

## 습식 신선공정 해석 및 단선을 저감을 위한 패스 재설계

이상근\*, 김민안(부산대 대학원 정밀기계공학과), 김병민(부산대 ERC for NSDM)

### Analysis of Wet Wire Drawing Process and Pass Redesign to Reduce Wire Breakage

S. K. Lee, M. A. Kim(Precision Mecha. Eng. Dept. PNU), B. M. Kim(ERC for NSDM, PNU)

#### ABSTRACT

Wet wire drawing process is used to produce fine wire in the industrial field. The production of fine wire by using wet wire drawing process with appropriate dies pass schedule would be impossible without understanding of relationship between process parameters such as material properties, dies reduction, friction conditions, drawing speed etc. However, up to now, dies pass schedule of wet wire drawing process has performed by trial and error of expert. Therefore, this study investigates the relationship between process parameters quantitatively and analyzes a conventional wet wire drawing process. Using the results, the conventional pass schedule can be redesigned to reduce the wire breakage during wet wire drawing. To verify the result of this study, the wet wire drawing experiment was performed. And the results between conventional process and redesigned pass schedule were compared. As the comparison of results, the wire breakage was considerably reduced in the redesigned pass schedule more than conventional pass schedule.

**Key Words** : Wet Wire Drawing(습식 신선), Pass Schedule(패스 스케줄), Process Parameters(공정변수), Wire Breakage(단선), Redesign Pass Schedule(재설계된 패스 스케줄)

#### 1. 서론

습식 신선공정의 경우, 일반적으로 가는 세선의 생산에 적용되는 공정으로, 1000m/min 이상의 고속으로 진행되기 때문에 공정 중에 단선이 발생하게 되면 생산효율을 저하시킬 뿐 아니라, 공정을 재개하는데 상당한 시간이 소요되기 때문에 생산비용 또한 현저히 증가시키는 원인이 된다<sup>[1]</sup>. 따라서, 습식 신선의 경우 공정 중의 단선발생 방지를 통한 생산의 안정화가 매우 중요하다. 일반적으로 습식 신선공정의 단선을 방지하기 위해서는 적절한 다이스 패스 스케줄이 가장 중요하다. 이를 위해서는 습식 신선공정에 미치는 공정변수들의 영향 파악이 선행되어야 하며, 이를 통한 적절한 다이스 패스 스케줄이 이루어져야 한다.

습식 신선공정의 주요 공정변수들로는 선재의 물성치, 윤활제의 윤활특성, 다이스 감면율 및 다이스 반각, 캡스탄의 직경 및 회전수 등이 있다. 따라서 이들 공정변수들을 적절히 선정해야만 안정적인 습식 신선이 가능하다. 그러나, 현재까지 대부분의

습식 신선공정의 다이스 패스 스케줄은 이러한 공정변수들의 정량적인 평가없이, 실제 현장 숙련자들의 경험에 의해 이루어졌다. 따라서, 본 연구에서는 보다 효율적인 습식 신선공정의 다이스 패스 스케줄을 위하여, 습식 신선공정의 공정변수들의 상호관계를 정량적으로 평가하였다. 또한, 실제 현장에서 적용하고 있는 습식 신선공정에 대한 해석을 수행하여 그 결과를 바탕으로 단선을 저감을 위한 새로운 패스로 재설계하였다. 재설계된 공정에 대하여 실제 신선 시험을 수행하여 그 결과를 기존의 공정과 비교하여 습식 신선공정의 안정성을 비교하였다.

#### 2. 습식 신선공정

##### 2.1 신선력 및 역장력

습식 신선의 경우 건식 신선과는 달리 다이스 출구에서 선재를 당기는 힘 외에 다이스 입구에서 신선방향과 반대방향으로 역장력이 작용하게 된다. 이러한 역장력은 습식 신선공정 시 선재의 변형영역에서 다이스에 가해지는 압력을 낮추어주기 때문

에, 가는 선의 신선 시 반드시 역장력이 존재해야만 한다<sup>[2]</sup>. 현재까지 역장력에 관한 몇몇 연구들이 진행되어 왔지만, 최적의 역장력에 관한 연구는 거의 없다. 본 연구에서는 먼저 습식 신선 시 발생하는 신선력과 역장력을 정량적으로 평가하였다. Fig. 1 에 습식 신선 시 다이스 전·후에서 발생하는 신선력과 역장력을 나타내었다.

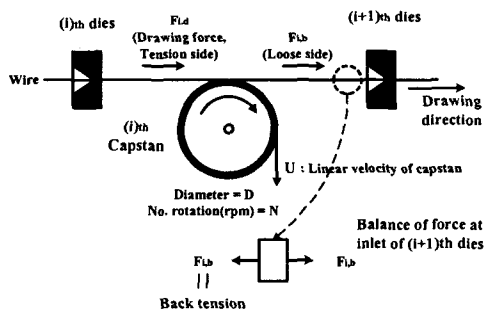


Fig. 1 Drawing and backtension force

본 연구에서는 내부변형과 전단변형, 그리고 마찰력을 극복하기 위해 필요한 다이스 입구에서의 힘을 계산하기 위하여 Geleji<sup>[3]</sup>가 제안한 식(1)을 적용하였다.

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

$\alpha$  : 다이스 반각

$k_m$  : 선재의 평균변형저항

$F$  :  $f_1 - f_2$  (다이스 입·출구 단면적 차)

$Q$  : 선재와 다이스 접촉면적

$\mu_D$  : 선재와 다이스 접촉면 사이의 마찰계수

$k_{fm}$  : 선재의 평균 항복강도

Fig. 1 의  $i+1$  번째 다이스의 입구에서 발생하는 역장력은 다음의 식(2)로 구하였다<sup>[4]</sup>.

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

$F_{i+1,b}$  :  $i+1$  번째 다이스 입구에서의 역장력

$n_i$  :  $i$  번째 캡스탕에서의 선재의 권취수

$\mu_{ci}$  :  $i$  번째 캡스탕에서의 선재와의 마찰계수

$F_{i,d}$  :  $i$  번째 다이스 출구에서의 신선력

## 2.2 기계 감면율

습식 신선공정에서 선재를 잡아당기는 캡스탕은 후반부 패스로 갈수록 그 속도가 빨라진다. Fig. 2 에서 보듯이, 기계 감면율은 다이스 전·후에 위치하고 있는 두 캡스탕의 속도로 계산이 되어진다. 습식 신선에서는 일반적으로 기계 감면율을 다이스 감면율 보다 약 2~3% 정도 낮게 설정한다. 기계 감

면율은 식(3)으로 계산이 된다.

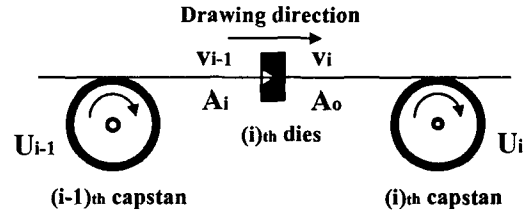


Fig. 2 Machine reduction

$$K_i[\%] = (U_i - U_{i-1}) / U_i \times 100 \quad (3)$$

## 2.3 슬립율과 슬립 속도율

습식 신선기의 경우, 선재와 다이스 그리고 선재를 잡아당기는 캡스탕이 윤활제 속에 완전히 잠긴 상태에서 공정이 이루어진다. 습식 신선의 경우, 캡스탕에 잠겨 있는 선재의 속도와 캡스탕 표면의 속도차로 인하여 슬립이라고 하는 미끌림 현상이 발생한다. 이 속도차를 캡스탕의 속도에 대한 비율로 나타낸 것을 슬립율이라고 한다. 식(2)에서 알 수 있듯이, 습식 신선의 경우, 이 슬립과 캡스탕에 잠겨 있는 선재의 권취수에 의하여 역장력이 변하기 때문에 이들을 적절히 설정하므로써 역장력을 조절할 수 있다. Fig. 3 은 캡스탕에서의 슬립을 나타낸 것으로, 슬립에 의한 슬립율은 식(4)로 계산되어진다.

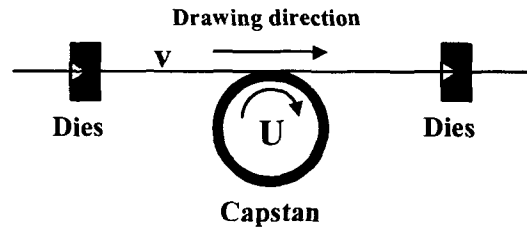


Fig. 3 slip at a capstan

$$S_{rate}[\%] = (U - v) / U \times 100 \quad (4)$$

습식 신선 작업 시 슬립량에 의해 선의 장력이 변하게 된다. 현재까지 실제 현장에서는 숙련된 작업자의 경험에 의하여 슬립에 의한 장력 조절이 이루어졌다. 따라서, 보다 체계적인 습식 신선 공정을 위해서는 슬립의 영향을 고려한 정확한 장력의 평가가 필요하다.

슬립율과 함께 습식 신선 시 중요한 것이 슬립 속도율이다. 슬립 속도율은 Fig. 4 에서 보듯이, 각 패스에서의 선재와 캡스탕의 속도차이를 마지막 권취 드럼의 속도에 대한 비로 나타낸 값을 말하며, 식(5)와 같이 표현된다.

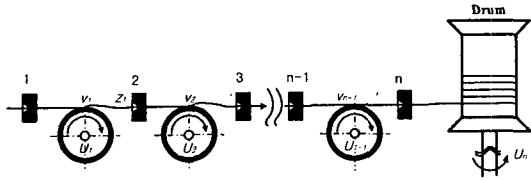


Fig. 4 Multi pass wet wire drawing machine

$$S_{vel}[\%] = (U - v) / U_n \times 100 \quad (5)$$

$U$  : 캡스탄의 표면속도

$v$  : 선재 속도

$U_n$  : 마지막 권취드럼 속도

### 3. 실제 공정에 대한 적용

이상의 이론적인 배경으로 실제 현장에서 적용하고 있는 습식 선선공정에 대한 해석을 수행하였다. 적용한 공정은 초기 선경 1.50mm 에서 0.24mm 의 최종 선경을 생산하는 습식 선선공정으로 모든 패스에 대하여 다이스 반각은 5°로 균일하며, 각 캡스탄에서의 선재의 권취수가 2 회인 24 패스 습식 선선 공정이다.

#### 3.1 초기 선재의 물성치 평가

실제 공정에 대한 해석을 수행하기 위하여 우선, 인장시험을 통하여 초기 선재의 물성치를 평가하였다. 시험으로 획득한 선재의 유동응력식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 205.2\bar{\epsilon}^{0.230} [kgf/mm^2] \quad (6)$$

#### 3.2 윤활제 특성 평가

먼저, 선재와 다이스 접촉면에서의 마찰특성을 드로우 벤치를 이용하여 평가하였으며, 마찰계수는 약 0.11 이었다.

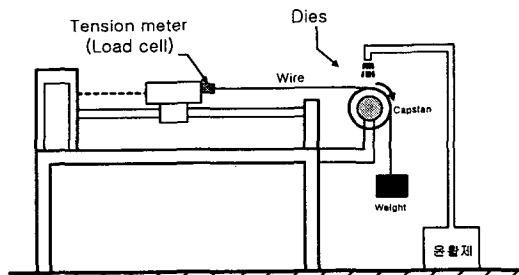


Fig. 5 Test machine for evaluation of characteristic of lubricant between wire and capstan

또한, 습식 선선공정에서 중요한 캡스탄에서의 선재와 캡스탄 표면과의 마찰특성을 평가하기 위하

여 본 연구에서는 Fig. 5 와 같은 시험장치를 제작하여 실제 슬립과 선재의 권취수에 따른 마찰계수를 평가하였다. Fig. 6 에 시험결과를 나타내었다.

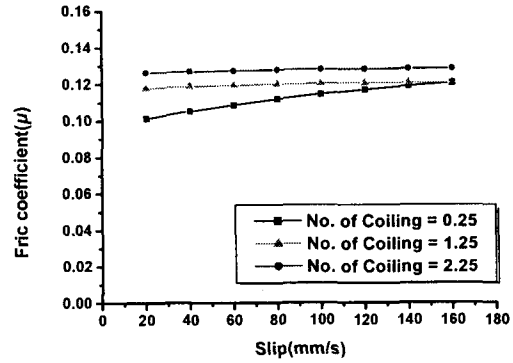


Fig. 6 Friction characteristic between wire and capstan

Fig. 6 에서 알 수 있듯이, 선재의 권취수와 슬립이 증가할수록 마찰계수가 점차 증가하는 경향을 나타내었으나, 그 값에 큰 차이는 없었다.

#### 3.3 현 공정의 해석 및 패스 재설계

Fig. 7 은 해석한 공정의 다이스 및 기계 감면율을 나타낸 것이다. Fig. 7 에서 보듯이 현재의 공정은 다이스 감면율 및 기계 감면율이 거의 균일한 값을 나타내고 있으며, 그 차이는 약 2%정도이다.

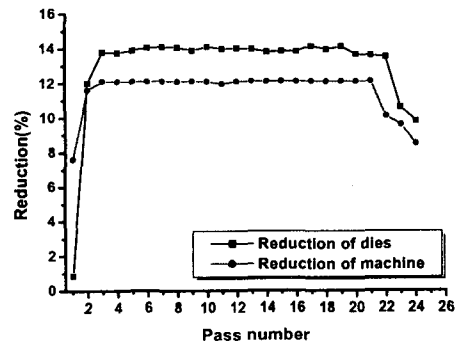


Fig. 7 Reductions of dies and machine

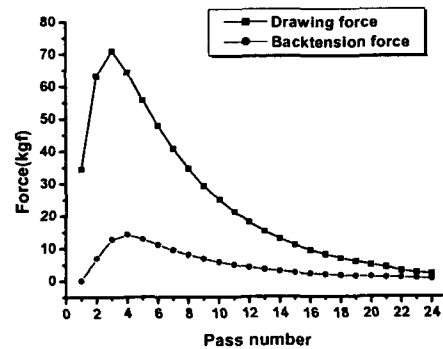


Fig. 8 Drawing and backtension force

Fig. 8 은 각 패스에서의 신선력과 역장력을 나타낸 것이다. 선재의 직경이 굵은 전반부 패스에서 대체로 높게 평가됨을 알 수 있으며, 역장력은 신선력의 약 23% 정도를 차지하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9 는 재설계된 습식 신선 공정의 다이스 및 기계 감면율을 나타낸 것이다. Fig. 9 에서 보듯이 재

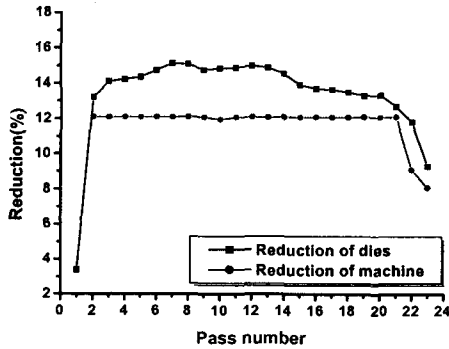


Fig. 9 Reduction of dies and machine of redesigned pass

설계된 패스의 경우 전반부에서 다이스 감면율이 기존의 공정에 비하여 약 1% 정도 상승하였기 때문에 패스 수가 23 패스로 감소하였다.

Fig. 10 은 기존 패스 및 재설계된 패스에 대한 유한요소해석 결과로 선재의 단선에 직접적인 영향을 미치는 연성 파단값을 나타낸 것이다. Fig. 10 에서 알 수 있듯이, 재설계된 패스의 경우가 그 값이 상대적으로 낮음을 알 수 있다.

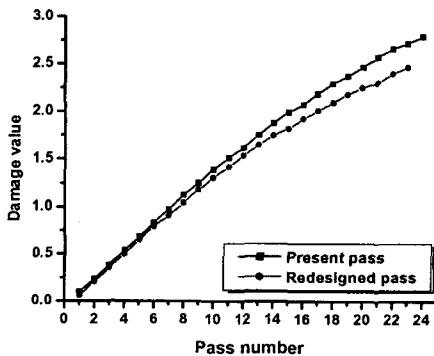


Fig. 10 Comparison of damage between present pass and redesigned pass

### 3.4 신선 시험 결과

이상의 해석 결과를 토대로 재설계된 공정에 대한 신선 시험을 수행하였다. 7 일간 연속적으로 시험을 수행하여 그 단선율을 기존 공정과 비교하여 Fig. 11 에 나타내었다. Fig. 11 은 습식 신선 공정 및 습식 신선공정 후 선재의 단선율을 나타낸 것으로, Fig. 11 에서 알 수 있듯이, 재설계된 공정의 경우가 기존 공정에 비하여 단선율이 약 35% 이상 향상된 결과를 나타내었다. 따라서, 현재의 습식 신선공정을 재설계된 패스로 대체할 경우, 신선 중의 선재

의 단선율을 상당히 감소시킬 수 있을 것이다.

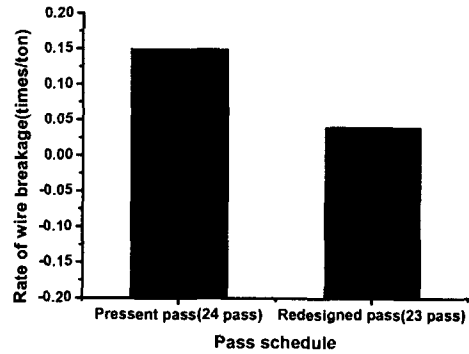


Fig. 11 Comparison of wire breakage

## 4. 결론

본 연구를 통하여 가는 선 생산을 위한 습식 신선공정의 정량적 해석이 가능하게 되었다. 또한, 본 연구에서 해석을 수행한 습식 신선공정에 대하여 다이스 감면율 재설정을 통한 패스 재설계를 수행하여 습식 신선 시험을 수행한 결과, 습식 신선 중의 선재의 단선율을 상당히 낮출 수 있었다. 이상의 연구를 통하여 현재까지 대부분 현장 숙련자의 경험에 의존하던 습식 신선공정의 패스설계를 체계적으로 수행할 수 있게 되었으며, 보다 안정된 패스 설계가 가능하게 되었다. 본 연구의 결과를 실제 현장에 적용함으로써, 단선율 저감을 통한 생산공정의 안정화를 강화할 수 있을 것으로 사려된다.

## 후 기

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

## 참고문헌

1. Avitzur. B., Simchon. M., and Shi. J., "Wet Fine Wiredrawing with Slip," Steel Cord Technical Report, pp. 45 - 54, 1993.
2. Skolyszewski. A., Packo. M., "Back tension value in the fine wire drawing process," J. Mater. Proces. Technol., Vol. 80, pp. 380 - 387, 1998.
3. Geleji. A., "Die Berechnung der Krafte und des Arbeitsbedarfs bei der Formgebung im bildsamen Zustande der Metalle," Akamemie-Verlag, Budapest, 1995.
4. Geleji. A., "Buildsame Formung der Metalle in Rechnung und Versuch," Akademie-Verlag, Berlin.