한국정밀공학회지 제 24 권 제 1 호 (2007 년 1 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 1, January 2007

층간분리 방지를 위한 건식 등온 신선 패스 설계

고대철*, 이상곤**, 김민안**, 김병민#

Isothermal Pass Schedule to Prevent Delamination in the Dry Wire Drawing Process

Dae-Cheol Ko*, Sang-Kon Lee**, Min-An Kim** and Byung-Min Kim#

ABSTRACT

Wire drawing process of the high carbon steel with a high speed is usually conducted at room temperature using a number of passes or reductions through consequently located dies. In the multi-pass drawing process, temperature rise in each pass affects the mechanical properties of the final product such as bending, torsion, and tensile property, etc. This temperature rise during the deformation promotes the occurrence of delamination, and deteriorates the torsion property and durability of wire. This study 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 the delamination. Based on the calculation of the wire temperature, a new pass schedule, which can prevent the delamination due to the excessive wire temperature rise, is designed through the isothermal pass schedule.

Key Words : Wire drawing process(신선공정), Temperature rise(온도상승), Delamination(층간분리), Torsion test(비틀림시험), Isothermal pass schedule(등온패스설계)

기호설명

$T_{die,out}$ = wire temperature at the die exit
$T_{die,in}$ = wire temperature at the die inlet
A = conversion factor
f_2 = area of the wire at the die exit
ρ = density of the wire
c = specific heat of the wire
F = difference of area between die inlet and exit
k_m = average deformation resistance
α = semi die angle
k_{fm} = mean yield strength before, and after drawing of the wire
m = heat partition coefficient
Q = contact area between die and wire
μ = friction coefficient
$T_{block,in}$ = wire temperature at the inlet of the block
t_A = time that the wire moves to the inlet of the block after passing through the previous die
$T_{block,out}$ = wire temperature at the exit of the block

☞ 접수일: 2006 년 8 월 28 일; 게재승인일: 2006 년 11 월 20 일
* 부산대학교 동남권부품소재산학협력혁신연구소
** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
# 교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소
E-mail bmkim@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2319

t_C = time that the wire is positioned from the exit of the block to the inlet of the next die
ΣR = thermal resistance
r, d = wire radius and diameter
$T_{c.w}$ = temperature of the cooling water
h_{air} = convection heat transfer coefficient
T_{air} = temperature of the air
T = temperature variation of the wire with the time

1. 서론

자동차 타이어 보강재로 사용되는 고탄소강 스틸코드(steel cord)의 경우 일반적으로 3 번의 신선공정을 거쳐 생산된다. 1 차, 2 차 신선의 경우 건식신선이며, 마지막 3 차 신선의 경우 습식신선이다.

신선공정에서 중요한 공정변수는 단면 감소율, 다이반각, 다이와 소재 사이의 마찰, 신선 속도 등이다. 신선 하중을 최소화하거나 신선 시 발생하는 온도를 억제하기 위해서는 이와 같은 공정변수들을 적절히 선정하여야 한다. 특히, 고탄소강 건식신선의 경우에는 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.[1,2]

신선공정중에 단선은 여러 가지 원인에 의해서 발생한다. 그 원인들 중에서 가장 대표적인 것이 길이방향으로 파단이 발생하는 층간분리이다.[3] 층간분리의 발생은 열처리에 의한 미세조직, 잔류응력, 그리고 신선공정조건 등에 영향을 받는다.[4-7] 고탄소강(0.7~1.0 wt%C)의 경우 가공 중 가공발열 또는 시효에 의해 강선중의 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 다수의 선재를 꼬으는 연선공정에서 단선 발생으로 인해 생산성이 저하된다. 따라서, 신선중 층간분리 발생을 억제하는 것이 상당히 중요하며, 이를 위해서는 선재의 온도를 최대한 낮게 유지하는 것이 매우 중요하다.[1]

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

2. 층간분리에 의한 선재 파단

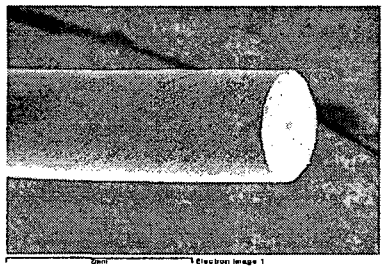

Fig. 1(a) Completely flat torsion fraction without delamination

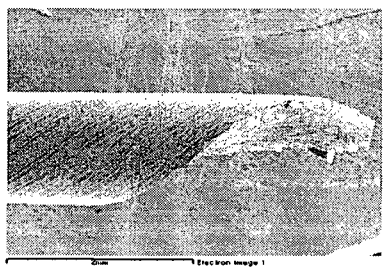

Fig. 1(b) Traditional brittle failure due to delamination

신선 공정중 선재에 층간분리가 발생하게 되면 후속 연선공정 시 비정상적인 파단이 일어나게 된다.

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 신선 방향과 수직을 이루며 매우 평평하게 형성된다. 반면, 내부에 층간분리가 발생한 경우, Fig. 1(b)와 같이 비틀림이 가해졌을 때 선재 표면부에서부터 신선방향과 평행하게 파단이 발생하게 된다.

3. 실공정에 대한 층간분리 발생 평가

3.1 신선공정 조건

본 연구에서 선재의 층간분리 발생을 평가하기 위해 적용한 신선공정은 자동차 타이어 보강재

로 사용되는 고강도 스틸코드 생산을 위한 2 차 신선공정이다. 사용되는 초기 선재는 탄소함량이 0.75~0.78 wt%인 고탄소강으로 Table 1 에 초기 선재의 화학조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of the wire

C	Si	Mn	S	P	Al	Cu
0.75~ 0.79	0.15~ 0.25	0.60~ 0.90	0.02↓	0.02↓	0.01~ 0.05	0.10↓

Table 2 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

초기선재 직경 φ3.500 mm 에서 최종 선재 직경 φ0.951 mm 로 신선하는 9 패스 연속 신선공정으로, 최종 선재속도는 700 m/min 이다. Table 2 에 각 패스의 선재 직경 및 다이 감면율을 나타내었다.

3.2 층간분리발생 평가

Table 2 의 공정조건으로 생산된 2 차 신선재에 대하여 각 패스에서의 층간분리 발생을 평가하기 위하여 선재 샘플에 대하여 비틀림 시험을 실시하였다. 비틀림은 Fig. 2 의 비틀림 시험기를 이용하였으며, 비틀림 시험편의 길이는 선재직경의 100 배이다.

Table 3 에 비틀림 시험에 따른 선재의 파단 비틀림 회전수와 파단 형태를 나타내었다.

Table 3 의 비틀림 시험 결과 층간분리 발생으로 인하여 7, 8, 그리고 9 번째 패스의 선재의 경우 파단 비틀림 횟수가 급격히 감소한 것으로 사려된다.

Fig. 3 은 각 패스 선재에 대한 비틀림 시험 시 선재가 파단되는 형상을 나타낸 것이다. 파단 비틀림 횟수 결과와 동일하게 7, 8, 그리고 9 번째 패스의 경우 층간분리에 의해 신선방향으로 파단이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

신선시 가공발열에 의한 선재의 온도상승은 가공 중에 선재의 동적변형시효(dynamic strain aging)를 촉진시킬뿐 아니라 신선 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. 4 에 측정 결과를 나타내었다. Fig. 4 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 신선공정의 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.

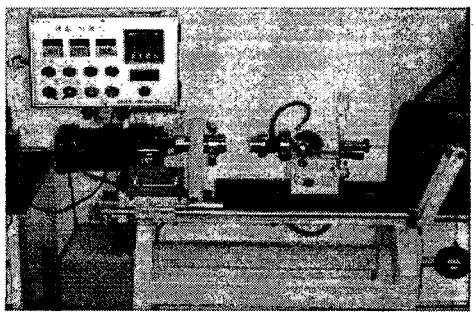

Fig. 2 Torsion test machine

Table 3 The result of torsion test

No. of pass	No. of torsion	Remark
1	30	No delamination
2	47	No delamination
3	39	No delamination
4	36	No delamination
5	44	No delamination
6	41	No delamination
7	35	Delamination
8	32	Delamination
9	28	Delamination

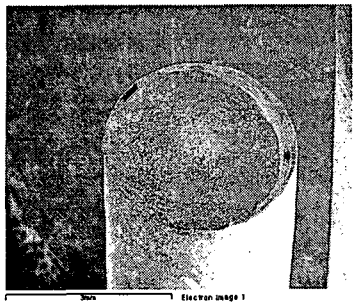

Fig. 3 (a) Fracture shape of initial wire (D = 3.500 mm)

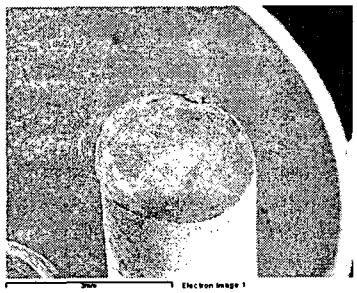

Fig. 3 (b) Fracture shape of the 1st pass (D = 2.880 mm)

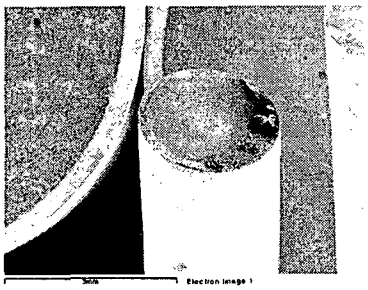

Fig. 3(c) Fracture shape of the 2nd pass (D = 2.460 mm)

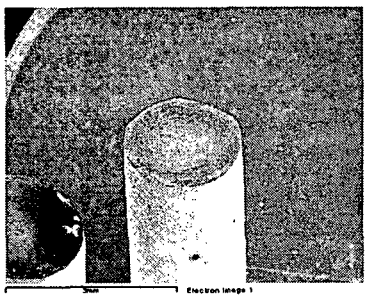

Fig. 3(d) Fracture shape of the 3rd pass (D = 2.100 mm)

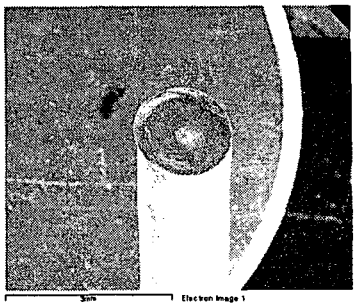

Fig. 3(e) Fracture shape of the 4th pass (D = 1.800 mm)

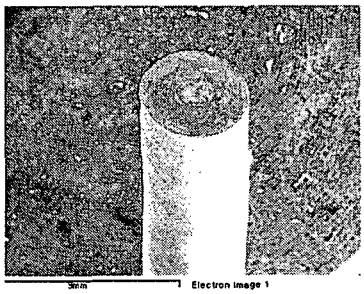

Fig. 3(f) Fracture shape of the 5th pass (D = 1.550 mm)

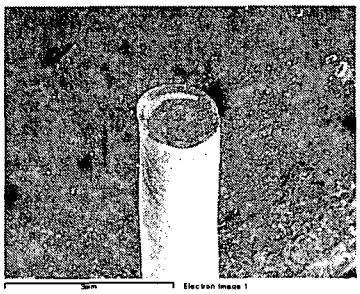

Fig. 3(g) Fracture shape of the 6th pass (D = 1.370 mm)

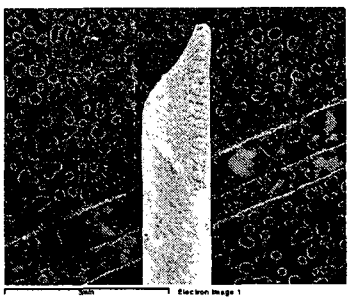

Fig. 3(h) Fracture shape of the 7th pass (D = 1.200 mm)

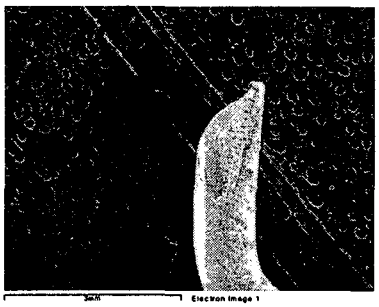

Fig. 3(i) Fracture shape of the 8th pass (D = 1.060 mm)

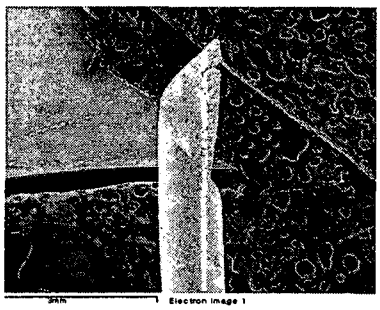

Fig. 3(j) Fracture shape of the 9th pass (D = 0.950 mm)

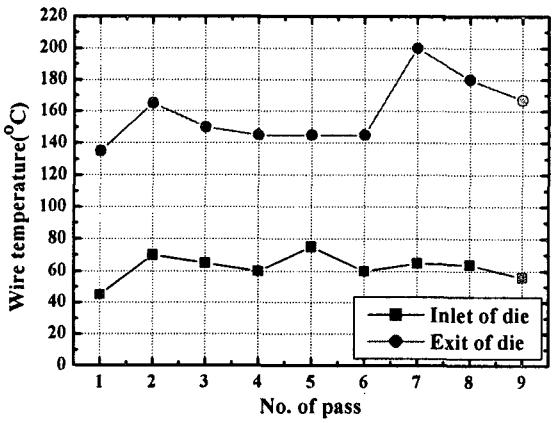

Fig. 4 Wire temperature

4. 등온패스 설계

4.1 선재 온도 예측

신선 시 선재의 온도는 선의 체적변형과 내부 전단변형 및 선재와 다이 접촉면에서의 마찰열로 인하여 상승하게 된다.[8]

본 연구에서는 적용된 2 차 신선공정에 대하여 공정중 선재의 온도를 낮추기 위해 다이스 감면율을 조절하여 등온패스를 설계하였다. 선재의 온도 계산은 이전의 연구결과를 이용하였다.[8] 다이 출구에서의 선재 온도는 다음의 식(1)로 계산하였다.

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

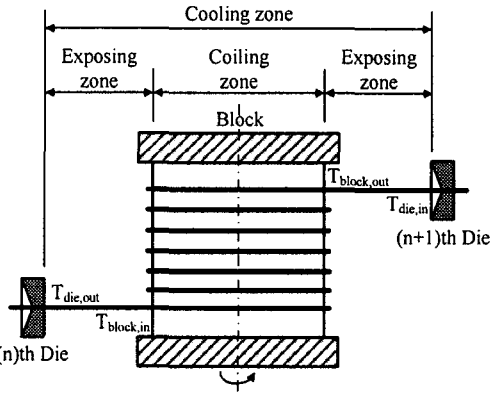

Fig. 5 Cooling zone between the (n)th and (n+1)th die

다이를 통과한 선재는 다음 다이 입구까지 이동하는 동안 블록에서 냉각이 된다. 선재의 온도는 Fig. 5 와 같이 신선 다이를 통과한 후 블록의 입구까지 이동하면서 신선기 주위의 대기에 노출되어 감소하고, 블록에 저선되어 있을 때, 그리고 블록을 빠져 나와 다음 다이 입구까지 주위 공기와의 대류에 의한 열전달로 인해 감소하게 된다. 선재가 다이를 통과한 후 각 냉각영역에서의 선재 온도는 다음의 식들로 계산되어진다.[8]

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

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

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

여기서, $A = \dfrac{1/\sum R_t + h_{air}}{\rho \cdot r \cdot c}$, $B = \dfrac{T_{c.w}/\sum R_t + h_{air} \cdot T_{air}}{\rho \cdot r \cdot c}$

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

4.2 등온 패스설계

이상의 온도 계산식을 이용하여 현재의 2 차 신선공정을 등온 패스로 재설계하였다. Fig. 6 에 기존 패스와 재설계된 패스에 대한 다이스 감면율을 나타내었다. Fig. 6 의 결과에서 알 수 있듯이, 재설계된 패스의 경우 기존 패스에 비해 전반부 패스에서 다이스 감면율이 상대적으로 높게 설정되었지만, 후반부 패스에서는 기존 패스보다 낮게 설정되었다. 따라서, 후반부 패스에서 감면율 감소로 인하여 선재의 온도가 기존 공정보다 낮을 것으로 예상된다.

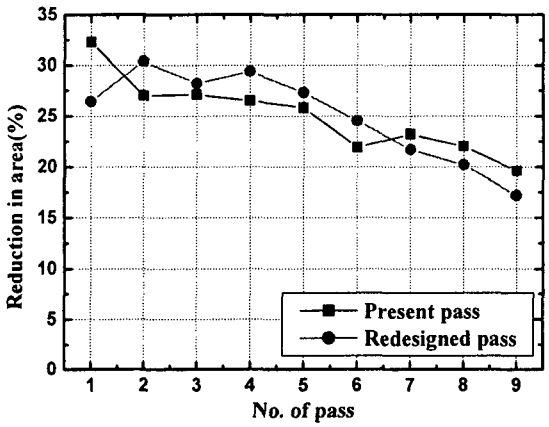

Fig. 6 Comparison of reduction in area between the present and the redesigned pass

재설계된 다이스 감면율에 대하여 신선실험을 실시하여, 다이 출구에서의 선재 온도를 측정하고 그 결과를 온도계산식으로 예측한 결과와 비교하였다. Fig. 7 에 온도 측정 및 계산결과를 나타내었다. Fig. 7 의 결과에서 알 수 있듯이 온도 계산결과와 실제 시험에서 측정한 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 또한, Fig. 4 의 기존 공정에 대한 온도측정 결과에 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.

Table 4 에 재설계된 공정으로 생산된 선재에 대한 비틀림 시험 결과를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이, 모든 패스에서 선재 내부에 층간분리가 발생하지 않았다.

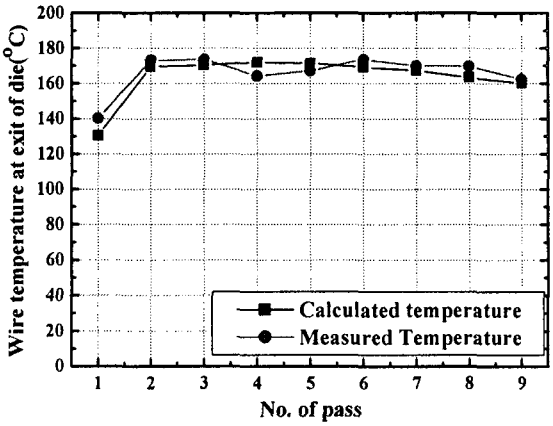

Fig. 7 Wire temperature at exit of die

Table 4 The result of torsion test (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

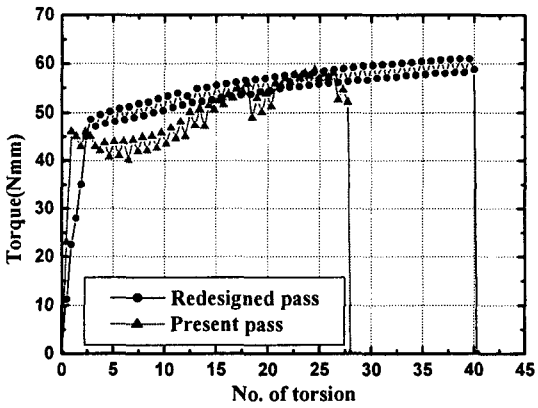

Fig. 8 Comparison of torque curve between the present and the redesigned drawing pass

Fig. 8 은 마지막 최종 신선 후 선재의 비틀림 시험 시 선재의 비틀림 강도를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 재설계된 공정의 경우 최종 신선 후에도 선재 내부에 층간분리가 발생하지 않았음을 알 수 있다.

Fig. 9 는 재설계된 공정에 대한 최종 신선 후 비틀림 시험에 의한 선재의 파단형상을 나타낸 것이다. 재설계된 공정의 경우 층간분리가 발생하지 않았기 때문에 파단면이 신선 방향과 수직을 이루며 평평하게 형성되었다.

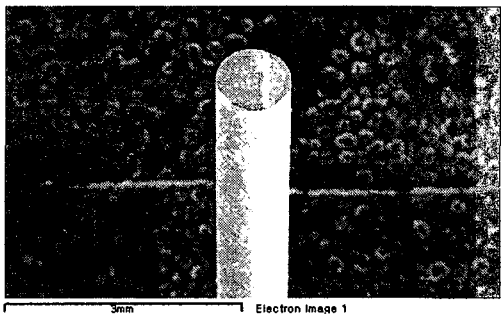

Fig. 9 Wire fracture after shape of the 9th pass for the redesigned drawing process

5. 결론

이상의 연구를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 신선 시 선재의 온도가 과도하게 상승하게 되며 선재 내부에 층간분리가 발생하여 후속 공정인 연선 공정 시 단선을 일으키거나, 최종 제품의 내구성을 저하시키게 된다.

(2) 선재 온도 평가 및 비틀림 시험을 통하여 신선 시 각 패스에 대한 층간분리 발생을 평가하였다. 선재의 온도가 과도하게 높은 경우 내부에 층간분리가 발생하여 비틀림 시험 시 파단 비틀림 횟수가 급격히 감소함과 동시에 신선방향과 평행하게 파단이 발생함을 알 수 있었다.

(3) 층간분리가 발생한 스틸코드 생산을 위한 2 차 신선공정에 대하여 선재 온도계산식을 이용하여 등온패스를 설계하였다. 설계된 패스에 대하여 신선시험을 실시한 결과 기존 공정에서 층간분리가 발생한 패스의 선재 온도가 감소하였다.

(4) 재설계된 패스로 신선된 선재에 대하여 동일한 방법으로 비틀림 시험을 실시한 결과 모든 패스에서 층간분리가 발생하지 않음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Nakamura, Y., Fujita, T., Kawakami, H. and Yamada, Y., "New Cooling System for High-Speed Wire Drawing," Wire J., Int., Vol. 9, pp. 59-68, 1976.
2. Kim, Y. S., Kim, D. H., Kim, B. M., Kim, M. A. and 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, Vol. 25, No. 2, pp. 330-337, 2001.
3. Shimizu, K. and Kawabe, N., "Fracture mechanics aspects of delamination occurrence in high-carbon steel wire," Wire J., Int., pp. 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., pp. 150-158, July 1999.
5. Golis, B., Pilarczyk, J. W., Blazejowski, Z. and Dyja, H., "Small final reductions in the drawing process of rope wires," Wire J., Int., pp. 184-199, March 2000.
6. Lefever, I., D'Haene, U., Raemdonck, W. V., Aernoudt, E., Houtte, P. V. and Sevillano, J. G., "Modeling of the delamination of high strength steel wire," Wire J., Int., pp. 90-99, June 1998.
7. Ibaraki, N., Makii, K., Ochiai, K. and Oki, Y., "Wire rods for ultra tensile steel cord," Wire J., Int., pp. 122-129, March 2000.
8. Kim, Y. S., Kim, D. H., Kim, B. M., Kim, M. A. and 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, Vol. 18, No. 5, pp. 57-64, 2001.