

Steel Cord 생산을 위한 초고속 습식 신선 패스 설계

황원호¹ · 이상곤¹ · 김병민[#] · 고우식²

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

Won Ho Hwang, Sang Gon Lee, Byung Min Kim, Woo Shick Ko

(Received September 14, 2005)

Abstract

High-speed multi-pass wet wire drawing has become very common for production of high-carbon steel cord because of the increase in customer demand and production rates in real industrial fields. Although, the wet wire drawing process is performed at a high speed usually above 1000m/min, greater speed is required to improve productivity. However, in the high-carbon steel wire drawing process, the wire temperature rises greatly as the drawing speed increase. The excessive temperature rise makes the wire more brittle and finally leads to wire breakage. In this study, the variations in wire temperature during the multi-pass wet wire drawing process were investigated. A multi-pass wet wire drawing process with 21 passes, which is used to produce steel cord, was redesigned by considering the increase in temperature. Through a wet wire drawing experiment, it was possible to increase the maximum final drawing speed to 2000m/min.

Key Words : Wet Drawing, Steel Cord, Embrittlement, Wire Temperature, Multi-pass Wire Drawing Process, Pass Schedule

1. 서 론

자동차 타이어의 보강재로 사용되고 있는 스틸 코드(Steel cord) 제품은 신선 속도가 1000m/min 이상인 고속에서 다단 습식 신선 공정으로 생산되고 있으며, 자동차 타이어 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 강선의 온도 상승에 따른 강선의 취화(Embrittlement)에 의해 스틸코드 제품의 품질이 저하되거나 습식 신선 공정 중 단선의 발생 빈도가 높아지며, 신선

속도 증가와 다이스와 강선의 계면에서의 온도 상승으로 인한 다이스 마멸량이 증가하게 되어 다이스 교체주기가 짧아지게 되는 문제가 발생하게 된다. 그러므로 스틸코드 제품의 생산성 향상을 위하여 신선 속도만을 증가시킬 경우 신선 공정 중 단선으로 인한 제품의 생산효율이 저하되고 생산 비용이 현저히 증가하게 되며 양질의 제품을 얻기도 힘들다. 다이스의 교체주기는 다이 재질을 변경하여 문제를 해결할 수 있다. 그러나 스틸코드의 재료로 사용되는 고탄소강 신선의 경우에는 강선의 온도 상승이 클수록 강선 내부의 탄소와 질소의 확산이 빠르게 진행됨으로써 전위의 이동이 어렵게 되어 강선의 취화로 인해 신선

1. 부산대학교 정밀기계공학과

2. ㈜효성 중공업연구소

교신저자 : 부산대학교 기계공학부

E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

공정 중 단선 발생 가능성이 더욱 높아진다. 따라서 고탄소강의 고속 다단 습식 신선 공정에서 강선의 취화에 의한 단선을 방지하고, 최종 제품의 기계적 성질을 향상시키기 위해서는 신선 공정 중 강선의 온도 상승을 최대한 억제할 필요가 있다[1~3].

신선 공정에서의 온도 상승에 관한 연구는 처음에 Siebel과 Kobitzsch에 의해 시작되었다[3]. 이 연구에서는 단위 체적당의 일과 마찰 일이 모두 열로 변환된다고 가정하였고, 다이와 소재 사이의 접촉면에서 발생된 열의 일부가 강선으로 열전달된다고 가정하여 신선 후의 강선의 온도를 계산하였다. Yukio 등은 Siebel 등이 제시한 일차원 모델을 개선하여 그 적용 범위를 확장하였다[5]. 이들은 축대칭의 열전달 방정식을 이용하여 재료에서 다이로의 열전달을 고려하여, 일차원 모델과 유한요소 해석을 통하여 그 결과를 서로 비교하였다.

그러나 지금까지의 강선 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 강선이 권취되고 그 다음 다이를 통과할 때까지의 강선의 온도 계산 방법에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 다단 신선 공정에서의 강선 온도 예측에 관한 연구를 수행하였으며, 자동차 타이어의 보강재로 사용되고 있는 스틸코드 제품의 생산성을 높이기 위해 스틸코드 제조 공정 중의 하나인 다단 습식 신선 공정에서 강선 온도 예측 결과를 이용하여 기존 신선 속도 1100m/min 을 81.8% 향상 시킨 신선 속도 2000m/min 의 초고속 습식 신선 패스를 설계하였다.

2. 강선의 온도 예측 기법

2.1 강선의 온도 상승

다단 습식 신선 공정 시 강선의 온도 상승으로 인한 강선의 취화 및 단선을 방지하기 위해서는 강선의 온도변화를 정확하게 계산하여 제어하는 것이 필요하다. 공정변수를 적절히 선정하고 신선 공정의 패스를 재설계하여 강선의 온도를 제어할 수 있다면, 강선의 온도 상승에 의해 발생하는 단선을 방지할 수 있다.

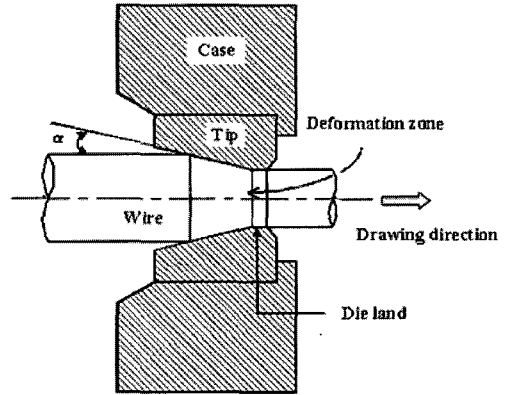


Fig. 1 Schematic cross-sectional view of die

Fig. 1은 강선이 신선 다이를 통과하고 있는 소성변형 중인 강선의 개략도를 보여주고 있다. 신선 다이를 통과하는 강선의 보유 열량은 체적변형과 내부전단 변형과 마찰에 의해 발생된 열량과 같게 되며, 다이 출구에서의 강선의 평균 온도는 다음의 식 (1)과 같이 유도된다[6].

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

여기서, T_{out} 은 다이 출구에서의 강선 온도, T_{in} 은 다이 입구에서의 강선 온도, A 는 열의 일당량, f_2 는 다이 출구에서의 강선의 단면적, ρ 는 강선의 밀도, c 는 강선의 비열, F 는 다이 입구와 출구에서 강선의 단면적 차이, k_m 은 변형중의 강선 내부의 평균 변형 저항, α 는 다이 반각, k_{fm} 은 변형 전후의 강선의 평균 항복 강도, m 은 열기여율, Q 는 마찰면적, μ 는 마찰 계수이다.

습식 신선 공정 중 다이와 강선의 마찰에 의해 발생한 열은 강선과 다이로 전달된다. 식 (1)에서 m ($0 \leq m \leq 1$)은 다이와 강선의 마찰로 인해 발생한 열이 강선으로 전달 되는 정도를 나타내는 열기여율(Heat partition coefficient)이다. 본 연구에서는 윤활유 속에서 공정이 진행되는 습식 신선 공정 이므로 윤활유에 의한 다이의 냉각 효과를 고려하여 열기여율의 값을 0.6으로 결정하였다. 그리고 마찰 계수 μ 는 평판마찰시험을 통하여 얻은 0.05을 사용하였다.

2.2 신선 다이 통과 후 강선의 온도 강하

습식 신선 공정은 연속적으로 이루어지며 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 n 번째 다이와 n+1 번째 다이 사이에는 강선을 잡아당겨 신선을 행하는 동력원의 역할과 n 번째 다이에서 변형 시에 상승한 강선의 온도를 낮추는데 필요한 냉각시간을 확보 해주는 역할을 동시에 하는 캡스탄이 설치되어 있다.

강선의 온도는 Fig. 2 와 같이 다이를 통과한 후 다음 다이 입구까지 윤활유와의 대류에 의한 열 전달로 인해 감소하게 된다. 강선이 윤활유에 노출되어 있는 동안 강선의 온도 강하를 예측하기 위해서 강선의 미소면적이 시간에 따라 이동하는 동안의 온도 변화를 고찰하였다. 그리고 연속 신선 공정에서는 Fig. 2 와 같이 다이 출구에서 다음 다이 입구까지의 공정이 단단으로 동일하게 반복 되기 때문에 본 연구에서는 이 구간을 냉각영역 (Cooling zone)이라 가정하였다.

강선이 다이를 통과한 후 다음 다이 입구까지 강하된 온도의 계산식은 다음 식 (2)와 같이 유도 된다.

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

여기서, T_{lub} 는 윤활유의 온도, h_{lub} 는 윤활유와 강선 사이의 대류 열전달 계수, d 는 강선의 직경, t 는 강선이 윤활유에 노출되어 있는 시간이다. 본 연구에서는 h_{lub} 를 45°C에서 물의 대류 열전달 계수로 가정하여 $0.005 W/mm^2 \cdot ^\circ C$, 윤활유 온도는 45°C로 결정하였다.

3. 다단 신선 공정의 강선 온도해석

3.1 기존 신선 공정의 강선 온도해석

해석에 적용한 기존 습식 신선 공정은 초기 강선 직경 1.150 mm 에서 최종 강선 직경 0.192 mm 의 21 단 습식 다단 신선 공정이다. 본 연구에서는 실제 습식 다단 신선 공정에 대한 강선 온도 해석을 수행하기 위하여 먼저 초기 강선에 대한 물성 시험을 수행하였다. 강선은 AISI 1072 강이며, 인장 시험을 통해 구한 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

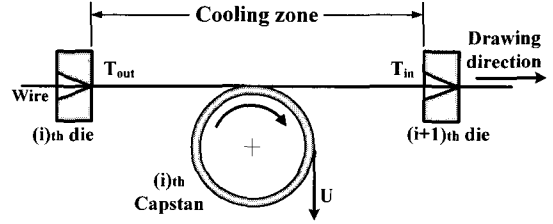


Fig. 2 Schematic representation of multi-stage wire drawing machine

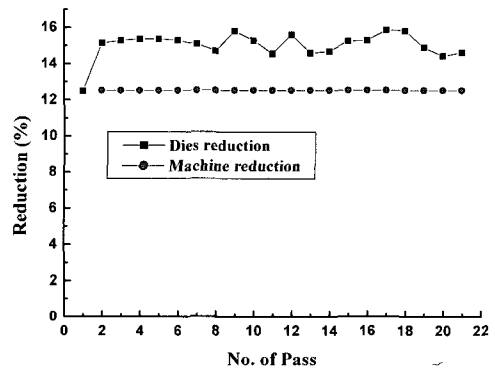


Fig. 3 Dies reduction and Machine reduction on 21dies machine

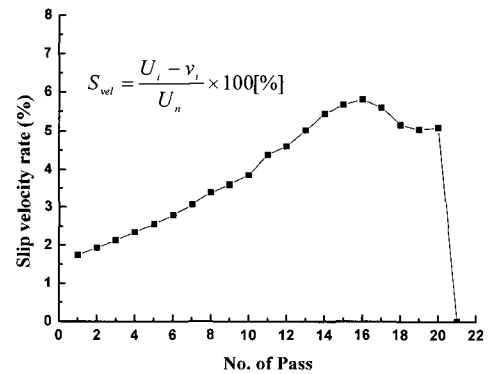


Fig. 4 Slip velocity rate on 21dies machine

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

Fig. 3 은 해석에 적용한 기존 습식 신선 공정의 다이스 및 기계감면율을 나타낸 것이다. 평균 다이스 감면율은 약 15.69%이고, 기계 감면율은 약 12.53%인 등감면율 타입의 패스이다.

Fig. 4 는 각 패스에서 슬립 속도율을 나타낸 것이다. 해석에 적용한 기존 공정의 경우 모든 패스에서 다이 반각은 5°로 일정하며, 슬립 속도율은 1.74~5.81% 사이의 값을 가진다. Fig. 4 에서 U_i 는 i 번째 패스의 캡스탄 표면 속도, v_i 는 i 번째 패스의 강선 속도, U_n 는 마지막 권취 드럼의 표면 속도이다($U_n = 1100\text{m/min}$).

위에서 제시된 신선 속도가 1100m/min 인 기존의 다단 습식 신선 공정의 각 패스에서 강선 온도를 예측하기 위해 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 강선 온도를 계산하였고, Fig. 5 에 각 패에서의 강선 온도를 계산한 결과를 나타내었다. Fig. 5 에서 등감면을 타입의 패스에서는 패스가 진행됨에 따라서 강선의 온도는 계속해서 상승하게 되어 최고 236.95℃까지 상승하는 것을 알 수 있다.

다이를 통과하면서 상승한 강선의 온도는 윤활유에 의해 빠르게 강하하게 된다. 그러나 AISI

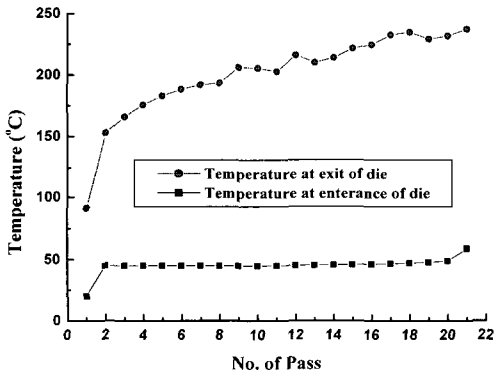


Fig. 5 Wire temperature on 21dies machine at Wire speed 1100m/min

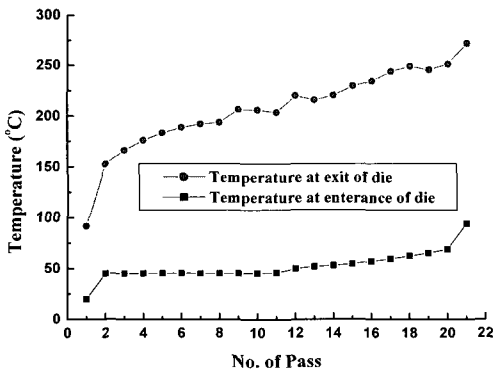


Fig. 6 Wire temperature on 21dies machine at Wire speed 2000m/min

1072 강은 180℃ 이상의 온도에서 취화 현상이 일어나게 되므로, 신선 공정에 의해 강선의 온도가 높게 나타날수록 강선은 180℃ 이상의 온도에서 오래 머물게 되어 취화 현상이 더 많이 일어나게 된다. 결과적으로, 신선 공정 중 강선의 온도가 높게 나타날수록 최종 강선의 품질이 저하되거나 신선 공정 중 단선발생 가능성이 높아지게 된다.

Fig. 6은 스틸코드 제품의 생산성을 향상 시키기 위해서 기존의 다단 습식 신선 공정에서 단순히 신선 속도만 2000m/min 으로 높였을 경우의 강선 온도 예측 결과이며, 최고 271.91℃까지 강선 온도가 상승하게 된다. 이 결과에서 강선의 온도는 다이를 통과한 후 다음 다이입구에서 윤활유 온도까지 충분히 냉각되지 못함을 알 수 있다. 신선 중 강선이 충분히 냉각되지 못하게 되면, 패스가 진행될수록 강선의 온도는 계속해서 상승하게 되어 강선의 급격한 취화로 인해 신선 공정 중 단선이 발생하게 된다. 그러므로 신선 공정 중 강선의 온도가 높게 나타나는 것을 방지하기 위해서는 다이를 통과한 후 다음 다이의 입구까지 강선의 온도가 윤활유 온도까지 충분히 냉각될 수 있도록 다단 습식 신선 패스를 설계해야 한다.

실공정에서도 기존의 다단 습식 신선 공정에서 신선 속도만을 높여줄 경우 강선의 온도 상승에 의한 강선의 취화 현상에 의해 신선 공정 중 단선이 발생하여 스틸코드 제품의 생산성을 향상시키는 것이 불가능하였다.

3.2 재설계된 신선 공정의 강선 온도해석

위의 해석결과들을 토대로 강선의 온도가 높게 나타나는 것을 방지하기 위한 패스 재설계를 수행하였다. 강선이 다이를 통과할 때 각 패스에서의 소성변형에 의한 발열량을 줄이기 위해 패스 수를 21 패스에서 27 패스로 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 Fig. 7 과 같이 슬립 속도율을 5%로 고정하여 기계감면율을 결정하였다[7~9].

Fig. 8 은 재설계된 습식 신선 공정의 다이스 및

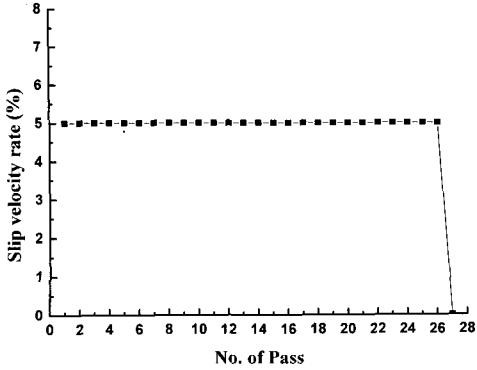


Fig. 7 Slip velocity rate of redesigned pass

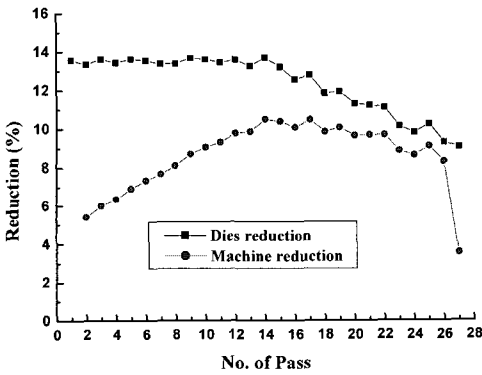


Fig. 8 Dies reduction and Machine reduction of redesigned pass

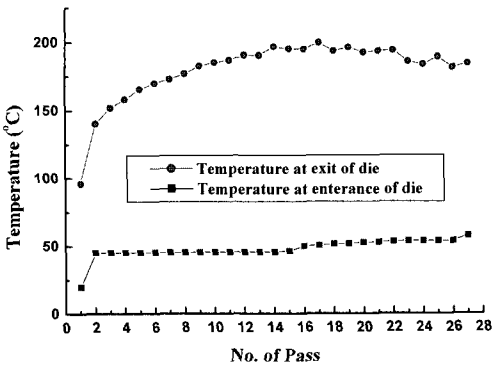


Fig. 9 Wire temperature of redesigned pass at Wire speed 2000m/min

기계감면율을 나타낸 것이다. 전반부 패스의 다이 스 감면율은 등감면율 타입의 패스를 적용하였고, 후반부 패스의 다이 스 감면율은 테이퍼 타입의

Table 1 Comparison between existing and redesigned pass schedule

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

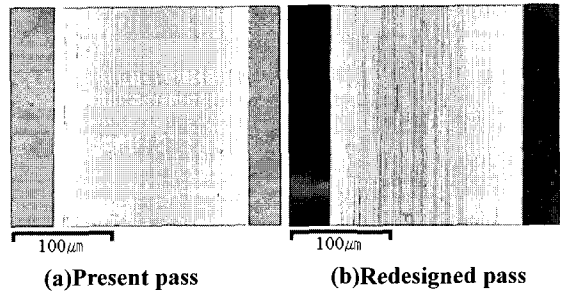


Fig. 10 Electron image of wire surface after drawing process

패스를 적용하였다.

후반부 패스에서 등감면율을 적용할 경우 강선의 온도가 계속해서 상승하게 되므로 강선의 온도가 높아지는 것을 억제하기 위해서 후반부 패스에서 테이퍼 타입의 감면율을 적용하였다.

Fig. 9는 재설계된 다단 습식 신선 공정의 신선 속도 2000m/min에서 각 패스의 강선 온도를 예측한 결과이다. 이 결과에서 가장 높은 강선의 온도는 194.33℃로 기존 다단 습식 신선 공정에 비해 매우 안정적으로 나타났다. 재설계된 다단 습식 신선 공정의 경우 전반부 패스에서 강선의 온도는 계속해서 상승하다가 후반부 패스에서는 유효 유 온도까지 충분히 냉각되며, 테이퍼 타입 다이 스 감면율의 적용에 의해 계속해서 상승하지 않는다. 그러므로 재설계된 다단 습식 신선 공정의 경우 신선 공정 중 강선의 취화에 의한 단선 발생 가능성은 매우 낮아져 초고속의 신선 속도에서도 안정적인 신선 공정이 가능할 것이다.

4. 재설계된 습식 신선 패스 검증

재설계된 다단 습식 신선 패스에 대한 시험을 수행하였고, 신선된 제품의 품질을 평가하기 위한

시험편은 목표가동 신선 속도(2000m/min) 상태에서 5,000m 이상의 구간에서 채취하였다. 시험 중 Cuppy 단선은 발생하지 않았으며, 신선 제품의 품질은 강선의 직경, 강선의 강도(TS), 염회(Twisting), 표면 거칠기(Surface Roughness), 델라미네이션(Delamination)의 발생 유무 등으로 평가하였다.

Table 1 에 재설계된 다단 습식 신선 패스와 기존패스에 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. Fig. 10 에서 기존의 21 단 습식 신선 공정과 재설계된 27 단 습식 신선 공정에 의해 생산된 최종 제품의 양호한 표면 상태를 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 제품의 생산성을 결정하는 신선 속도를 증가시키기 위해서 먼저 다단 습식 신선 공정 중의 강선 온도를 예측하였고, 그 결과를 이용하여 기존의 다단 습식 신선 패스를 재설계하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 유도된 강선 온도 계산식을 이용하여 다단 습식 신선 공정 중의 강선 온도 변화를 예측하였다.

(2) 2000m/min 의 초고속 신선 공정에서는 후반부 패스에서 선속이 매우 빨라져 강선 온도가 윤활유 온도까지 충분히 냉각되지 못하는 현상이 발생하게 된다.

(3) 기존 21 단의 등감면을 타입에서 신선 속도가 2000m/min 인 신선 공정은 패스가 진행됨에 따라서 강선의 온도가 계속해서 상승하게 되고, 강선의 취화 현상에 의해 단선이 발생하여 신선 공정이 불가능하였다.

(4) 신선 속도 2000m/min 의 재설계된 27 단 습식 신선 공정에서는 단선율을 줄이기 위해서 다이 반각을 4°로 줄였다. 슬립속도율은 5%로 고정하여 기계감면율을 설계하였고, 평균 다이스 감면율은 약 11.67%로 작게 설계하여 전반적으로 강선의 온도가 낮게 나타나도록 하였다. 그리고 후반부에 테이퍼 타입의 패스를 적용하여 계속해서 강선의 온도가 높아지는 것을 막았다.

(5) 재설계된 27 단 습식 신선 공정에 의해 생산

된 제품의 품질은 기존 제품에 대비하여 비교적 양호한 품질을 가지는 것으로 나타났다.

이상의 연구 결과에서 재설계된 27 단 습식 신선 패스에서 신선 속도 2000m/min 의 초고속 신선 공정이 가능하게 되었으며, 본 연구를 통해 신선 속도를 증가시켜 스틸코드 제품의 생산성을 향상시키는 것이 가능하게 되었다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Nakamura, T. Fujita, H. Kawakami, Y. Yamada, 1976, New Cooling System for High-Speed Wire Drawing, Wire Journal International, No. 7, pp. 59~68.
- [2] Y. B., Lee, D. H., Shin, W. J., Nam, 2004, Effect of Deformation Temperature on the Formation of Ultrafine Grains in the 5052 Al Alloy, Metals and Materials International, Vol. 10, No. 5, pp. 407~410.
- [3] Kim, Hyoung Seop, 2004, Fictive Stress Model Based Finite Element Analysis for Bulk Metallic Glasses at an Elevated Temperature, Metals and Materials International, Vol. 10, No. 5, pp. 461~466.
- [4] Alexander Geleji, 1960, Bildsame Formung der Metalle in Rechnung und Versuch, Akademie-Verlag, GmbH, BERLIN.
- [5] Yukio Kojima, Nobuhiro Yasue, Takaji Mizuno, 1991, A Calculation of Interface Temperature in Drawing, Journal of the JSTP, Vol. 32, No. 366, pp. 906~911.
- [6] Y. S., Kim, D. H., Kim, B. M., Kim, M. A., Kim, Y. M., Park, 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.
- [7] 日本國特許廳, 公開特許公報, 1997.
- [8] Sang Kon Lee, Min Ahn Kim, Byung Min Kim, Hyung Ho Jo, 2003, "Development of Analysis Program for Multi-Pass Wet Wire Drawing Process and Its Application," Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 9, pp. 126 ~ 134.
- [9] Dae Cheol Ko, Byung Min Kim, Jae Chan Choi, Beom Soo Kang, 1994, A Study on Prevention of Central Burst Defects in Wire Drawing, Journal of the KSME, Vol. 18, No. 11, pp. 3098~3107.