

# Delamination 방지를 위한 등온 신선 패스 설계

\*이상곤<sup>1</sup>, 김민안<sup>1</sup>, 고대철<sup>2</sup>, 김병민<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 부산대 대학원 정밀기계공, <sup>2</sup> 부산대 ILIC, <sup>3</sup> 부산대 기계공학부

## Isothermal Pass Schedule to Prevent Delamination in the Wire Drawing

\*S. K. Lee<sup>1</sup>, M. A. Kim<sup>1</sup>, D. C. Ko<sup>2</sup>, B. M. Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Preci. & Mech. Eng., Pusan National Univ., <sup>2</sup> ILIC, Pusan National Univ., <sup>3</sup> School of Mech. Eng., Pusan National Univ.

Key words : Wire drawing, Temperature rise, Delamination, Torsion test, Isothermal pass schedule

### 1. 서론

자동차 타이어 보강재로 사용되는 고탄소강 스틸코드 (Steel cord) 신선의 경우 선재의 온도 상승이 클수록 선재 내부의 탄소와 질소의 확산이 빠르게 진행됨으로써 전위의 이동이 어렵게 되어 갑작스런 취화(Embrittlement)로 인해 공정 중의 단선 가능성이 높아진다<sup>1,2</sup>. 신선공정중에 단선은 여러 가지 원인에 의해서 발생한다. 그 원인들 중에서 가장 대표적인 것이 길이방향으로 파단이 발생하는 Delamination 이다<sup>3</sup>. Delamination 의 발생은 열처리에 의한 미세조직, 잔류응력, 그리고 신선공정조건 등에 영향을 받는다<sup>4,5</sup>. 고탄소강(0.7~1.0wt%C)의 경우 가공 중 가공발열 또는 Aging 에 의해 강선중의 탄소가 확산되어 전위 (Dislocation)에 고착됨으로써 Delamination 발생을 촉진시킨다. Delamination 이 발생하게 되면 선재의 취성(Brittle)이 높아져 연성(Ductility)이 감소된다. 특히, 선재의 비틀림 물성치(Torsion property)가 악화되어 비틀림응력 작용 초기에 길이방향으로 크랙이 발생하여 후공정인 다수의 선재를 꼬이는 연선공정에서 단선 발생으로 인해 생산성이 저하된다. 따라서, 건식 신선 중 Delamination 의 발생을 억제하는 것이 상당히 중요하며, 이를 위해서는 선재의 온도를 최대한 낮게 유지하는 것이 매우 중요하다<sup>1</sup>.

따라서, 본 연구에서는 스틸코드 생산을 위한 건식 2 차 신선공정에 대하여 각 패스에 대한 선재의 온도를 평가하고, 비틀림 시험을 통하여 Delamination 발생여부를 평가하였다. 또한, Delamination 이 발생한 신선공정에 대하여 Delamination 발생 방지를 위한 등온패스를 설계하였다.

### 2. 현공정에 대한 Delamination 발생 평가

Fig. 1(a), (b)에 Delamination 발생 유무에 따른 선재의 전형적인 비틀림 파단형상을 나타내었다. 내부에 Delamination 이 발생하지 않은 경우 Fig. 1(a)에서 보듯이 파단면이 신선 방향과 수직을 이루며 매우 평평하게 형성된다. 반면, 내부에 Delamination 이 발생한 경우, Fig. 1(b)와 같이 비틀림이 가해졌을 때 선재 표면부에서부터 신선방향과 평행하게 파단이 발생하게 된다.

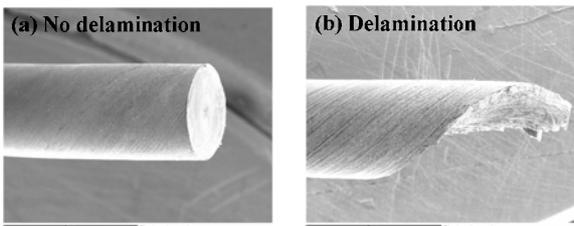


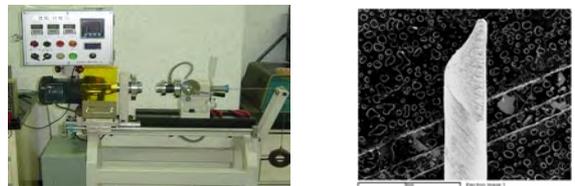
Fig. 1 Torsion fracture of drawn wire

본 연구에서는 현재 자동차 타이어 보강재로 사용되는 스틸코드 생산을 위한 2 차 신선공정에 대한 선재의 Delamination 발생을 평가하였다. Table 1 에 공정조건을 나타내었다.

Table 1 Wire diameter and reduction in area at each pass

| No. of die   | Diameter(mm) | Reduction in area(%) |
|--------------|--------------|----------------------|
| Initial wire | 3.500        | -                    |
| 1            | 2.880        | 32.3                 |
| 2            | 2.460        | 27.0                 |
| 3            | 2.100        | 27.1                 |
| 4            | 1.800        | 26.5                 |
| 5            | 1.550        | 25.8                 |
| 6            | 1.370        | 21.9                 |
| 7            | 1.200        | 23.2                 |
| 8            | 1.060        | 22.0                 |
| 9            | 0.950        | 19.6                 |

Table 1 의 신선조건으로 신선 후 각 패스에서의 선재에 대하여 비틀림 시험을 통하여 Delamination 발생을 평가하였다. 비틀림 시험결과 7 번째 패스 이후 Delamination 발생으로 인하여 선재의 비틀림 파단면이 신선방향으로 형성되었다. Fig. 2 에 비틀림 시험기와 7 번째 패스에서의 선재 파단형상을 나타내었다.



(a) Torsion test machine (b) Fracture shape of the 7<sup>th</sup> pass

Fig. 2 Test machine and fracture shape

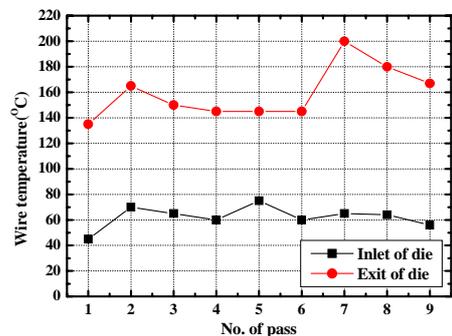


Fig. 3 Wire temperature

Fig. 3 은 각 패스의 다이 입구와 출구에서 접촉식 온도계로 측정된 선재의 온도이다. Fig. 3 에서 Delamination 이 발생한 7 번째 패스에서 다이 출구부의 선재 온도가 약 200°C 로 상당히 높음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 적용한 스틸코드 생산을 위한 2 차 신선공정의 경우 후반부 패스에서 선재의 과도한 온도 상승으로 인하여 Delamination 이 발생한다는 것을 알 수 있었으며, 이를 방지하기 위해서는 공정 재설정을 통한 선재의 온도 제어 요구됨을 알 수 있었다.

### 3. 등온패스 설계

신선 시 선재의 온도는 선의 체적변형과 내부전단변형 및 선재와 다이 접촉면에서의 마찰열로 인하여 상승하게 된다. 변형 시 선재의 온도계산은 이전의 연구결과를 이용하여 다음의 식으로 계산하였다<sup>6</sup>.

$$T_{die,out} = T_{die,in} + \frac{1}{A \cdot f_2 \cdot \rho \cdot c} \left( F \cdot k_m + \frac{4}{3\sqrt{3}} f_2 \cdot \alpha \cdot k_{fm} + m \cdot Q \cdot k_m \cdot \mu \right) \quad (1)$$

여기서,  $T_{die,out}$  는 다이 출구에서의 선재온도,  $T_{die,in}$  은 다이 입구에서의 선재온도,  $A$  는 열의 일당량(Conversion factor),  $f_2$  는 다이 출구에서의 선재 단면적,  $\rho$  는 선재 밀도,  $c$  는 선재의 비열,  $F$  는 다이 입구와 출구에서의 선재 단면적 차이,  $k_m$  은 변형 중의 선재 내부의 평균 변형저항,  $\alpha$  는 다이 반각,  $k_{fm}$  은 변형 전후의 선재 평균 항복강도,  $m$  은 마찰로 인해 발생하는 열이 선재로 열전달되는 정도를 나타내는 열기여율(Heat partition coefficient),  $Q$  는 마찰면적, 그리고  $\mu$  는 마찰계수이다.

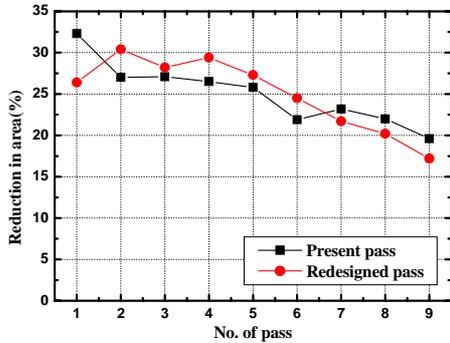


Fig. 4 Reduction in area of present and redesigned pass

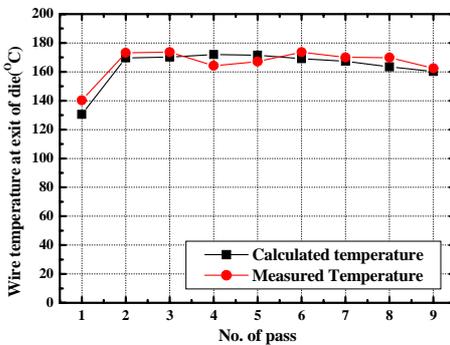


Fig. 5 Wire temperature at exit of die

Table 2 The result of torsion test for redesigned pass

| No. of pass | No. of torsion | Remark          |
|-------------|----------------|-----------------|
| 1           | 32             | No delamination |
| 2           | 44             | No delamination |
| 3           | 41             | No delamination |
| 4           | 38             | No delamination |
| 5           | 42             | No delamination |
| 6           | 39             | No delamination |
| 7           | 40             | No delamination |
| 8           | 38             | No delamination |
| 9           | 41             | No delamination |

Fig. 4 와 Fig. 5 에 재설계된 패스의 다이 감면율과 다이 출구부에서의 선재 온도를 나타내었다. Fig. 4 에서 재설계된

패스의 경우 기존 패스에 비해 전반부 패스에서 다이스 감면율이 상대적으로 높게 설정되었지만, 후반부 패스에서는 기존 패스보다 낮게 설정되었다. 따라서, 후반부 패스에서 감면율을 감소로 인하여 선재의 온도가 기존 공정보다 낮을 것으로 예상된다. Fig. 5 의 온도측정 결과에서 Delamination 이 발생하기 시작하는 7 번째 패스의 경우 선재의 온도가 약 200°C 에서 170°C 로 상당히 감소함을 알 수 있다.

Table 2 에 재설계된 공정으로 생산된 선재에 대한 비틀림 시험 결과를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이, 모든 패스에서 선재 내부에 Delamination 이 발생하지 않았다.

Fig. 6 은 재설계된 공정에 대한 최종 신선 후 비틀림 시험에 의한 선재의 과단형상을 나타낸 것이다. 재설계된 공정의 경우 Delamination 이 발생하지 않았기 때문에 과단면이 신선 방향과 수직을 이루며 평평하게 형성되었다.

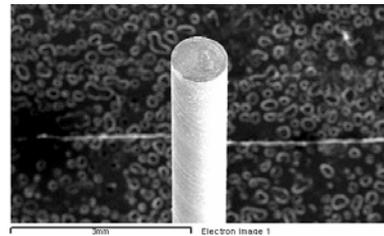


Fig. 6 Wire fracture after 9th pass (redesigned drawing process)

### 4. 결론

본 연구에서는 신선 시 선재 온도예측 및 측정을 통하여 신선 후 선재에 발생하는 Delamination 을 방지하기 위한 등온 패스를 재설계하였다. 재설계된 패스에 대한 신선 실험 결과 기존에 Delamination 이 발생한 7 번째 패스에서 선재의 온도가 약 30°C 감소하였다. 재설계된 신선공정으로 생산한 선재에 대하여 비틀림 시험을 실시한 결과, 모든 패스에서 Delamination 이 발생하지 않았다.

### 참고문헌

1. Nakamura, Y., Fujita, T., Kawakami, H. and Yamada, Y., "New Cooling System for High-Speed Wire Drawing," Wire J., Int., **9**, 59 - 68, 1976.
2. Kim, Y. S., Kim, D. H., Kim, B. M., Kim, M. A., Park, Y. M., "Development of Wire Temperature Prediction Method in a Continuous Dry Wire Drawing Process Using the High Carbon Steel," J. of the KSME, **25**(2), 330 - 337, 2001.
3. Shimizu, K. and Kawabe, N., "Fracture mechanics aspects of delamination occurrence in high-carbon steel wire," Wire J., Int., 88 - 97, March 2002.
4. Heizmann, J., J., Tidu, A., Bolle, B. and Peeters, L., "Influence of the crystallographic texture on the torsional behavior of steel cord," Wire J., Int., 150 - 158.
5. Golis, B., Pilarczyk, J., W., Blazejowski, Z. and Dyja, H., "Small final reductions in the drawing process of rope wires," 184 - 199.
6. 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," J. of the KSPE, **18**(5), 57-64, 2001.