

# Steel Cord 생산을 위한 초고속 습식 신선 패스 설계

황원호<sup>1</sup> · 이상곤<sup>1</sup> · 김병민<sup>#</sup> · 고우식<sup>2</sup>

## Pass Design of Wet-Drawing with Ultra High Speed for Steel Cord

W. H. Hwang, S. G. Lee, B. M. Kim, W. S. Ko

### Abstract

Improving the productivity of steel cord is required due to the increase in demand for it, even though steel cord being used as a reinforcement of a tire has been produced at multi-pass wet wire drawing process over 1000m/min. To improve the productivity, if just increase drawing speed, it causes temperature rise, fracture arisen by embrittlement during drawing process. To increase drawing speed affecting productivity, the variation of wire temperature during multi-pass wet wire drawing process is investigated in this study. In result, the multi-pass wet wire drawing process is redesigned. The redesigned wet drawing process with 27 passes efficiently controls wire temperature during drawing process. It, therefore, enables drawing process to be possible at ultra high speed with 2000m/min. It becomes possible to improve the productivity of steel cord in this paper because the increase in drawing speed could be achieved.

**Key Words** : Wet Drawing(습식 신선), Steel Cord(스틸코드), Embrittlement(취화), Wire Temperature(선재 온도), Multi-pass Wire Drawing Process(다단 신선 공정), Pass Schedule(패스 설계)

### 1. 서론

자동차 타이어의 보강재로 사용되고 있는 스틸코드(Steel cord) 제품은 신선 속도 1000m/min 이상의 고속에서 다단 습식 신선 공정으로 생산되고 있으며, 스틸코드 제품에 대한 수요 증가로 인해 제품의 생산성 향상이 요구되고 있다. 최근에는 제품의 생산성을 증가시키기 위해서 신선 속도를 증가시키고 있다. 그러나 습식 신선 공정의 신선 속도가 증가할수록 선재의 온도 상승에 따른 선재의 취화에 의해 제품의 품질이 저하되거나 습식 신선 공정 중 단선의 발생 빈도가 높아지는 문제가 발생하게 된다. 스틸코드 제품의 생산성 향상을 위하여 신선 속도만을 증가시킬 경우 신

선 공정 중 단선으로 인한 제품의 생산효율이 저하되고 생산 비용이 현저히 증가하게 되며 양질의 제품을 얻기도 힘들다. 그러므로 고속 다단 습식 신선 공정에서 선재의 취화에 의한 선재의 단선을 방지하고, 최종 제품의 기계적 성질을 향상시키기 위해서는 신선 공정 중 선재의 온도 상승을 최대한 억제할 필요가 있다[1].

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 캡스탄(Capstan)에 선재가 권취되고 그 다음 다이를 통과할 때까지의 선재의 온도 계산 방법에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과

2. ㈜효성 중공업연구소

# 교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

본 연구에서는 다단 습식 신선 공정에서의 선재 온도 예측에 관한 연구를 수행하였으며, 스틸 코드 제품의 생산성을 높이기 위해 선재 온도 예측 결과를 이용하여 기존 신선 속도 1100m/min을 81.8% 향상 시킨 신선 속도 2000m/min의 초고속 습식 신선 패스를 설계하였다.

## 2. 선재의 온도 예측 기법 개발

### 2.1 선재의 온도 상승

신선 시 온도 상승으로 인한 선재의 취화 및 단선을 방지하기 위하여 선재의 온도를 정확하게 계산하여 제어하는 것이 필요하다. 공정변수를 적절히 선정하고 신선 공정의 패스를 재설계하여 선재의 온도를 제어할 수 있다면, 선재의 온도 상승에 의해 발생하는 단선을 방지할 수 있다.

신선 다이를 통과하는 선재의 보유 열량은 체적변형과 내부전단 변형과 마찰에 의해 발생된 열량과 같게 되며, 다이 출구에서의 선재의 평균 온도는 다음의 식 (1)과 같이 유도된다[2].

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

여기서,  $T_{out}$ 은 다이 출구에서의 선재 온도,  $T_{in}$ 은 다이 입구에서의 선재 온도,  $A$ 는 열의 일당량,  $f_2$ 는 다이 출구에서의 선재 단면적,  $\rho$ 는 선재의 밀도,  $c$ 는 선재의 비열,  $F$ 는 다이 입구와 출구에서 선재의 단면적 차이,  $k_m$ 은 변형중의 선재 내부의 평균 변형 저항,  $\alpha$ 는 다이 반각,  $k_{fm}$ 은 변형 전후의 선재의 평균 항복 강도,  $m$ 은 열기여율,  $Q$ 는 마찰면적,  $\mu$ 는 마찰 계수이다.

식 (1)에서  $m$  ( $0 \leq m \leq 1$ )은 다이와 선재의 마찰로 인해 발생한 열이 선재로 전달 되는 정도를 나타내는 열기여율(Heat partition coefficient)이다. 본 연구에서는 윤활유 속에서 공정이 진행되는 습식 신선 공정이므로 윤활유에 의한 다이의 냉각 효과를 고려하여 열기여율의 값을 0.6으로 결정하였다. 그리고 마찰 계수  $\mu$ 는 평판마찰시험을 통하여 얻은 0.05을 사용하였다.

### 2.2 신선 다이 통과 후 선재의 온도 강하

습식 신선 공정은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 연속적으로 이루어지며,  $n$  번째 다이와  $n+1$  번째

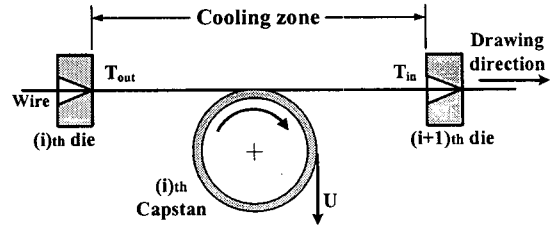


Fig. 1 Schematic representation of multi-stage wire drawing machine

다이 사이에 설치되어 있는 캡스탄은  $n$  번째 다이에서 변형 시에 상승한 선재의 온도가 냉각되는 시간을 확보해준다.

선재가 윤활유에 노출되어 있는 동안 선재의 온도 강하를 예측하기 위해 선재의 미소면적이 시간에 따라 이동하는 동안의 온도 변화를 고찰하였다. 선재가 윤활유에 노출되어 있는 동안 강하된 온도의 계산식은 다음 식 (2)와 같다.

$$T_{i+1, in} = (T_{i, out} - T_{lub}) \cdot \exp \left[ - \left( \frac{4 \cdot h_{lub}}{\rho \cdot d \cdot c} \right) \cdot t \right] + T_{lub} \quad (2)$$

여기서,  $T_{lub}$ 는 윤활유의 온도,  $h_{lub}$ 는 윤활유와 선재 사이의 대류 열전달 계수,  $d$ 는 선재의 직경,  $t$ 는 선재가 윤활유에 노출되어 있는 시간이다. 본 연구에서는  $h_{lub}$ 를 45°C에서 물의 대류 열전달 계수로 가정하여 0.005 W/mm<sup>2</sup>·°C, 윤활유 온도는 45°C로 결정하였다.

## 3. 다단 신선 공정의 선재 온도해석

### 3.1 기존 신선 공정의 선재 온도해석

기존 습식 신선 공정은 초기 선재 직경 1.150 mm에서 최종 선재 직경 0.192 mm의 21패스 습식 다단 신선 공정이다. 선재는 AISI 1072 강이며 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 223.7\bar{\epsilon}^{0.205} [kgf/mm^2] \quad (3)$$

Fig. 2는 해석에 적용한 기존 습식 신선 공정의 다이스 및 기계감면율을 나타낸 것이다. 평균 다

이스 감면율은 약 15.69%이고, 기계 감면율은 약 12.53%인 등감면율 타입의 패스이다.

해석에 적용한 기존 공정의 경우 모든 패스에

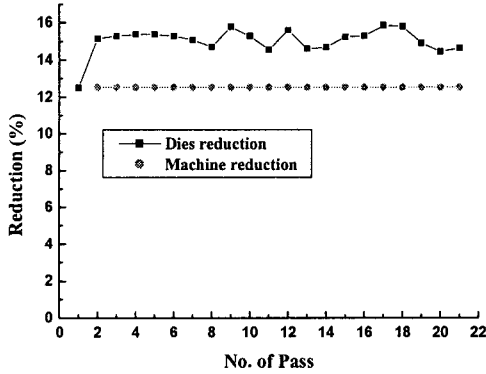


Fig. 2 Dies reduction and Machine reduction on 21 dies machine

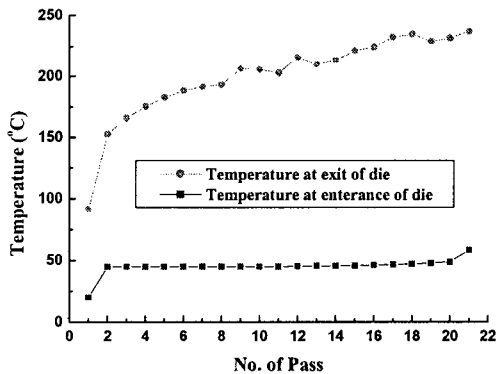


Fig. 3 Wire temperature on 21 dies machine at Wire speed 1100m/min

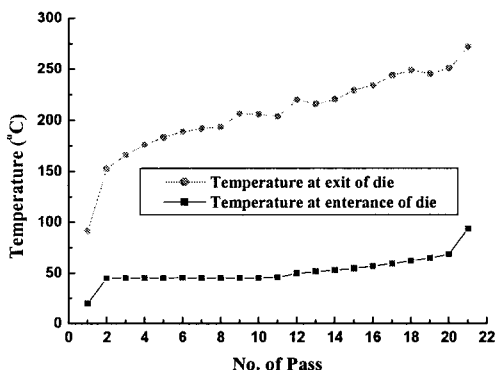


Fig. 4 Wire temperature on 21 dies machine at Wire speed 2000m/min

서 다이 반각은 5°로 일정하며, 슬립 속도율은 1.74~5.81% 사이의 값을 가진다.

신선 속도가 1100m/min인 기존의 다단 습식 신선 공정의 각 패스에서 선재 온도를 예측하기 위해 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 선재 온도를 계산하였다. Fig. 3에서 등감면율 타입의 패스에서는 패스가 진행됨에 따라서 선재의 온도는 계속해서 상승하게 되어 최고 236.95°C까지 상승하는 것을 알 수 있다.

다이를 통과하면서 상승한 선재의 온도는 윤활유에 의해 빠르게 강하하게 된다. 그러나 AISI 1072 강은 180°C 이상의 온도에서 취화 현상이 일어나게 되므로, 신선 공정에 의해 선재의 온도가 높게 나타날수록 선재는 180°C 이상의 온도에서 오래 머물게 되어 취화 현상이 더 많이 일어나게 된다. 신선 공정 중 선재의 온도가 높게 나타날수록 최종 선재의 품질이 저하되거나 신선 공정 중 단선발생 가능성이 높아지게 된다.

Fig. 4는 스틸코드 제품의 생산성을 향상 시키기 위해서 기존의 다단 습식 신선 공정에서 단순히 신선 속도만 2000m/min으로 높였을 경우의 선재 온도 예측 결과이며, 최고 271.91°C까지 선재 온도가 상승하게 된다. 이 결과에서 선재의 온도는 다이를 통과한 후 다음 다이입구에서 윤활유 온도까지 충분히 냉각되지 못함을 알 수 있다. 신선 중 선재가 충분히 냉각되지 못하게 되면, 패스가 진행될수록 선재의 온도는 계속해서 상승하게 되어 선재의 급격한 취화로 인해 신선 공정 중 단선이 발생하게 된다.

### 3.2 재설계된 신선 공정의 선재 온도해석

위의 해석결과들을 토대로 선재의 온도가 높게 나타나는 것을 방지하기 위한 패스 재설계를 수행하였다. 선재가 다이를 통과할 때 각 패스에서의 소성변형에 의한 발열량을 줄이기 위해 패스 수를 21패스에서 27패스로 늘여 평균 다이스 감면율을 약 12.43%로 설계 하였으며, 낮은 다이스 감면율로 인한 Cuppy 단선 발생을 방지하기 위하여 모든 패스에서 다이 반각을 4°로 설계하였다. 기존 연구에서 습식 신선공정 중 단선율을 최소화 하기 위해서는 각 패스에서의 슬립 속도율을 3~8%로 설정하는 것이 가장 이상적이다. 그러므로 다단 습식 신선 공정 중 단선율을 최소화 하기 위해 슬립 속도율을 5%로 고정하여 기계감면율을 결정하였다.

Fig. 5는 재설계된 습식 신선 공정의 다이스 및 기계감면율을 나타낸 것이다. 전반부 패스의 다이스 감면율은 등감면율 타입의 패스를 적용하였고, 후반부 패스의 다이스 감면율은 테이퍼 타입의 패스를 적용하였다.

Fig. 6은 재설계된 다단 습식 신선 공정의 신선 속도 2000m/min에서 각 패스의 선재 온도를 예측한 결과이다. 이 결과에서 가장 높은 선재의 온도는

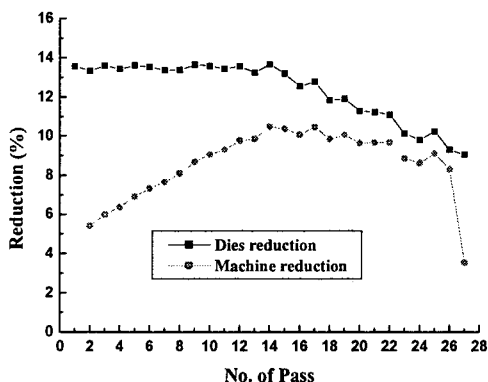


Fig. 5 Dies reduction and Machine reduction of redesigned pass

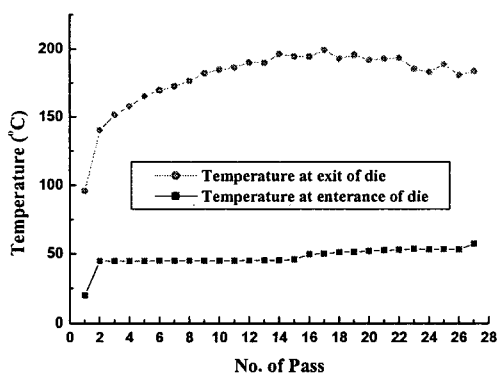


Fig. 6 Wire temperature of redesigned pass at Wire speed 2000m/min

Table 1 Comparison between existing and redesigned pass schedule

Item	Present pass	Redesigned pass
Diameter(mm)	0.192	0.192
TS(kg/mm <sup>2</sup> )	286	288
Twisting	72	74
Roughness(μm)	0.22	0.36

는 194.33℃로 기존 다단 습식 신선 공정에 비해 매우 안정적으로 나타났다. 재설계된 다단 습식 신선 공정의 경우 전반부 패스에서 선재의 온도는 계속해서 상승하다가 후반부 패스에서는 윤활유 온도까지 충분히 냉각되지 않지만 테이퍼 타입의 다이스 감면율의 적용에 의해 더 이상 상승하지 않는다.

#### 4. 재설계된 습식 신선 패스 검증

재설계된 다단 습식 신선 패스에 대한 시험을 수행하였고, 신선된 제품의 품질은 선경, 선재강도, 염회, 표면 거칠기 등으로 평가하였다.

Table 1에 재설계된 다단 습식 신선 패스와 기존 패스에 의해 생산된 제품에 대한 시험 결과를 나타내었다. 결과는 기존 공정에 의해 생산된 제품과 재설계된 공정에 의해 생산된 제품에 대한 값이다. 이 결과에서 재설계된 다단 습식 신선 공정에 의해 생산된 제품은 기존 제품에 대비하여 비교적 양호한 품질을 가지는 것으로 나타났다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 제품의 생산성을 결정하는 신선 속도를 증가시키기 위해서 먼저 다단 습식 신선 공정 중의 선재 온도를 예측하였고, 그 결과를 이용하여 기존의 다단 습식 신선 패스를 재설계하였다. 재설계된 27 단 습식 신선 패스에서 신선 속도 2000m/min의 초고속 신선 공정이 가능하게 되었으며, 본 연구를 통해 신선 속도를 증가시켜 스틸코드 제품의 생산성을 향상시키는 것이 가능하게 되었다.

#### 참고 문헌

[1] Nakamura, Y., Fujita, T., Kawakami, H., Yamada, Y., 1976, "New Cooling System for High-Speed Wire Drawing," Wire Journal International, No. 7, pp. 59 ~ 68.

[2] Kim, Y. S., Kim, D. H., Kim, B. M., Kim, M. A., Park, Y. M., 2001, "Development of Isothermal Pass Schedule Program for the Re-design of a Continuous High Carbon Steel Wire Drawing Process," Journal of the KSPE, Vol. 18, No. 5, pp. 57 ~ 64.