

## 고탄소강의 연속 건식 신선 공정에서 선재의 온도 예측 기법 개발

김영식\* · 김동환\*\* · 김병민\*\*\* · 김민안\*\*\*\* · 박용민\*\*\*\*

(2000년 9월 5일 접수)

### Development of Wire Temperature Prediction Method in a Continuous Dry Wire Drawing Process Using the High Carbon Steel

Young-Sik Kim, Dong-Hwan Kim, Byung-Min Kim, Min-An Kim and Yong-Min Park

**Key Words :** Continuous Dry Wire Drawing(연속 건식 신선), High Carbon Steel(고탄소강), Embrittlement(취화), Wire Temperature(선재 온도), Coiling of Wire(저선)

#### 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 multi-stage drawing process, temperature rise in each pass affects the mechanical properties of final product such as bend, twist and tensile strength. Also, this temperature rise during the deformation is the reason that the wire in drawing process is broken by the embrittlement due to rapid strain aging effect. This paper presents the estimation of the wire temperature for the multi-stage wire drawing process. Using the proposed calculation method of wire temperature, temperature rise at deformation zone as well as temperature drop in block considering the heat transfer between the block and wire were calculated. As these calculated wire temperatures were applied to the real industrial fields, it was known that the calculated results were in a good agreement with the measured wire temperature.

#### 1. 서론

신선(Wire drawing) 가공은 금속 성형공정 중에서 가장 오래된 가공 방법 중의 하나이지만, 아직도 산업현장에 많은 영향을 미치고 있다. 신선 가공은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 다이를 통하여 선재를 잡아당겨 신선 방향으로 선재의 길이를 증가시키고 동시에 단면적을 감소시키는 기본적인 소성가공 방법이다. 이러한 공정을 거쳐 생산된 제품은 표면 정도 및 치수 정도가 우수하다. 신선 공정에서 중요한 공정 변수는 단면적 감소율, 다이 반각, 다이와 소재 사이의 마찰, 신선 속도 등이 있다. 신선 하중을 최소화하거나 신선시에 발

생하는 온도를 억제하기 위해서는 이와 같은 공정 변수들을 적절히 선정하여야 한다. 특히, 고탄소강 신선의 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.<sup>(1)</sup> 따라서 고탄소강의 연속 신선 공정에서는 후 공정에서 정적 변형 시효(Static strain aging effect)에 의한 선재의 단선을 방지하고, 최종 제품의 기계적 성질을 향상시키기 위해 각 패스에서의 선재의 온도 상승을 최대한 억제할 필요가 있다.

최근에는 제품의 생산성을 증가시키기 위해서 최종 신선 속도를 증가시키는데, 신선 속도가 증가할수록 변형시에 발생한 열이 분산될 충분한 시간을 가지지 못하고 윤택 조건이 변하여 선재의 온도가 상승하게 된다. 신선 공정에서의 온도 상승에 관한 연구는 처음에 Siebel, Kobitzsch<sup>(2)</sup>에 의해 시작되었다. 이 연구에서는 단위 체적 당의 일과 마찰일이 모두 열로 변환된다고 가정하였고 다리와 소재 사이의 접촉면에서 발생된 열의 일부가

\* 부산대학교 대학원

\*\* 회원, 부산대학교 대학원

\*\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : bmkim@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2319 FAX : (051)514-7640

\*\*\*\* 주효성 연양공장 강선연구소

선재로 열전달 된다고 가정하여 신선 후의 선재의 온도를 계산하였다. Yukio 등<sup>(3)</sup>은 Siebel, Kobitzsch가 제시한 일차원 모델을 개선하여 그 적용 범위를 확장하였다. 이들은 축대칭의 열전달 방정식을 이용하여 재료에서 다이로의 열전달을 고려하여, 일차원 모델과 유한요소 해석을 통하여 그 결과를 서로 비교하였다.

Loh, Samsone<sup>(4)</sup>은 약 700℃ 정도의 비교적 고온 상태에서의 신선 공정에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 단면적 감소율을 40~50%로 하고 계면에서의 마찰을 일정 전단 마찰 상수라 가정한 후 선재 내부의 응력을 예측하기 위한 상계해를 유도하였다.

그러나 지금까지의 선재 온도 예측에 관한 연구는 단일 신선 공정(Single pass wire drawing process)에 관하여 주로 이루어졌으며, 다단 신선 공정(Multi-pass wire drawing process)과 같이 다이를 통과하여 블록에 선재가 저선되고 그 다음 다이를 통과할 때까지의 선재의 온도 계산 방법에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 실제 현장에서 자동차 타이어의 보강재로 사용되고 있는 스틸코드의 제조 공정 중의 하나인 연속 건식 신선 공정에서의 규정된 선재의 온도를 제어하기 위한 패스스케줄, 단면적감소율을 결정하기 위해 선재의 평균 온도 계산이 필수적이므로 이에 관한 연구를 수행하였다. 선재가 각 패스에서 다이를 통과하면서 상승되는 온도 및 다이를 통과하여 블록에서 저선되어 있을 때 감소하는 선재의 온도를 계산하는 수치 계산법을 확립하여 건식 신선전 패스에서의 선재의 평균 온도를 예측하는 방법을 제시하였으며, 실제 현장에서 측정된 선재의 온도와 서로 비교하였다.

## 2. 선재의 온도 예측 기법 개발

### 2.1 변형시의 선재의 온도 상승

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

$$\bar{\sigma} = 1126.0\epsilon^{-0.0953} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

신선시 온도 상승으로 인한 선재의 취화 및 단선을 방지하기 위하여 선재의 온도를 정확하게 계산하여 제어하는 것이 필요하다. 공정변수를 적절

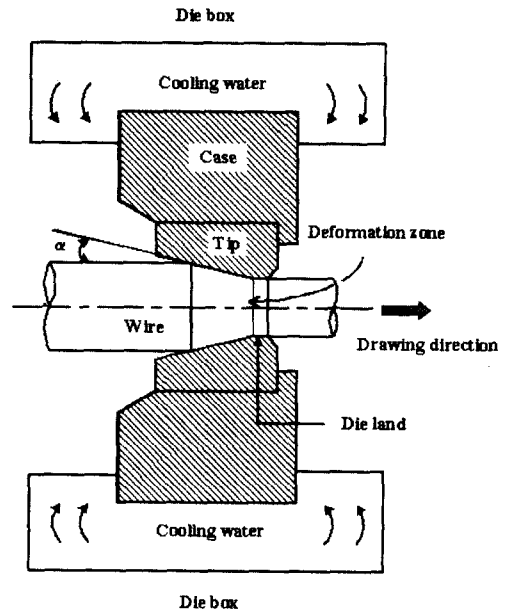


Fig. 1 Schematic cross-sectional view of die box

히 선정하고 신선 공정의 패스스케줄을 재설계하여 선재의 온도를 제어할 수 있다면, 선재 전체에 온도 상승으로 인해 발생하는 단선을 방지할 수 있다.

우선, 선재와 다이의 접촉면에서 마찰이 없는 경우, 즉 선재가 다이를 통과할 때의 변형양상이 이상 변형이고, 소성변형에 필요한 모든 일이 열로 변환된다고 가정하면, 선의 체적변형과 내부전단변형에 소모되는 에너지로 인해 선재에 발생하는 열량은 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$W_a = \frac{1}{A} F \cdot k_m \cdot v \cdot z \quad (2)$$

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

위 식 (2)와 (3)에서  $W_a$ ,  $W_b$ 는 각각 체적변형에 필요한 일과 내부전단변형에 필요한 일이 모두 열로 변환된 양을 나타낸다. 여기서,  $F$ 는 다이 입구와 출구에서 선재의 단면적의 차이,  $k_m$ 은 변형 중의 선재 내부의 평균 변형 저항,  $k_{fm}$ 은 변형 전후의 선재의 평균 항복 강도,  $v$ 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,  $\alpha$ 는 다이 반각이다. 따라서, 선재와 다이의 접촉면의 마찰을 무시한 경우에, 식 (4)와 같이 선재의 보유 열량은 체적변형과 내부전단 변형에 의해 발생된 열량과 같게 되며, 다이 출구에서의 선재의 평균 온도는 다음의 식 (5)와 같이 유도된다.

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

$$T_{out} = T_{in} + \frac{1}{A \cdot f_2 \cdot \rho \cdot c} (F \cdot k_m + \frac{4}{3\sqrt{3}} f_2 \cdot \alpha \cdot k_{fm}) \quad (5)$$

위 식에서,  $c$ 는 선재의 비열,  $\rho$ 는 선재의 밀도,  $T_{in}$ 은 다이 입구에서의 선재의 온도,  $T_{out}$ 은 변형 후 다이 출구에서의 선재의 온도이다.

한편, 선재와 다이의 접촉면에서 마찰이 존재하는 경우에 마찰에 의해 발생 되는 열은 선재나 다이의 온도와는 무관하다고 하면, 단지 마찰을 무시했을 때 발생한 선재의 열량에 단순히 가산될 수 있으며, 이 가산된 열량이 마찰로 인해 선재의 온도가 상승하는 열원(Heat source)이 된다.<sup>(2)</sup> 즉, 마찰을 고려하여 다이 출구에서의 온도 분포가 정상 상태가 될 때의 선재에 발생하는 평균 온도는 다음 식과 같이 계산된다.

$$T_{out} = T_{in} + \frac{1}{A \cdot f_2 \cdot \rho \cdot c} (F \cdot k_m + \frac{4}{3\sqrt{3}} f_2 \cdot \alpha \cdot k_{fm} + m \cdot Q \cdot k_m \cdot \mu) \quad (6)$$

여기서,  $m$ 은 열기여율,  $\mu$ 는 마찰 계수,  $F$ 는 다이 입구와 출구에서 선재의 단면적의 차이,  $Q$ 는 마찰 면적이다.

위 식 (6)에서  $m(0 \leq m \leq 1)$ 은 마찰로 인해 발생되는 열이 선재로의 열전달 되는 정도를 나타내는 열기여율(Heat partition coefficient)이며, 실제로 마찰로 인해 발생된 열의 80~90%는 선재로, 10~20%는 다이로 열전달된다. 신선 속도가 1m/s 이상일 때는  $m$ 은 0.8~0.9 사이의 값을 가진다.<sup>(2)</sup>

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 다이 박스(Die box)에서 냉각수에 의한 다이 냉각 효과를 고려하여 열기여율의 값을 전 패스에 걸쳐 0.8로 두어 변형후의 선재의 평균 온도를 계산하였다. 일반적으로 변형시에 다이 내부에서의 선재의

표면온도는 마찰 조건의 변화로 인하여 내부보다는 높지만 다이를 통과한 후에는 선재 자체의 전도로 인해 선재의 표면과 내부의 온도차는 없어진다.<sup>(2)</sup> 따라서 본 연구와 같이 급격한 온도 상승에 의한 신선 중의 단선을 방지하기 위해 규정된 선재의 온도 상승량을 평가하는데 선재가 다이를 통과한 후의 선재의 온도를 평균온도로 계산하는 것이 적절하다고 할 수 있다.

## 2.2 다이 통과 후 선재의 온도 강하

일반적인 고탄소강의 신선 공정은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 연속적으로 이루어지며,  $n$ 번째 다이와  $n+1$ 번째 다이 사이에는 선재를 잡아당겨 신선 되게 하는 동력원의 역할과  $n$ 번째 다이에서 변형 시에 상승된 온도를 낮추는 냉각원의 역할을 동시에 하는 블록(Block)이 설치되어 있다(Fig. 3).

선재의 온도는 Fig. 2와 같이 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 대기에 노출되고, 블록에서 저선되어 있을 때의 선재의 온도 강하를 예측하기 위해서 선재의 미소면적이 시간에 따라 이동하는 동안의 온도 변화를 고찰하였다. 그리고 연속 신선 공정에서는 Fig. 2와 같이 다이 출구에서 다음 다이 입구까지의 공정이 다단으로 동일하게 반복되기 때문에 본 연구에서는 이 구간을 냉각영역(Cooling zone)이라 가정하였다.

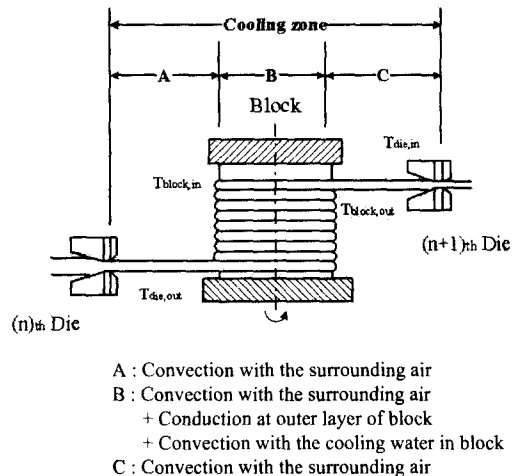


Fig. 2 Schematic representation of multi-stage wire drawing machine

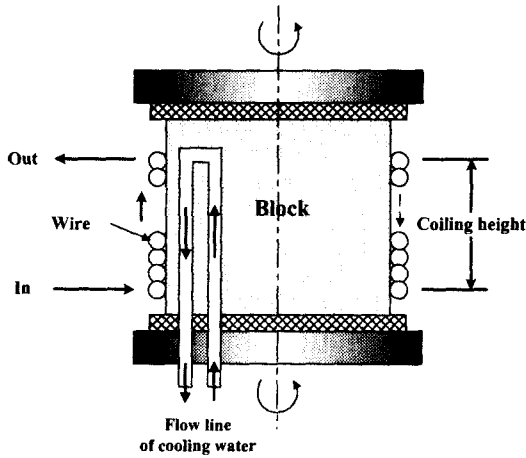


Fig. 3 Cross sectional view of block

선재가 다이를 통과한 후 블록의 입구, 블록의 출구, 그 다음 다이의 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>(6)</sup>를 이용하였다.

1. 블록 입구에서의 선재의 온도 (구간 A)

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

2. 블록 출구에서의 선재의 온도 (구간 B)

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

$$T_{block,out} = \frac{B}{A} + \exp(-A \cdot t_B) \cdot \left(T_{block,in} - \frac{B}{A}\right) \quad (8)$$

여기서,

$$A = \frac{1/\sum R_i^* + h_{air}}{\rho \cdot r \cdot c}$$

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

3. 다음 다이 입구에서의 선재의 온도 (구간 C)

$$T_{die,in} = (T_{block,out} - T_{air}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{h_{air}}{\pi \cdot \rho \cdot d \cdot c}\right) \cdot t_C\right] + T_{air} \quad (9)$$

위의 식 (7)~(9)에서,  $T_{block,in}$  은 블록의 입구에서의 선재의 온도,  $t_A$ 는 선재가 다이를 통과한 후 블록 입구까지 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 변형후 선재의 온도 상승에 가산된다.  $t_C$ 는 선재가 블록을 빠져나와 다음 다이의 입구까지 이동하는 시간을 나타낸다.  $\sum R^*$ 는 열저항(Thermal resistance),  $r, d$ 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 냉각 영역의 각 위치까지 선재가 이동하는데 걸리는 시간,  $T$ 는 시간에 따른 선재의 온도 변화를 나타낸다.

Fig. 2의 구간 A와 구간 C와 같이 선재가 신선기 주위 공기와의 대류에 의해 감소되는 온도는 다음의 식 (7)과 (9)에 의해 계산해 본 결과 0.8°C 이내로 떨어져 그 양이 선재가 구간 B와 같이 블록에 저선되어 있을 때 감소하는 선온에 비하여 무시할 정도로 작기 때문에 본 연구에서는 선재의 온도 강하 계산은 구간 B에 중점을 두었다.

선재가 블록에 저선되어 있을 때, 즉 구간 B에서의 선온은 저선량 혹은 저선 시간에 따라서 그 차이가 있지만 대략 90°C~110°C가 냉각되고, 이때의 선재의 온도 강하가 그 다음 다이에서의 변형 시에 발생하는 선재의 온도 상승에 영향을 주기 때문에 변형시의 온도 계산만큼 냉각시의 선재의 온도 계산이 중요하다 할 수 있다.

3. 온도 예측 기법의 적용 및 검증

3.1 공정 조건

본 연구에서 제시된 선재 온도 계산 식의 결과를 검증하기 위해서 실제 고탄소강의 연속 신선 공정에서 측정된 선재의 온도와 비교해 보았다. 각 패스의 다이 입구와 출구에서의 선재 온도는 접촉식 온도계를 이용하여 수 회 반복해서 측정되었다. 온도 계산에 필요한 공정변수는 실제 현장에서 사용하고 있는 것으로 선정하였으며, Table 1에 나타내었다.

온도 계산에 필요한 변수 즉, 재료상수, 가공경화 지수, 선재의 밀도 및 비열 등은 온도에 따라서 변하지 않는 상수라고 가정하였다. 또한 선재와 다이의 접촉면에서의 마찰계수도 압력과 온도에 무관하다고 하였으며, 연속 신선 공정에서 사

용하고 있는 비누성분의 건식 윤활제의 마찰 계수는 Fig. 4 와 같이 UTM(Universal Testing Machine : 60ton)을 이용하여 평판마찰시험법(Straight pulling friction test)으로 측정하였다.<sup>(5)</sup>

실제 현장에서는 다이 교체 비용의 절감을 위해서 전 패스에 걸쳐서 다이 반각을 일정하게 하여 선재를 생산하고 있으므로 본 연구에서도 다이 반각을 6°로 일정하게 하여 선재의 온도를 계산하였다. 그리고 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%이다.

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 pass	2.88	19.0
2 pass	2.56	21.0
3 pass	2.30	19.3
4 pass	2.08	18.2
5 pass	1.89	17.4
6 pass	1.72	17.2
7 pass	1.57	16.7
8 pass	1.45	14.7

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

### 3.2 온도 계산 결과의 비교

3.1 절에서 나타낸 공정변수를 이용하여 고탄소강의 연속신선 공정에서 다이 입구와 출구의 온도를 계산하고, 실제 현장에서 측정된 선재의 온도와 비교하였다. 그 결과를 Fig. 5 와 Fig. 6 에 각각 나타내었다.

다음의 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제시된 온도 계산 식을 이용하여 다이 입구와 출구에서의 선재의 온도를 계산해 본 결과, 실제 측정된 값에 근접하였다. 선재가 다이를 통해 변형을 받으면서 선재의 온도는 약 100°C 상승하였고, 그 후 다이와 다이 사이에 있는 블록에 저선되어 있을 경우에 약 90°C ~ 110°C 감소하였다. 이는 실제 측정된 선재의 온도와 개발된 수식으로 계산된 선재의 온도 모두 같은 경향을 나타내었다. 선재의 후 공정에서의 단선과 최종 제품의 기계적 성질에 중요한 영향을 주는 다이 출구에서의 선재의 온도 경우, 그 오차는 각 패스마다 다르지만, 첫 번째 패스를 제외하고는 -5°C ~ 5°C 범위 이내에 존재하므로, 본 연구를 통해 개발된 선재의 온도 계산 방법이 타당하다고 할 수 있다.

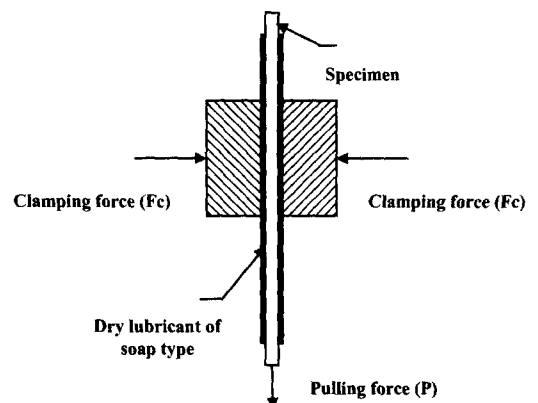


Fig. 4 Schematic representation of straight pulling friction test method

그리고 Table 3 에는 각 패스마다의 신선 하중 및 신선에 필요한 동력을 계산하여 정리해 놓았다. 패스가 진행될수록 신선 하중이 감소하는 것은 다이 출구에서의 선경이 작아지기 때문이고, 이에 반해 동력이 패스가 진행됨에 따라 거의 변화가 없는 이유는 신선에 필요한 동력은 신선 하중과 각 패스에서의 다이 출구 속도의 곱으로 얻어지므로 신선 하중이 감소하여도 패스가 진행될수록 신선 속도가 커지기 때문이다.

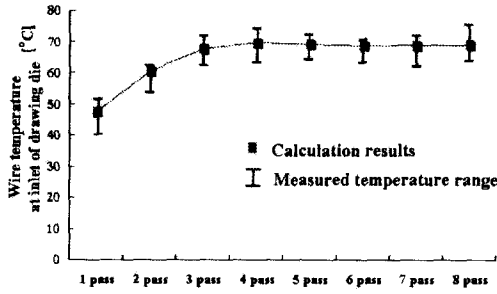


Fig. 5 Wire temperature at inlet of drawing die

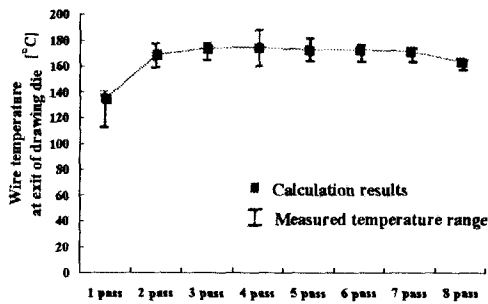


Fig. 6 Wire temperature at exit of drawing die

Table 3 Drawing force and consumed power to draw the wire at each pass

Pass No.	Drawing force [N]	Consumed power [W]
1 pass	2343.4	6534.2
2 pass	2301.4	8126.9
3 pass	1816.5	7941.8
4 pass	1459.3	7800.9
5 pass	1186.9	7684.5
6 pass	987.8	7722.7
7 pass	814.6	7643.4
8 pass	633.6	6970.7

### 3.3 변수 연구(Parametric study)

본 연구에서 제시한 선재 온도 예측 방법을 이용하여 공정 변수에 따른 다이 출구에서의 선재의 온도 변화를 조사하였다. 그 예로서 Fig. 7, Fig. 8 그리고 Fig. 9 에 마찰계수와 블록 내의 냉각수의 온도, 저선 높이에 따른 다이 출구에서의 선재의 온도를 실제 현장에서 적용하고 있는 공정 조건과 서로 비교하였다.

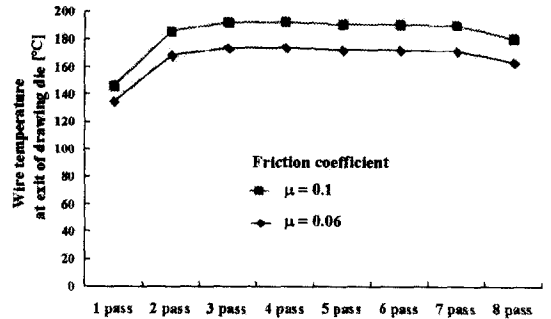


Fig. 7 Wire temperature at exit of the drawing die according to the friction coefficient

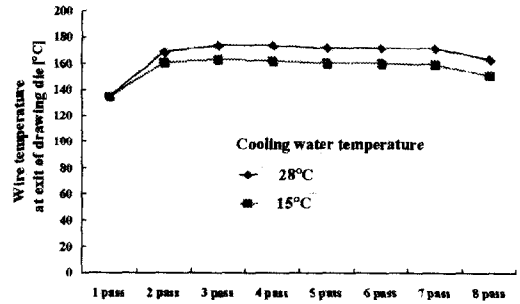


Fig. 8 Wire temperature at exit of the drawing die according to the cooling water temperature in block

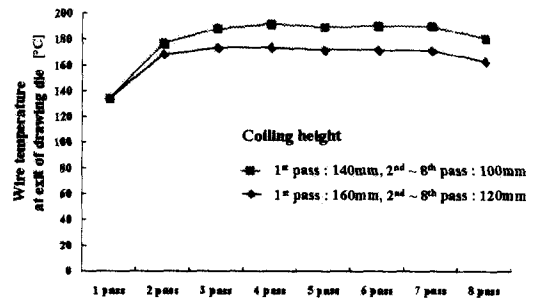


Fig. 9 Wire temperature at exit of the drawing die according to the coiling height of wire in block

그림에서 알 수 있듯이, 선재의 온도는 다이와 선재 사이의 접촉면에서 마찰 조건이 좋을수록, 블록내의 냉각수의 온도가 낮을수록, 그리고 저선 높이가 클수록 감소하게 된다. 마찰계수가 작을수록 선재 온도가 감소하는 이유는 식 (6)에서 마찰 계수가 작을수록 다이와 선재 사이의 계면에서 마찰로 인해 발생하는 열의 양이 작기 때문이고, 블록 내의 냉각수의 온도가 작을수록 선재의 온도가 감소하는 것은 선재가 블록에 저선되어 있을 때 냉각수가 블록의 표면을 냉각시키게 되어 블록과 접촉하고 있는 선재의 온도를 떨어뜨리기 때문이다. 또한 저선 높이가 클수록 선재가 블록에 저선되어 있는 시간이 길어지며 냉각 영역에서 선재가 방출하는 열량이 많아져 선재의 온도는 감소하게 된다.

최근에는 제품의 생산성을 향상시키기 위해서 최종 신선 속도를 증가시키는데, 고탄소강의 신선의 경우에는 신선 속도 증가에 따라 선온 상승으로 인해 단선 가능성이 높아진다. 따라서 위의 세 가지 방법, 마찰조건 향상, 블록내의 냉각수 온도의 감소 및 저선높이를 증가시키는 방법 이외에도 패스스케줄의 재설계 또는 블록 및 다이의 구조 변경을 통한 냉각 방식을 실제 신선 공정에 적용해야 하며, 이에 대한 연구가 앞으로 선행되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

고탄소강의 연속 신선 공정에서 부적절한 공정 변수의 선정은 변형 시에 선재의 온도를 급격하게 상승시키게 되는 원인이 된다. 이로 인해 선재가 취화되는 시간이 빨라지며 공정 중의 단선 발생 가능성이 높아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 연속 신선 공정의 패스 설계 방법 중의 하나인 등온 패스스케줄 프로그램을 개발하기 위하여 각 패스마다의 선재의 온도를 예측하는 수식적인 방법을 제시하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선재의 온도 상승은 다이 반각, 단면적 감소율, 다이와 선재 사이의 마찰, 선재의 유동응력에 영향을 받으며, 냉각 영역에서의 선재의 온도 강하는 블록 내의 냉각수 온도, 저선 높이, 저선 시간 등에 영향을 받는다.

(2) 본 연구에서 사용한 소재와 공정변수를 이용하여 선재의 온도를 계산해 본 결과 선재가 다이를 통해 변형을 받으면서 선온은 약 100°C 상승하였고, 변형 없이 냉각 영역에서 신선기 주위의 대기와 선재 사이의 대류로 인한 열전달, 블록과

선재 사이의 열전달로 인해 약 90°C ~ 110°C 정도 감소하였다.

(3) 냉각 영역에서의 선재의 온도는 신선기 주위의 공기와의 대류에 의한 열전달로 인해 약 0.8°C 이내로 감소하여 온도 강하는 거의 없었으며, 대부분 선재가 블록에 저선 되어 있을 때 선온이 감소함을 알 수 있었다.

(4) 고탄소강의 연속 신선시, 공정 중의 단선 발생을 방지하기 위해 선재의 온도 상승을 억제하기 위해서는 다이와 선재 사이의 마찰조건을 향상시켜 선재의 보유열량을 작게 하고, 블록 내의 냉각수의 온도를 감소시키거나 저선 높이를 최대한으로 하여 선재가 외부로 방출하는 열의 양을 많게 해야 한다.

(5) 제시된 온도 계산 방법으로 선재의 온도를 계산한 결과를 측정된 결과와 비교해 보았으며, 그 오차는 -5°C ~ 5°C 내에 있어 본 연구의 결과가 타당함을 알 수 있다.

본 연구 결과를 바탕으로 하여 향후 연속 신선 공정에서 등온 패스스케줄 설계 프로그램 개발 시에 본 연구의 결과를 유용하게 적용할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) Nakamura, Y., Fujita, T., H.Kawakami, and Yamada, Y., 1976, "New Cooling System for High-Speed Wire Drawing," *Wire Journal International*, Vol. 9. No. 7, pp. 59~68.
- (2) Alexander Geleji, 1960, "Bildsame Formung der Metalle in Rechnung und Versuch," Akademie-Verlag, GmbH.BERLIN.
- (3) Loh, N.H. and Sansome, D.H., 1983, "Drawing of Wire at Evaluated Temperature," *Wire Ind.* 50, pp. 148~154.
- (4) Yukio Kojima, Nobuhiro Yasue and Takaji Mizuno, 1991, "A Calculation of Interface Temperature in Drawing," *Journal of the JSTP*, Vol. 32, No. 366, pp. 906~911.
- (5) Wojtowicz, W.J., 1970, "Lubricating Characteristics of Drawing Compound," *SME creative Mfg Semi*.
- (6) Incropera, Frank P. and Dewitt, David P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4<sup>th</sup> Edition*, John Wiley & Sons, INC.
- (7) 고대철, 김병민, 강범수, 최재찬, 1994, "인발공정의 내부결함 방지에 관한 연구," 대한기계학

- 회 논문집, 제 18 권, 제 11 호, pp. 3098~3107.
- (8) 김영식, 김용철, 김병민, 2000, “고탄소강의 다단 인발 공정에서의 선재의 온도 예측,” 대한기계학회 춘계학술대회, 울산대학교.
- (9) 김영식, 김동환, 김병민, 2000, “고탄소강의 신선 시 단선 방지를 위한 등온패스스케줄 프로그램의 개발,” 대한기계학회 부산지부 춘계학술대회, 해양대학교.