다단계 냉간 압연된 고탄소강 와이어의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 패스스케줄의 영향

우동혁 · 이욱진* · 박익민* · 박용호*[†]

고려제강(주), *부산대학교

Effect of Pass Schedule on the Microstructures and Mechanical Properties of Multi-step Cold Rolled High Carbon Steel Wires

Dong Hyeok Woo, Wook Jin Lee*, Ik Min Park* and Yong Ho Park*[†]

KISWIRE. LTD., Busan 613-701, Korea

*Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(2011년 5월 4일 접수 : 2011년 5월 19일 최종수정 : 2011년 5월 20일 채택)

Abstract Flat rolling of wire is an industrial process used to manufacture electrical flat wire, medical catheters, springs, piston segments and automobile parts, among other products. In a multi-step wire flat rolling process, a wire with a circular cross-section is rolled at room temperature between two flat rolls in several passes to achieve the desired thickness to width ratio. To manufacture a flat wire with a homogeneous microstructure, mechanical and metallurgical properties with an appropriate pass schedule, this study investigated the effect of each pass schedule (1stand ~ 4stand) on the microstructures, mechanical properties and widths of cold rolled high carbon steel wires using four-pass flat rolling process. The evolutions of the microstructures and mechanical properties of the widths of cold rolled wires during three different pass schedules of the flat rolling process of high carbon wires were investigated, and the results were compared with those for a conventional eight-pass schedule. In the width of cold rolled wires, three different pass schedules are clearly distinguished and discussed. The experimental conditions were the same rolling speed, rolling force, roll size, tensile strength of the material and friction coefficient. The experimental results showed that the four-pass flat cold rolling process was feasible for production of designed wire without cracks when appropriate pass schedules were applied.

Key words cold rolling of wire, pass schedule, flat wire, wiper blade.

1. 서 론

고탄소강 이형선(flat wire) 제품은 스프링용, 피스톤 부품, 전자 부품, 의학용 등 많은 산업 분야에 폭넓게 사용되고 있으며, 특히 자동차 산업에서 유리창에 장착되는 wiper blade 부품의 필수 소재로써 수요가 지속적으로 증가하여 많은 관심을 받고 있다.¹⁾ 일반적으로 이형선을 제조하기 위해서는 원소재인 고탄소강 wire rod를 냉간 선 가공하여 고강도의 <111>, <100> 방향의 집합조직을 얻은 후,²⁾ wire 이형 가공 공정 중 하나인 다단계 압연 공정(multi-step flat rolling process)을 통해 요구되는 치수를 만족하는 flat 형태의 이형선으로 냉간 압연하여 생산하고 있다.

고탄소강 이형선의 다단계 압연 공정은 신선 가공된 고탄소강 선재를 압연롤을 이용하여 여러 단계에 걸쳐 압연하여 요구되는 치수로 가공하는 공정이며, 그 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 이형선의 미세조직 및 기계적 특성은 압연롤 반경, wire 선경, 재료의 인장강도, 생산공정 중 wire 온도, 압연롤과 wire간의 마찰계수 등의 다양한 제조 공정인자에 의해 결정되며, 특히 압연 공정의 패스스케줄(pass schedule)에 따라 제조된 이형선의 size, 외관 및 기계적 특성이 결정된다고 보고되고 있다.³⁻⁷⁾ 패스스케줄 설계는 처음 압연롤에 들어가는 wire를 마지막 제품이 되어 나오기 까지 어떠한 패스를 거쳐 압연할 것인가를 설계하는 것으로, 전체 패스의 개수, 각 패스의 압하율, 각 패스의 치수 등의 공정변수를 결정한다.

기존의 압연 패스스케줄 설계는 생산공정 경험을 바탕으로 설계자가 직접 시행착오를 거쳐 설계하는 방식이었으나, 최근 들어 유한요소해석법(finite element method)을

[†]Corresponding author

E-Mail : yhpark@pusan.ac.kr (Y. H. Park)

Fig. 1. Schematic illustration of the multi-step flat rolling process of wire.

활용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 압연 공정 결과를 예측하려는 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^{8,9)} 그러나, 실제 현장 조건의 압연 패스스케줄을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 설계하고 최적화 하기 위해서는 원소재와 공정인자에 따른 많은 변수가 있기 때문에 정확한 예측이 어려운 실정이다.¹⁰⁾ 따라서, 최종 제품의 요구 치수와 물성에 맞는 최적의 패스스케줄 설계에 관한 신선공정¹¹⁻¹²⁾ 및 판재 냉간 압연 공정¹³⁻¹⁶⁾에 대해서는 실험과 시뮬레이션을 통해 많은 연구결과가 보고되고 있지만, 이형선의 다단계 압연 공정의 패스스케줄에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화와 관련된 연구는 매우 부족한 실정이다. 특히 산업적으로 막대한 수요를 가지는 wiper blade 부품용 고탄소강 이형선의 다단계 압연 공정은 현재 각 패스의 개별 압하율을 15~20%로 고정하여 일률적으로 적용하는 경우가 대부분이다.

본 연구의 목적은 wiper blade 등의 고강도 부품소재로 적용 가능한 고탄소강 이형선 제조공정에서 최적의 패스스케줄을 설계하는 것이다. 이를 위해 Benchmark case로 기존의 고탄소강 이형선 제조공정을 기본으로 하여 이형선의 생산성 향상을 꾀하기 위해 기존 8패스 공정을 4패스로 수정하였고, 각 패스의 개별 압하율을 달리한 3가지의 패스스케줄을 통해 누적 압하율 75.7%의 고탄소강 이형선을 제조하였고, 조건별 최종압연제 및 각 조건의 패스별 미세조직 및 기계적 특성, 제조된 이형선의 치수정밀도에 대해서 연구하였다. 또한, 8패스 공정과 4패스 공정을 실시한 소재의 기계적 특성 및 미세조직을 상호 비교하였다.

2. 실험 방법

다단계 냉간 압연 공정에 원소재로 사용된 wire rod의 화학성분을 Table 1에 나타내었다. Wire는 0.82 wt.%의 탄소가 함유된 고탄소강 재질이며 가공성을 확보하기 위해 인과 황의 함유량을 0.01 wt.%로 제한하였으며, 압연 전

Table 1. Chemical composition of the high carbon steel used for the investigation. (wt.%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cu
Bal.	0.82	0.26	0.48	0.01	0.01	0.01

Table 2. Specifications of multi-step rolling machine and as-drawn wire used for the investigation.

Condition		Value
Rolling Machine	Rolling Type	4-Stand Tandem 2-High Mill
	Roll diameter(mm)	210
	Roll material	1,2 Stand Tool Steel Roll 3,4 Stand Tungsten Carbide Roll
	Machine Tolerances(mm)	Thickness ± 0.005 Width ± 0.02
Wire	Rolling speed (m/sec)	0.83
	entry diameters (mm)	3.29
	Tensile strength (MPa)	1696

냉간 가공율 64%, 4패스 다이스 신선가공 처리를 거쳐 선경(d) 3.29 mm, 인장강도 약 1.7 GPa를 가지는 wire로 가공하였다.

Table 2는 본 연구에 사용된 압연기 및 as-drawn 상태의 공급 신선 선재의 치수를 나타내었으며, Fig. 1에 모식적으로 나타낸 바와 같이 총 4개의 stand로 이루어져 있는 다단계 압연기를 이용하였다. 본 실험에 사용된 압연기에서 1, 2번 stand의 압연롤은 공구강(tool steel)로 이루어져 있으며, 3, 4번 stand의 압연롤은 tungsten carbide로 각각 구성되어 있는데, 일반적으로 공구강 압연롤은 부가하중이 클 경우에도 압연롤의 피로파괴 등이 적고 장수명인 장점이 있으나 제품의 치수 정밀도를 확보하는 데 한계가 있는 단점이 있으며 이에 비해 tungsten carbide 압연롤은 개별 압하율이 클 경우 롤의 취성파괴 등으로 압연롤의 수명이 크게 떨어지는 반면에 최종 압연제의 치수 정밀도를 확보하는 데 유리한 장점을 가지고 있다.

Benchmark case로 선택된 자동차용 wiper blade 소재용 고탄소강 이형선의 제조 과정은 일반적으로 균질화 열처리, 산세, 신선 가공, 다단계 냉간 압연 가공, 잔류응력 제거 열처리의 과정으로 이루어져 있으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 냉간 압연 공정에서 요구되는 누적압하율은 75.7%로, 현재 일반적으로 사용되고 있는 패스당 개별 압하율 15~20%를 적용할 경우 총 8패스의 압연 과정이 요구된다. 본 연구에서는 benchmark case인 기존 8패스 압연공정을 4패스로 수정하여 다음과 같은 3 종류의 패스스케줄을 설계하였다:

Fig. 2. Typical manufacturing process of high carbon steel flat wire for automotive wiper blade.

(1) 첫번째 패스에서 40%의 높은 개별압하율을 부가하여 가공한 후 2, 3, 4패스에서 순차적으로 압하율을 낮추어 가공 – Schedule A

(2) 2 패스까지 높은 압하율로 가공한 후 마지막 패스에서 11%의 비교적 낮은 압하율을 이용하여 가공 – Schedule B

(3) 1~3 패스에서 약 30%의 비교적 균일한 압하율을 부가하여 가공한 후 마지막 패스에서 약 20%의 압하율로 가공 – Schedule C

A, B, C 각 패스스케줄 stand별 압하율 및 benchmark case인 기존 8패스 공정의 개별압하율을 Table 3에 나타냈었고, 누적압하율을 Fig. 3에 나타내었다.

패스스케줄에 따른 이형선의 미세조직 및 기계적 특성을 알아보기 위해 각각의 스케줄에서 1~4 패스 압연가공 전후에서 시험편을 채취하여 분석하였으며, 치수 정밀도를 확인하기 위해 최종 냉간압연 처리된 이형선의 두께 (h)와 너비(w)를 각각 5회 측정하여 평균하였다. 시험편의

Fig. 3. Cumulative height reduction ratios during multi-step cold rolling processes of wires used for the investigation. (a) A comparison between four-pass schedules and conventional eight-pass schedule. (b) Schedules A, B and C only.

미세조직 관찰은 연마를 거친 후 광학현미경과 주사전자현미경을 통하여 확인하였으며, 기계적 특성을 평가하기 위해 인장 및 경도시험을 행하였다. 경도 측정은 압연률에 의해 냉간가공된 접촉면을 기준으로 이형선의 가운데와 좌우측을 측정하여 이를 평균하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 가장 높은 개별압하율인 40%의 압하율이 부가된 패스스케줄인 schedule A로 wire를 압연하여 각 패

Table 3. Height reduction ratios of each steps of the rolling pass schedules A, B and C with those of conventional eight-pass schedule.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Conventional	17.3%	18.0%	17.9%	16.9%	14.5%	16.9%	16.7%	11.1%
Schedule A	39.8%	31.3%	26.5%	20.0%	-	-	-	-
Schedule B	39.8%	36.4%	28.6%	11.1%	-	-	-	-
Schedule C	33.1%	31.8%	31.3%	22.3%	-	-	-	-

Fig. 4. Evolutions of cross section optical micrographs of cold rolled wires after (a) 1 pass, (b) 2 pass, (c) 3 pass and (d) 4 pass during rolling pass schedule A (parallel to the rolling direction).

스의 가공 전후 이형선 단면을 광학현미경을 통해 관찰한 사진이다. 판재의 다단계 냉간 압연 공정에서 소재의 소성한계 이상의 높은 개별압하율이 부가될 경우 절판 및 엿지부 크랙이 발생한다고 보고 되고 있다.¹⁵⁾ 그러나, 본 실험에서 가장 severe한 압연 조건인 개별압하율 40%의 경우 이형선의 절손 및 엿지부 크랙은 발생하지 않았고, 이에 따라 실험에 사용된 소재의 경우, 4패스 압연스케줄에서 최대 개별압하율 40%와 누적압하율 75.7%는 소재의 소성한계 이상은 아닌 것으로 판단된다.

Fig. 5는 압연 전의 as-drawn wire 및 기존 8패스 압연공정을 통해 제조된 이형선, 그리고 각각 schedule A, B, C를 통해 4패스 압연공정으로 제조된 이형선의 표면 및 중심부 광학현미경 사진을 나타내었다. 압연가공 전의 as-drawn wire의 경우, 표면 및 중심부에 길이방향으로 배열된 결정립이 관찰되었다(Fig. 5(a), (b)). 그리고 기존 8패스 공정을 통해 제조된 이형선의 경우 중심부 미세조직은 as-drawn wire의 미세조직과 비슷하지만(Fig. 5(d)), 표면부의 미세조직은 여러 단계의 압연가공에 의해 결정립이 더욱 미세해지고 결정립이 길이방향으로 배열된 것을 알 수 있다(Fig. 5(c)). Fig. 5(e)-(j) 는 각각 schedule A, B, C의 패스스케줄에 의해 압연된 4패스 공정 이형선의 표면 및 중심부는 결정립 크기 및 배열성에서 기존 8패스 공정으로 제조된 이형선과 큰 차이가 없고 양호한 미세조직을 나타내며, 표면과 중심부에서 미세크랙 등의 결함은 확인되지 않았다. 이는 Fig. 6에 나타난 전자주사현미경 조직사진을 통해서도 확인할 수 있는데, 신선가공 wire 및 압연 처리된 이형선 모두 lamellar 형태의 미세조직을 나타내었으며, 이는 고탄소강의 일반적인 미세조직인 pearlite 조직이 냉간가공에 의해 길이방향으로 배열되어 형성된 것으로 사료된다. 압연 전의 as-drawn wire 및

Fig. 5. Optical micrographs of (a, b) as-drawn wire and end-product flat wires processed by (c, d) conventional eight-pass schedule, (e, f) schedule A, (g, h) schedule B and (i, j) schedule C.

기존 8패스 이형선, 그리고 각각 schedule A, B, C를 통해 제조된 이형선 모두 유사한 미세조직을 나타내었고, void 등의 결함은 관찰되지 않았다. 따라서, 본 실험에서 채택한 3 종류의 패스스케줄 모두 소재의 미세조직 측면에서 benchmark case인 기존 8패스 공정과 유사한 결과를 나타내었다.

Fig. 7에 기존 8패스스케줄 및 4패스스케줄의 압연 패스 전, 후 이형선의 인장강도 및 경도 변화를 나타내었다. 소성 가공량이 많아질수록 인장강도 및 경도는 선형적으로 증가하였고, 이는 냉간가공량 증가에 따른 가공경화에 의한 것으로 사료된다. Benchmark case인 기존 8패스 공정의 경우, 다단계 압연처리가 끝난 후 소재의 인장강도는 약 2,020 MPa, 경도는 약 76.2 HRA의 높은 강도와 경도를 나타내었으며, schedule A~C의 경우 비슷한 수준인 1,990~2,000 MPa 정도의 인장강도와 75.4~75.7 HRA의 경도를 나타내었다. Fig. 7(a)의 결과로 볼 때, 이형선의 인장강도는 주로 누적 압하율에 따라 결정되는 것으로 생각되며, 패스스케줄과의 상관관계는 없는 것으로 판단된다. 한 편, schedule A와 B의 경우 1~3패스

Fig. 6. Scanning electron micrographs of (a) as-drawn wire and end-product flat wires processed by (b) conventional eight-pass schedule, (c) schedule A, (d) schedule B and (e) schedule C.

Fig. 7. Evolutions of (a) ultimate tensile strength and (b) rockwell hardness of wires during multi-step cold rolling process.

에서 경도가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 철강재료의 경도는 재료 내부에 소용가공으로 인한 누적되는 전위의 밀도 및 잔류응력 증가에 의존하므

로, schedule A 와 B에서 관찰된 급격한 경도 증가는 압연공정에서 부가된 초기 높은 개별 압하율 및 단축된 패스스케줄 때문으로 생각된다(Fig. 7(b)). 이와 같은 소재

Fig. 8. (a) Evolutions of wire width during multi-step cold rolling process. (b) Effect of pass schedule on the width of end-product flat wires.

의 정도 증가는 후속 압연 공정에서 압연률의 spring back stress를 증대시키고 이로 인한 슬립현상은 최종 압연제의 치수정밀도에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

Fig. 8(a)는 다단계 압연 공정에서 이형선의 선폭의 변화를 각 패스별로 도식한 그래프이다. 이형선의 선폭은 누적 압하율이 증가됨에 따라 선형적으로 증가하였으며, 각 패스스케줄 모두 최종적으로 압연 가공 후 최적 선폭인 7 mm에 근접함을 알 수 있었다. Fig. 8(b)는 기존 8패스와 개선 4패스의 압연 최종 패스 후의 선폭을 나타내었다. 먼저, benchmark case인 기존 8패스 이형선의 경우 선폭이 7 mm에 근접하는 높은 치수정밀도를 보였으나, 4 패스 공정의 경우 이형선의 최종 선폭이 패스스케줄에 따라 상당한 차이를 나타내었다. schedule A와 B의 경우 benchmark case에 비해 상당히 좁은 선폭을 보였으며, 특히, schedule B로 압연한 이형선의 경우 기존 8패스 이형선에 비해 매우 좁은 6.85 mm 정도의 선폭을 나타내었다. Schedule C의 경우 기존 8패스 공정과 비교하여 유사한 수준의 6.97 mm의 선폭을 나타내었다. Schedule A

와 B의 좁은 선폭이 나타나는 것은 압연공정 초기에 부가되는 높은 압하율로 인한 가공경화 효과에 의해 후속 압연 공정의 spring back stress 증대 및 이로 인한 슬립 현상에 의해 나타날 결과로 사료된다.

이상의 결과를 바탕으로 고탄소강 이형선의 패스스케줄 설계에서 고려해야 하는 공정변수의 영향을 다음과 같이 생각할 수 있다. 먼저 고탄소강 이형선의 최종 기계적 특성은 누적 압하율에 의해 대부분 결정되는데 반해 치수정밀도는 패스스케줄에 따라 많은 차이를 보이므로 패스스케줄을 설계할 때에는 최종 압연제의 요구 치수 및 치수정밀도를 우선적으로 고려하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한, 초기 압연 패스의 개별압하율을 높게 설정할 경우 (schedule A, B) 그렇지 않은 경우에 비해 (schedule C) 치수정밀도가 떨어지는 것을 알 수 있는데, 이는 Fig. 7(b)의 결과를 볼 때 압연공정 초기에 부가되는 높은 가공경화 효과에 의한 후속 압연 공정의 높은 spring back stress 및 이로 인한 슬립현상과 관련된 것으로 판단된다. 따라서 초기 압연 패스의 개별압하율을 높게 설정하기 보다 여러 패스에 나뉘어 압연하는 경우가 최종 압연품의 치수정밀도 확보에 유리하다고 생각된다. 그리고 압연공정 마지막 패스에서 20% 이상의 높은 압하율을 부가하였을 경우 (schedule A)에 비해 비교적 적은 11%의 개별압하율을 부가한 경우 (schedule B) 치수정밀도가 더욱 저하되는 것을 확인할 수 있으며 다단계 압연공정에서 마지막 패스의 압하율이 낮을 경우 슬립 현상이 더욱 커지는 효과로 보이며 패스스케줄 설계시 지양해야 할 것으로 사료된다. 본 실험에서 고탄소강 이형선 다단계 압연 공정시 최적의 패스스케줄은 schedule C로, 기존 8패스 공정과 비교하여 생산성 증대효과와 함께 매우 유사한 미세조직 특성, 98.5%의 인장강도 및 99.3%의 경도, 99.4% 이상의 치수정밀도를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차용 wiper blade 소재로 적용되고 있는 고탄소강 이형선의 다단계 압연공정에서 생산성 및 치수 정밀도, 기계적 특성을 고려한 최적의 패스스케줄을 설계하고 기존 8패스 공정에 비해 생산성 향상효과를 노릴 수 있는 4패스 압연공정의 적용가능성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 고탄소강 이형선의 기존 8패스 압연공정을 4패스로 수정한 결과, 최대 개별압하율 40%와 누적압하율 75.7%는 소재에 심각한 파손 및 결함 없이 압연이 가능하였다.

2) 다단계 압연공정을 거친 이형선의 미세조직은 압연 방향으로 배열된 미세한 pearlite 상으로 구성되어 있었으며, 압연 패스스케줄에 변화를 주었을 경우에도 유사한 미

세조직을 보였다. 이형선의 기계적 특성은 소성 가공량이 많아짐에 따라 냉간가공 효과에 의해 선형적으로 증가하였다. 패스스케줄의 변화는 최종 기계적 특성치에는 영향을 미치지 않지만, 최종 압연제의 치수정밀도는 큰 영향을 나타내었다.

3) 4패스 압연공정에서 초기 압연 패스의 개별압하율을 높게 설정할 경우 치수정밀도가 저하되었다. 이는 압연공정 초기에 부가되는 높은 가공경화 효과에 의한 후속 압연공정의 슬립현상 때문인 것으로 사료된다. 또한, 마지막 압연 패스의 개별압하율을 낮게 설정한 경우 치수정밀도가 더욱 저하되는 것을 확인할 수 있었으며, 고탄소강 이형선의 패스스케줄 설계시 지양해야 할 조건으로 사료된다.

4) 본 연구의 결과를 바탕으로 고탄소강 이형선의 다단계 압연 공정에서 기존 8패스의 공정을 패스스케줄 최적화를 통해 4패스 압연공정으로 대체하여 동등한 기계적 특성과 미세조직, 치수정밀도를 확보하였고, 본 연구에서 제안한 최적화된 패스스케줄은 고탄소강 이형선 제조 및 생산성 향상에 대단히 유효하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 고려제강(주)의 지원을 통해 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. C. Vallengano, P. A. Cabanillas and F. J. García-Lomas, J. Mater. Process. Tech., **195**, 63 (2008).
2. D. R. Askeland and P. P. Fulay, The Science and Engineering of Metals, 5th ed., p. 265~283, Scitech, USA (2008).
3. Members of The Wire Association, Inc., Steel Wire Handbook, Vol. 3, p. 1-32, ed. A. B. Dove, The Wire Association INT'L, Guilford, CT (1986).
4. M. Kazeminezhad and A. K. Taheri, Mater. Des., **26**, 99 (2005).
5. M. Kazeminezhad and A. K. Taheri, J. Mater. Process. Tech., **171**, 253 (2006).
6. M. Kazeminezhad and A. K. Taheri, J. Mater. Process. Tech., **160**, 313 (2005).
7. M. Kazeminezhad, A. K. Taheri and A. K. Tieu, J. Mater. Process. Tech., **200**, 325 (2008).
8. R. Iankov, J. Mater. Process. Tech., **142**, 355 (2003).
9. T. Masse, Y. Chastel, P. Montmitonnet, C. Bobadilla, N. Persem and S. Foissey, J. Mater. Process. Tech., **211**, 103 (2011).
10. B. Carlsson, J. Mater. Process. Tech., **73**, 1 (1998).
11. S. K. Lee, D. C. Ko and B. M. Kim, Mater. Des., **30**, 2919 (2009).
12. S. K. Lee, M. A. Kim and B. M. Kim, in Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference(COEX, Korea, Nov., 2002), p.71.
13. S. H. Lee, D. H. Kim, I. Y. Hwang, S. Y. Ok, D. H. Kim, W. J. Hwang and B. M. Kim, in Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference (Jeju, Korea, May, 2008), p.813.
14. D. H. Na and Y. S. Lee, Trans. KSME A, **34**(10), 1443 (2010) (in Korean).
15. S. -H. Lee, S. -Y. Ok, I. -Y. Hwang, W. -J. Hwang and B. -M. Kim, J. KSPE, **25**(11), 66 (2008) (in Korean).
16. S. M. Yoon, S. H. Park and S. Y. Synn, Transactions of Materials Processing, **9**(2), 112 (2000) (in Korean).