

층간분리 방지를 위한 인발공정 패스설계

이상곤¹· 고대철²· 김병민[#]

Pass Design of Drawing Process to Prevent Delamination

S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim

Abstract

Drawing process of the high carbon steel wire with high speed is usually performed at room temperature using multi pass. In the multi pass drawing, temperature rise affects the mechanical properties of the final product. The excessive temperature rise during the deformation promotes the occurrence of delamination, and deteriorates the torsion property and durability of wire. This paper investigates the occurrence of delamination in the wire through the torsion test and the evaluation of wire temperature. The excessive wire temperature leads to the occurrence of delamination. Based on the calculation of the wire temperature, a new pass schedule, that can prevent the delamination due to the excessive wire temperature rise, is designed through the isothermal pass schedule.

Key Words : Drawing Process(인발공정), Temperature Rise(온도상승), Delamination(층간분리), Torsion Test(비틀림 실험), Isothermal Pass Schedule(등온패스설계)

1. 서 론

자동차 타이어 보강재로 사용되는 고탄소강 스틸코드(steel cord)의 경우 일반적으로 1 차, 2 차 건식인발과 마지막 3 차 습식인발로 생산된다.

인발공정에서 중요한 공정변수는 단면 감소율, 다이반각, 다이와 소재 사이의 마찰조건, 인발속도 등이다. 인발하중을 최소화 하거나 인발 시 발생하는 온도를 억제하기 위해서는 공정변수들을 적절히 선정해야만 한다. 특히, 고탄소강 인발의 경우에는 선재의 온도 상승이 클수록 선재 내부의 탄소와 질소의 확산이 빠르게 진행됨으로써 전위의 이동이 어려워져 갑작스런 취화(embrittlement)로 인해 공정 중의 단선 발생가능성이 높아진다[1].

인발공정중에 단선발생 원인 중에서 가장 대표적인 것이 길이방향으로 파단이 발생하는 층간분리(delamination)이다[2]. 층간분리의 발생은 열처리 에 의한 미세조직, 잔류응력, 그리고 신선공정

조건 등에 영향을 받는다[3]. 고탄소강(0.7~1.0 wt%C)의 경우 가공 중 가공발열 또는 시효에 의해 탄소가 확산되어 전위에 고착됨으로써 층간분리 발생을 촉진시킨다. 층간분리가 발생하게 되면 선재의 취성이 높아져 연성이 감소하게 된다. 특히, 선재의 비틀림 물성치(torsion property)가 악화되어 비틀림응력 작용 초기에 길이방향으로 크랙이 발생하여 후공정인 연선공정에서 단선 발생으로 인해 생산성이 저하된다. 따라서, 인발 중 층간분리 발생을 억제하는 것이 상당히 중요하며, 이를 위해서는 선재의 온도를 최대한 낮게 유지하는 것이 중요하다[1].

본 연구에서는 스틸코드 생산을 위한 건식 2 차 인발공정에 대하여 각 패스에 대한 선재온도를 평가하고, 비틀림 시험을 통하여 층간분리 발생여부를 평가하였다. 또한, 층간분리가 발생한 신선공정에 대하여 층간분리 발생 방지를 위한 등온패스를 설계하였다.

1. 부산대, 부산대-IFAM 국제공동연구소

2. 부산대학교 ILIC

교신저자: 부산대 기계공학부, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

2. 층간분리에 의한 파단

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

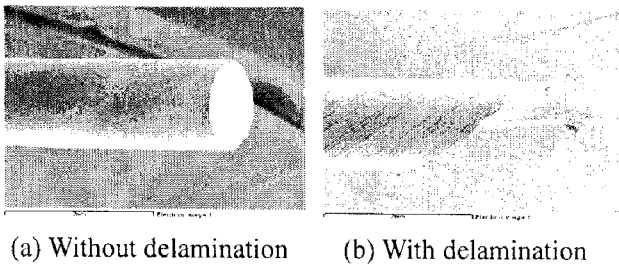


Fig. 1 Fracture mode according to delamination

3. 현공정에 대한 층간분리 발생평가

3.1 인발공정 조건

Table 1 Chemical composition of the wire

C	Si	Mn	S	P	Al	Cu
0.75~ 0.78	0.15~ 0.25	0.60~ 0.90	0.02↓	0.02↓	0.01~ 0.05	0.10↓

Table 2 Wire diameter and reduction at each pass

Pass No.	Diameter(mm)	Reduction(%)
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

본 연구에서 선재의 층간분리 발생을 평가하기 위해 적용한 선선공정은 자동차 타이어 보강재로 사용되는 고강도 스틸코드 생산을 위한 2차 선선공정이다. 사용되는 초기 선재는 탄소함량이

0.75~0.78 wt%인 고탄소강으로 Table 1 에 초기 선재의 화학조성을 나타내었다.

3.2 비틀림실험을 통한 층간분리발생 평가

Table 2의 공정조건으로 생산된 인발재에 대하여 각 패스에서의 층간분리 발생을 평가하기 위하여 선재직경의 100 배 길이의 샘플에 대한 비틀림 시험을 실시하여 그 결과를 Table 3 에 나타내었다. Table 3 에 비틀림 시험에 따른 선재의 파단 비틀림 회전수와 파단 형태를 나타내었다. Table 3의 비틀림 시험 결과 층간분리 발생으로 인하여 7, 8, 그리고 9 번째 패스 선재의 경우 파단 비틀림 횟수가 급격히 감소한 것을 알 수 있다.

Table 3 Result of torsion test

Pass No.	Torsion No.	Delamination
1	30	x
2	47	x
3	39	x
4	36	x
5	44	x
6	41	x
7	35	O
8	32	O
9	28	O

Fig. 2는 비틀림 시험결과 층간분리에 의한 파단이 처음 발생한 7 번째 패스의 파단형상을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 층간분리에 의해 인발방향으로 파단이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

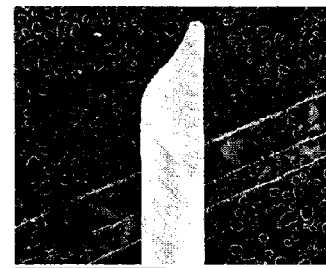


Fig. 2 Fracture shape of the 7th pass(D = 1.200 mm)

인발 시 가공발열에 의한 선재의 온도상승은 가공 중에 선재의 동적변형시효(dynamic strain aging)를 촉진시킬뿐 아니라 인발 후에는 정적변형시효(static strain aging)를 촉진시켜 선재에 층간분리를 일으키는 직접적인 원인이 된다. 따라서,

본 연구에서는 적용한 신선 공정에 대하여 각 패스의 다이 입구와 출구에서의 선재의 온도를 측정하여 층간분리 발생 원인을 조사하였다. 선재의 온도는 접촉식 온도측정기를 이용하여 측정하였다. Fig. 3 에 측정 결과를 나타내었다. Fig. 3 에서 알 수 있듯이, 층간분리가 발생한 마지막 3 패스에서 다이 출구에서의 선재 온도가 약 170~200 °C 로 상당히 높음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 적용한 스틸코드 생산을 위한 2 차 인발공정의 경우 후반부 패스에서 선재의 과도한 온도 상승으로 인하여 층간분리가 발생하는 것으로 판단하였으며, 이를 방지하기 위해서는 공정 재설정을 통한 선재의 온도 제어가 요구됨을 알 수 있었다.

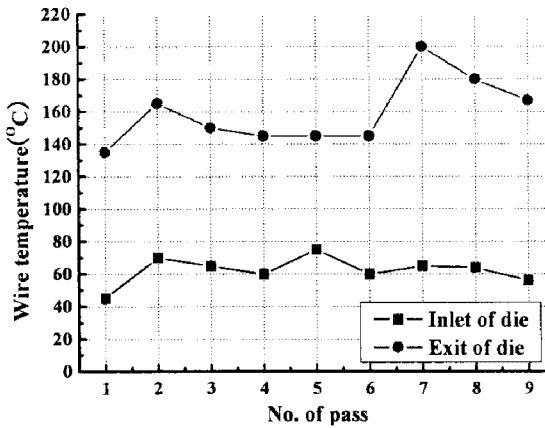


Fig. 3 Wire temperature

4. 등온패스 설계

4.1 선재온도계산

신선 시 선재의 온도는 선의 체적변형과 내부 전단변형 및 선재와 다이 접촉면에서의 마찰열로 인하여 상승하게 된다[3].

본 연구에서는 적용된 인발공정에 대하여 선재의 온도를 낮추기 위해 다이 감면율을 조절하여 등온패스를 설계하였다. 선재의 온도계산은 이전의 연구결과를 이용하였다[3]. 다이 출구에서의 선재 온도는 다음의 식(1)로 계산하였다.

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

다이를 통과한 선재는 다음 다이 입구까지 이동하는 동안 블록에서 냉각이 된다. 선재의 온도는 Fig. 4 와 같이 인발다이를 통과한 후 블록의

입구까지 이동하면서 인발기 주위의 대기에 노출되어 감소하고, 블록에 저선되어 있을 때, 그리고 블록을 빠져 나와 다음 다이입구까지 주위 공기와의 대류에 의한 열전달로 인해 감소하게 된다.

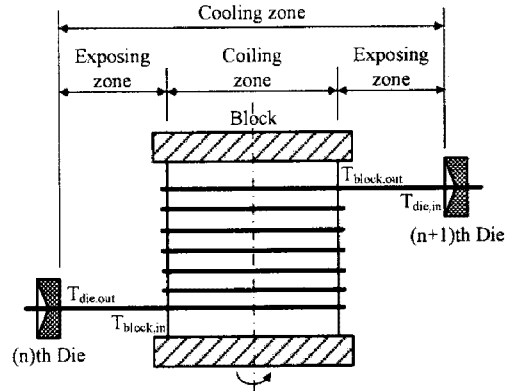


Fig. 4 Cooling zone between the (n)th and (n+1)th die

선재가 다이를 통과한 후 각 냉각영역에서의 선재 온도는 다음의 식들로 계산되어진다.

$$T_{die,in} = (T_{die,out} - T_{air}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{h_{air}}{\pi \cdot \rho \cdot d \cdot c}\right) t_A\right] + T_{air} \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} + \left(\frac{1/\sum R_i + h_{air}}{\rho \cdot r \cdot c}\right) \cdot T = \frac{1}{\rho \cdot r \cdot c} \left(\frac{T_{c,w}}{\sum R_i} + h_{air} \cdot T_{air}\right)$$

$$T_{block,out} \frac{B}{A} + \exp(-A \cdot t_B) \cdot \left(T_{block,in} - \frac{B}{A}\right) \quad (3)$$

$$\text{여기서, } A = \frac{1/\sum R_i + h_{air}}{\rho \cdot r \cdot c}, \quad B = \frac{T_{c,w}/\sum R_i + h_{air} \cdot T_{air}}{\rho \cdot r \cdot c}$$

$$T_{die,in} = (T_{block,out} - T_{air}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{h_{air}}{\pi \cdot \rho \cdot d \cdot c}\right) t_c\right] + T_{air} \quad (4)$$

4.2 등온패스설계

온도 계산식을 이용하여 현공정을 등온 패스로 재설계하였다. Fig. 5 에 기존 패스와 재설계된 패스에 대한 다이 감면율을 나타내었다. Fig. 5 의 결과에서 알 수 있듯이, 재설계된 패스의 경우 기존 패스에 비해 전반부 패스에서 다이 감면율이 상대적으로 높게 설정되었지만, 후반부 패스에서는 기존 패스보다 낮게 설정되었다. 따라서, 후반부 패스에서 감면율 감소로 인하여 선재의 온도가 기존 공정보다 낮을 것으로 예상된다.

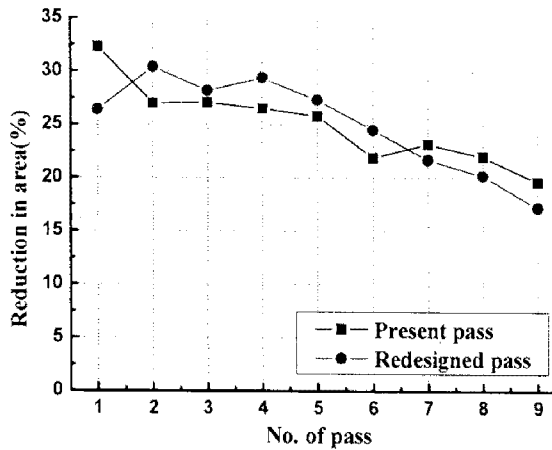


Fig. 5 Comparison of reduction in area between the present and the redesigned pass

다이 감면율에 대하여 인발실험을 실시하여, 다이 출구에서의 선재 온도를 측정하고 그 결과를 온도계산식으로 예측한 결과와 비교하였다.

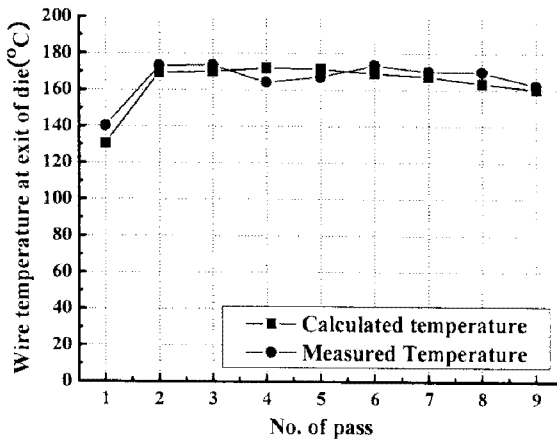


Fig. 6 Wire temperature at exit of die

Fig. 6 에 온도 측정 및 계산결과를 나타내었으며, 온도 계산결과와 실제 시험에서 측정한 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 또한, 기존 공정에 비해 전반부 패스에서의 선재온도는 약 170°C 정도로 상승하였지만, 층간분리가 발생하는 후반부 패스에서는 기존 공정보다 상대적으로 감소한 것을 알 수 있다. 특히, 층간분리가 발생하기 시작하는 7 번째 패스의 경우 선재의 온도가 약 200°C 에서 170°C 로 상당히 감소함을 알 수 있다.

재설계된 공정으로 생산된 선재에 대한 비틀림 시험 결과 모든 패스에서 층간분리가 발생하지 않았다. Fig. 7 은 재설계된 공정에 대한 최종 선선 후 비틀림 시험에 의한 선재의 파단형상을

나타낸 것이다. 재설계된 공정의 경우 층간분리가 발생하지 않았기 때문에 파단면이 선선 방향과 수직을 이루며 평평하게 형성되었다.

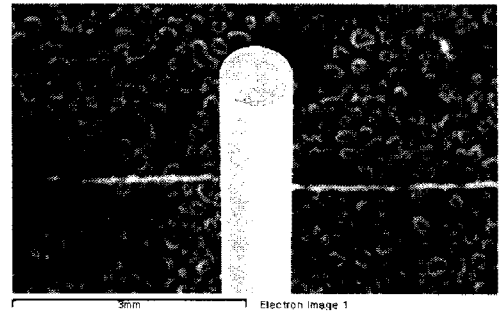


Fig. 7 Wire fracture after shape of the 9th pass for the redesigned drawing process

5. 결론

스틸코드 생산을 위한 고탄소강 인발공정에 있어 지나친 온도상승은 층간분리의 주요원인이다. 본 연구에서는 지나친 온도상승으로 인하여 층간분리가 발생하는 인발공정에 대하여 선재온도에측모델을 기초로 등온패스로 재설계하였다. 재설계된 패스에 대한 온도예측결과 층간분리가 발생하는 후반부 패스에서 선재의 온도가 약 30°C 감소하였다. 재설계된 패스로 인발실험 후 선재에 대한 비틀림시험결과 층간분리가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참 고 문 헌

- [1] Y. Nakamura, T. Fujita etc, 1976, New cooling system for high-speed wire drawing, Wire. J. Int., Vol. 9, pp. 59~68.
- [2] K. Shimizu, N. Kawabe, 2002, Fracture mechanics aspects of delamination occurrence in high-carbon steel wire, Wire J. Int., March, pp. 88~97.
- [3] Y. S. Kim, D. H. Kim, B. M. Kim, M. A. Kim, Y. M. Park, 2001, Development of isothermal pass schedule program for the re-design of a continuous high carbon steel wire drawing process, J. of the KSPE, Vol. 18, Mo. 5, pp. 57~64.