

습식 신선공정의 단선율 저감을 위한  
패스 재설계

부산대학교 대학원 정밀기계공학과\*  
부산대학교 기계공학부\*\*

이상곤, 김민안\*, 김병민\*\*



## 습식 신선공정의 단선을 저감을 위한 패스 재설계

이상곤\* · 김민안\*\* · 김병민\*\*\*

### Pass Redesign for Reduction of Wire Breakage in the Wet Wire Drawing Process

S. K. Lee\*, M. A. Kim\*\*, and B.M. Kim\*\*\*

#### Abstract

The Production of fine wire through wet wire drawing process with appropriate pass schedule would be impossible without understanding of relationship among many process parameters. Therefore, this paper investigates the relationship among process parameters of wet wire drawing process. In this study, it is possible to obtain the important basic data that can be used in the pass schedule of multi-pass wet wire drawing process. In order to verify the effectiveness of the analysis, pass redesign was performed based on the result of analysis to reduce the wire breakage. The wire breakage between the conventional pass schedule and the redesigned pass schedule was compared by the FE analysis and the wet wire drawing experiment.

**Key Words** : Wet Wire Drawing, Die Pass Schedule, Wire Breakage, Slip Rate, Slip Velocity Rate, FE Analysis, Wet Drawing Experiment

#### 1. 서 론

일반적으로  $\phi 1.0\text{mm}$  이하의 세선(fine wire)의 생산에 적용되는 습식 신선공정은 통상 1000m/min 이상의 고속에서 진행되기 때문에 공정 중에 단선(wire breakage)이 발생하게 되면 생산효율을 저하시키고, 생산비용을 증가시키는 직접적인 원인이 된다. 따라서, 습식 신선공정의 단선방지를 통한 생산 안정화는 매우 중요하다. 일반적으로 습식 신선공정의 단선방지를 위해서는 적절한 다이 패스 스케줄이 가장 중요하다. 이를 위해서는 습식 신선

공정에 대한 공정해석이 선행되어야 하며, 이를 통하여 습식 신선공정에 미치는 공정변수들의 영향 파악이 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 습식 신선공정에 대한 해석을 통하여 공정변수들의 영향을 파악하였다. 또한, 효율적인 습식 신선공정의 다이 패스 스케줄을 위하여, 공정변수들의 영향을 정량적으로 평가하였다. 공정변수 영향 평가를 통한 습식 신선공정의 안정화를 위하여, 실제 현장에서 적용되고 있는 습식 신선공정에 대한 공정변수들을 정량적으로 평가하여, 그 결과를 토대로 보다 안정적인

\* 부산대 대학원 정밀기계공학과  
\*\* (주)효성 강선연구소  
\*\*\* 부산대 정밀정형 및 금형가공 연구소

습식 신선공정 패스를 설계하였다. 또한, 재설계된 패스에 대하여 유한요소해석 및 실제 현장에 적용하여 공정 중에 발생하는 단선율을 비교하였다.

## 2. 습식 신선공정

### 2.1 신선력 및 역장력

습식 신선의 경우 건식 신선과 달리 다이 입구에서 신선방향과 반대방향으로 역장력이 존재한다. Fig. 1에 습식 신선공정 시 다이의 전·후에서 발생하는 신선력과 역장력을 나타내었다.

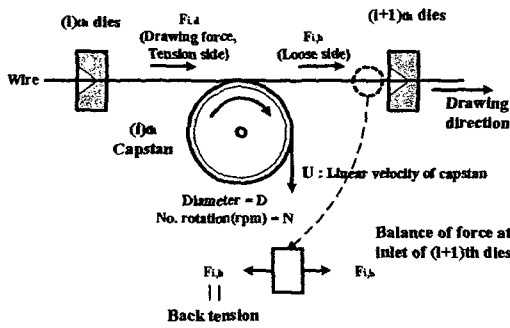


Fig. 1 Drawing and backtension force

다이 출구에서 작용하는 신선력( $F_d$ )은 내부변형과 단변형 그리고 마찰을 극복하기 위해 필요한 힘의 합이며<sup>(6)</sup>, 구체적인 계산식은 Geleji<sup>(1)</sup>가 제안한 다음의 식을 이용하였다.

$$F_d = k_m(F + Q \cdot \mu_D) + 0.77 \cdot a \cdot k_{fm} \cdot f_2 \quad (1)$$

- $a$  : 다이 반각
- $k_m$  : 선재의 평균변형저항
- $F$  :  $f_1 - f_2$  (다이 입구와 출구의 단면적 차)
- $Q$  : 선재와 다이 접촉면적( $F/\sin a$ )
- $\mu_D$  : 선재와 다이 표면 사이의 마찰계수
- $k_{fm}$  : 선재의 평균 항복강도

역장력은 습식 신선공정 시 캡스탄의 표면속도와 선재의 속도 차이로 인하여 발생하는 슬립에 의하여 다이 입구측에서 신선방향과 반대방향으로 발생한다. Fig. 1에서  $i$ 번째 캡스탄의 전·후에 위치한  $i$ 번째와  $i+1$ 번째 다이에서  $i$ 번째 다이의 출구에서는 신선력이,  $i+1$ 번째 다이의 입구에서는 신선반대방향으로 역장력

이 작용하게 된다.  $i+1$ 번째 다이의 입구측에서 발생하는 역장은 다음의 식으로 구하였다<sup>(2)</sup>.

$$F_{i+1,b} = \frac{1}{\exp(2\pi \times n_i \times \mu_{ci})} \cdot F_{i,d} \quad (2)$$

- $F_{i+1,b}$  :  $i+1$ 번째 다이 입구에서의 역장력
- $n_i$  :  $i$ 번째 캡스탄에서의 선재의 권취수
- $\mu_{ci}$  :  $i$ 번째 캡스탄에서 선재와의 마찰계수
- $F_{i,d}$  :  $i$ 번째 다이 출구에서의 인발력

식(2)에서 역장력( $F_{i+1,b}$ )은 이전 다이의 신선력과 캡스탄에서의 선재의 권취수 및 마찰특성에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서, 다이 입구에서의 총 신선력은  $F_d$ 와  $F_{i+1,b}$ 의 합이다.

### 2.2 슬립율과 슬립속도율

Fig. 2와 같은 습식 신선의 경우 선재, 다이, 그리고 선재를 당기는 캡스탄이 윤활제 속에 잠겨진 상태에서 작업이 이루어지며, 캡스탄과 선재 사이의 마찰로 인하여 캡스탄의 표면속도와 선재의 속도차로 인하여 선재와 캡스탄 표면의 미끄럼 현상인 슬립이 발생하게 된다. 이 속도차를 캡스탄의 속도에 대한 비율로 나타낸 것을 슬립율(slip rate :  $S_{rate,i}$ )이라고 하며, 식(3)과 같이 나타내어진다<sup>(7)</sup>.

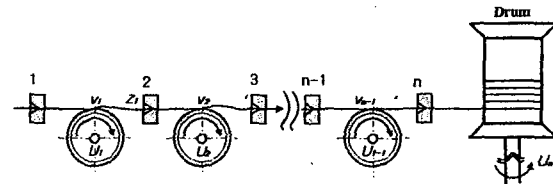


Fig. 2 Multi-pass wet wire drawing machine

$$S_{rate,i} = (U_i - v_i) / U_i \times 100 [\%] \quad (3)$$

- $U_i$  :  $i$ 번째 단의 캡스탄 속도
- $v_i$  :  $i$ 번째 단의 선재 속도

습식 신선 작업 시 슬립율에 의해 선의 장력이 변하게 된다. 현재까지 실제 현장에서는 숙련된 작업자의 노하우에 의하여 슬립에 의한 장력을 조절하고 있다. 따라서, 슬립의 영향을 고려한 정확한 장력의 평가가 필요하다.

슬립 속도율(slip velocity rate :  $S_{vel,i}$ )은 각 캡스탄에서의 슬립을 마지막 권취드럼의 속도에 대한 비로 나타낸 값을 말하며, 식(4)와 같이 나타내어진다.

$$S_{vel,i} = \frac{U_i - v_i}{U_n} \times 100 [\%] \quad (4)$$

$U_i$  :  $i$ 번째 단의 캡스탄 속도

$v_i$  :  $i$ 번째 단의 선재 속도

$U_n$  : 최종 권취 드럼의 속도

### 3. 실제 공정에의 적용

#### 3.1 실제 공정에 대한 해석

이상의 이론적 배경을 바탕으로 실제 현장에서 적용하고 있는 습식 신선공정에 대한 해석을 수행하였다. 적용한 공정은 초기 선경 1.50mm에서 최종 선경 0.26mm의 고탄소강 선재를 생산하는 공정으로, 모든 페스의 다이 반각은 5°로 균일하며, 각 캡스탄에서의 선재의 권취수는 2회인 총 24페스의 공정이다.

##### 3.1.1 선재의 물성치 평가

실제 공정에 대한 해석을 위해 먼저, 초기 선재인 고탄소강(0.8%C)에 대한 물성치를 확보하기 위하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험 결과 초기 선재의 유동응력 식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 207.3 \epsilon^{-0.2308} \quad (5)$$

##### 3.1.2 윤활제의 마찰특성 평가

선재와 다이 접촉면, 선재와 캡스탄 접촉면에서의 마찰특성을 평가하기 위해 Fig. 3과 같은 시험장치를 이용하여 습식 신선 윤활제에 대한 마찰계수를 측정하였다. 측정결과 선재와 다이 접촉면에서의 마찰계수( $\mu_D$ )는 0.11이었다. 또한 선재와 캡스탄 접촉면에서의 마찰계수는 Fig. 4와 같이 선재와 캡스탄 사이의 슬립이 증가할수록, 캡스탄에서의 선재의 권취수가 증가할수록, 커지는 경향을 나타내었다.

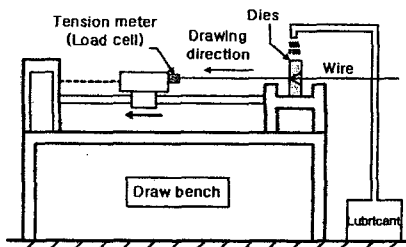


Fig. 3 Draw bench to evaluate friction characteristic between wire and die

#### 3.2 실제 공정에 대한 해석결과 및 고찰

Fig. 5는 각 페스의 다이 및 기계 감면율을 나타낸 것이다. 실 공정의 해석결과 다이 감면율은 약 13.8%로 거의 균일한 값을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 기계 감면율은 다이 감면율보다 약 2% 낮은 12.0%의 값을 나타내고 있었다. 현재 국내 대부분의 습식 신선공정은 Fig. 5와 같은 등감면율 상태에서 행해지고 있으며, 페스 설계 또한 현장 작업자의 노하우에 의하여 이루어지고 있는 실정이다.

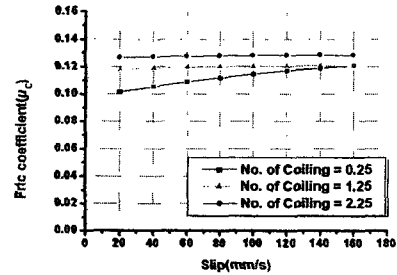


Fig. 4 Friction coefficient between wire and capstan depending on coiling number and slip

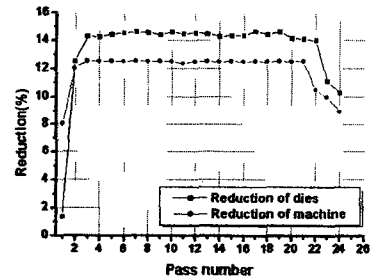


Fig. 5 Reduction of dies and machine

Fig. 6은 각 캡스탄에서의 슬립율과 슬립속도율을 나타낸 것이다. 슬립율은 전반부 페스에서 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 실제 선재의 신선속도는 후반부 페스에서 빠르지만, 선재와 캡스탄의 상대 속도 차가 전반부 페스에서 더 크기 때문이다. 속도율은 전반부에서 증가하는 양상을 보이다 중반부 페스를 지나 최대 값을 나타낸 후 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다. 기존의 연구에서 고탄소강의 경우 습식 신선공정 중의 단선율을 개선시키기 위해서는 3 ~ 8% 범위의 슬립 속도율이 추천되고 있다<sup>(8)</sup>. 따라서, 본 연구에서 해석을 수행한 습식 신선공정의 경우 단선율 저감을 통한 신선공정의 안정화를 위하여 공정변수 재설정을 통한 슬립 속도율의 조절이 필요함을 알 수 있다.

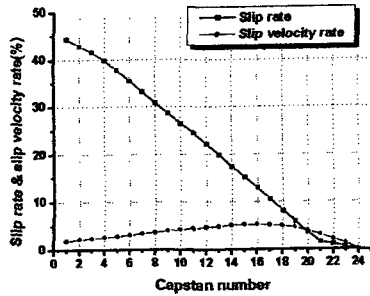


Fig. 6 Slip rate & slip velocity rate at each capstan

#### 4. 다이 패스 재설계

##### 4.1 다이 감면을 재설정

이상의 결과를 바탕으로 각 캡스탄에서의 슬립 속도율을 기준으로 다이 감면율을 조정함으로써 단선율 저감을 위한 패스 재설계를 수행하였다. 재설계된 패스의 다이 감면율, 기계 감면율 그리고 슬립 속도율을 Fig. 7에 나타내었다. 재설계된 공정에 대한 슬립 속도율을 나타낸 것이다. 재설계된 패스의 경우 거의 모든 패스의 슬립 속도율이 약 3 ~ 8%범위에 존재하고 있다.

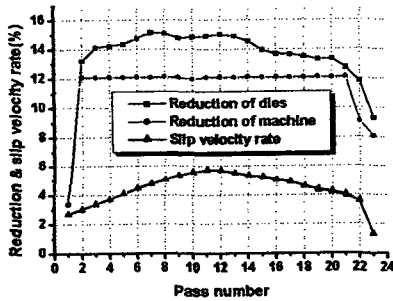


Fig. 7 Reductions and slip velocity rate

##### 4.2 유한요소해석 및 신선 시험결과

상용유한요소 해석 S/W인 DEFORM-2D로 실제 공정 중의 선재의 단선에 직접적인 관계가 있는 데미지값 (damage value)을 비교하였다. Fig. 8은 기존 공정 및 재설계된 공정에 대한 마지막 패스에서의 선재의 데미지 값을 나타낸 것이다<sup>(3)</sup>. 마지막 패스를 통과한 후 기존 공정 및 재설계된 공정에서 최대 데미지값은 각각 2.7216, 2.4008을 나타내었다. Fig. 9는 기존 공정 및 재설계된 공정에 대하여 각 패스 통과 후 선재의 최대 데미지값을 나타내었다. 재설계된 패스의 경우가 데미지값이 보다 낮게 평가됨을 알 수 있다. 따라서, 재설계된 패스가 상

대적으로 단선율(wire breakage rate)이 낮을 것으로 예상된다.

Fig. 9는 기존 공정 및 재설계된 공정에 대한 습식 신선시험 결과 공정중의 단선율을 나타낸 것이다. 재설계된 패스에서 단선율이 현저히 감소된 것을 확인할 수 있었다.

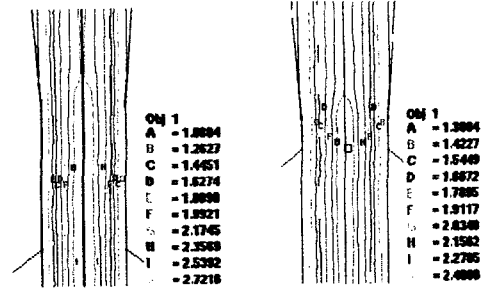


Fig. 8 Comparison of damage value between conventional and redesigned pass schedule after final pass

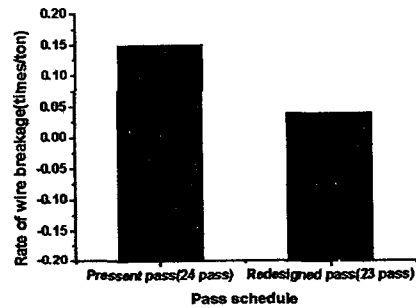


Fig. 8 Comparison of wire breakage between conventional and redesigned pass schedule

#### 5. 결론

본 연구에서는 실제 현장에서 적용되고 있는 습식 신선공정에 대한 다이 감면율 재설정을 통한 패스 재설계를 수행하여 유한요소해석 및 습식 신선시험을 통하여 선재의 단선율을 비교하였다. 유한요소해석 결과 재설계된 패스가 선재의 단선에 직접적인 영향을 미치는 데미지 값이 낮게 평가되어 기존 공정에 비해 보다 안정적인 신선이 가능할 것으로 평가되었다. 또한, 습식 신선시험 결과 역시, 재설계된 습식 신선공정에서의 선재의 단선율이 기존 공정에 비하여 월등히 낮게 나타났다. 이상의 연구결과 통하여 대부분 현장 숙련자의 경험에 의존하던

습식 신선공정의 패스설계를 보다 체계적으로 수행할 수 있게 되었으며, 향후 습식 신선공정의 연구에도 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

- (1) Geleji, A., 1995, "Die Berechnung der Kräfte und des Arbeitsbedarfs bei Formgebung im Bildsame Zustände der Metalle", Akademi-Verlag, Budapest.
- (2) Geleji, A., "Bildsame Formung der Metalle in Rechnung und Versuch", Akademie-Verlag GmbH, Berlin.
- (3) SFTC, 1995, "DEFORM<sup>TM</sup>-2D".