

신선 속도 향상을 위한 건식 신선 공정의 패스스케줄 설계

김영식*, 김동환*(부산대 정밀기계공학과 대학원), 김병민**(부산대 기계공학부),
김민안***, 박용민***(주효성 언양 공장 중앙연구소)

Pass Schedule Design for Improvement of Drawing Speed in the Dry Wire Drawing Process

Y.S.Kim, D.H.Kim(Graduate School of Prec. Mecha. Dept.,PNU), B.M.Kim(Mecha. Eng. Dept. PNU),
M.A.Kim, Y.M.Park(Central Research Center, Hyosung Corporation)

ABSTRACT

In the high carbon steel wire drawing process, the wire temperature increases as the drawing speed is faster in order to increase the production rate in the shop floor. The rapid temperature rise causes the wire fracture in the dry wire drawing process. So, in this paper, the isothermal pass schedule program, which includes the calculation method of wire temperature at each pass, is proposed to prevent the wire fracture due to the temperature rise. Using the isothermal pass schedule program, it is newly proposed the pass schedule design system that prevents the cup-cone defects, improves the elongation of the final products and assures further deformation. As a result, the temperature rise of the wire was decreased and the production rate of the final product is remarkably grown up according to the increase of the final drawing speed than that of the conventional process. Also, the proposed pass schedule design system could give a useful information to the process designer who would design the high carbon steel wire drawing process.

Key Words : Wire Temperature(선재 온도), Wire Fracture(단선), Isothermal Pass Schedule Program(등온패스스케줄 프로그램), Pass Schedule Design System(패스스케줄 설계 시스템)

1. 서론

최근에는 제품의 생산성을 증가시키기 위해서 최종 신선 속도를 증가시키는데, 신선 속도가 증가할수록 변형 시에 발생한 열이 다이 외부로 분산될 충분한 시간을 가지지 못하고 다이와 선재 사이의 마찰 조건이 변하여 선재의 온도가 상승하게 된다. 선재의 온도 상승에 따라 선재 내부의 탄소와 질소가 확산됨으로써 이들이 전위의 이동을 방해하여 선재는 취화(Embrittlement)되며 단선 발생 가능성이 높아져 신선 공정이 불안정하게 된다.

본 연구에서는 연속 건식 신선 공정에서 선재의 온도 상승으로 인한 공정 중의 단선을 방지하고 생산성을 향상시키기 위한 새로운 패스스케줄 설계 방식을 제시하고자 한다. 이를 위해, 우선 각 패스에서 선재의 온도를 예측하는 수식적인 방법을 개발하여 실제 현장에서 측정한 데이터와 비교하여

그 타당성을 검토한 후, 각 패스의 다이 출구에서의 선재의 온도를 동일하게 하는 등온 패스스케줄 프로그램을 개발하였다. 등온패스스케줄 프로그램을 이용하여 신선성을 향상시키고 단선을 방지하는 패스스케줄 설계 시스템을 제시하고 기존의 공정을 재설계하였다.

2. 선재의 온도 예측

2.1 선재 온도

선재가 다이를 통과한 후 선재의 온도 상승은 Fig.1 에 나타난 바와 같이 변형 영역에서 선재의 제적변형, 전단변형 및 마찰로 인해 발생하는 열량을 고려하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

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

(1)

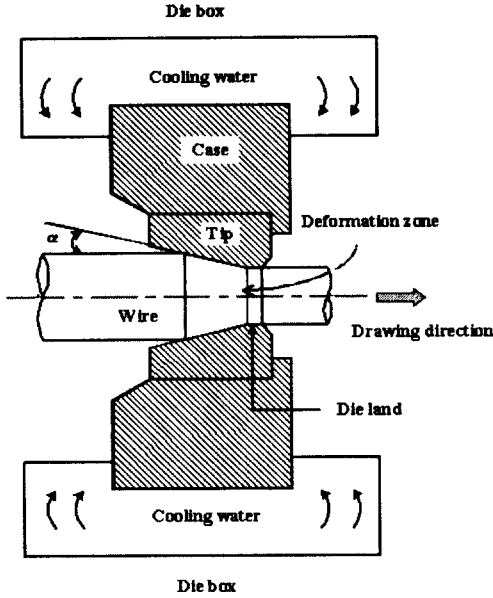


Fig.1 Deformation zone in wire drawing process

위의 식(1)에서, F 는 다이 입구와 출구에서 선재의 단면적의 차이, k_m 은 변형 중의 선재 내부의 평균 변형 저항, k_{fm} 은 변형 전후의 선재 평균 항복강도, v 는 신선 속도로 최종의 신선 속도와 각 다이에서의 선경이 정해지면 체적일정 조건으로부터 구해진다. 그리고, z 는 선재가 다이를 통과하는데 걸리는 시간, f_2 는 다이 출구에서의 선재의 단면적, A 는 열의 일당량(Conversion factor), α 는 다이 반각이다. c 는 선재의 비열, ρ 는 선재의 밀도, $T_{die,in}$ 은 다이 입구에서의 선재의 온도, $T_{die,out}$ 은 변형 후 다이 출구에서의 선재의 온도, m 은 열기여율, μ 는 마찰 계수, F 는 다이 입구와 출구에서 선재의 단면적의 차이, Q 는 마찰 면적이다.

일반적으로, 연속 신선 공정에서는 선재가 다이를 통과한 후에 Fig.2와 같이 동력원과 냉각원의 역할을 동시에 하는 블록에 저선되며, 이 때 감소되는 선재의 온도는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

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

$$\frac{dT}{dt} + \left(\frac{1/\sum R_i' + h_{air}}{\rho \cdot r \cdot c}\right) \cdot T = \frac{1}{\rho \cdot r \cdot c} \cdot \left(\frac{T_{c,w}}{\sum R_i'} + h_{air} \cdot T_{air}\right)$$

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

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

(3)

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

위의 (2), (3), (4)식에서, $T_{block,in}$ 은 블록의 입구에서의 선재의 온도, t_A 는 선재가 다이를 통과한 후 블록입구까지 이동하는데 걸리는 시간, $T_{block,out}$ 은 블록의 출구에서의 선재의 온도, t_B 는 선재가 블록에 저선되어 있는 시간, $T_{die,in}$ 다음 다이 입구에서의 선재의 온도, 이 온도가 다음 다이에서 변형 후 선재의 온도 상승에 가산된다. t_C 는 선재가 블록을 빠져나와 다음 다이의 입구까지 이동하는 시간을 나타낸다. $\sum R_i'$ 는 열저항(Thermal resistance), r 과 d 는 각 패스마다의 선재의 반경 및 직경, $T_{c,w}$ 는 블록 내에 선재를 냉각시키기 위해 흐르는 냉각수의 온도, h_{air} 는 신선기 주위의 공기의 대류 열전달 계수, T_{air} 는 신선기 주위의 공기의 온도, t 는 다이셋의 각 위치까지 선재가 이동하는데 걸리는 시간, T 는 시간에 따른 선재의 온도 변화를 나타낸다.

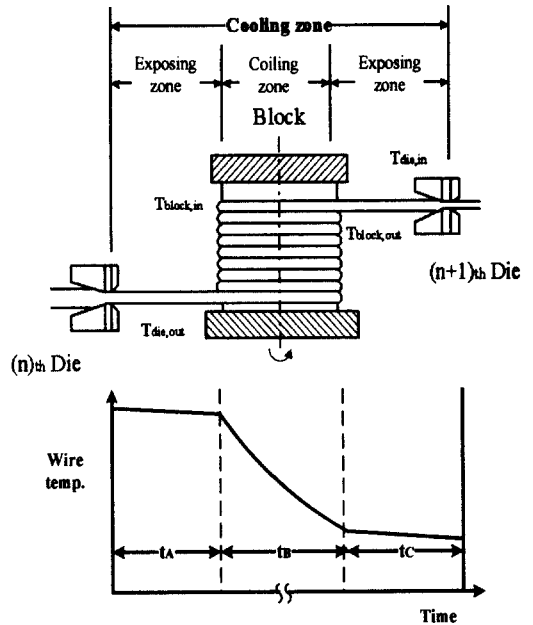


Fig.2 Schematic representation of multi-stage wire drawing machine

2.2 온도 예측 기법의 적용 및 검증

본 연구에서 고려된 소재는 건식 1차 신선을 마친 후 파텐팅(Patenting)처리된 AISI 1080 강이며, 인장 시험을 통해 구한 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 1126.0 \bar{\epsilon}^{-0.0953} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

온도 계산에 필요한 재료상수, 가공경화 지수, 선재의 밀도 및 비열 등은 신선 공정이 실온 상태에서 이루어지기 때문에 온도에 따라서 변하지 않는 상수라고 가정하였다.

본 연구에서 적용한 공정 조건과 패스스케줄은 Table 1 과 Table 2 에 나타낸 바와 같다. 총 패스 수는 8 패스이며, 첫번째 냉각 영역에서의 블록의 직경과 저선 높이는 600mm, 160mm 이고, 나머지 패스에서는 각각 400mm 와 120mm 로 하였다.

Fig.3 에 본 연구에서 제시한 온도 계산 방법을 이용하여 계산된 온도와 실제 현장에서 측정된 온도를 서로 비교 해 놓았으며, 두 결과가 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 1 Process conditions

Friction coefficient, μ	Semi-die angle, α	Bearing length, l	Final drawing speed, v
0.06	6°	0.5d _{out}	11m/s

Table 2 Conventional pass schedule

Pass no.	Exit wire diameter [mm]	Reduction in area [%]
1 st pass	2.88	19.0
2 nd pass	2.56	21.0
3 rd pass	2.30	19.3
4 th pass	2.08	18.2
5 th pass	1.89	17.4
6 th pass	1.72	17.2
7 th pass	1.57	16.7
8 th pass	1.45	14.7

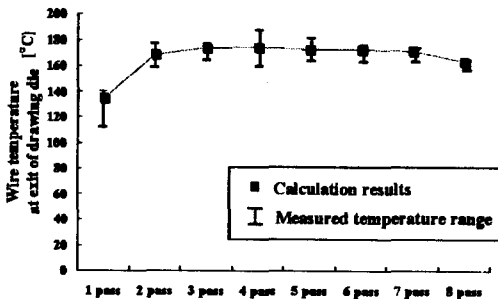


Fig.3 Comparison results between the calculation wire temperature and measured values at exit of the drawing die

3. 패스스케줄 설계 시스템

3.1 등온패스스케줄 프로그램

본 연구에서는 앞서 제시한 온도 계산식을 이용하여 선재의 온도 상승 계산과 연속 신선 공정 설계의 간편화를 위해서 다이 출구에서의 선재의 온도를 일정하게 하는 등온패스스케줄 프로그램을 개발하였다. 그 흐름도는 다음의 Fig.4 와 같다.

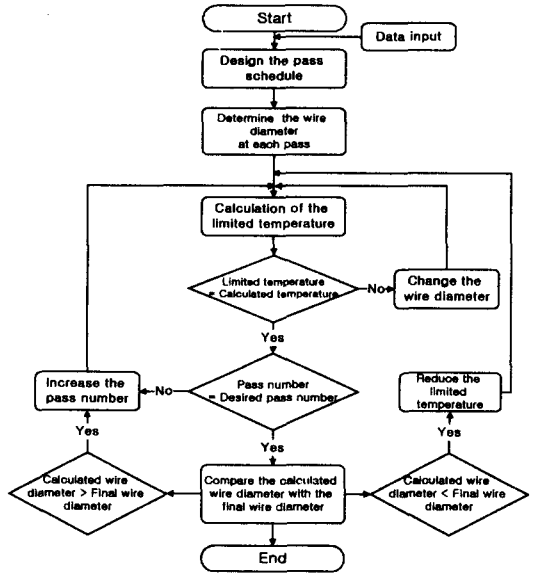


Fig.4 Flow chart of the isothermal pass schedule program (SDD2D)

위의 등온패스스케줄 프로그램의 흐름도는 다음과 같이 설명할 수 있다.

- Step.1 온도 계산에 필요한 물성치를 입력한다.
- Step.2 초기 선경과 최종 선경을 입력한다.
- Step.3 설계자가 원하는 패스 수를 입력한다.
- Step.4 공정을 균등단면적감소율(전 패스의 단면적 감소율을 같게 설계하는 방법)로 설계한다.
- Step.5 한계온도 (균등단면적감소율 패스스케줄로 설계하였을 때 계산된 선재의 온도)와 프로그램상에서 계산된 온도를 비교한다.
- Step.6 한계온도와 프로그램상에서 계산된 온도를 비교하면서 두 값이 같게 될 때까지 선경을 변화 시킨다.
- Step.7 위의 Step.6 의 과정을 계속 반복하여 설계자 원하는 패스 수가 될 때까지 프로그램을 반복 수행한다.
- Step.8 최종 선경이 설계자가 입력한 값과 같음을 비교하고, 같아질 때 까지 위의 Step.6, 7 의 과정을 반복한다.

Step.9 최종 선경이 설계자가 원하는 값과 같게 되면, 프로그램을 종료한다.

3.2 연속 건식 신선 공정 설계

등온패스스케줄 프로그램을 이용하여 연속 건식 신선 공정의 8 패스 전체를 등온패스스케줄 설계 방식으로 재설계하였다. 그 결과 다이 출구에서의 선재의 온도를 약 166°C 로 일정하게 유지하고, 최종 신선 속도도 현재보다 약 1m/s 정도 증가시킬 수 있어 생산성 향상에 기여할 수 있었다. 그러나, 첫번째 패스의 단면적감소율이 약 26%로 다이 마모가 빨리 진행되는 문제가 발생하여 현장에 적용하는데 그 실용성이 없었다. 따라서 본 연구에서는 패스 수를 현재 공정에 적용하는 것보다 더 증가시키고, 다이 마모와 최종 제품의 연신율 및 신선성을 향상시키기 위해서 첫번째 패스의 단면적 감소율을 20%로 하고 나머지 8 패스를 등온패스스케줄 설계 방식으로 재설계하였다. 그리고 패스 수가 늘어 남에 따라 각 패스에서의 단면적감소율이 감소해 내부 결함으로 인한 단선 가능성이 증가함에 따라, 이를 보완하기 위해서 다이 반각을 6°에서 5°로 감소시켜 연속 건식 신선 공정을 재설계하였다.

위의 설계 제약 조건을 만족시키면서, 공정을 재설계했을 경우의 각 패스의 다이 출구에서의 선경과 실제 측정 온도 데이터를 다음의 Table 3 에 나타내었다. Table 3 에서 알 수 있듯이, 다이 출구에서의 선재의 온도는 기존의 경우보다 약 8°C 정도 줄일 수 있어 후 공정에서 취화로 인한 선재의 단선 발생을 억제할 수 있었다. 그리고 최종 신선 속도도 기존 대비 1.5m/s 상승된 12.5m/s 로 신선할 수 있어 최종 제품의 생산성을 약 11% 증가시킬 수 있었다.

Table 3 Re-designed pass schedule and wire temperature at exit of the drawing die at each pass

Pass no.	Wire diameter at exit of the drawing die [mm]	Wire temperature at exit of the drawing die [°C]
1 st pass	2.84	111.1
2 nd pass	2.52	147.2
3 rd pass	2.31	145.4
4 th pass	2.11	144.9
5 th pass	1.95	168.4
6 th pass	1.79	174.5
7 th pass	1.65	177.4
8 th pass	1.58	179.3
9 th pass	1.45	174.3

4. 결론

본 연구를 통해서 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 선재가 다이를 통해서 변형을 받은 후의 선재의 온도 상승과 블록에 저선되어 있을 때의 선재의 온도 강하식을 유도하여 측정결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.
- (2) 온도 계산식을 이용하여 선재의 온도 상승을 고려한 등온패스스케줄 프로그램을 개발하여 연속 신선 공정 설계 시 유용한 정보를 얻을 수 있었다.
- (3) 선재의 온도 상승 및 내부결함으로 인한 단선 방지, 신선 중의 신선성 향상, 최종 제품의 연신율의 향상을 고려한 새로운 패스스케줄 설계 시스템을 제시하여 기존 공정에 적용하였다. 그 결과 선재의 온도 상승으로 인한 단선 가능성을 감소시키고, 생산성을 증가시킬 수 있었다.

후기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고 문헌

1. Y.Nakamura, T.Fujita, Ph.D., H.Kawakami and Y.Yamada, "New cooling system for high-speed wire drawing," *Wire Journal*, No.7, pp 59-68, 1976
2. Alexander Geleji, "Bildsame formung der metalle in rechnung und versuch," Akademie-Verlag, GmbH.BERLIN, 1960
3. Yukio Kojima, Nobuhiro Yasue and Takaji Mizuno, "A calculation of interface temperature in drawing," *Journal of the JSTP*, Vol.32, No.366, pp.906-911, 1991
4. Y.C.Kim, "A study on the analysis and design of the rectangular shaped drawing process," Pusan National University, 2000
5. Aly El-Domiaty, Sadek Z.Kasab, "Temperature rise in wire-drawing," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 83, pp.72-83, 1998
6. Frank P. Incropera, David P. Dewitt, "Fundamentals of heat and mass transfer, 4th edition," John Wiley & Sons, INC., 1996