

# 고탄소강 연속 신선 공정의 재설계를 위한 등온패스스케줄 프로그램의 개발

김영식\*, 김동환\*, 김병민\*\*, 김민안\*\*\*, 박용민\*\*\*

## Development of Isothermal Pass Schedule Program for the Re-design of a Continuous High Carbon Steel Wire Drawing Process

Young Sik Kim\*, Dong Hwan Kim\*, Byung Min Kim\*\*, Min An Kim\*\*\*, Yong Min Park\*\*\*

### ABSTRACT

The high speed in the wire-drawing process to meet the demands for the increased productivity has a great effect on the heat generated due to plastic deformation and friction between the wire and the drawing dies. During the high carbon steel wire drawing process, the temperature rise gives a great influence to the fracture of wire. In this paper, to control the temperature rise in the wire after the deformation through the drawing die, the calculation method of the wire temperature, which includes the temperature rise in the deformation zone as well as the temperature drop in the block considering the heat transfer among the wire, cooling water and surrounding air, is proposed. These calculated results of the wire temperature at the inlet and exit of the drawing die at each pass are compared with the measured wire temperatures and verified its efficiency. So, using the program to predict the wire temperature, the isothermal pass schedule program was developed. By applying this isothermal pass schedule program to the conventional process condition, a new isothermal pass schedule is redesigned through all passes. As a result, the possibility of wire fracture could be considerably reduced and the productivity of final product could be more increased than before.

**Key Words** : Dry wire drawing(건식 신선), High carbon steel(고탄소강), Wire temperature(선재 온도), Wire fracture(단선), Isothermal pass schedule(등온패스스케줄)

### 1. 서론

신선 가공은 주로 연속적으로 이루어지며 특히, 고탄소강을 이용한 연속 신선 공정에서는 공정 중의 선재의 온도 상승에 따른 정적 변형 시효에 의한 단선을 방지하기 위해서 각 패스에서의 공정변수의 적절한 조합과 패스스케줄의 재설계를 통해 선재의 온도 상승을 최대한 억제할 필요가

있다. 그리고 패스스케줄에 따라서도 선재의 내부 변형 양상도 달라지게 되므로 적절한 패스스케줄의 선정도 최종 제품의 기계적 성질의 향상을 위해서는 중요시되어야 한다.

최근에는 제품의 생산성을 증가시키기 위해서 최종 신선 속도를 증가시키는데, 신선 속도가 증가할수록 변형 시에 발생한 열이 인발 금형 외부로 분산될 충분한 시간을 가지지 못하고 인발 금

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과  
\*\* 부산대학교 기계공학부  
\*\*\* (주)효성 연양공장 강선연구소

형과 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<sup>(1)</sup>. 신선 공정에서 선재의 온도 상승에 관한 연구는 최초 Siebel 과 Kobitzsch<sup>(2)</sup>에 의해 시작되었다. 이 연구에서는 단위 체적당의 일과 마찰일이 모두 열로 변환된다고 가정하였고 인발 금형과 소재 사이의 접촉면에서 발생된 열의 일부가 선재로 열전달 된다고 가정하여 신선 후의 선재의 온도를 계산하였다. Yukio 등<sup>(3)</sup>은 Siebel 과 Kobitzsch 가 제시한 일차원 모델을 개선하여 그 적용 범위를 확장하였으며, 이들은 축대칭의 열전달 방정식을 이용하여 재료에서 인발 금형으로의 열전달을 고려하여, 일차원 모델과 유한요소 해석을 통하여 그 결과를 서로 비교하였다. Kim<sup>(4)</sup>은 사각재 인발 공정에서 최종 제품을 생산하기 위해 두 가지의 패스스케줄을 설계하여 인발력과 인발속도를 서로 비교해서 인발 금형의 파손과 마모의 경향을 파악하였다.

본 연구에서는 자동차 타이어의 보강재로 사용되고 있는 스틸코드의 제조 공정 중의 하나인 연속 건식 신선 공정에서 선재의 온도 상승으로 인한 단선을 방지하기 위해 현재의 신선 공정을 재설계하고자 한다. 이를 위해, 1)각 패스에서 인발 금형을 통과하면서 상승되는 선재 온도와, 2)인발 금형을 통과한 후 신선기 주위의 공기에 노출되고, 블록에서 저선(선재가 블록에 감겨 있는 상태)되어 있을 때 감소하는 선재 온도 계산 방법을 제시하였다. 계산된 온도 결과를 실제 현장에서 측정된 온도 데이터와 서로 비교, 검증하였다. 이 결과를 토대로 하여 건식 신선 공정 전 패스에서 인발 금형 출구에서의 선재의 온도를 동일하게 하는 등온패스스케줄 프로그램을 개발하였으며, 기존의 패스스케줄을 등온패스스케줄 설계 방식으로 재설계하였다.

## 2. 선재 온도 예측 기법 개발

### 2.1 선재의 온도 상승

선재와 인발 금형의 접촉면에서 마찰이 없는 경우, 즉 선재가 인발 금형을 통과할 때의 변형양상이 이상 변형이고, 소성변형에 필요한 모든 일

이 열로 변환된다고 가정하면, 선의 체적변형과 내부전단변형에 소모되는 에너지로 인해 선재에 발생하는 열량은 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다<sup>(2)</sup>.

$$W_a = \frac{1}{A} F \cdot k_m \cdot v \cdot z \quad (1)$$

$$W_b = \frac{1}{A} \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot k_{fm} \cdot f_2 \cdot \alpha \cdot v \cdot z \quad (2)$$

위 식 (1)과 (2)에서  $W_a, W_b$ 는 각각 체적변형에 필요한 일과 내부전단변형에 필요한 일이 모두 열로 변환된 양을 나타낸다. 여기서,  $F$ 는 인발 금형 입구와 출구에서 선재의 단면적의 차이,  $k_m$ 은 변형 중의 선재 내부의 평균 변형 저항,  $k_{fm}$ 은 변형 전후의 선재 평균 항복 강도,  $v$ 는 신선 속도로 최종의 신선 속도와 각 인발 금형에서의 선경이 정해지면 체적일정 조건으로부터 구해진다. 그리고,  $z$ 는 선재가 인발 금형을 통과하는데 걸리는 시간,  $f_2$ 는 인발 금형 출구에서의 선재의 단면적,  $A$ 는 열의 일당량(Conversion factor),  $\alpha$ 는 다이 반각이다.

한편, 선재와 인발 금형의 접촉면에서 마찰이 존재하는 경우에 마찰에 의해 발생하는 열은 선재나 인발 금형의 온도와는 무관하다고 하면, 단지 마찰을 무시했을 때 발생한 선재의 열량에 단순히 가산될 수 있으며, 이 가산된 열량이 마찰로 인해 선재의 온도가 상승하는 열원이 된다. 즉, 인발 금형과 선재 사이의 마찰을 고려하여 인발 금형 출구에서의 온도 분포가 정상 상태가 될 때의 선재에 발생하는 평균 온도는 다음 식과 같다.

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

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

식(3)은 선재의 보유열량은 체적변형과 내부전단 변형 및 인발 금형과 선재 사이의 마찰에 의해 발생한 열량과 같게 됨을 나타낸 것이고, 이 식을 정리하여  $T_{die,out}$ 에 관하여 풀게 되면 식(4)와 같이

선재가 인발 금형을 통과한 후의 선재의 평균 온도를 구할 수 있게 된다. 위 식에서,  $c$  는 선재의 비열,  $\rho$  는 선재의 밀도,  $T_{die,in}$  은 인발 금형 입구에서의 선재의 온도,  $T_{die,out}$  은 변형 후 인발 금형 출구에서의 선재의 온도,  $m$  은 열기여율,  $\mu$  는 마찰 계수,  $F$  는 인발 금형 입구와 출구에서 선재의 단면적의 차이,  $Q$  는 마찰 면적이다.

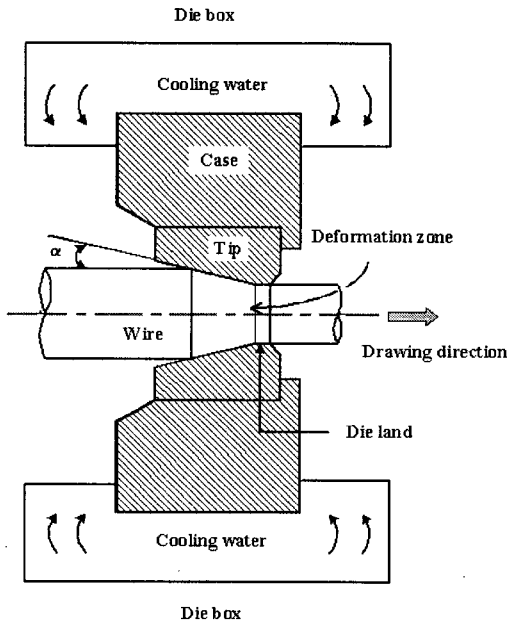


Fig. 1 Schematic cross-sectional view of die box

식(4)에서  $m(0 \leq m \leq 1)$ 은 마찰로 인해 발생하는 열이 선재로의 열전달되는 정도를 나타내는 열기여율(Heat partition coefficient)이며, 실제로 마찰로 인해 발생된 열의 80~90%는 선재로, 10~20%는 인발 금형으로 열전달된다. 신선 속도가 1m/s 이상 일 때는  $m$  은 0.8~0.9 사이의 값을 가진다<sup>(2)</sup>. 본 연구에서는 Fig.1 에 나타난 바와 같이 다이 박스(Die box)에서 냉각수에 의한 인발 금형의 냉각 효과를 고려하여 열기여율의 값을 0.8로 하였다.

## 2.2 인발 금형 통과 후 선재의 온도 강하

일반적인 고탄소강의 신선 공정은 Fig.2 에 나타난 바와 같이 연속적으로 이루어진다. 선재의 온도는 Fig.2 와 같이 인발 금형을 통과한 후 블록의 입구까지 이동하면서 신선기 주위의 대기에 노출되어 감소하고, 블록에 저선되어 있을 때, 그리고

블록을 빠져 나와 다음 인발 금형 입구까지 주위 공기와의 대류에 의한 열전달로 인해 감소하게 된다. 선재가 대기에 노출되고, 블록에서 저선되어 있을 때의 선재의 온도 강하를 예측하기 위해서 선재의 미소면적이 시간에 따라 이동하는 동안의 온도 변화를 고찰하였다. 연속 신선 공정에서는 Fig.2 와 같이 인발 금형 출구에서 다음 인발 금형 입구까지의 공정이 다단으로 동일하게 반복되므로, 본 연구에서는 이 구간을 냉각영역(Cooling zone)이라 가정하였다.

선재가 인발 금형을 통과한 후 블록의 입구, 블록의 출구, 그 다음 인발 금형의 입구에서의 온도 계산식은 다음과 같다. 온도 계산식을 유도하기 위하여 미소 면적을 가진 선재의 시간에 따른 온도 변화를 구하는 데 유용한 방법으로 사용되고 있는 Lumped capacitance method<sup>(8)</sup>를 이용하였다. 냉각 영역의 각 위치에서의 선재의 온도 계산식을 다음의 식(5), (6), (7)에 각각 나타내었다.

$$T_{block,in} = (T_{die,out} - T_{air}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{h_{air}}{\pi \cdot \rho \cdot d \cdot c}\right) \cdot t_A\right] + T_{air} \quad (5)$$

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

$$T_{block,out} = \frac{B}{A} + \exp(-A \cdot t_B) \cdot (T_{block,in} - \frac{B}{A}) \quad (6)$$

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

$$T_{die,in} = (T_{block,out} - T_{air}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{h_{air}}{\pi \cdot \rho \cdot d \cdot c}\right) \cdot t_C\right] + T_{air} \quad (7)$$

식(5)는 선재가  $n$  번째 인발 금형을 통과한 후 블록의 입구까지 도달할 때(Exposing zone)까지의 시간에 따른 선재의 온도, 식(6)은 선재가 블록에 저선되어 블록을 통과할 때(Coiling zone)까지의 시간에 따른 선재의 온도, 식(7)은 선재가 블록을 빠져나와 다음의  $n+1$  번째 인발 금형의 입구까지 이동할 때(Exposing zone)의 시간에 따른 선재의 온도를 나타내고 있다.

식(5)~(7)에서,  $T_{block,in}$  은 블록의 입구에서의 선

재의 온도,  $t_A$ 는 선재가 인발 금형을 통과한 후 블록입구까지 이동하는데 걸리는 시간,  $T_{block,out}$ 은 블록의 출구에서의 선재의 온도,  $t_B$ 는 선재가 블록에 저선되어 있는 시간,  $T_{die,in}$ 은 다음 인발 금형 입구에서의 선재의 온도이고, 이 온도가 다음 인발 금형에서 변형 후 선재의 온도 상승에 가산된다.  $t_C$ 는 선재가 블록을 빠져나와 다음 인발 금형의 입구까지 이동하는 시간을 나타낸다.  $\sum R$ 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  $n$ 번째 인발 금형의 출구에서  $n+1$ 번째 인발 금형의 입구 사이에서 각 위치까지 선재가 이동하는데 걸리는 시간,  $T$ 는 시간에 따른 선재의 온도 변화를 나타낸다. Fig.2 에서 선재가 대기 중에 노출된 영역에서 신선기 주위 공기와의 대류에 의해 감소되는 온도는 식(5)와 (7)에 의해 계산해 본 결과 감소하는 온도의 양이 선재가 블록에 저선되어 있는 영역에서 감소하는 선재 온도에 비하여 무시할 정도로 작기 때문에 선재의 온도 강하는 선재가 블록에 저선되어 있을 때 가장 많은 영향을 받는다.

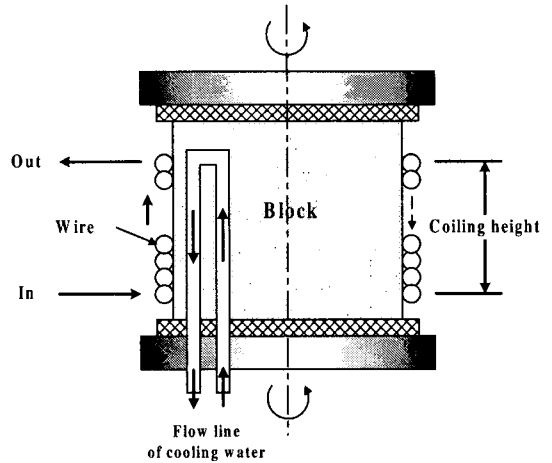


Fig. 3 Cross sectional view of block

Fig.3 에는 블록의 단면을 개략적으로 나타내었다. 이 블록은  $n$ 번째 인발 금형과  $n+1$ 번째 인발 금형 사이에 위치하여 선재를 잡아당겨 신선 되게 하는 동력원의 역할 뿐만 아니라  $n$ 번째 인발 금형에서 변형 시에 상승된 온도를 낮추는 냉각원의 역할을 한다.

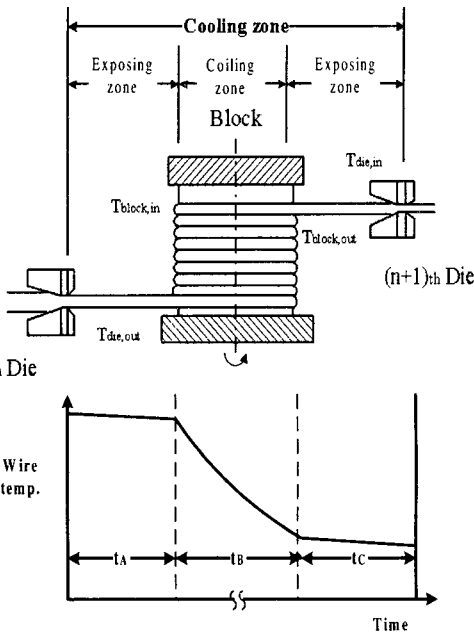


Fig. 2 Schematic representation of multi-stage wire drawing machine

### 2.3 온도 예측 기법의 적용 및 검증

온도 계산에 필요한 공정조건은 실제 현장에서 사용하고 있는 것으로 선정하였으며, Table 1에 나타내었다. 그리고, 온도 계산을 위해 사용된 소재는 건식 1 차 신선을 마친 후 파텐팅(Patenting) 처리된 AISI 1080 강이며, 인장 시험을 통해 구한 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 1126.0\epsilon^{-0.0953} \text{ [MPa]} \quad (8)$$

온도 계산에 필요한 재료상수, 가공경화 지수, 선재의 밀도 및 비열 등은 신선 공정이 실온 상태에서 이루어지기 때문에 온도에 따라서 변하지 않는 상수라고 가정하였다. 또한 선재와 인발 금형의 접촉면에서의 마찰계수도 압력과 온도에 무관하다고 하였으며, 연속 신선 공정에서 사용하고 있는 비누성분의 건식 윤활제의 마찰 계수는 UTM (Universal Testing Machine : 60ton)을 이용하여 평판마찰시험법으로 측정하였다<sup>(6)</sup>.

인발 금형의 교체 비용 절감을 위해서 다이 반각을 전 패스에서 6°로 일정하게 하여 선재의 온도를 계산하였다. 각 패스마다의 선경 및 단면적 감소율을 Table 2 에 정리하였다. 초기의 선재의 직경은 3.2mm, 최종 선재의 직경은 1.45mm 로 총 단면적 감소율은 79.5%, 총 패스 수는 8 패스이다.

본 연구에서의 온도 예측 기법을 스틸코드 제품 생산 공정 중의 하나인 8 패스 연속 신선 공정에 적용하였으며, 첫번째 냉각 영역에서의 블록의 직경과 저선 높이는 600mm, 160mm, 두 번째에서 마지막 여덟번째 냉각 영역에서의 블록의 직경과 저선 높이는 각각 400mm, 120mm 로 하였다.

Table 1 Process conditions

Friction coefficient, $\mu$	0.06
Semi-die angle, $\alpha$	6°
Bearing length, $l$	$0.5 \times d_{out}$
Final drawing speed, $v$	11m/s
Temperature of surrounding air, $T_{air}$	39°C
Temperature of cooling water in block, $T_{c.w.}$	28°C
Initial wire temperature	47.5°C
Heat partition coefficient, $m$	0.8
Material of tip	Tungsten carbide
Material of die case	Steel (AISI 1045)

Table 2 Present pass schedule

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

## 2.4 온도 계산 결과의 비교

제시된 온도 예측 기법의 타당성을 검증하기 위해서 온도 계산 결과를 실제 현장에서 측정된 선재의 온도와 비교하였다. 선재 온도는 접촉식 온도계를 이용하여 각 인발 금형 입구와 출구에서 10 회 측정하였다. 그 결과를 Fig.4 와 Fig.5 에 각각 나타내었다. Fig.4 에는 인발 금형 입구에서의 선재의 온도를, Fig.5 에는 각 패스의 인발 금형 출구에서의 선재의 온도를 측정결과와 비교하여 나타내었다. 그림에는 측정된 온도의 최대값과 최소값을 표시하였다.

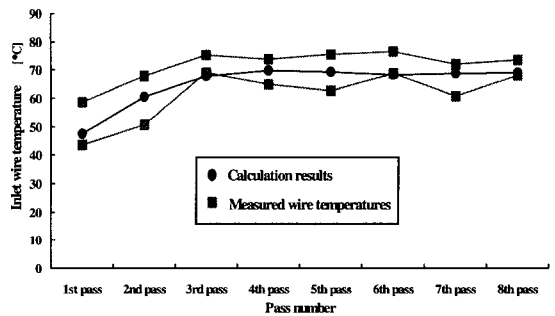


Fig. 4 Wire temperature at inlet of drawing die

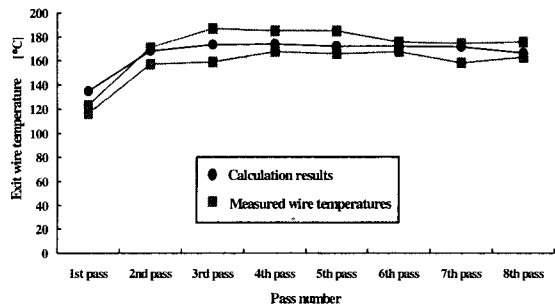


Fig. 5 Wire temperature at exit of drawing die

위의 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제시된 온도 계산식을 이용하여 인발 금형 입구와 출구에서의 선재의 온도를 계산해 본 결과, 실제 측정된 값에 근접하였다. 선재가 인발 금형을 통해 변형을 받으면서 선재의 온도는 약 100°C 상승하였고, 그 후 인발 금형과 인발 금형 사이에 있는 블록에 저선되어 있을 경우에 약 90°C ~ 110°C 감소하였다. 이는 실제 측정된 선재의 온도와 개발

된 수식으로 계산된 선재의 온도 모두 같은 경향을 나타내었다. 선재의 후 공정에서의 단선과 최종 제품의 기계적 성질에 중요한 영향을 주는 인발 금형 출구에서의 선재의 온도 경우, 그 오차는 각 패스마다 다르지만 측정오차 까지 고려한다면 본 연구를 통해 개발된 선재의 온도 계산 방법으로 계산된 선재의 온도가 측정 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

### 3. 건식 선선 공정의 재설계

#### 3.1 등온패스스케줄 프로그램의 개발

앞서 제시한 온도 계산 식으로 계산한 값과 온도 측정 데이터와 비교한 결과 서로 잘 일치함을 Fig.4, 5 를 통해서 알 수 있었다. 본 연구에서는 현재의 공정을 재설계하기 위해서 제시한 온도 계산식을 바탕으로 하여 등온패스스케줄 프로그램을 개발하였다. 등온패스스케줄 프로그램의 개발에 관한 순서도를 다음의 Fig.6 에 나타내었다. 등온패스스케줄 프로그램으로 기존의 공정을 재설계하는 단계에 관하여 설명하면 아래와 같다.

- 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 변화시킨다.
- Step.7** 위의 Step.6 의 과정을 계속 반복하여 설계자가 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 공정 재설계

개발된 등온패스스케줄 프로그램을 이용하여 건식 2 차 선선 공정을 재설계하였으며, 그 결과를 기존의 공정과 비교하여 Table 3 에 나타내었다. 최종 선선 속도, 다이 반각, 저선 높이 등과 같이 온도 계산에 필요한 공정 조건은 기존의 공정과 동일하게 적용하였다.

기존의 공정을 등온패스스케줄 프로그램을 이용하여 재설계한 결과, 인발 금형을 통과한 후 선재의 온도를 약 166°C 로 일정하게 유지할 수 있어 선선 중 선재의 온도 상승으로 인한 단선 발생 가능성을 현저히 줄이고, 선선 공정의 안정화에 기여할 수 있었다. 또한 이 패스스케줄을 현장에 적용하였을 경우, 최종 선선 속도는 현재 11m/s 에서 1m/s 더 증가시켜 12m/s 로 선선할 수 있어 최종 제품의 생산성 향상에 기여할 수 있었다.

그러나 Table 4 에 나타낸 바와 같이 현재의 건식 2 차 선선 공정의 전 패스를 등온패스스케줄 설계방식에 따라 재설계 한 경우 첫번째 패스에서의 단면적감소율이 현 공정의 경우보다 약 7%정도 크게 될 뿐만 아니라 선선 속도, 선선 하중, 선선에 필요한 동력도 증가하게 된다. 이 경우 첫번

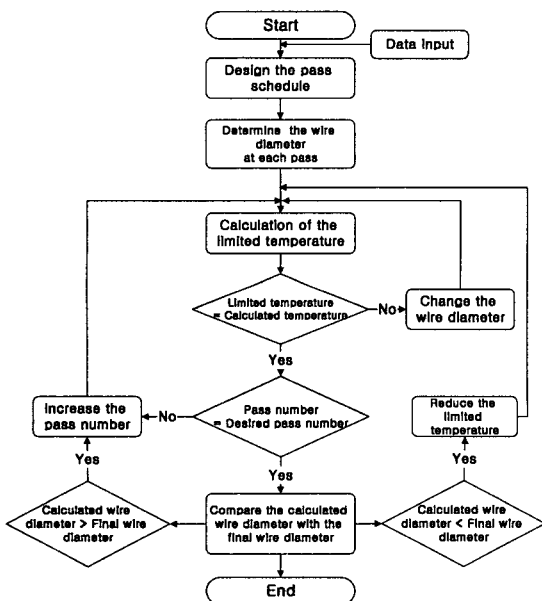


Fig. 6 Flow chart for isothermal pass schedule program

째 패스의 인발 금형의 마모가 빨리 진행되고 신선 중 인발 금형의 파손 위험이 급격히 증가한다<sup>(4)</sup>. 그리고 건식 1 차 신선을 마친 후 파텐팅 처리된 선재 내부의 Cementite lamellae 는 방향성이 없기 때문에 제품의 연신율을 향상시키기 위해서는 건식 2 차 신선의 첫번째 패스에서의 단면적 감소율을 작게 하여 이들의 방향을 신선 방향으로 향하게 하고, 마지막 패스에서도 신선 후 선재에 남아있는 잔류응력으로 인한 제품의 변형을 막기 위해서는 단면적감소율을 작게 패스스케줄을 설계해야 한다<sup>(5)</sup>.

Table 3 Comparison of conventional pass schedule and re-designed pass schedule

Pass no.	Conventional pass schedule		Re-designed pass schedule	
	Exit wire diameter [mm]	Reduction in area [%]	Exit wire diameter [mm]	Reduction in area [%]
1 <sup>st</sup> pass	2.88	19.0	2.75	26.1
2 <sup>nd</sup> pass	2.56	21.0	2.49	18.2
3 <sup>rd</sup> pass	2.30	19.3	2.26	17.5
4 <sup>th</sup> pass	2.08	18.2	2.06	16.9
5 <sup>th</sup> pass	1.89	17.4	1.88	16.5
6 <sup>th</sup> pass	1.72	17.2	1.72	16.2
7 <sup>th</sup> pass	1.57	16.7	1.58	15.9
8 <sup>th</sup> pass	1.45	14.7	1.45	15.7

Table 4 Comparison results in 1<sup>st</sup> pass for each pass schedule

	Conventional pass schedule	Re-designed pass schedule
Reduction in area [%]	19.0	26.1
Drawing speed [m/s]	2.79	3.06
Drawing force [N]	2311.2	2870.7
Consumed power to draw the wire [W]	6444.3	8777.3

Table 5 Modified isothermal pass schedule

Pass no.	Exit wire diameter [mm]	Reduction in area [%]
1 <sup>st</sup> pass	2.88	19.0
2 <sup>nd</sup> pass	2.51	23.9
3 <sup>rd</sup> pass	2.27	18.2
4 <sup>th</sup> pass	2.06	17.6
5 <sup>th</sup> pass	1.88	17.0
6 <sup>th</sup> pass	1.72	16.6
7 <sup>th</sup> pass	1.57	16.7
8 <sup>th</sup> pass	1.45	14.7

따라서 본 연구에서는 패스스케줄 설계 시에 위와 같은 인자들을 고려하여 건식 2 차 신선의 첫번째 패스와 마지막 패스에서의 단면적 감소율을 현장에서 사용하고 있는 값을 적용하고 나머지 패스를 등온패스스케줄로 설계하는 수정된 등온패스스케줄(Modified isothermal pass schedule)로 건식 2 차 신선 공정을 재설계하였으며, 그 결과를 다음의 Table 5 에 나타내었다. 고탄소강의 신선 시 온도 상승으로 인한 단선 발생 가능성이 현저히 높아지는 임계 온도는 170°C 내외이다<sup>(1)</sup>. 그러므로 생산성 향상을 위해서 최종 신선 속도를 현재보다 더 빠르게 하여 신선 하는 경우 선재의 온도가 175°C ~ 180°C 이상으로 상승하여 단선 가능성이 커짐에 따라 신선 속도를 더 이상 증가시킬 수는 없었으나, 첫번째, 마지막 패스를 제외한 나머지 패스에서 인발 금형 출구에서의 선재의 온도를 약 172°C 로 일정하게 유지할 수 있어 현재의 공정보다는 단선 가능성을 감소시킬 수 있었다.

#### 4. 결론

고탄소강을 이용한 연속 신선 공정에서 선재의 온도 상승으로 인한 단선 방지를 위해서는 각 패스의 적합한 공정 변수의 선정 및 패스스케줄 설계가 요구된다. 그러나 지금까지는 시행착오를 통한 현장 경험에 의존하여 공정 변수 및 패스스케줄을 설계하여 온도 상승으로 인한 단선 발생을 억제하였다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 단선 발생 예측 및 신선 공정의 안정화를 위하여 현장

의 온도 측정 결과와 비교한 후, 타당한 온도 계산식을 유도하였으며, 이를 토대로 전 패스의 인발 금형 출구에서 선재 온도를 일정하게 하는 등온패스스케줄 프로그램을 개발하였다. 이 결과를 현장에 적용하여 개발된 등온패스스케줄 프로그램의 실용성을 검토한 후, 체계적인 단선 방지를 위한 패스스케줄 설계 방법을 제시하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 선재가 인발 금형을 통해 변형을 받으면서 선재 온도는 약 100°C 상승하였고, 변형 없이 냉각 영역에서 선재의 주위의 대기와 선재 사이의 대류로 인한 열전달, 블록과 선재사이의 열전달로 인해 약 90°C ~ 110°C 정도 감소하였으며, 그 타당성을 검토하기 위해 실제 선선 공정에서 측정된 데이터와 비교 및 검증하였다.
- (2) 제시된 선재 온도 예측 기법의 타당성을 검증한 후, 이를 이용하여 등온 패스스케줄 프로그램을 개발하여 현재의 건식 2 차 선선 공정을 재설계하였다.
- (3) 등온패스스케줄 프로그램을 이용하여 선선 공정을 재설계한 결과 인발 금형 출구에서의 선재의 온도를 약 166°C 로 일정하게 유지할 수 있었으며, 온도 상승으로 인한 공정 중의 단선 발생 가능성이 상당히 감소하였고, 최종 선선 속도를 현재보다 1m/s 상승시켜 최종 제품의 생산성을 향상시킬 수 있었다.
- (4) 고탄소강의 건식 선선 공정 설계 시에 고려할 수 있는 설계 제약 조건을 고려하여 수정된 등온패스스케줄 설계 방식으로 건식 2 차 선선 공정을 다시 설계하였으며, 이 경우 최종 선선 속도를 증가시킬 수는 없었으나 인발 금형 출구의 선재의 온도를 일정하게 유지할 수 있었고, 선재의 선선성, 최종 제품의 연신율과 치수 정도의 측면에서는 더 우수한 제품을 생산하는 것이 가능하였다.

향후 공정 중에 온도 상승으로 인한 단선 발생을 억제하면서 최종 선선 속도를 증가시켜 제품의 생산성 향상을 기대하기 위해서는 본 연구에서 제시한 패스스케줄 설계 방식 뿐만 아니라, 선재의 온도 감소에 영향을 주는 인자, 블록의 구조 변경 등을 통한 냉각 방식이 함께 고려된 건식 선선 공정 설계가 이루어져야 할 것이다.

## 후 기

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

## 참고문헌

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. Jan W. Pilarczyk, "Hydrodynamic drawing effects on wire ASTRO characteristics," Wire Journal International, No. 7, pp. 70-83, 1997.
6. W.J.Wojtowicz, "Lubricating characteristics of drawing compound," SME creative Mfg Semi, 1970.
7. Aly El-Domiati, Sadek Z.Kasab, "Temperature rise in wire-drawing," Journal of Material Processing Technology, Vol. 83, pp. 72-83, 1998.
8. Frank P. Incropera, David P. Dewitt, "Fundamentals of heat and mass transfer, 4<sup>th</sup> edition," John Wiley & Sons, NC., 1996.