$

a : 다이스 반각

D_o : 초기 소재직경

D_i : 다이스 출구인발제 직경

따라서 식(1)은 다음의 식(4)로 표현된다.

$$\sigma_{residual} = \left(\frac{2.63a^2 + 44.72a - 107.54}{100} \right) \cdot K\bar{\epsilon}^n \quad (4)$$

식(1)에서 재료의 탄성계수가 다른 경우 잔류응력에 대한 탄성계수의 영향을 고려하기 위해 Fig. 4로부터 다음의 식(5)을 알 수 있다.

$$\bar{\sigma} = E \cdot \bar{\epsilon}_{res} + K \cdot \bar{\epsilon}_o^n - E \cdot \bar{\epsilon}_o \quad (5)$$

식(1)과 식(5)는 P₂를 통과함으로써 두 식을 연립하여 전개하면 식(6)을 얻을 수 있다.

$$E \cdot \bar{\epsilon}_{res} + K \cdot \bar{\epsilon}_o^n - E \cdot \bar{\epsilon}_o = f(a) \cdot K \cdot \bar{\epsilon}_{res}^n$$

$$E \cdot \bar{\epsilon}_{res} - f(a) \cdot K \cdot \bar{\epsilon}_{res}^n = E \cdot \bar{\epsilon}_o - K \cdot \bar{\epsilon}_o^n = C \quad (6)$$

식(5)를 만족하는 $\bar{\epsilon}_{res}$ 근사해를 구한 후 $\bar{\epsilon}_{res}$ 를 식(1)에 대입하면 탄성계수를 고려한 인발제의 잔류응력을 계산할 수 있다.

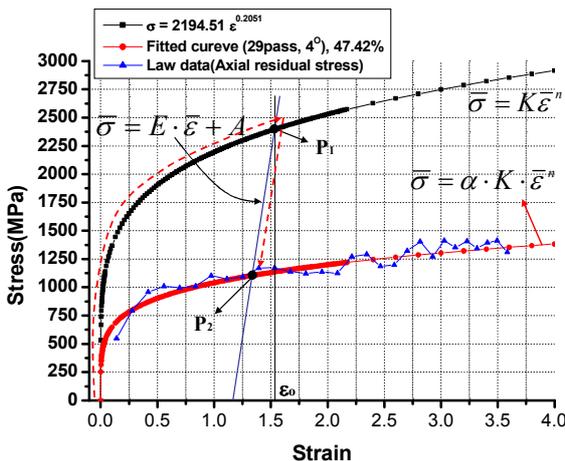


Fig. 4 Prediction of residual stress

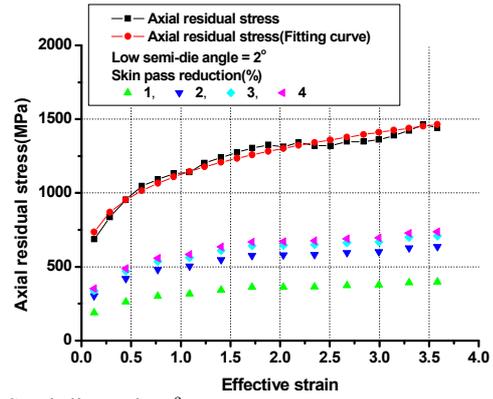
3. 인발제 표면 잔류응력 완화

인발공정 후 인발제의 표면부 잔류응력 제거에 관한 몇몇 연구들이 이루어져왔다. 본 연구에서는 인발제 표면부의 잔류응력 완화를 위하여 다단 인발공정에 대하여 각 패스에 다이스 감면율이 작은 스킨패스와 다이스 반각이 작은 저 다이반각을 적용한 경우에 대한 잔류응력 완화효과를 평가하였다.

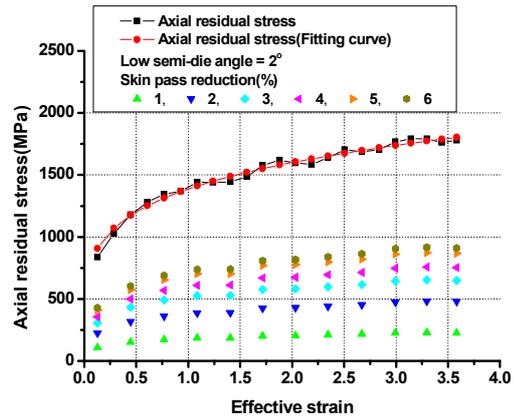
Fig. 5는 고탄소강 23 패스 신선공정에 대하여 홀수번째 패스마다 스킨패스(감면율: 1~8%)와 저 다이반각(2°)을 적용했을 때의 잔류응력을 나타낸 것이다. Fig. 5의 결과에서 다이스 감면율이 낮은 스킨패스를 적용할 경우 인발제의 잔류응력이 낮아짐을 알 수 있다. 또한, 스킨패스의 다이스 반각이 낮을수록 잔류응력 또한 더 낮아짐을 알 수 있다. 따라서, 인발공정 시 마지막 공정에서 다이스 감면율이 낮은 스킨패스와 저 다이반각을 동시에 적용할 경우 인발제의 잔류응력을 완화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

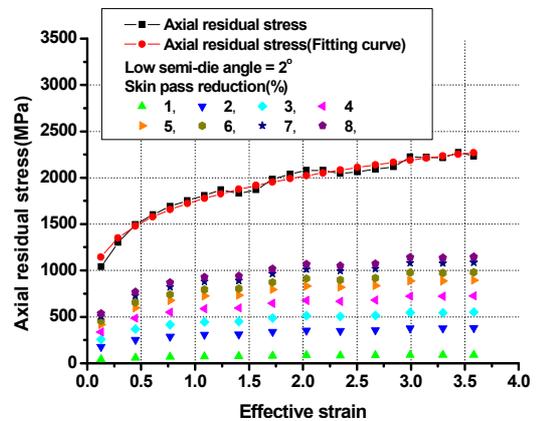
본 연구에서는 인발제의 잔류응력 평가를 위하여 소재 물성치 및 공정변수에 의한 잔류응력 예측 모델을 제안하였다.



(a) Semi-die angle 5°



(b) Semi-die angle 6°



(c) Semi-die angle 7°

Fig. 6 Residual stress according to application of skin pass with low semi-die angle

또한 인발공정 시 감면율이 낮은 스킨패스와 저 다이 반각을 동시에 적용할 경우 인발제의 잔류응력을 상당히 완화시킬 수 있음을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력 양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- Shiota, Y., Tomota, Y., Moriari, A., Kamiyama, T., "Structure and mechanical behavior of heavily drawn pearlite and martensite in a high carbon steel," J. Metlas and Materials, 11(5), 371-376, 2005.
- Kuboki, T., Akiyama, M., "Reduction in residual stress after cold bar drawing," Adv. Tech. Plasti., 1, 361-366, 2002.