

# 생산성 향상을 위한 세션 인발공정설계에 관한 연구

이상근<sup>1</sup> · 김병민<sup>#</sup>

## A Study on the Fine Wire Drawing Process Design to Improve the Productivity

S. K. Lee, B. M. Kim, M. A. Kim

(Received March 3, 2008)

### Abstract

The control of wire temperature is very important in the fine wire drawing process. The wire speed should be increased, and the wire temperature should be dropped as much as possible. Up to now, the process design of wire drawing process depends on the experiences of experts. In this study, a wire drawing process design method was proposed to increase the productivity. The proposed method of this study includes the pass schedule and the design of a multi pass wire drawing machine. A pass schedule was performed based on the calculation of the wire temperature. Also, a new multi pass wire drawing machine was manufactured to apply the designed pass schedule. Through the wire drawing experiment, the effectiveness of the proposed process design method was evaluated. The final drawing speed was increased from 1,100m/min to 2,000m/min without deterioration of final drawn wire.

**Key Words** : Wire Drawing Process, Wire Temperature, Process Design, Pass Schedule, Wire Drawing Machine, Wire Drawing Experiment

### 1. 서론

직경이 가는 세션을 생산하는 인발공정은 일반적으로 고속에서 이루어지며, 생산성은 인발속도와 공정 중 발생하는 단선에 크게 의존한다[1]. 따라서, 생산성을 극대화 시키기 위해서는 선재의 요구 품질을 만족하면서, 단선율을 최소화시킴과 동시에 최종 선재 속도를 최대한 높이는 것이 매우 중요하다. 세션 인발은 초기 선재를 여러 개의 다이를 통과시켜 원하는 직경의 최종 선재를 생산하는 공정이다. 공정 중에 발생하는 단선율을 최소화하고, 최종 선재의 속도를 높이기 위해서는 적절한 패스 설계와 새로운 인발기의 적용이 필수적이다. 현재까지 다단 인발공정의 패스설계는

대부분 현장 작업자의 노하우에 의존하며, 체계적인 패스설계 방법이 확립되어 있지 않다. 대표적인 인발 선재인 스틸코드(Steel cord)의 경우 일반적으로 탄소함량 0.7wt%이상의 고탄소강으로 산업용 소재 중에서도 강도가 매우 높은 소재이며, 자동차 타이어의 보강재로 널리 사용되고 있다. 스틸코드 인발은 일반적으로 1,000 m/min 이상의 고속에서 이루어진다. 생산성 향상을 위해 인발속도를 높일 경우 선재와 다이 접촉면에서의 과도한 열발생으로 인하여 선재의 온도가 상승하게 된다. 고탄소강 인발 시 선재 온도가 지나치게 상승할 경우 정적변형시효(Static strain-aging)에 의해 정적변형시효 취성(embrittlement)이 증가하며 이로 인하여 인발 중에 단선이 발생하거나, 최종 선재

1. 부산대-IFAM 국제공동연구소  
# 교신저자: 부산대 기계공학부, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

의 기계적 성질이 저하된다[2~3]. 따라서, 최종 선재의 속도를 높이기 위해서는 이에 따른 선재의 온도 상승을 최대한 억제해야만 한다.

본 연구에서는 고탄소강 스틸코드 인발공정의 최종 선재속도 향상을 통해 생산성을 향상시킬 수 있는 공정설계 방법을 제안하였다. 이를 위하여 탄소강 인발공정 시 선재온도계산 모델을 이용하여 다단 인발공정의 패스를 설계하였으며, 설계된 패스를 적용하여 인발속도를 극대화 시키기 위한 새로운 인발기를 제작하였다. 본 연구에서 제안한 공정설계방법을 초기 선재직경 1.050mm, 최종 선재직경 0.175mm 인 인발공정에 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 제안한 공정설계방법을 적용하여 기존 1,100m/min 의 인발속도를 2,000m/min 까지 높였으며, 생산된 최종선재에 대하여 직경, 인장강도(TS), 파단발생 회전수(Twist No), 표면조도(SR), 단선율(WBR)를 평가하여 기존공정의 결과와 비교하였다. 그 결과 기존공정과 동등한 품질을 가진 선재의 생산성을 약 2 배 향상시킬 수 있었다.

## 2. 선재온도를 고려한 패스 설계

### 2.1 선재온도 계산

세선 생산을 위한 인발공정은 선재가 여러 개의 다이를 통과하는 다단공정이다. Fig. 1 에서 보듯이 세선인발은 선재의 직경을 감소시키는 다이 및 선재를 잡아당기는 캡스탄이 윤활제 속에 완전히 잠긴 상태에서 인발이 이루어진다. 선재 인발 시 다이를 통과하는 선재는 체적변형과 내부전단변형, 그리고 다이와의 마찰에 의한 열발생으로 온도가 상승하게 된다. 다이를 통과하는 선재의 온도는 다음의 식으로 계산이 가능하다[4].

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

$T_{out}$  은 다이 출구부에서의 선재 온도,  $T_{in}$  은 다이 입구부에서의 선재온도,  $A$  는 열의 일당량,  $f_2$  는 다이 출구부 단면적,  $\rho$  는 선재의 밀도,  $c$  는 비열,  $F$  는 다이 입구부와 출구부의 선재 단면적 차이,  $k_m$  은 평균변형저항,  $\alpha$  는 다이 반각,  $k_{fm}$  은 변형 전후의 선재 평균항복강도,  $m$  은 열기여율,  $Q$  는 마찰면적,  $\mu$  는 선재와 다이 사이의 마찰계수이다.

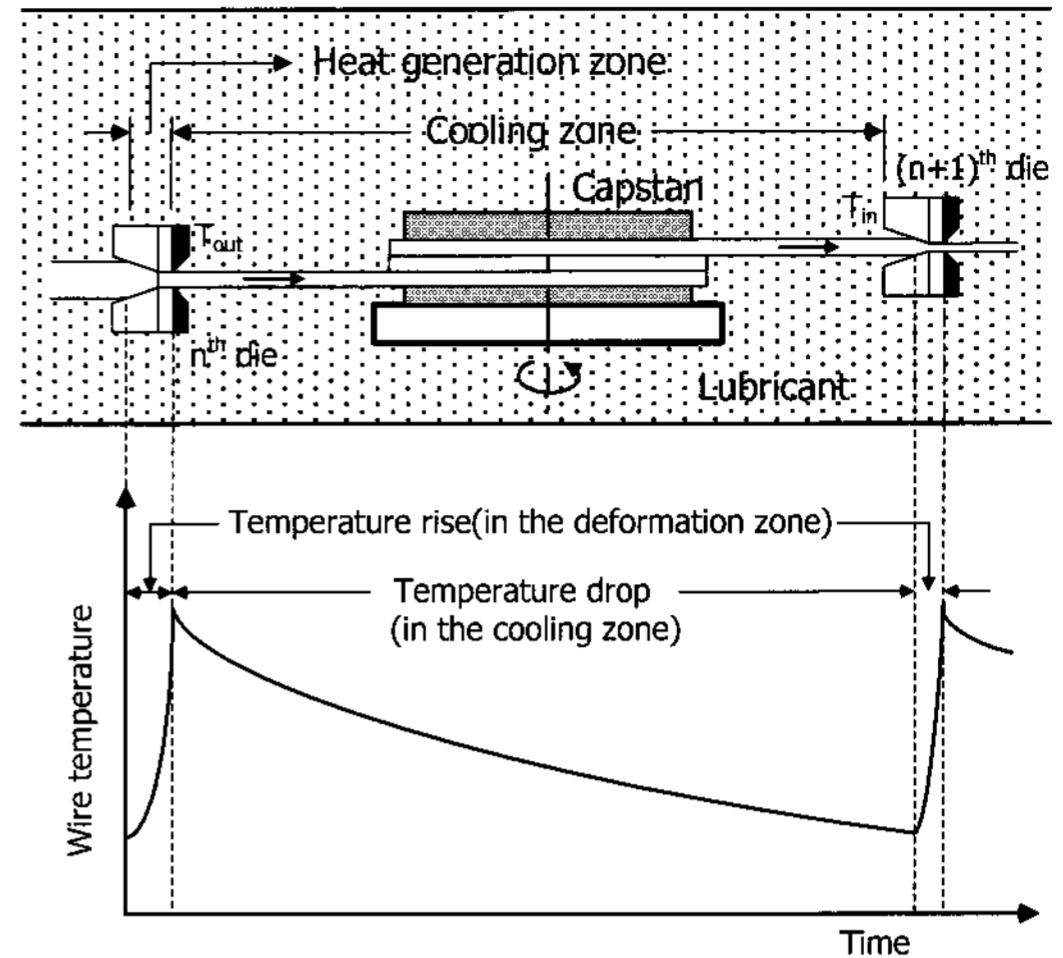


Fig. 1 Heat generation and cooling

Fig. 1 에서 보듯이 다이를 통과한 선재는 다음 다이의 입구에 도달할때까지 윤활제에 노출되어 냉각이 일어난다. 이때 냉각된 선재의 온도는 다음의 식으로 계산이 가능하다[5].

$$T_{i+in} = (T_{i,out} - T_{lub}) \cdot \exp \left[ - \left( \frac{4 \cdot h_{lub}}{\rho \cdot d \cdot c} \right) \cdot t \right] + T_{lub} \quad (2)$$

$T_{i+1,in}$  은 다음 다이입구에서의 선재온도,  $T_{i,out}$  은 이전 다이출구에서의 선재온도,  $h_{lub}$  는 윤활제의 대류열전달계수,  $d$  는 선재직경,  $t$  는 선재가 윤활제에 노출되어 있는 시간이다.

### 2.2 다단 인발 패스 설계

고탄소강 선재 인발공정 시 선재의 온도는 패스 설계와 인발속도에 의존한다. 인발속도 상승에 따른 지나친 선재온도 상승을 방지하기 위해서는 적절한 패스 설계가 이루어져야 한다. 현재까지 대부분의 세선 다단 인발공정 패스 설계의 경우 모든 패스에서 다이 감면율이 거의 일정한 등단면감소율을 적용하고 있다. Fig. 2 에서 알 수 있듯이 등단면감소율을 적용할 경우 선재 직경이 상대적으로 작아지는 후반부 패스의 경우 선재의 온도가 급격하게 상승하게 된다[1]. 이로 인하여 선재의 정적변형시효를 촉진시켜 공정 중 단선을 유발시키거나 최종 선재의 기계적 성질을 악화시킨다.

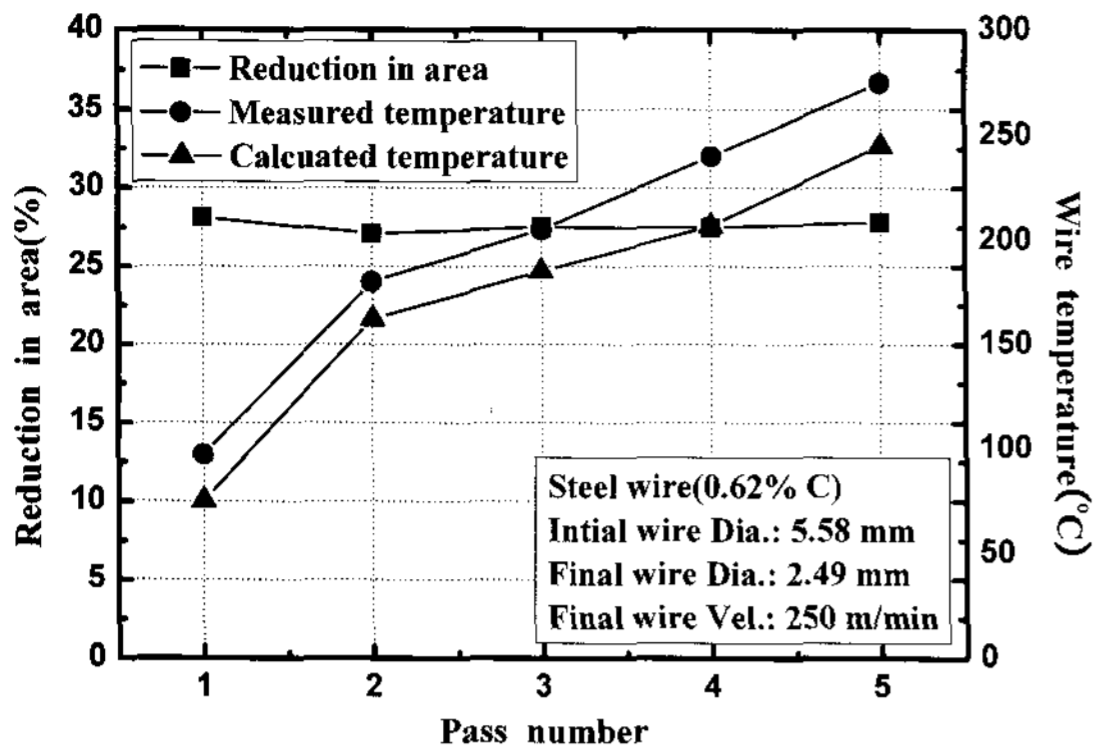


Fig. 2 Reduction in area and wire temperature

따라서, 적절한 패스 설계를 통한 선재의 지나친 온도상승 방지가 매우 중요하다. 본 연구에서는 후반부 패스에서의 지나친 선재 온도 상승을 방지하기 위하여, 패스를 전반부와 후반부로 나누어 설계하였다. Fig. 3 에서 알 수 있듯이 먼저 총 패스수를 결정하여 등단면감소율로 패스를 설계한 후 전반부 패스는 등단면감소율보다 감면율을 1~2% 높게 설정하고, 후반부 패스는 순차적으로 감소하는 형태를 적용하였다.

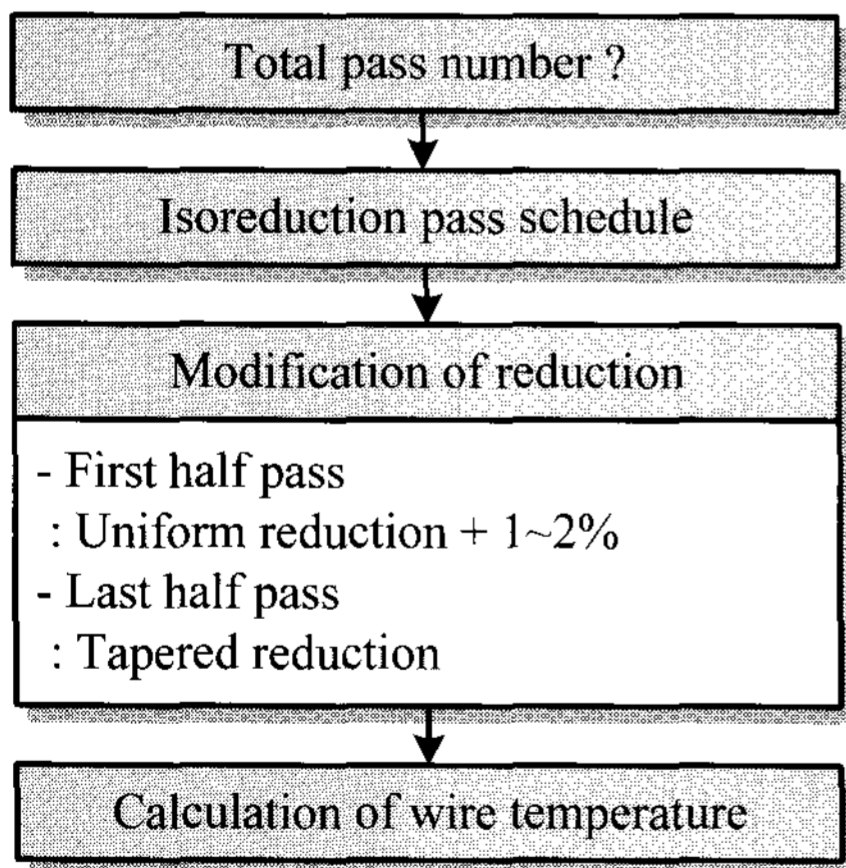


Fig. 3 Flowchart for pass schedule

### 3. 인발기 설계

Fig. 4 에 세션 생산을 위한 다단 인발기의 개략도를 나타내었다. 인발기를 제작하기 위해서는 먼저 선재를 잡아당기는 캡스탄의 단수, 직경, 그리고 축의 회전수를 결정해야만 한다.

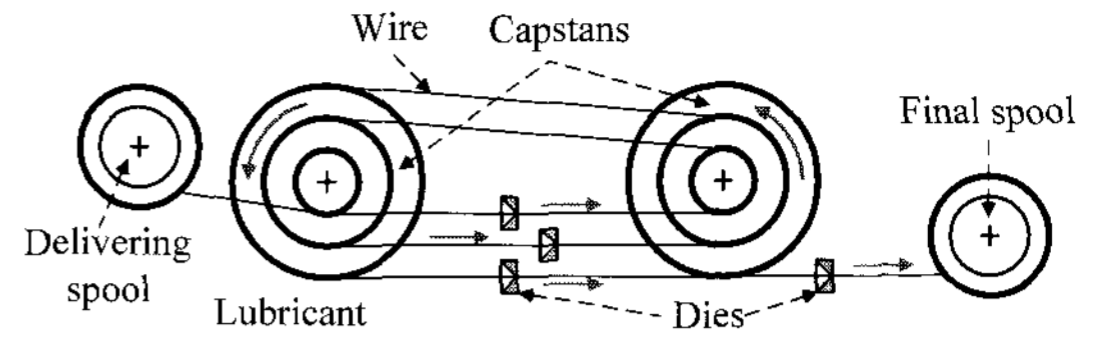


Fig. 4 Schematic diagram of wire drawing machine

본 연구에서는 인발기 설계를 위하여 2 장에서 설계된 패스에 대하여 식(3)의 슬립속도율을 적용하였다[6].

$$S_{vel} = (U_i - v_i) / U_f \times 100 [\%] \quad (3)$$

$U_i$  는 캡스탄주속,  $v_i$  는 선재속도, 그리고  $U_f$  는 최종 권취드럼의 주속이다. 기존 연구결과에서 슬립속도율을 3~8%로 설정할 경우 인발 시 발생하는 선재의 단선율을 현저히 감소시킬 수 있다 [6,7]. 따라서 본 연구에서는 슬립속도율을 적용하여 다단 인발기의 캡스탄 직경과 회전수 설정하였다. Fig. 5 에 다단 인발기 설계절차를 나타내었다.

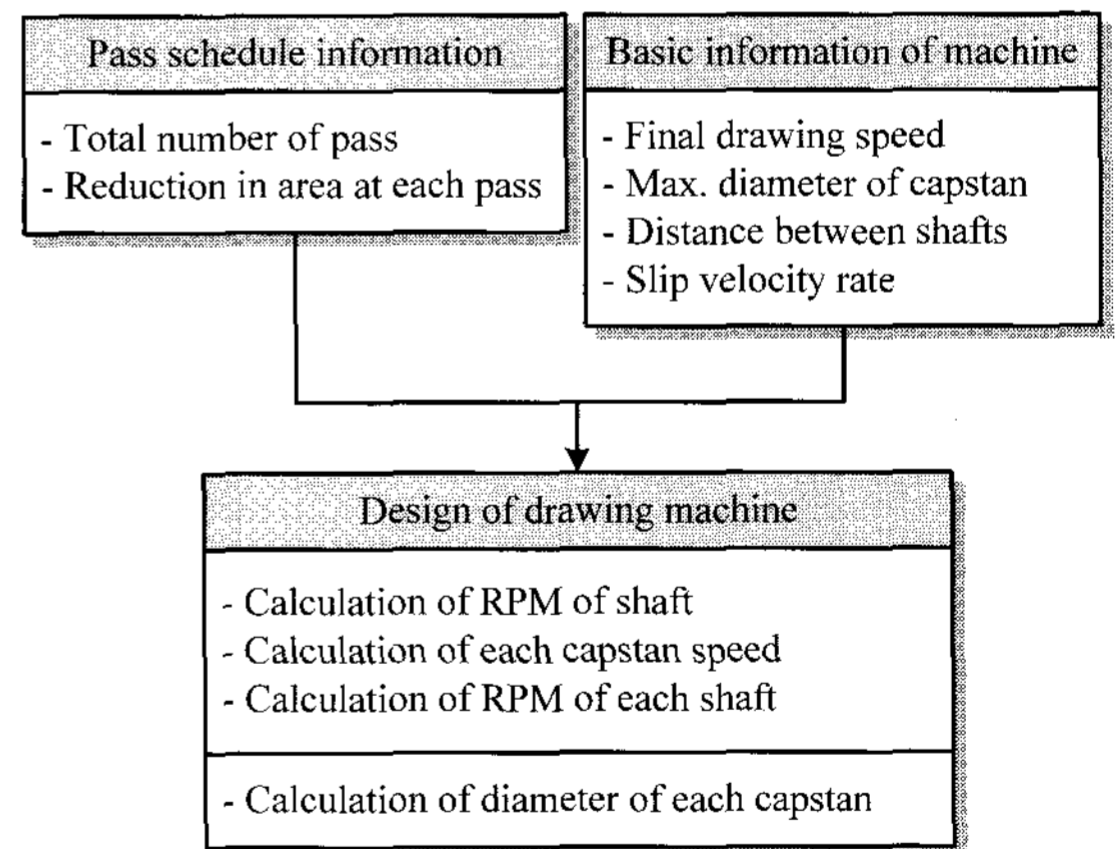


Fig. 5 Flowchart for design of drawing machine

설계된 패스와 최종 인발속도, 최대 권취 스펴 (spool)의 직경, 캡스탄 축간거리, 그리고 슬립속도율을 이용하여 우선, 캡스탄 축의 회전수를 결정한 후 계산된 각 패스의 선재속도를 이용하여 각 캡스탄의 주속을 계산한다. 마지막으로 계산된 각 캡스탄의 주속과 회전수를 이용하여 각 캡스탄의 직경을 계산한다.

### 4. 다단 인발공정 설계

본 연구에서 제안한 다단 인발공정설계방법에 대한 타당성을 검증하기 위하여 실제 스틸코드 생산에 적용되고 있는 다단 인발공정에 대한 공정 재설계를 수행하였다.

#### 4.1 다단 인발패스 설계

초기 선재직경 1.050mm 에서 최종 0.175mm 선재를 생산하는 총감면율 97.22% 인발공정설계를 수행하였다. 초기 선재는 탄소함량 0.70wt%의 고탄소강으로 인장시험으로 구한 선재의 물성치는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 2138 \cdot \bar{\epsilon}^{0.205} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

최종 선재직경 0.175mm 인발공정은 현재 24 패스공정으로 최종 인발속도는 약 1,100m/min 로, 본 연구에서는 약 2,000m/min 까지 상승시켜 생산성을 극대화시키고자 한다. 기존 공정은 다이 감면율이 약 13.0~15.0%로 거의 균일한 값을 나타내고 있다. Fig. 6 은 기존공정에 대하여 최종 인발속도를 2,000m/min 으로 상승시켰을 때 선재의 온도를 예측한 것이다. 예측결과에서 알 수 있듯이 최종 인발속도의 상승으로 인하여 선재의 최대온도는 약 230°C 이상 상승함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 속도상승에 따른 선재의 지나친 온도상승을 방지하기 위하여 총패수를 29 패스로 늘려 각 패스에서의 선재 소성변형과 다이접촉면에서의 마찰길이를 감소시켜 선재의 온도상승을 억제하였다. Fig. 7 에 재설계된 패스의 다이 감면율을 나타내었다. Fig. 7 에서 알 수 있듯이 선재의 온도가 200°C 이상으로 상승하는 15 번째 패스부터는 다이 감면율이 순차적으로 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 8 은 설계된 패스에 대한 다이 출구부에서의 선재온도 예측결과를 나타낸 것이다. 설계된 패스의 경우 선재의 최대 온도가 약 168°C 로 상당히 낮아짐을 알 수 있다.

#### 4.2 다단 인발기 설계

현재 사용되고 있는 다단 인발기는 최대인발속도가 1,500 m/min 이며, 2,000 m/min 로 상승시키기 위해서는 새로운 인발기가 요구된다. 본 연구에서는 패스설계 데이터를 기초로 새로운 인발기를 설계 및 제작하였다. 먼저, 최종 선재의 권취 스

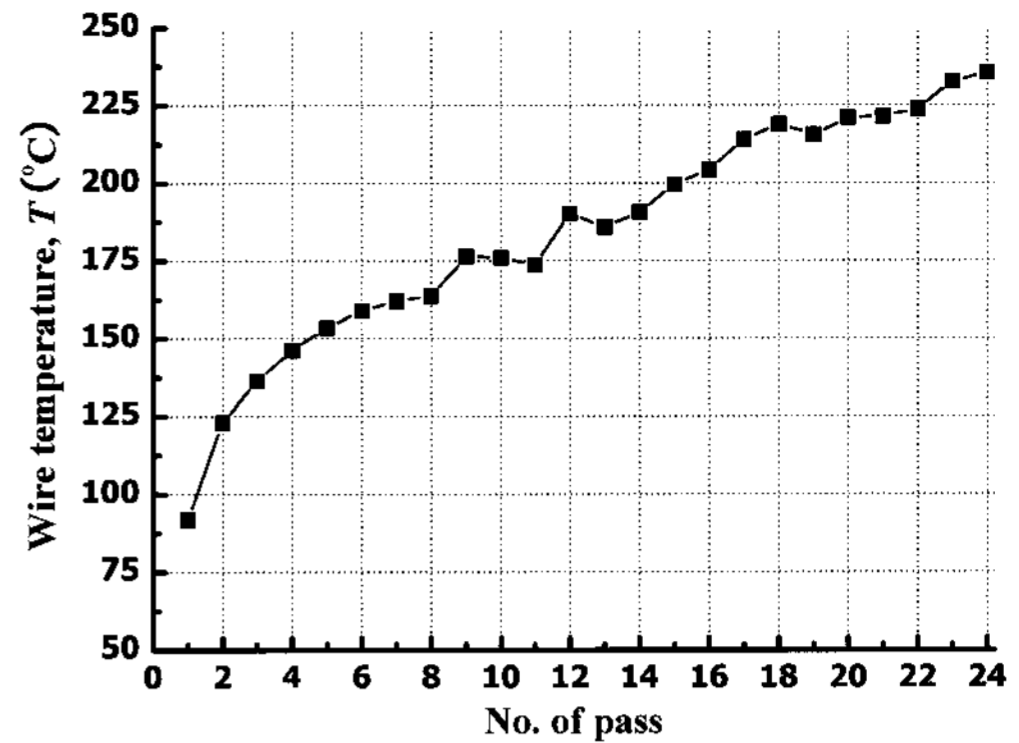


Fig. 6 Wire temperature (velocity : 2,000 m/min)

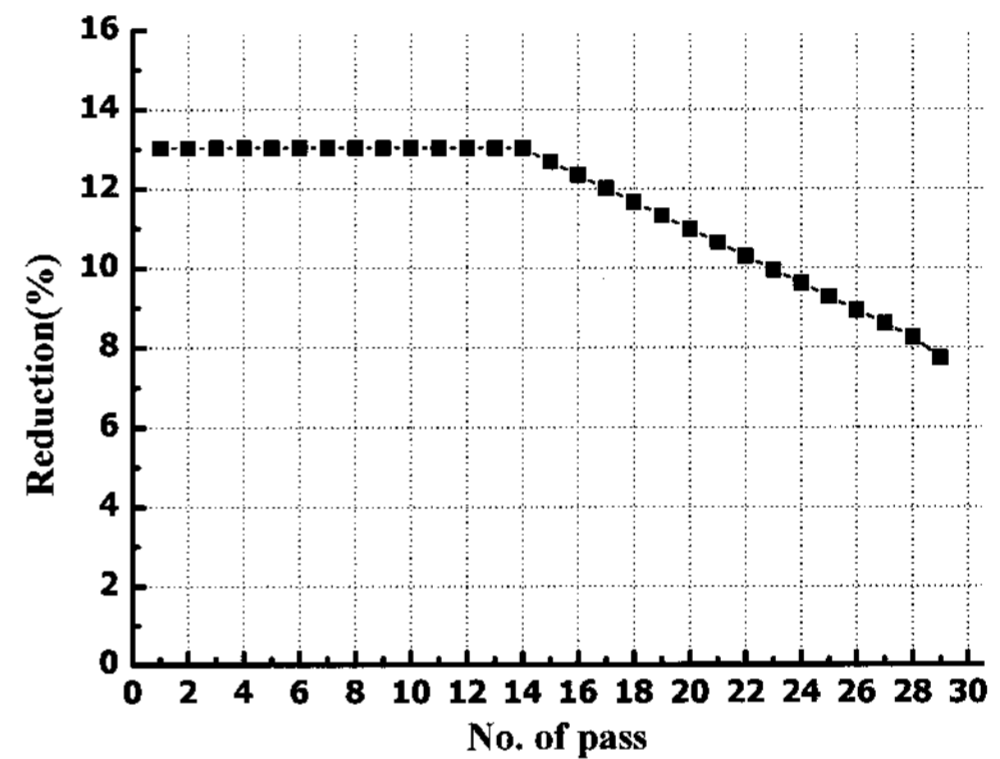


Fig. 7 Die reduction of the new pass schedule

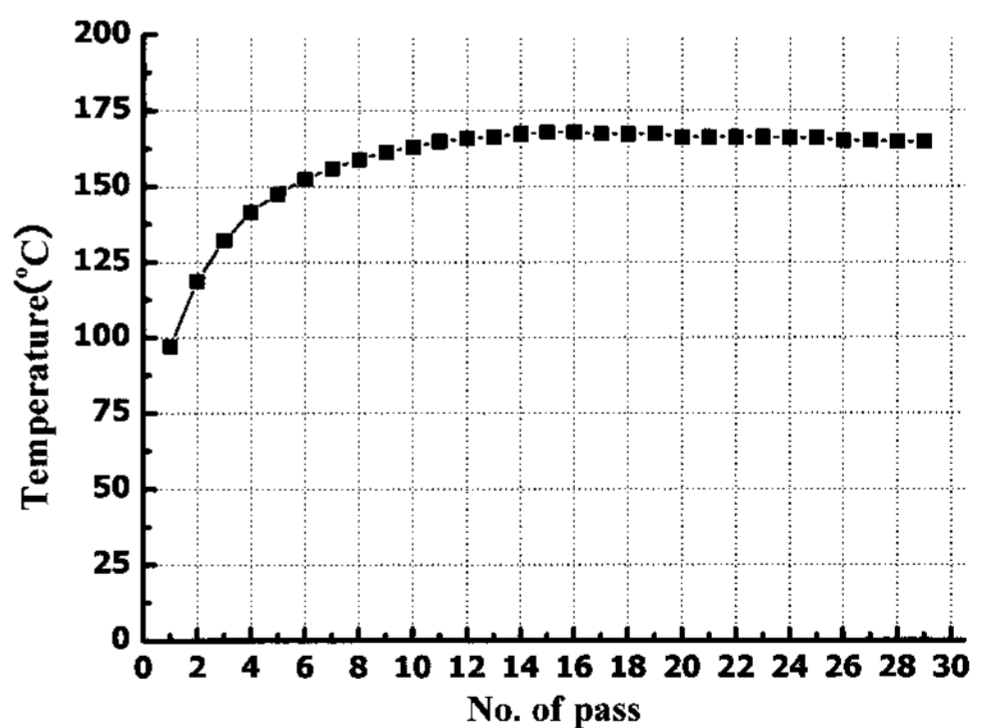


Fig. 8 Wire temperature of new pass schedule

풀 직경을 250mm 로 설정하여 스펀의 회전수를 결정하였다. 본 연구에서는 식(3)의 슬립속도율을 모든 패스에서 5%로 일정하게 설정하였으며, 설정된 슬립속도율과 각 패스의 선재속도를 이용하여 각 캡스탄의 주속을 계산하였다. 다단 캡스탄의 최대 직경은 신선기의 크기를 고려하여 300mm



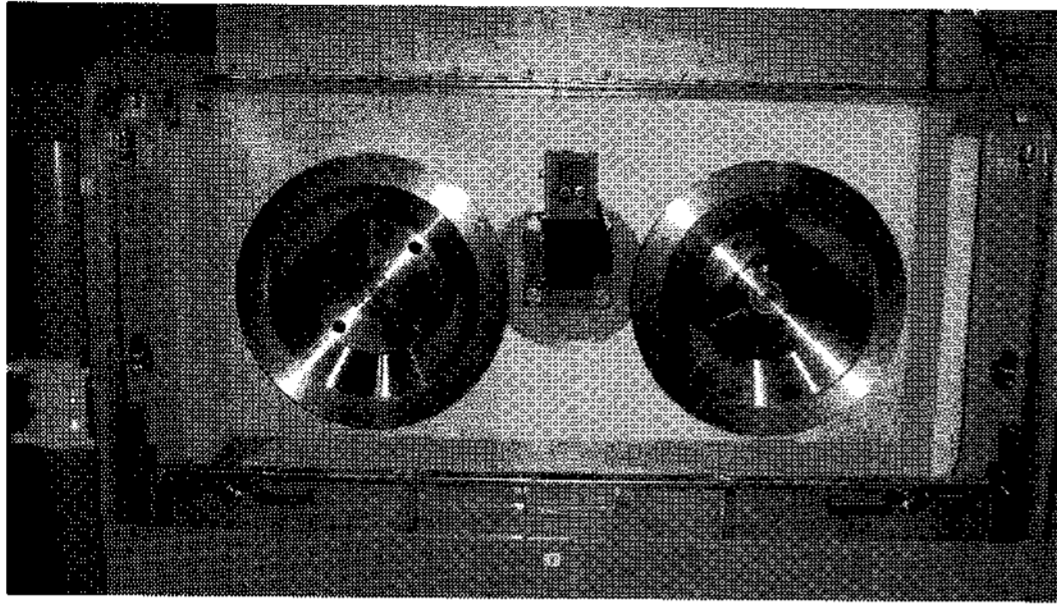


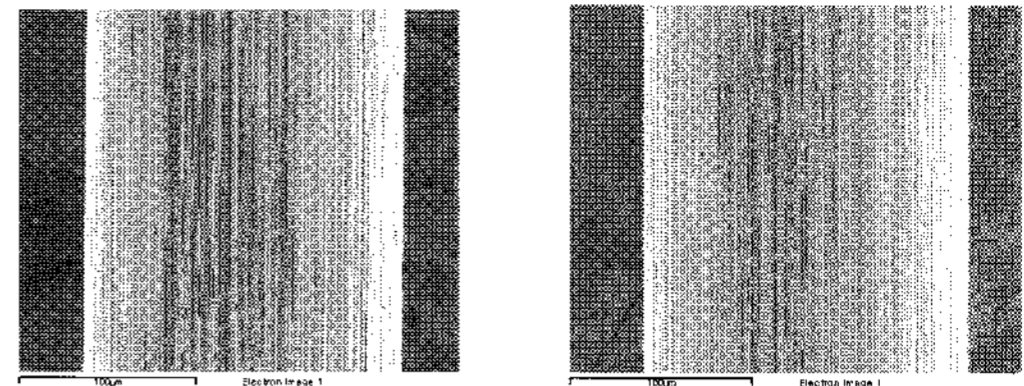
Fig. 9 New drawing machine

로 설정하였으며, 이를 통하여 캡스탄 주축의 회전수를 결정하였다. 마지막으로 설정된 슬립속도와 선재 속도를 이용하여 각 캡스탄의 직경을 결정하였다. Fig. 9 에 이상의 결과로 제작된 고속 인발기를 나타내었다.

### 5. 다단 인발실험 및 고찰

본 연구에서 제안한 세션 다단 인발공정설계방법에 대한 타당성을 검증하기 위하여 설계된 패스와 새로운 인발기를 이용하여 인발실험을 실시하였다. 설계된 공정을 적용하여 약 5,000m 의 최종 선재를 생산하여 기존 공정과 비교, 분석하였다. 최종 선재에 대하여 선재직경, 인장강도, 파단 발생 회전수, 층간분리 발생여부, 표면조도, 단선율을 비교하여 제안된 공정에 대한 타당성을 평가하였다.

Fig. 10 은 기존공정으로 생산된 선재와 본 연구에서 제시한 인발공정으로 생산한 최종 선재를 나타낸 것이다. 인장시험을 통한 인장강도는 2,765~2,785MPa 로 기존공정의 2,697MPa 보다 다소 증가하였다. 최종 선재 내부의 층간분리 발생 여부를 평가하기 위하여 선재 직경의 100 배 길이의 시편에 대하여 파단 회전수를 평가하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 공정의 경우 파단회전수가 63~65 회로 기존 공정(63 회)과 동등한 값을 나타내었으며, Fig. 11 에서 보듯이 층간분리가 발생하지 않아 파단면이 평평함을 알 수 있었다. 본 연구에서 설계된 공정은 최대 선재온도가 약 168°C 로 현공정(145°C)보다 약 23°C 높았으나, 고탄소강의 정적변형시효 촉진 온도(200°C) 보다는 상당히 낮은 값을 나타내었다[3]. 따라서, 공정중 선재의 온도를 정적변형시효 촉진 온도 이하로



(a) 1,100m/min

(b) 2,000m/min

Fig.10 Final drawn wire

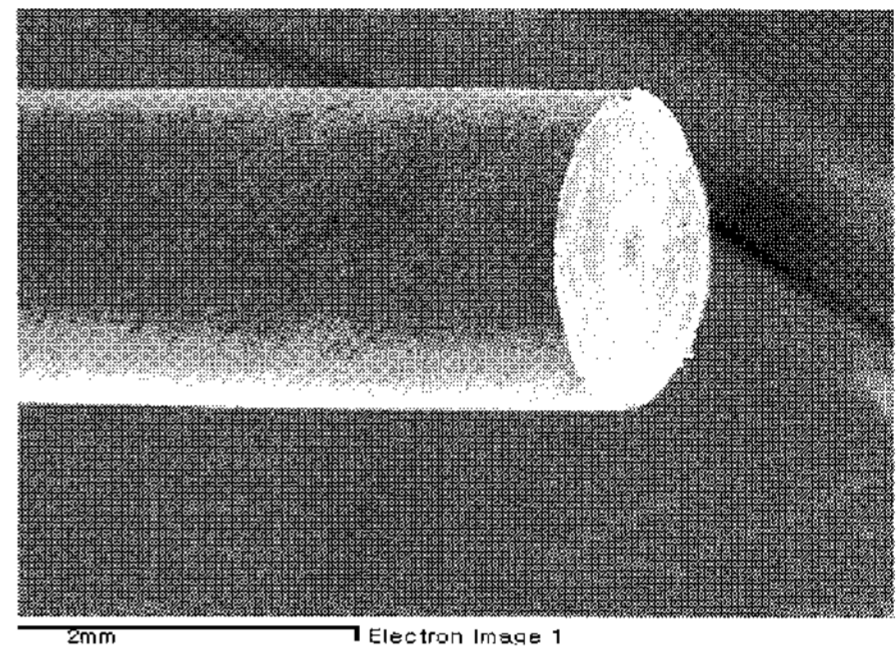


Fig.11 Fracture surface without delamination

Table 1 Result of drawing experiment

Items	Current process (1,100 m/min)	Redesign process (2,000 m/min)
Diameter[mm]	0.175	0.175
TS[MPa]	2,697	2,765
Twist No.	63	63~65
Delamination	No	No
SR[ $\mu$ m]	0.26	0.21
WBR[times]	0	0

제어할 경우 선재의 인장강도 및 파단 회전수 저하 방지가 가능함을 알 수 있다.

표면조도는 약 0.21 $\mu$ m 로 기존공정의 0.26 $\mu$ m 보다 다소 향상됨을 알 수 있었다. 또한, 실험공정중에 단선은 발생하지 않았다.

Table 1 에 이상의 실험결과를 나타내었다. 실험결과 본 연구에서 제안한 세션 인발공정설계 방법을 적용할 경우 최종 선재의 품질저하 없이 최종 인발속도를 상승시킬 수 있음을 알 수 있었다.

### 6. 결론

본 연구에서는 선재의 온도예측 모델을 이용하여 고탄소강 세션 다단 인발공정 패스설계 및 최

종 인발속도 상승을 위한 새로운 인발기 설계 및 제작을 통하여 최종 인발속도를 상승시킬 수 있는 다단 인발공정설계 방법을 제안하였다. 제안한 방법으로 설계 및 제작된 패스와 인발기를 이용한 인발 실험을 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 온도해석결과 초기 직경 1.050mm, 최종 0.175 mm 인 24 패스 공정의 인발속도를 1,100m/min 에서 2,000m/min 으로 높일 경우 선재의 온도가 230°C 이상으로 상승하였다.

(2) 선재의 지나친 온도상승은 정적변형시효를 촉진시켜 단선 및 선재 품질저하의 원인이 된다. 이를 방지하기 위하여 본 연구에서는 전반부 패스의 단면감소율은 거의 일정하게 유지하고, 후반부 패스는 순차적으로 감소시켜 인발속도 상승에 의한 선재온도 상승을 방지하였다.

(3) 기존 24 패스 공정을 29 패스로 설계하였으며, 29 패스 공정에 대한 온도해석결과 최대 온도는 약 168°C 로 낮아졌다.

(4) 설계된 패스와 슬립속도율, 최대 인발속도를 기초로 새로운 다단 인발기를 설계, 제작하였다. 이를 이용한 인발실험결과 최종 선재의 품질저하 없이 최종 인발속도를 1,100m/min 에서 2,000m/min 으로 상승시키는 것이 가능하였다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제안하고 있는 다단 인발공정설계방법에 대한 타당성을 확인할 수 있었으며, 실공정에 적용 시 최종 선재의 품질저하 없이 생산성을 획기적으로 향상시킬 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업 및 2007 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원(No. M60601010004-06E0101-00410)을 받아 수행된 연구결과임

## 참 고 문 헌

- [1] JSTP, 1990, Drawing process(Japaness), Korona.
- [2] Y. Nakamura, T. Fujita, H. Kawakami, Y. Yamada, 2001, New cooling system for high-speed wire drawing, Wire J. Int., pp. 59~68.
- [3] M. Kalweit, 1997, Wire cooling on high-performance drawing machine, Wire J. Int., July, pp. 88~91.
- [4] Y. M. Park, M. A. Kim, B. M. Kim, Y. S. Kim, D. H. Kim, 2002, Innovative productivity in the steel cord wire drawing process, Wire J. Int., June, pp. 60~68.
- [5] W. H. Hwang, S. G. Lee, B. M. Kim, W. S. Ko, 2005, Pass design of wet-drawing with ultra high speed for steel cord, Trans. Mater. Process., Vol. 14, No. 9, pp. 785~790.
- [6] BS, 1997, Japan patent 9-24413.
- [7] S. K. Lee, B. M. Kim, 2005, Analysis of multi-pass wet wire drawing process and its application, Trans. Mater. Process., Vol. 14, No. 8, pp. 689~695.