

고탄소강의 다단 인발 공정에서의 선재의 온도 예측

김영식* · 김용철* · 김병민**

Prediction of the wire temperature in a high carbon steel drawing process

Young-Sik Kim, Yong-Chul Kim and Byung-Min kim

Key Words : Multi-stage wire drawing process(다단 인발 공정), High carbon steel(고탄소강), Wire temperature(선재 온도)

Abstract

Drawing is one of the oldest metal forming operations and has major industrial significance. This process allows excellent surface finishes and closely controlled dimensions to be obtained in long products that have constant cross sections. In drawing of the high carbon steel wire, exit speeds of several hundreds meters per minute are very common. Drawing is usually conducted at room temperature using a number of passes or reductions through consequently located dies. In multi-stage drawing process like this, temperature rise in each pass affects the mechanical properties of final product such as bend, twist and tensile strength. In this paper, therefore, to estimate the wire temperature in multi-stage wire drawing process, wire temperature prediction method was mathematically proposed. Using this method, temperature rise at deformation zone as well as temperature drop between die exit and the next die inlet were calculated.

기호설명

- T_1 : 금형 입구에서의 선재의 온도
- T_2 : 금형 출구에서의 선재의 온도
- A : 열의 일당량(conversion factor)
- c : 선재의 비열
- f_1, f_2 : 다이 입구 및 출구의 단면적
- μ : 다이와 선재의 접촉면에서의 마찰계수
- α : 다이 반각
- m : 열기여율(Heat partition coefficient)
- ρ : 선재의 밀도
- k_m : 재료의 평균 변형 저항
- k_{fm} : 재료의 평균 항복 강도
- ΣR_t^* : 열저항 (thermal resistance)
- r_{out} : 변형 후 선재의 반경
- d_{out} : 변형 후 선재의 직경
- h_{air} : 대기의 대류 열전달 계수
- T_{air} : 대기의 온도
- $T_{c.w.}$: 블록 내의 냉각수의 온도

- z : 변형에 걸리는 시간
- t : 금형 사이에서 선재가 머물러 있는 시간
- v : 신선 속도
- W_a : 선재의 체적 변형에 필요한 일
- W_b : 선재의 내부 전단 변형에 필요한 일

1. 서론

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

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

하중을 최소화하거나 인발 시에 발생하는 온도를 억제하기 위해서는 이와 같은 공정 변수들을 적절히 선정하여야 한다. 특히, 연속 인발 공정에서는 후 공정에서의 변형 시효에 의한 단선을 방지하고, 최종 제품의 기계적 성질을 향상시키기 위해서는 각 패스에서의 선재의 최대 온도 상승을 조절할 필요가 있다.

최근에는 제품의 생산성을 증가시키기 위해서 최종 인발 속도를 증가시키는데, 인발 속도가 증가할수록 변형 시에 발생한 열이 분산될 충분한 시간을 가지지 못하고 윤활 조건이 변하여 선재의 온도가 상승하게 된다. 선재의 인발에서의 온도 상승에 관한 연구는 처음에 Siebel 과 Kobitzsch[1]에 의해 시작되었다. 이 연구에서는 단위 체적당의 일과 마찰일이 모두 열로 변환된다고 가정하였고 다이와 소재 사이의 접촉면에서 발생된 열의 일부가 선재로 열전달 된다고 가정하여 인발 후의 선재의 온도를 계산하였다. Yukio 등[2]은 Siebel 과 Kobitzsch 가 제시한 일차원 모델을 개선하여 그 적용 범위를 확장하였다. 이들은 축대칭의 열전달 방정식을 이용하여 재료에서 다이스로의 열전달을 고려하여, 일차원 모델과 유한요소 해석을 통하여 그 결과를 서로 비교하였다.

선재 인발 공정에서 열이 항상 나쁜 영향을 미치는 것은 아니다. 높은 온도에서의 인발은 냉간 공정에서 인발하기 어려운 경한 재료를 쉽게 가공할 수 있게 한다. Loh 와 Samsone[3]은 약 700℃ 정도의 비교적 고온 상태에서의 인발 공정에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 단면적 감소율을 40~50%로 하고 계면에서의 마찰을 일정 전단 마찰 상수라 가정 후 인발 응력을 예측하기 위한 상계해를 유도하였다.

본 연구에서는 실제 산업 현장에서 자동차 타이어의 보강재로 사용되고 있는 스틸코드의 제조 공정 중의 하나인 건식 다단 인발 공정에서의 선재의 온도 예측에 관하여 연구를 수행하였다. 선재가 각 패스에서의 다이를 통과하면서 상승되는 온도 및 다이를 통과하여 블록에서 저선되어 있을 때 감소하는 선재의 온도를 계산하는 방법을 제시하였다.

2. 선재의 온도 예측

2.1 변형 시의 선재의 온도 예측

본 연구의 온도 계산에 사용된 소재는 AISI 1080 강이며, 인장 시험을 통해 구한 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 112.6\epsilon^{-0.0953} \quad [\text{kgf/mm}^2] \quad (1)$$

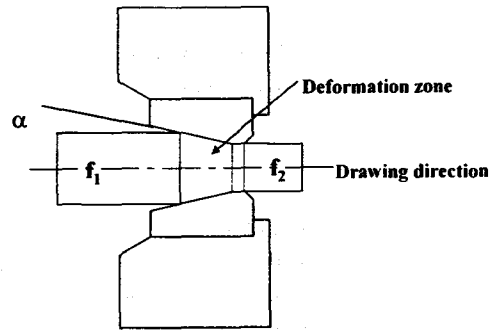


Fig.1 Drawing die in wire drawing process

선선 시 온도 상승으로 인한 선재의 취화 및 단선을 방지하기 위하여 선재의 온도를 계산하는 것이 필요하다. 공정변수를 적절히 선정하여 선재의 온도를 제어할 수 있다면, 선재 전체에 온도 상승으로 인해 발생하는 제반 문제의 해결도 가능해진다.

선재와 다이의 접촉면에서 마찰이 없는 경우, 즉 선재가 다이를 통과할 때의 변형양상이 이상 변형이고, 소성변형에 필요한 모든 일이 열로 변환된다고 가정하면, 선의 체적변형(식(2))과 내부전단변형(식(3))으로 인해 선재에 발생하는 열량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$W_b = \frac{1}{A} 0.77 \cdot k_{fm} \cdot f_2 \cdot \alpha \cdot v \cdot z \quad (3)$$

위 식 (2)와 (3)은 각각 체적변형에 필요한 일과 내부전단변형에 필요한 일을 나타내며, 이들이 모두 열로 변환된다고 가정하였다. 따라서, 선재와 다이의 접촉면의 마찰을 무시한 경우에, 다이 출구에서의 선재의 온도는 다음과 같다.

$$f_2 \cdot v \cdot \rho \cdot c \cdot z \cdot c \cdot (T_{out} - T_{in}) = \frac{1}{A} (F \cdot k_m + 0.77 f_2 \cdot \alpha \cdot k_{fm}) \cdot v \cdot z \quad (4)$$

$$T_{out} = T_{in} + \frac{1}{A} \cdot \frac{F \cdot k_m + 0.77 \cdot f_2 \alpha \cdot k_{fm}}{f_2 \cdot \rho \cdot c} \quad (5)$$

한편, 선재와 다이의 접촉면에서 마찰이 존재하는 경우에 마찰에 의해 발생 되는 열은 선재나 다이의 온도와는 무관하고, 단지 마찰을 무시했을 때 발생한 선재의 열량에 단순히 가산되며, 이 가산된 열량이 마찰로 인해 선재의 온도가 상승하는 원인이 된다. 즉, 신선 시 금형 출구에서의 온도 분포가 정상 상태가 될 때의 선재에 발생하는 온도는 다음 식과 같다.

$$T_{out} = T_{in} + \frac{1}{A} \cdot \frac{F \cdot k_m + 0.77 \cdot f_2 \cdot \alpha \cdot k_{fm} + m \cdot Q \cdot k_m \cdot \mu}{f_2 \cdot \rho \cdot c} \quad (6)$$

여기서,

$$F = f_1 - f_2$$

$$Q = F / \sin \alpha$$

이다.

위 식(5)에서 $m (< 1)$ 은 마찰로 인해 발생하는 열이 선재로의 열전달 된다는 물리적 의미를 가진 열기여율(Heat partition coefficient)이며, 실제로 마찰로 인해 발생된 열의 80~90%는 선재로, 10~20%는 다이로 열전달된다. 신선 속도가 1m/s 이상 일 때는 m 은 0.8~0.9 사이의 값을 가진다.

본 연구에서는 열기여율의 값을 전 패스에 걸쳐 0.8로 두어 변형 시의 선재의 온도를 계산하였다.

2.2 금형과 금형 사이에서의 선재의 온도 강하

일반적인 고탄소강의 신선 공정은 Fig.2에 나타난 바와 같이 연속적으로 이루어지며, 금형과 그 다음 금형사이에서 선재를 냉각시키기 위해 블록이 설치되어 있다. 블록에서 선재의 온도는 약 90°C~110°C가 냉각되고, 이 때의 선재의 온도 강하가 그 다음 금형에서의 변형 시에 발생하는 선재의 온도 상승에 영향을 주기 때문에 변형 시의 온도 계산만큼 냉각 시의 선재의 온도 계산도 중요하다 할 수 있다.

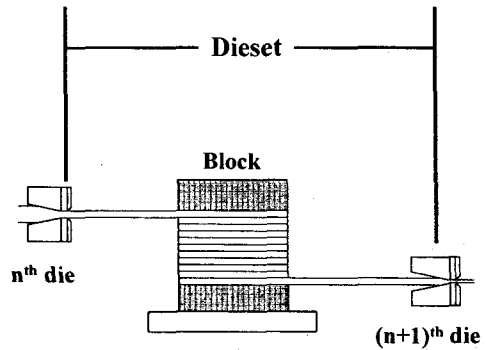
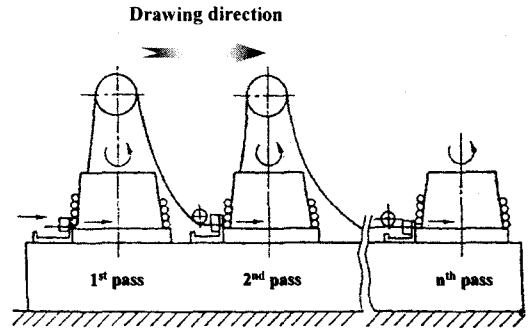


Fig.2 Multi-stage wire drawing machine

따라서 본 연구에서는 블록에서의 선재의 온도 강하를 예측하기 위해서 선재의 미소면적이 시간에 따라 이동될 때의 온도 변화를 고찰하였다. 그리고 금형의 출구에서 다음 금형의 입구까지를 다이셋(dieset)이라고 정의하였다.

미소 면적을 가진 선재의 시간에 따른 온도 변화는 다음의 열전달 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{dT}{dt} + \left(\frac{1/\sum R'_i + h_{air}}{\rho \cdot r \cdot c} \right) \cdot T = \frac{1}{\rho \cdot r \cdot c} \cdot \left(\frac{T_{c.w.}}{\sum R'_i} + h_{air} \cdot T_{air} \right) \quad (7)$$

위의 (7)식에서 시간에 대한 선재의 온도에 관한 식으로 풀면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

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

여기서,

$$A = \frac{1/\sum R'_i + h_{air}}{\rho \cdot r \cdot c}$$

$$B = \frac{T_{c.w.}/\sum R'_i + h_{air} \cdot T_{air}}{\rho \cdot r \cdot c}$$

이다.

3. 온도 계산 결과의 검토

3.1 공정변수의 선정

본 연구에서 제시된 온도 계산 식의 결과를 검증하기 위해서 실제 고탄소강의 연속 선선공정에서 측정된 선재의 온도와 비교 해 보았다. 온도 계산에 필요한 공정변수는 실제 현장에서 사용하고 있는 것으로 선정하였으며, Table1 에 정리해 두었다.

온도 계산에 필요한 변수 즉, 재료상수, 가공경화 지수, 선재의 밀도 및 비열 등은 온도에 따라서 변하지 않는 상수라고 가정하였다. 또한 선재와 금형의 접촉면에서의 마찰계수도 압력과 온도에 무관하다고 하였다.

Table1 Process variables

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

실제 산업 현장에서는 금형비용의 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 Table2 에 정리하였으며, 초기의 선재의 직경은 3.2mm 이다.

Table 2 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

3.2 온도 계산 결과의 비교

3.1 절에서 나타낸 공정변수를 이용하여 고탄소강의 연속선선 공정에서 금형의 입구와 출구부의 온도를 계산하고, 실제 현장에서 측정된 선재의 온도와 비교하였다. 그 결과를 Table3, Table4, 그리고 Fig.3, Fig.4 에 각각 나타내었다.

Table 3 Wire temperature at die inlet

Pass no.	Wire temperature [°C]	
	Measured value	Calculated result
1 pass	47.50	47.50
2 pass	61.50	60.52
3 pass	72.30	67.83
4 pass	68.90	69.79
5 pass	72.40	69.40
6 pass	68.80	68.74
7 pass	66.30	68.93
8 pass	72.80	69.16

Table4 Wire temperature at die exit

Pass no.	Wire temperature [°C]	
	Measured value	Calculated result
1 pass	122.80	134.72
2 pass	165.30	168.51
3 pass	170.50	173.77
4 pass	177.80	174.11
5 pass	174.90	172.36
6 pass	170.30	172.28
7 pass	167.70	171.55
8 pass	165.50	163.34

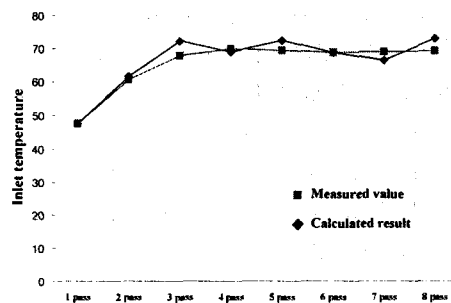


Fig.3 Wire temperature at die inlet

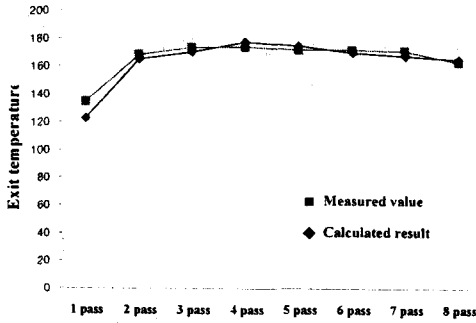


Fig.4 Wire temperature at die exit

위의 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제시된 온도 계산 식을 이용하여 금형의 입구와 출구에서의 선재의 온도를 계산해 본 결과, 실제 측정된 값에 근접하였다. 선재가 금형을 통해 변형을 받으면서 선재의 온도는 약 100°C 상승하였고, 그 후 금형과 금형사이에 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 물성에 중요한 영향을 주는 금형 출구에서의 선재의 온도 경우, 그 오차는 각 패스마다 다르지만, 첫번째 패스를 제외하고는 -5°C ~ 5°C 범위 이내에 존재하므로, 본 연구를 통해 개발된 선재의 온도 계산 방법이 타당하다고 할 수 있다.

4. 결론

고탄소강의 다단 인발 공정 시에 적절하지 못한 공정변수를 선정하여 변형 시에 선재의 온도 상승은 순간적인 취화로 인한 단선 발생 가능성을 높이기 때문에 본 연구에서는 연속 신선 공정의 패스 설계 방법 중의 하나인 등은 패스스케줄 프로그램을 개발하기 위하여 각 패스마다의 선재의 온도를 예측하는 수식적인 방법을 제시하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선재의 온도는 다이 반각, 단면적 감소율, 금형과 선재 사이의 마찰, 선재의 유동응력에 영향을 받으며, 본 연구에서 사용한 소재와 공정변수를 통해 선재의 온도를 계산해 본 결과 변형을 받으면서 약 100°C 상승하였고, 변형 없이 블록과

선재의 열전달로 인해 약 90°C ~ 110°C 정도 감소하였다.

(2) 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.

향후 연속 신선 공정의 등은 패스스케줄 설계 프로그램 개발 시 본 연구의 결과를 유용하게 적용할 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

- (1) ALEXANDER GELEJI, "BILDSAME FORMUNG DER METTLE IN RECHNUNG UND VERSUCH", AKADEMIE-VERLAG GmbH.BERLIN
- (2) Yukio Kojima, Nobuhiro Yasue and Takaji Mizuno, 1991, "A Calculation of Interface Temperature in Drawing", Journal of the JSTP, Vol.32, No.366
- (3) N.H.Loh, D.H.Sansome, "Drawing of wire at evaluated temperature, Wire Ind. 50, pp148-154
- (4) Aly El-Domiati, Sadek Z.Kasab, 1998, "Temperature rise in wire-drawing", Journal of Material Processing Technology, Vol. 83, pp.72-83
- (5) Salah Oweis, 1987, "Design Analysis of a Tandem Wire Drawing System", November/December, Computer in Mechanical Engineering
- (6) A.Skolyszewski, J.Luksza, M.Packo, 1996, "Some problems of multi-stage fine wire drawing of high-alloy steels and special alloys", Journal of Material Processing Technology, Vol.60, pp.155-160
- (7) Michael T.Hillery, Vincent J.McCabe, 1995, "Wire drawing at evaluated temperatures using different die materials and lubricants", Journal of Material Processing Technology, Vol.55, pp.53-57
- (8) 日本塑性加工學會, 1990, "引拔加工", 코로나社
- (9) 김태형, 1997, "냉간 금속성형제품의 정밀도 향상을 위한 유한요소 법의 활용"
- (10) EDWARD M. MILENIK, 1991, "METAL WORKING SCIENCE AND ENGINEERIG", McGraw-Hill
- (11) Frank P. Incropera, David P. Dewitt, 1996, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th edition" JOHN WILEY & SONS, INC.