

다단 습식 신선공정 해석 및 적용

이상곤¹ · 김병민[#]

Analysis of Multi-Pass Wet Wire Drawing Process and Its Application

S. K. Lee, B. M. Kim

(Received June 27, 2005)

Abstract

Multi-pass wet wire drawing process is used to produce fine wire in the industrial field. The production of fine wire through multi-pass wet wire drawing process with appropriate dies pass schedule would be impossible without understanding the relationship among many process parameters such as material properties, dies reduction, friction conditions, drawing speed etc. However, in the industrial field, dies pass schedule of multi-pass wet wire drawing process has been executed by trial and error of experts. This study investigated the relationship among many process parameters quantitatively to obtain the important process information for the appropriate pass schedule of multi-pass wet wire drawing process. Therefore, it is possible to predict the many important process parameters of multi-pass wet wire drawing process such as dies reduction, machine reduction, drawing force, backtension force, slip rate, slip velocity rate, power etc. The validity of the analyzed drawing force was verified by FE simulation and multi-pass wet wire drawing experiment. Also, pass redesign was performed based on the analyzed results, and the wire breakage between the original pass schedule and the redesigned pass schedule was compared through experiment.

Key Words : Multi-pass Wet Wire Drawing, Slip Rate, Slip Velocity Rate, Drawing Force, FE Simulation, Pass Redesign, Wet Wire Drawing Experiment

1. 서론

일반적으로 $\phi 1.0\text{mm}$ 이하의 세선(fine wire) 생산에 적용되는 다단 습식 신선공정은 1000m/min 이상의 고속으로 생산되고 있어 공정중에 단선이 발생하게 되면 생산효율이 저하되고, 생산비용이 증가되는 직접적인 원인이 된다. 따라서, 다단 습식 신선공정의 단선방지를 통한 생산 안정화는 매우 중요하다. 일반적으로 다단 습식 신선공정의 단선방지를 위해서는 적절한 다이스 패스 스케줄이 가장 중요하다. 이를 위해서는 다단 습식 신선

공정에 대한 공정해석이 필수적이며, 이를 통하여 공정변수들이 다단 습식 신선공정에 미치는 영향 파악이 선행되어야만 한다. 다단 습식 신선공정의 주요 공정변수는 초기 선재 재질, 다이스 감면율 및 반각, 캡스탄의 기계 감면율, 습식 윤활제의 윤활특성 등이다. 이들 공정변수의 최적 조합을 통한 다단 습식 신선공정의 안정화를 위해서는

이들 공정변수에 대한 정량적인 평가가 매우 중요하다. 현재까지 이러한 공정 변수들에 대한 많은 연구가 있었지만, 대부분이 개별적인 영향평가에 국한되었으며, 실제 작업 현장에서 유용하게

1. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
교신저자: 부산대학교 정밀경형 및 금형가공 연구소,
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

활용 가능한 데이터 확보에는 미흡하였다[1~4].

따라서, 본 연구에서는 효율적인 다단 습식 신선공정의 패스 스케줄 설정을 위하여, 다단 습식 신선공정의 주요 공정변수인 다이스 감면율, 기계 감면율, 슬립률, 슬립 속도율 등을 정량적으로 평가하기 위하여 다단 습식 신선공정에 대한 해석적 방법을 확립하였다. 해석 결과에 대한 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석 및 실제 다단 습식 신선 실험을 통하여 각 패스에서의 신선력을 비교하였다. 또한, 본 연구에서는 실제 현장에서 적용하고 있는 습식 신선공정에 대한 패스 재설계를 실시하고, 재설계된 패스에 대하여 습식 신선 실험을 통하여 선재의 단선율을 비교하였다.

2. 다단 습식 신선공정 기초 이론

2.1 신선력 및 역장력

습식 신선공정의 경우 건식 신선공정과 달리 다이 출구에서의 신선력 외에 다이 입구에서 신선방향과 반대방향으로 역장력이 존재한다[5]. 역장력은 다단 습식 신선공정 중 선재의 변형시 선재가 다이스에 가하는 압력을 낮추어 주기 때문에 세션 신선 시 반드시 역장력이 존재해야만 한다. 현재까지 역장력에 관한 몇몇 연구들이 진행되어 왔지만, 어느 정도의 역장력이 가장 최적의 값인지는 알 수 없다. Fig. 1 에 다단 습식 신선공정 시 다이 전·후에서 발생하는 신선력과 역장력을 나타내었다.

다이 출구에서 작용하는 신선력(Z_d)은 내부변형과 전단변형 그리고 마찰을 극복하기 위해 필요한 힘의 합이며[7], 본 연구에서는 A. Geleji 가 제안한 다음의 식(1)을 이용하였다[7].

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

α : 다이스 반각

k_m : 선재의 평균 변형저항

$F: f_1 - f_2$ (다이스 입구와 출구 단면적 차이)

Q : 선재와 다이스 접촉면적($F/\sin\alpha$)

μ_D : 선재와 다이스 사이의 마찰계수

k_{fm} : 선재의 평균 항복강도

역장력은 다단 습식 신선공정 시 캡스탄의 표면속도와 선재의 속도 차이로 인하여 발생하는 슬립에 의하여 다이 입구측에서 신선방향과 반대방향으로 발생한다. Fig. 1 에서 i 번째 캡스탄의 전·후에 위치한 i 번째와 $(i+1)$ 번째 다이에 있어서 i 번째 다이의 출구에서는 신선력이, $(i+1)$ 번째 다이의 입구에서는 신선 반대방향으로 역장력이 작용하게 된다. $(i+1)$ 번째 다이의 입구측에서 발생하는 역장력($Z_{i+1,b}$)은 EyrerWein이 제안한 다음의 식(2)로 구하였다[6].

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

$Z_{i+1,b}$: $(i+1)$ 번째 다이 입구에서의 역장력

n_i : i 번째 캡스탄에서의 선재의 권취수

μ_{ci} : i 번째 캡스탄에서의 선재와의 마찰계수

$Z_{i,d}$: i 번째 다이 출구에서의 총신선력

식(2)에서 역장력은 이전 다이의 신선력과 캡스탄에서의 선재의 권취수 및 마찰특성에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 다이 출구에서의 총신선력은 입구에서의 역장력과 출구에서의 신선력의 합이다.

2.2 기계 감면율

다단 습식 신선공정에서 선재를 잡아당기는 캡

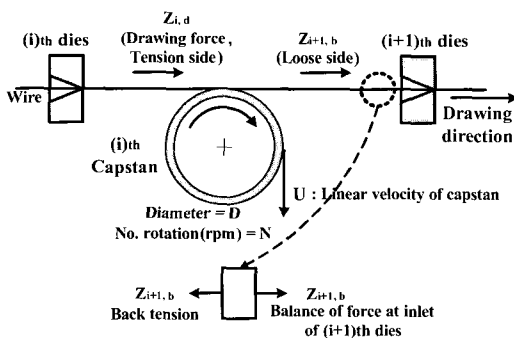


Fig. 1 Drawing and backtension force

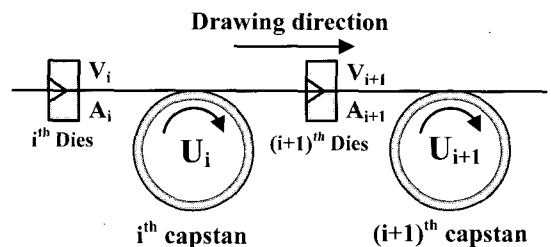


Fig. 2 Definition of machine reduction

스탄은 후반부 패스로 갈수록 그 속도가 빨라진다. 다이 감면율을 고려하여 기계 감면율이 적절히 설정되지 않을 경우, 신선 중 단선을 일으키는 원인이 된다. 일반적으로 실제 현장에서는 기계 감면율을 다이 감면율보다 2~3% 정도 낮게 설정하고 있다. Fig. 2 에서 i 번째 다이를 기준으로 전·후에 위치하는 캡스탄의 기계 감면율(K)은 다음의 식(3)으로 정의된다[8].

$$K_{i+1} = \frac{U_{i+1}}{U_i} \times 100[\%] \quad (3)$$

U_{i+1} : $(i+1)$ 번째 캡스탄의 속도

U_i : i 번째 캡스탄의 속도

2.3 슬립률과 슬립속도를

Fig. 3 과 같은 다단 습식 신선기의 경우 선재, 다이, 그리고 선재를 당기는 캡스탄이 윤활제 속에 잠겨진 상태에서 작업이 이루어지며, 캡스탄과 선재 사이에 마찰로 인하여 선재와 캡스탄 표면의 미끌림 현상인 슬립이 발생하게 된다. 이 속도차를 캡스탄의 속도에 대한 비율로 나타낸 것을 슬립률(S_{rate})이라고 하며, 식(4)와 같이 나타내어진다[8].

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

U_i : i 번째 단의 캡스탄 속도

v_i : i 번째 단의 선재 속도

다단 습식 신선공정의 경우 슬립양에 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.

슬립속도율(S_{vel})은 각 캡스탄에서의 슬립을 마지막 권취드럼의 속도에 대한 비로 나타낸 값을 말하며, 식(5)와 같이 나타내어진다.

$$S_{vel,i} = \frac{U_i - v_i}{U_n} \times 100[\%] \quad (5)$$

U_i : i 번째 단의 캡스탄 속도

v_i : i 번째 단의 선재 속도

U_n : 최종 권취드럼의 속도

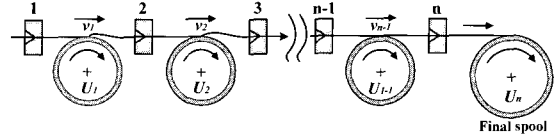


Fig. 3 Multi-pass wet wire drawing process

3. 실제 다단 습식 신선공정에 대한 해석

이상의 이론적 배경을 바탕으로 실제 현장에서 적용하고 있는 다단 습식 신선공정에 대한 해석을 수행하였다. 적용한 공정은 초기 선경 $\phi 1.15\text{mm}$ 에서 최종 선경 $\phi 0.185\text{mm}$ 의 고탄소강 선재를 생산하는 공정으로, 총감면율이 97.41%인 21 패스 공정이다. 모든 패스의 다이스 반각은 5° 로 일정하며, 각 캡스탄에서의 선재의 권취수는 2.5 회이다. Table 1 에 다단 습식 신선공정조건을 나타내었다.

Table 1 Wet wire drawing process conditions

Process conditions	Value
No. of pass	21
Semi dies angle	5°
No. of coiling on capstan	2.5
Final drawing speed	1100m/min

실제 공정에 대한 해석을 수행하기 위하여 먼저, 초기 선재인 고탄소강에 대한 물성치를 확보하였다. MTS 를 이용한 단축인장시험을 통하여 확보한 초기 선재의 유동응력식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 2194.5\bar{\epsilon}^{0.205} [MPa] \quad (6)$$

선재와 다이 및 선재와 캡스탄 표면에서의 마찰특성은 실제 현장에서 적용하고 있는 습식 신선용 윤활제에 대해 마찰시험을 통하여 구하였다[9]. Fig. 4 에 마찰시험 장치의 계략도를 나타내었다. 마찰시험 결과 선재와 다이 사이의 마찰계수(μ_D)는 0.11 이었다.

선재와 캡스탄 사이의 마찰계수는 캡스탄과 선재의 속도차(슬립), 그리고 캡스탄에 감겨 있는 선재의 권취수를 변화시켜 측정하였다[9]. Fig. 5 에 측정결과를 나타내었으며, 권취수가 증가할수록, 그리고 슬립이 증가할수록 마찰계수(μ_D)가 점차 증가하는 것을 알 수 있었다.

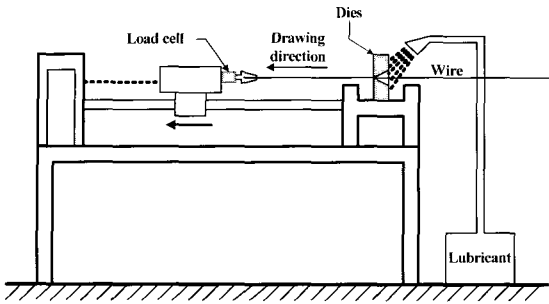


Fig. 4 Test machine for friction coefficient between wire and die

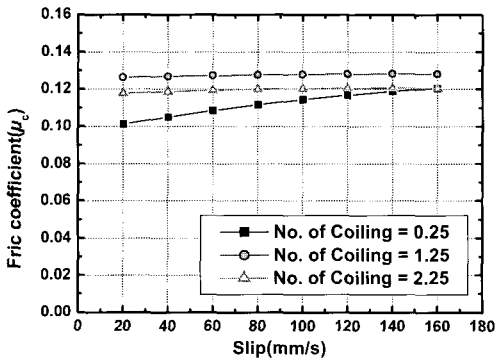


Fig. 5 Friction coefficient between wire and capstan

4. 다단 습식 신선공정 해석 결과

Fig. 6 은 해석 적용 다단 습식 신선공정에 대한 다이스 감면율과 기계 감면율을 나타낸 것이다. 다이스 감면율은 약 14~15%이고, 기계 감면율은 다이스 감면율보다 약 2% 정도 낮은 13%를 나타내고 있다. 다단 습식 신선공정의 경우 슬립을 고려하여 일반적으로 기계 감면율을 다이스 감면율보다 약 2~3% 낮게 설정하고 있다.

Fig. 7 은 해석 적용 습식 신선공정에 대한 총신선력 및 역장력을 나타낸 것이다. 총신선력과 역장력은 선재의 직경이 굵은 전반부 패스에서 높게 나타났으며, 패스가 진행됨에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 8 은 각 캡스탄에서의 슬립률을 나타낸 것이다. 슬립률은 전반부 패스에서 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 실제 선재의 신선속도는 후반부 패스에서 더 빠르지만, 선재와 캡스탄의 상대적인 속도 차이는 전반부 패스가 더 크기 때문이다.

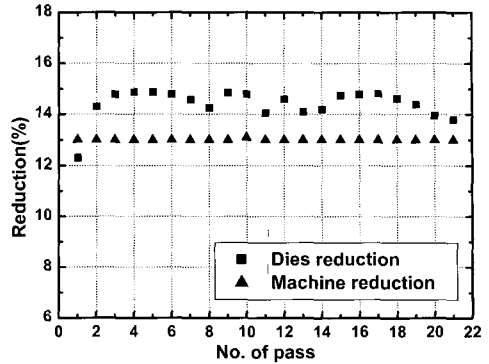


Fig. 6 Dies and machine reduction at each pass

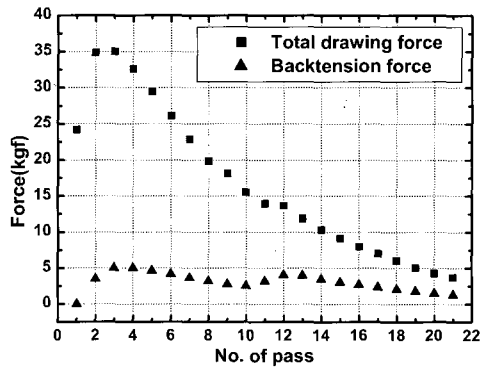


Fig. 7 Drawing and backtension force at each pass

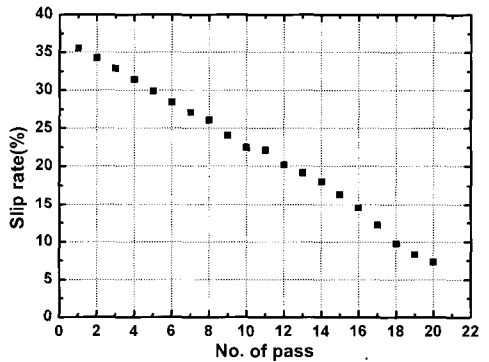


Fig. 8 Slip rate at each pass

실제 다단 습식 신선공정의 안정화를 위해서는 각 패스에서의 슬립률을 약 30%이하로 유지하는 것이 바람직하기 때문에 해석에 적용한 다단 습식 신선공정의 경우 패스 재설계를 통한 슬립률 조절이 요구됨을 알 수 있다[10].

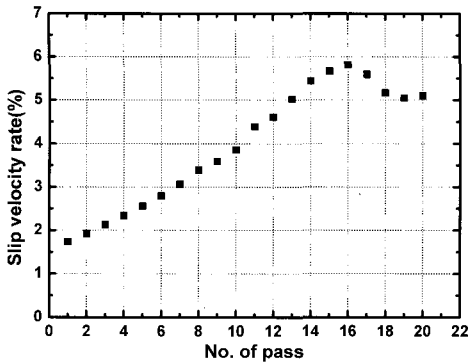


Fig. 9 Slip velocity rate at each pass

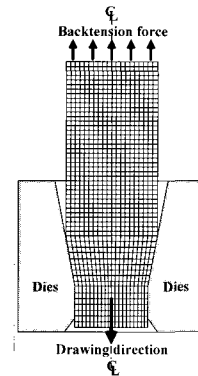


Fig. 10 Mesh of FE analysis

Fig. 9 는 각 캡스탄에서의 슬립속도율을 나타낸 것이다. 슬립속도율은 전반부에서 증가하는 양상을 보이다 중반부 패스를 지나 최대 값을 나타낸 후 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다. 다단 습식 신선공정에서 신선공정 중 선재의 단선율을 줄이기 위해서는 각 캡스탄의 슬립속도율을 3~8% 범위로 유지할 필요가 있다[10]. 따라서 본 연구에서 적용한 다단 습식 신선공정의 경우 신선공정의 안정화를 위해 공정변수 재설정을 통한 슬립속도를 조절이 필요함을 알 수 있다.

5. 유한요소 해석 및 습식 신선시험을 통한 신선력 평가

본 연구에서는 실제 다단 습식 신선공정 해석의 타당성을 확인하기 위하여 해석 적용 공정에 대한 유한요소 해석 및 실제 습식 신선시험을 통하여 각 패스에서의 총신선력을 비교하였다.

5.1 다단 습식 신선공정 유한요소 해석

Fig.10 에 신선공정 유한요소 해석을 위한 요소계를 나타내었다. 해석은 상용유한요소 해석 S/W 인 DEFORM-2D[11]를 이용하였으며, 각 패스에 대한 해석을 수행하여 총신선력을 평가하였다.

5.2 습식 신선 실험을 통한 신선력 평가

이상의 이론적 해석 및 유한요소해석에 의한 총신선력을 실제 다단 습식 신선공정 시 다이 출구부에 로드셀(load cell)을 부착하여 측정된 총신선력과 비교하였다. Fig. 11 에 로드셀이 장착된 다단 습식 신선기를 나타내었다. 로드셀은 Fig.11 에서 보듯이 다이의 출구측에 설치하였으며, 신선

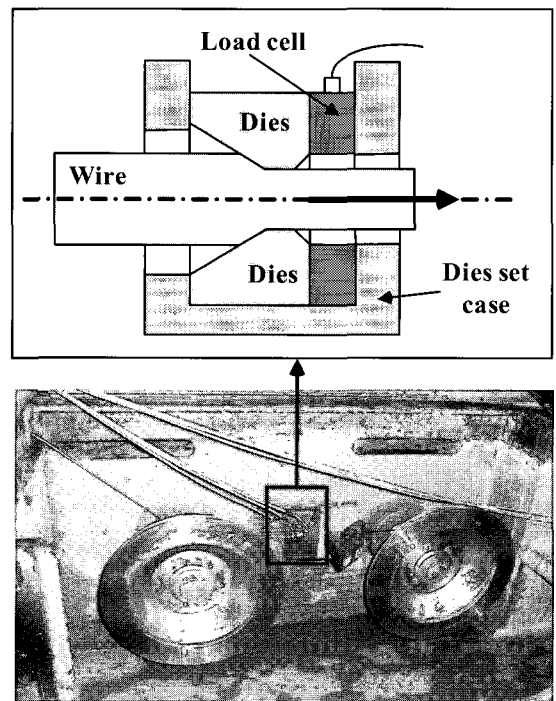


Fig.11 Schematic diagram of load cell

시 다이에 가해지는 하중으로 총신선력을 구하였다. 실제 다단 습식 신선기의 공간 제약으로 인하여 1, 3, 5, 11 그리고 13 번째 다이의 출구측에 로드셀을 장착하여 그 측정하중을 해석적 방법 및 유한요소해석을 통한 총신선력과 비교하였다.

Fig. 12 는 해석적 방법 및 유한요소 해석에 의한 각 패스에서의 총신선력과 실제 다단 습식 신선공정 중에 측정된 총신선력을 함께 나타낸 것이다. Fig. 12 의 결과에서 알 수 있듯이 세 경우의

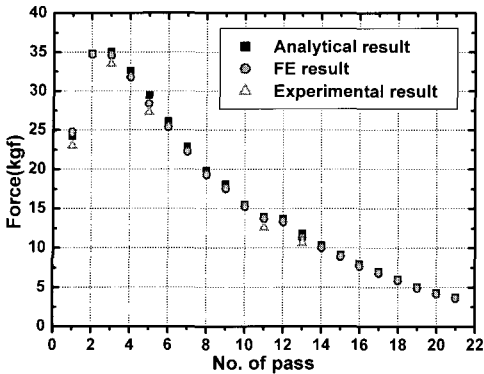


Fig.12 Comparison of drawing forces

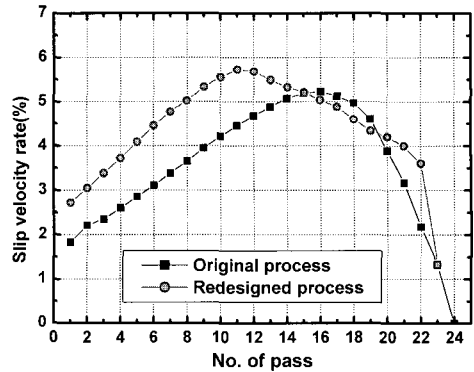


Fig.14 Comparison of slip velocity rate between original and redesigned process

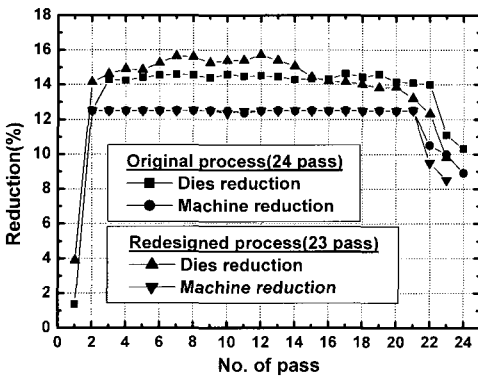


Fig.13 Comparison of Dies and machine reduction between original and redesigned process

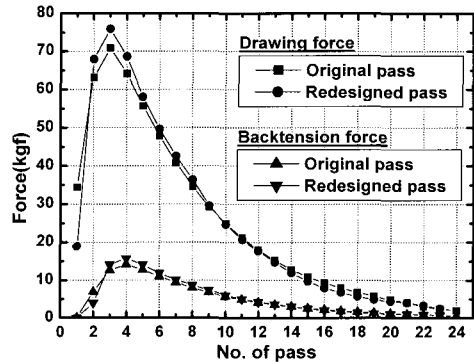


Fig.15 Comparison of force between original and redesigned process

충신선력이 잘 일치함을 알 수 있다.

6. 현장 적용 공정에 대한 패스 재설계

이상의 해석결과를 바탕으로 본 연구에서는 현장에서 적용하고 있는 초기 선경 $\phi 1.50\text{mm}$ 에서 최종 선경 $\phi 0.260\text{mm}$ 의 고탄소강 선재 생산을 위한 24 패스 습식 신선공정에 대하여 다이스 감면율을 조절하여 각 패스의 슬립속도율을 3~8%로 재설정하였다. 다이 반각은 5°로 일정하며, 총단면 감소율은 96.99%이다. 재설계된 공정에 대하여 습식 신선 시험을 실시하여 공정 중에 발생하는 단선을 및 생산량 등을 기존 공정과 비교하였다. Fig. 13 에 기존공정 및 재설계된 공정에 대한 다이스 감면율과 기계 감면율을 나타내었다. 재설계된 공정의 경우 전반부의 다이스 감면율이 기존 공정 보다 높아져 패스 수가 24 패스에서 23 패스로 감소하였다.

Fig.14는 기존공정 및 재설계된 공정에 대한 슬립속도율을 나타낸 것이다. 재설계된 공정의 경우 거의 모든 패스에서 슬립속도율이 3~8% 범위에 존재함을 알 수 있다.

Fig.15는 기존 공정과 재설계된 공정에 대한 신선력 및 역장력을 비교한 것이다. 재설계된 공정의 경우 전반부 패스의 감면율 증가로 인하여 신선력 및 역장력이 기존 공정에 비해 다소 상승하는 것을 알 수 있다.

Table 2 는 습식 신선 실험 결과를 나타낸 것이다. 실험은 1 주일 동안 실시하였으며, 기존 공정과 재설계된 공정에 대한 단선율, 다이스 개당 생산량, 그리고 선재의 인장강도(TS)를 평가하였다. 결과에서 알 수 있듯이 재설계된 공정의 경우 실험기간 1 주일 동안 단선이 발생하지 않았으며, 이로 인하여 다이스 개당 생산량도 약 40% 정도 향상 되었다. 인장강도 역시 기존 공정 대비 거의

Table 2 Result of wet wire drawing experiment

	Original	Redesigned	Remark
Breakage (times/ton)	0.11	No breakage	
Productivity per die(kg/EA)	177.9	250.0	40%↑
TS(kg/mm ²)	310.2	312.6	equal

동등수준을 확보할 수 있었다.

7. 결론

본 연구에서는 다단 습식 신선공정에 있어서 해석적인 방법을 통하여 주요 공정변수들을 정량적으로 평가하였다. 이를 통하여 실제 현장에서 적용하고 있는 습식 신선공정들에 대한 해석 및 단선을 저감을 위한 패스 재설계를 수행하였다. 이상의 연구를 통하여 다음의 결과를 도출하였다.

(1) 세선 생산을 위한 다단 습식 신선공정의 정량적인 해석을 통하여 패스 스케줄 설정 시 중요하게 고려되는 슬립율, 슬립속도율, 총신선력을 등을 예측할 수 있었다.

(2) 초기 선경 $\phi 1.15\text{mm}$ 에서 최종 선경 $\phi 0.185\text{mm}$ 의 고탄소강 선재를 생산하는 21패스 공정에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과 다이스 감면율은 약 14~15%, 기계 감면율은 다이스 감면율보다 약 2%정도 낮은 13%를 나타내었다.

(3) 해석 결과 전반부 패스에서 슬립률이 30%를 초과하며 슬립속도율 또한 3~8%를 벗어나고 있다. 따라서 단선을 저하를 통한 공정 안정화를 위해서 패스를 재설계할 필요가 있음을 알 수 있다.

(4) 해석적 방법의 타당성을 검증하기 위해 유한요소 해석을 수행한 결과 각 패스에서의 총신선력이 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한, 실공정에 대하여 1, 3, 5, 11, 그리고 13 번째 패스의 다이 출구부에 로드셀을 부착하여 실제 총신선력을 측정된 결과 해석적 방법 및 유한요소 해석으로 구한 총신선력과 잘 일치하였다.

(5) 초기 선경 $\phi 1.50\text{mm}$ 에서 최종 선경 $\phi 0.260\text{mm}$ 의 고탄소강을 생산하는 24 패스 습식 신선공정에 대하여 슬립속도율을 적용하여 23 패스로 재설계하였다. 재설계된 23 패스공정에 대하여 1 주일간 습식 신선 실험을 수행한 결과 공정중에 단선이 발생하지 않았다. 또한, 선재의 다이스 개당

생산량도 약 40%정도 향상되었으며, 인장강도도 동등 수준을 유지하였다.

이상의 연구결과에서 현장 작업자의 노하우에 의해 패스 설계가 이루어지고 있는 다단 습식 신선공정에 대한 정량적인 해석이 가능하게 되었으며, 이를 통하여 다단 습식 신선공정의 패스 설계를 보다 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] L. Sadok, M. Packo, A. Skolyszewski, M. Ruminski, 1992, Influence of the shape of the die on the field of strains in the drawing process, J. Mat. Proce. Tech., Vol. 34, pp. 381~388.
- [2] H. B. Campos, P. R. Cetlin, 1977, The influence of die semi-angle and of the coefficient of friction on the uniform tensile elongation of drawn copper bars, J. Mat. Proce. Tech., Vol. 80-81, pp. 388~391.
- [3] L. Lnzarotto, L. Dubar, A. Dubio, P. Ravassard, J. Oudin, 1997, Identification of coulomb's friction coefficient in real conditions applied to a wire drawing process, WEAR, Vol. 211, pp. 54~63.
- [4] 김동환, 김동진, 김병민, 인공신경망을 이용한 다단 인발 공정 설계, 한국소성가공학회지, 제 7 권 2 호, pp. 127~138.
- [5] A. Skolyszewski, M. Packi, 1998, Back tension value in the fine wire drawing process, J. Mat. Proce. Tech., Vol. 80-81, pp. 380~387.
- [6] A. Geleji, Bildsame Formug der Metalle in Rechnung und Versuch, Akademi-Verlag, GmbH, Berlin.
- [7] A. Geleji, 1995, Die Berechnung der Krafte und des Arbeitsbedrafts bei Formgebung im Bildsame Zustande der Metalle, Akademi-Verlag, Budapest.
- [8] P. Teragna, 1976, Calculation of the basic parameters for "Slip" drawing machine, Wire J., pp. 66~72.
- [9] 이상곤, 김민안, 김병민, 2002, 습식 신선공정의 단선을 저감을 위한 패스 재설계, 한국소성가공학회지 2002 년도 압출 및 인발가공 심포지엄, pp. 73~77.
- [10] Japan Patent Office, 1997, Patent No. 9-24412, Japan.
- [11] SFTC, 1995, DEFORMTM-2D.