

## 습식 다단 인발공정 해석 프로그램 개발

이상곤\* · 김병민\*\* · 김민안\*\*\* 박병권\*\*\*

# Development of Analysis Program for Multi-Pass Wet Wire Drawing Process

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

### Abstract

The production of fine wire through multi-pass wet wire drawing process would be impossible with no backtension at inlet of dies. Backtension is affected by many process parameters, such as dies reduction, coiling number of wire at capstan, machine constant, slip between wire and capstan, characteristic of lubricant and so on. Up to date, dies design and dies pass schedule of multi-pass wet wire drawing process have performed by trial and error of expert in the industrial field without consideration of quantitative relation among process variables. This study investigates the multi-pass wet wire drawing process considering the relation among process variables, such as dies reduction, coiling number of wire at capstan, machine constant, slip between wire and capstan, etc. And analysis program which can analyze many important process values(drawing force, backtension force, slip rate, slip velocity rate, etc) for die design and dies pass schedule of multi-pass wet wire drawing process was developed.

**Key Words** : Multi-Pass Wet Wire Drawing Process, Process Variables, Dies Design, Dies Pass Schedule, Analysis Program.

### 1. 서 론

최근 자동차 타이어의 보강재로 사용되고 있는 스틸코드(steel cord) 제품은 건식 인발(dry wire drawing)공정 후 습식 인발(wet wire drawing)공정을 거쳐, 최종 제품을 생산하는 연선(wire laying)공정을 거쳐 생산되어진다. 습식 인발 공정의 경우 일반적으로 1000m/min 이상의 고속에서 진행되기 때문에, 공정 중에 단선이 발생하

면 선재를 장입하기 위한 Down time의 증가로 인하여 생산 효율을 감소시켜 생산원가를 현저히 증가시키게 된다. 따라서, 인발공정시 발생하는 단선방지를 통한 생산성의 향상 및 공정의 안정화가 상당히 중요하다. 이를 위해서는 인발공정시 공정변수들이 미치는 영향평가 및 이를 통한 적절한 공정변수의 조합이 무엇보다 중요하다. 그러나, 현재까지 대부분의 습식 인발공정에 대한 공정변수들의 정량적인 영향 평가 및 이들의 영향을 고려

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

\*\*\* (주)효성 연강공장 강선연구소

한 다이스 및 다이스 스케줄은 거의 이루어지지 않고 있으며, 대부분 현장 숙련자들의 경험에 의존하여 다이스 및 다이스 패스 스케줄을 행하고 있는 실정이다.

습식 인발공정에서 선재를 인발하기 위한 인발력은 소재를 변형시키는데 필요한 힘, 소재와 다이스 접촉면에서의 마찰을 극복하기 위한 힘, 그리고 다이스 입구에서 인발방향과 반대방향으로 작용하는 역장력의 합으로 이루어져 있다. 특히, 다이스 입구에서 발생하는 인발력이 적절해야만이 안정적인 인발이 가능하다<sup>(1)</sup>.

본 연구에서는 습식 인발공정의 다이스 및 다이스 패스 스케줄을 위한 예비 연구로서, 습식 인발공정에 영향을 미치는 주요 공변변수인 다이스 감면율, 다이스 반각, 선재의 물성치, 윤활제 특성, 캡스탄에서의 선재의 권취수 등에 따른 습식 인발공정을 정량적으로 해석하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 습식 인발 공정 해석 프로그램을 개발하였으며, 개발한 프로그램을 토대로 실제 현장에서 적용하고 있는 습식 인발공정에 대한 해석을 수행하여, 인발력, 역장력, 슬립율, 슬립속도율 등을 예측하였다.

## 2. 습식 인발공정 이론

### 2.1 슬립율 및 슬립속도율

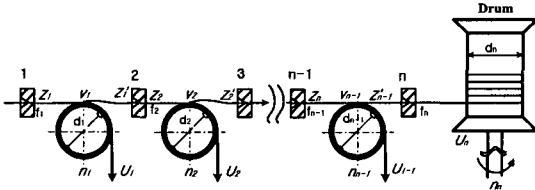


Fig. 1 Sensitivity of thickness

습식 인발공정의 경우 다이스 및 캡스탄이 윤활제 속에 잠긴 상태에서 작업이 이루어진다. Fig. 1에서와 같이 습식 인발공정의 경우 선재와 캡스탄 표면 사이에 마찰로 인하여 선재속도와 캡스탄 표면속도가 다르다. 이 속도 차를 슬립(slip)이라고 하며, 그 차이를 캡스탄의 속도에 대한 비로 나타낸 값을 슬립율(slip rate)이라고 한다. 슬립과 슬립율은 각각 다음의 식(1), (2)로 표현된다<sup>(2)</sup>.

$$S = U - v \quad (1)$$

$$S_{rate} = (U - v) / U \times 100 \quad (2)$$

S : 슬립,  $S_{rate}$  : 슬립율

U : 캡스탄 속도

v : 선재의 속도

슬립속도율(slip velocity rate)은 Fig. 1에서 보듯이 각 캡스탄에서의 슬립을 마지막 권취드럼의 속도에 대한 비로 나타낸 것을 말하며, 다음의 식(3)으로 표현된다<sup>(3)</sup>.

$$S_{vel} = (U - v) / U_n \times 100 \quad (3)$$

$S_{vel}$  : 슬립속도율

$U_n$  : 마지막 권취드럼의 속도

### 2.2 인발력 및 역장력의 계산

Fig. 2는 습식 인발공정 중에 발생하는 인발력과 역장력을 나타낸 것이다. Fig. 2와 같이 다이스 출구측에서는 선재를 인발하기 위한 인발력이 작용하게 되며, 다이스 입구측에서는 인발방향과 반대방향으로 역장력이 작용하게 된다. 본 연구에서는 습식 인발공정에서의 각 다이스의 출구측의 선재에 작용하는 인발력( $F_d$ )을 계산하기 위하여 다음의 A. Geleji의 식을 이용하였다<sup>(4)</sup>.

$$F_d = k_m(F + Q \cdot \mu_D) + 0.77 \cdot \alpha \cdot k_{fm} \cdot f_2 \quad (4)$$

$k_m$  : 선재의 평균변형저항

F :  $f_1 - f_2$  (다이스 입구와 출구의 단면적 차)

Q :  $F/\sin\alpha$  ( $\alpha$  : 다이스 반각)

$\mu_D$  : 선재와 다이스 표면 사이의 마찰계수

$k_{fm}$  : 선재의 평균 항복강도

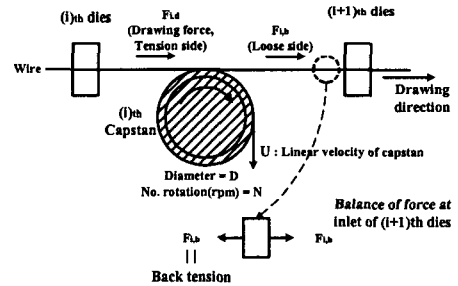


Fig. 2 Drawing and backtension force at the continuous dies

역장력은 습식 인발공정시 캡스탄의 표면속도와 선재의 속도 차이로 발생하는 슬립에 의하여 인발시 다이스 입구에서 인발방향과 반대방향으로 작용하는 힘이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 i번째 캡스탄의 전·후에 위치한 i번째와 i+1번째 다이스에 있어서 i번째 다이스의 출구측에서는 선재를 i번째 다이스를 통과시키기 위한 인발력이 작용하고 i+1번째 다이스의 입구측에서는 캡스탄의 슬립에 의한 역장력이 작용하게 된다. 다이스의 입구측에서 작용하는 역장력의 크기는 Eytelwein에 의해 식(5)와 같이 표현된다<sup>(4)</sup>. 식(5)에서 알 수 있듯이, 다이스

입구에서 발생하는 역장력은 이전 다이스 출구에서의 인발력, 캡스탄에서의 선재의 권취수 및 선재와 캡스탄 표면사이의 마찰계수에 영향을 받음을 알 수 있다.

$$F_{i+1,b} = \frac{1}{\exp(2\pi \times n_i \times \mu_{ci})} \cdot F_{i,d} \quad (5)$$

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

$n_i$  :  $i$ 번째 캡스탄에서의 선재의 권취수

$\mu_{ci}$  :  $i$ 번째 캡스탄에서 선재와의 마찰계수

$F_{i,d}$  :  $i$ 번째 다이스 출구에서의 인발력

### 3. 습식 인발공정 해석 프로그램

본 연구에서는 습식 인발공정의 인발력, 역장력, 소요 동력, 슬립율, 슬립속도를 등을 해석할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였다. Fig. 3은 개발한 프로그램의 순서도를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보듯이, 초기 선재의 물성치, 다이스 및 캡스탄의 입력 데이터에 의하여 첫 패스에 대한 인발력을 계산하게 되며, 계산된 인발력, 선재와 캡스탄 표면 사이의 마찰 특성 및 선재의 권취수에 의하여 다음 패스의 역장력을 산출하게 되며, 순차적으로 이후 패스에 대한 계산을 수행하게 된다.

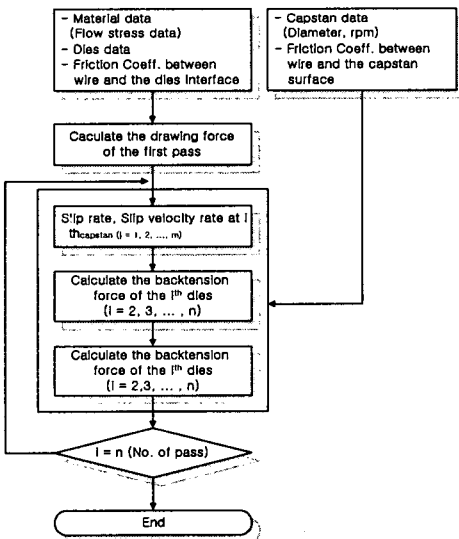


Fig. 3 Flow chart of multi-pass wet wire drawing process

해석 프로그램은 사용자의 편의를 위하여 GUI환경으로 데이터의 입력 및 수정, 그리고 결과의 확인이 가능하게 하였다.

## 4. 실제 공정에서의 적용

개발한 해석 프로그램을 이용하여 실제 현장에서 적용하고 있는 습식 인발공정에 대한 해석을 수행하였다. 해석에 적용한 공정은 초기 선재 직경 1.45mm에서 직경 0.25mm의 최종 선재를 생산하는 23패스 습식 인발공정이다.

### 4.1 소재 물성치

본 프로그램을 이용하여 실제 습식 인발공정에 적용하기 위하여 먼저 초기 선재에 대하여 인장시험을 실시하여, 소재의 유동응력 데이터를 구하였다. 초기 선재에 대한 유동응력식은 다음의 식(6)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 207.3 \epsilon^{-0.2308} [kg/mm^2] \quad (6)$$

### 4.2 윤활제의 마찰계수 평가

습식 인발공정시 선재와 다이스 접촉면 및 선재와 캡스탄표면 사이의 마찰계수를 평가하기 위하여 실제 공정에서 사용중인 선재, 다이스 그리고 캡스탄을 사용하여, 드로우벤치(draw bench)로 마찰계수를 평가하였다. Fig. 5에 선재와 캡스탄표면 사이의 마찰계수를 평가하는 시험장치의 계략도를 나타내었다. 선재와 캡스탄표면 사이의 마찰계수는 식(5)로부터 다음의 식(7)에 의하여 평가하였다.

$$\mu_c = \frac{\ln(T/P)}{2\pi \cdot n} \quad (7)$$

식(7)에서  $T$ 는 로드셀로 측정된 선재의 장력,  $P$ 는 역장력의 역할을 하는 무게추의 무게, 그리고  $n$ 은 캡스탄에서의 선재의 권취수를 나타낸다.

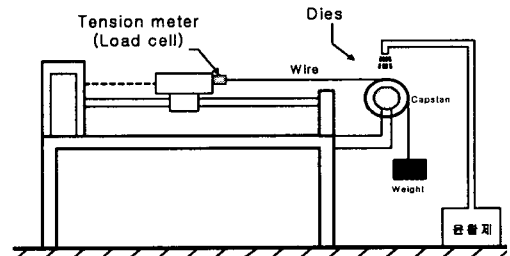


Fig. 4 Test machine for characteristics of lubricant

Fig. 5의 결과에서 알 수 있듯이 슬립이 증가할수록 마찰계수 값이 조금씩 증가하는 양상을 나타내고 있다.

## 5. 해석 결과 및 고찰

본 해석 프로그램을 이용하여 초기 선경 1.45mm에서 직경 0.25mm의 최종 선재를 생하는 23 패스 습식 인발 공정에 대한 해석결과는 다음과 같다. 먼저 Fig. 6은 해석을 수행한 공정에 대한 각 패스에서의 인발력과 다이 스 입구에서 작용하는 역장력의 크기를 나타낸 것이다.

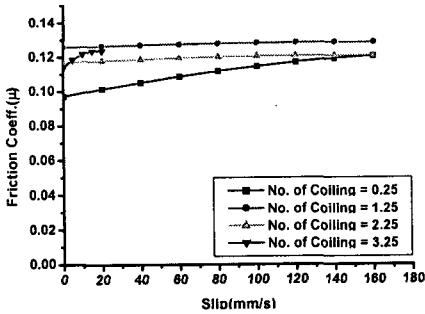


Fig. 5 Friction Coeff. between wire and capstan

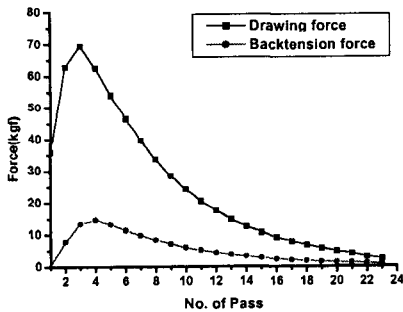


Fig. 6 Drawing & backtension force

Fig. 6에서 알 수 있듯이 인발력은 소재 직경이 상대적으로 큰 전반부 패스에서 높음을 알 수 있다. 또한, 역장력은 전반부 2패스 이후에 인발력의 약 24~25%로 거의 균일한 비율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 실제 습식 인발공정의 경우 적절한 역장력이 있어야 만이 단선을 방지하여, 안정적인 생산이 가능하다. 현재까지는 이러한 정략적인 해석은 거의 수행되지 않았으며, 현장의 숙련자들에 의하여 다이 스 스케줄이 이루어졌다.

Fig. 7은 각 패스에서의 슬립속도율과 슬립율을 나타내고 있다. Fig. 7에서 전반부 패스에서 캡스탄 및 선재의 절대 속도는 작지만, 슬립율은 후반부 패스보다 오히려 높게 측정됨을 알 수 있으며, 공정의 안정화를 위해서는 전반부 패스에서 슬립율을 30%이하로 유지할 필요가 있다<sup>(3)</sup>. 또한 슬립속도율은 전반부 패스에서 최적의 값인 3~8% 범위 미만의 값을 나타내고 있는데, 공정중의 단선율을 보다 낮추기 위해서는 슬립속도율을 3~8% 범위로 맞추기 위하여 패스 스케줄을 수정할 필요가 있

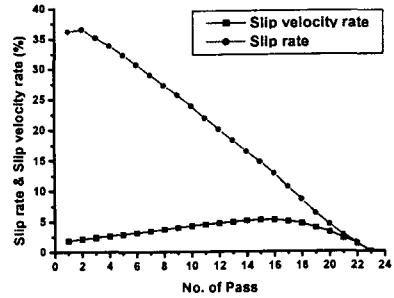


Fig. 7 Slip velocity rate & slip rate

## 5. 결론

습식 인발공정으로 세선을 생산하기 위해서는 반드시 적절한 슬립 및 역장력이 필요하며, 이를 위해서는 각 패스에서 적절한 공정변수의 조합을 이룰 수 있는 다이 스 및 다이 스 패스 스케줄이 요구된다. 그러나, 현재까지 대부분 시행착오를 통한 숙련자들의 경험에 의존하여 다이 스 및 다이 스 패스 스케줄이 이루어져 왔다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 시행착오를 줄여 보다 효율적인 공정변수의 선정 및 다이 스 스케줄을 위하여 습식 인발 공정의 정량적인 해석이 가능한 해석 프로그램을 개발하였으며, 개발된 해석 프로그램을 이용하여 실제 현장에서 적용하고 있는 습식 인발공정을 해석하였다. 그 결과 현재 공정의 문제점 파악 및 개선 사항을 평가할 수 있었으며, 향후 습식 인발공정의 개선을 위한 다이 스 및 다이 스 패스 스케줄의 수정 및 설계에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사려된다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 ERC를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Skolyszewski, A., Packo, M., 1999, "Back tension value in the fine wire drawing process", J. Mater. Proces. Technol., Vol. 80-81, pp. 380~387.
- (2) Teragna, P., August 1976, "Calculation of the basic parameters for "Slip" drawing machine", Wire J. pp. 66~72.
- (3) 日本國特許廳, 1977, "公開特許公報".
- (4) Geleji, A., "Bildsame Formung der Metalle in Rechnung und Versuch," Akademie-Verlag GmbH, Berlin.