

비원형 신선을 이용한 고강도-고연성 펄라이트 강선의 제조[§]

백현무* · 황선광** · 주호선* · 임용택*,***† · 손일현**** · 배철민****

* KAIST 기계공학과, ** KITECH 극한제조기술연구실용화그룹,
*** KIMM 원장실, **** POSCO 기술연구원 선재연구그룹

Manufacturing of High-Strength and High-Ductility Pearlitic Steel Wires Using Noncircular Drawing Sequence

Hyun Moo Baek*, Sun Kwang Hwang**, Ho Seon Joo*, Yong-Taek Im*,***†,
Il-Heon Son**** and Chul Min Bae****

* Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, ** Ultimate Manufacturing Technology R&BD Group, KITECH,
*** Office of the President, KIMM, **** Wire Rod Research Group, Technical Research Laboratories, POSCO

(Received March 4, 2014 ; Revised April 24, 2014 ; Accepted April 25, 2014)

Key Words: Noncircular Drawing Sequence(비원형 신선), High-strength(고강도), High-ductility(고연성), Delamination Fracture(박리파괴), X-ray Diffraction(X-선 회절), Texture Evolution(집합조직 진화)

초록: 본 연구에서는 고강도-고연성 펄라이트 강선을 제조하기 위하여 비원형 신선 공정을 적용하였다. 다단 비원형 신선 공정을 A와 B로 정의한 2 종류의 가공경로를 이용하여 상온에서 12 패스까지 수행하였다. 비원형 신선 공정과의 비교를 위해서 기존의 원형 신선 공정을 수행하고 기계적 특성과 집합조직 발달에 대해 비교를 수행하였다. 원형 신선 공정으로 제조된 강선은 10 패스에서부터 박리파괴가 관찰되었지만, 비원형 신선 가공경로 B의 경우는 12 패스에서도 박리파괴가 발생하지 않았으며, 이는 X-선 회절로부터 측정된 집합조직 결과에서 원형집합조직의 발달이 적은 것과 연관된다. 따라서, 다단 비원형 신선 공정을 통하여 기존의 신선 공정보다 박리파괴의 발생 가능성을 저감시킴으로써 높은 비틀림 연성을 갖는 고강도 펄라이트 강선을 제조할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract: In this study, a noncircular drawing (NCD) sequence for manufacturing high-strength and high-ductility pearlitic steel wires was investigated. Multipass NCD was conducted up to the 12th pass at room temperature with two processing routes (defined as the NCDA and NCDB), and compared with the wire drawing (WD). During the torsion test, delamination fracture in the drawn wire was observed in the 10th pass of the WD whereas it was not observed until the 12th pass of the NCDB. From X-ray diffraction, the circular texture component that increases the likelihood of delamination fracture of the drawn wire was rarely observed in the NCDB. Thus, the improved ability of the multipass NCDB to manufacture high-strength pearlitic steel wires with high torsional ductility compared to the WD (by reducing the likelihood of delamination fracture) was demonstrated.

1. 서 론

현수교와 사장교 등에 사용되는 교량용 케이블

(bridge cable)이나 자동차 타이어 보강용 코드(tire cord)로 사용되는 고탄소 강선(high-carbon steel wire)은 최근 구조물 및 수송기기의 대형화 및 경량화 요구에 따라 지속적으로 고강도화를 요구 받고 있으며, 주로 다단계 신선(wire drawing, WD) 가공에 의해 제조된다. 강선의 고강도화를 달성하는 방법으로는 합금설계 및 열처리 등에

§ 이 논문은 대한기계학회 2013년도 학술대회(2013. 12. 18.-20., 강원랜드) 발표논문임.

† Corresponding Author, ytim@kaist.ac.kr, ytim@kimm.re.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

의한 방법과 공정개선을 통한 신선 가공한계 (drawing limit)의 증대에 의한 방법이 있다.⁽¹⁾

이러한 강선의 신선 가공한계는 신선 가공 도중의 단선 발생여부를 기준으로 판단하기도 하지만, 산업체에서는 주로 박리파괴(delamination fracture)의 발생여부를 기준으로 강선의 신선 가공한계를 결정하게 된다. 고탄소 강선의 경우 신선 가공 이후에 주로 연선(stranding) 공정을 통하여 최종제품으로 제조되는데, 이 때 비틀림 연성이 부족할 경우 박리파괴가 발생하게 된다. 박리파괴가 발생한 강선은 그 파면의 형태가 나선의 형태로 층간 분리가 발생된 형태인 반면, 비틀림 연성이 양호한 강선의 경우에는 그 파면이 평평한 모습을 보이게 된다. 즉, 강선의 신선 가공량의 증가에 의한 고강도화는 박리파괴를 촉진하게 되므로 박리파괴가 발생하기 이전까지의 패스를 기준으로 해당 강선의 인장강도가 결정된다.

교량용 강선의 고강도화를 달성할 경우 주경간장(main span length)을 연장시킬 수 있고, 단위하중을 견딜 수 있는 케이블의 직경이 감소하여 원가 절감 및 공기 단축에 매우 유리하다. 특히, 이러한 교량용 케이블의 경우 타이어 보강용 코드에 비해서 초기 선경과 최종 선경이 비교적 크게 된다. 이러한 태경 신선재의 경우에 일반적으로 패스당 감면율(area reduction per each pass)이 커서 가공 중 소성변형에 의한 발열량이 상대적으로 많고, 주로 건식 윤활제를 사용하기 때문에 습식 윤활제를 사용하는 타이어 보강용 코드에 비해서 가공 중 강선의 온도 상승이 크다. 이 경우 동적변형시효(dynamic strain aging)에 의하여 시멘타이트(cementite)의 탄소 원자가 페라이트(ferrite)로 용해되어 박리파괴를 촉진할 수 있다.⁽²⁾ 또한, 태경 신선재의 경우, 신선가공 시 표층과 중심부 간에 불균일한 변형의 발생가능성이 높으며, 이러한 원인에 의하여 신선 가공된 강선에서는 불균일한 잔류응력이나 집합조직의 발달이 보고되고 있다.^(3,4) 이러한 강선의 경우, 비틀림 하중을 받았을 때 강선의 표층과 중심에서의 변형의 불균일성으로 인하여 박리파괴가 쉽게 발생할 수 있으므로 타이어 보강용 코드에 비하여 교량용 강선의 신선 가공한계 증대에 의한 고강도화 달성이 공업적으로 더욱 어렵다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는, 교량용 강선의 고강도

Table 1 Chemical composition of the high-carbon steel used in experiments

Components (wt. %)					
C	Si	Mn	P	S	Cr
0.79-0.86	0.15-0.35	0.60-0.90	0.03 max	0.03 max	0.18

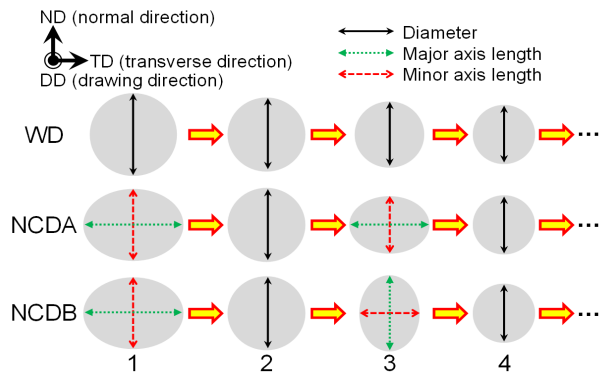


Fig. 1 Schematic diagrams of the NCD process and definition of two processing routes of NCDA and NCDB

화를 달성하기 위하여 추가적인 열처리나 특별한 합금의 첨가 없이 신선 가공한계를 증대시켜 기존의 신선 공정으로 제조된 강선보다 향상된 기계적 특성을 갖는 고강도-고연성의 강선을 제조하고자 한다. 이를 위해, 기존의 신선 공정보다 소재의 내부까지 비교적 균일한 소성변형을 가할 수 있는 것으로 최근 보고된 비원형 신선(noncircular drawing, NCD)⁽⁵⁾공정을 이용한 가공을 수행하고 제조된 강선의 기계적 특성을 기존의 신선 공정으로 제조된 강선과 비교하였다. 또한, 비원형 신선 공정에서 정의될 수 있는 2가지 가공 경로(processing route)를 적용하여 실험을 수행하고 특성을 비교하여 가공경로 효과를 살펴보았다. 비틀림 및 인장 시험을 통하여 제조된 강선의 연성 및 강도를 평가하였으며, 이러한 기계적 특성에 영향을 미치는 집합조직적 특성을 살펴보고자 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD) 기법을 사용하였다.

2. 실험 방법

2.1 소재 준비 및 가공 조건

본 연구에서 사용된 소재는 Table 1과 같은 화학 조성을 가지며 초기 선경이 13 mm인 완전 펄

Table 2 Process parameters of the drawing dies used for the multi-pass WD and NCD processes in experiments

No. of passes	WD	NCD		Semi-die angle (°)	Bearing length (mm)	Area reduction per each pass (%)	Total area reduction (%)
	Diameter (mm)	Major axis length at exit (mm)	Minor axis length at exit (mm)				
1	11.63	13.39	10.10	6	3.49	20	20
2	10.40	10.40		6	3.12	20	36
3	9.30	10.71	8.08	6	2.79	20	49
4	8.32	8.32		6	2.50	20	59
5	7.44	8.57	6.46	6	2.23	20	67
6	6.66	6.66		6	2.00	20	74
7	5.95	6.86	5.16	6	1.79	20	79
8	5.32	5.32		6	1.60	20	83
9	4.76	5.48	4.13	6	1.43	20	87
10	4.26	4.26		6	1.28	20	89
11	3.81	4.39	3.31	6	1.14	20	91
12	3.41	3.41		6	1.02	20	93

라이트 강(fully pearlitic steel)이다. 초기 펄라이트 조직을 미세화 및 균질화시키고자 1000°C에서 10분 간 유지 후 600°C로 유지된 연욕(lead bath)에 급랭시켜 10분 간 유지하여 항온변태를 실시하는 납 패이턴팅(lead patenting)을 수행하였고, 열처리 도중에 형성된 산화피막(scale)을 제거하기 위하여 물과 염산을 7:1의 비율로 혼합한 용액을 70°C로 가열하고 30분 간 침적시켜 산세 처리를 하였다.

각 패스 당 감면율이 20%가 되도록 패스 스케줄(pass schedule)을 설정하고 총 감면율(total area reduction)이 93%가 될 때까지 총 12 패스의 신선 공정을 수행하여 최종 선경이 3.41 mm가 되도록 하였다. 비원형 신선 공정의 경우, 기존 신선 공정과의 비교를 위해 동일한 패스 당 감면율 및 총 감면율을 적용하였고, 홀수 패스에서 장/단축비가 1.33인 타원형(oval) 금형을 사용하였다. 자세한 공정조건은 Table 2에 나타내었다. 신선 및 비원형 신선 공정의 실험에서 사용된 금형의 인서트와 컨테이너는 각각 초경합금과 중탄소강으로 제작되어 열박음으로 결합되었다. Fig. 1에 도시한 바와 같이, 비원형 신선에서 정의될 수 있는 2가지 가공경로에 따른 강선의 기계적 특성을 살펴보고자 2가지 가공경로를 각각 NCDA(noncircular drawing with processing route A)와 NCDB(noncircular drawing with processing route B)로 정의하고 실험을 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 비원형 신선에서 가공 경로를 나타낼 수

있는 최소의 가공횟수는 4회이다.

신선과 비원형 신선 공정 모두 드로우 벤치(draw bench) 타입의 신선기에서 16.67 mm/s의 속도로 상온에서 가공 되었으며, 윤활제로는 폴리브덴 건조피막형 윤활 스프레이를 사용하였다.

2.2 기계적 특성 평가

비틀림 시험은 신선 및 비원형 신선 공정으로 각각 10과 12 패스로 가공된 강선에 대하여 수행 되었으며, 시편으로 가공하지 않은 상태에서 비틀림 시험을 수행하였다. 시편길이는 강선 지름의 100 배로 결정하고 인장시험에서 획득한 극한인장강도(ultimate tensile strength, UTS)의 1% 수준의 역장력을 부가한 상태에서 30 cycle/min의 속도로 시험을 수행하였다. 시험은 파단이 발생 될 때까지 수행하였으며, 시편이 파단되면 그 파면을 관찰하여 박리파괴의 발생 여부를 판단하였다.

인장시험은 비원형 신선에서의 가공 경로 효과를 비교하기 위해 4, 8, 12 패스에서 실험을 수행 하였으며, 비틀림 시험을 수행한 10 패스에 대해서도 수행하였다. 신선 가공을 계속해서 수행하게 되면, 패스가 진행될수록 강선의 지름은 줄어들게 되므로 ASTM E8/E8M-13a를 참고하여 각각의 시편에 알맞은 시편지름을 선택하였다. 즉, 4, 8, 10, 12 패스로 가공된 강선의 인장시편 지름은 순서대로 5.0, 4.0, 3.0, 2.5 mm이었고, 시편의 표

점거리(gage length)는 25 mm로 일정하게 가공하여, 신장계(extensometer)를 장착하고 0.017 mm/s의 일정한 속도로 3회 반복 시험을 수행하였다. 시험 후 획득한 공칭 응력-변형률 선도에서 극한 인장강도와 파단까지의 연신율(elongation at fracture, El)을 획득하였고, 항복강도(yield strength, YS)는 0.2% offset 방법으로 구하였다. 파단된 시편을 결합한 뒤 최소 지름을 측정하여, 단면감소율(reduction of area, RA)을 다음의 식으로 계산하였다.

$$RA(\%) = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서 A_0 와 A_f 는 각각 시편의 초기와 최종 단면적을 나타낸다. 또한, 소재의 정적 인성(toughness)을 평가하기 위하여 공칭 응력-변형률 선도의 아래 부분의 면적을 적분하여 인성을 계산하였다.

2.3 집합조직 측정

XRD를 이용한 집합조직 측정 시에 20스캔을 40°에서 90°까지 4°/min의 속도와 0.01°의 측정 간격으로 Cu K α 선을 사용하여 수행하였다. 페라이트 상에 대하여 (110), (200), 및 (211)의 측정된 불완전 극점도(pole figure, PF)로부터 방위분포함수(orientation distribution function, ODF)를 계산하고 다시 완전 극점도를 계산하였다. 극점도와 방위분포함수의 계산에는 LaboTex 3.0이 사용되었다. 극점도는 (110)면에 대해서 신선방향(drawing direction, DD), 수평방향(transverse direction, TD), 수직방향(normal direction, ND)의 좌표계를 이용하여 도시하였다. 방위분포함수의 경우는 $\varphi_2=45^\circ$ 단면이 이상적인 집합조직의 주요성분을 가지고 있기 때문에 이 면에 대해서만 도시하고 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

신선 및 비원형 신선 가공경로 A와 B 공정 모두에서 단선이 발생하지 않고 총 감면율 93%까지 가공이 가능하였고, 제조된 강선의 치수 정밀도와 표면품질 또한 모든 경우에 대해 양호하였다.

3.1 비틀림 시험

Fig. 2에 비틀림 시험을 수행한 강선의 파단면



Fig. 2 Observations of the fracture surfaces of twisted wires processed by the WD, NCDA, and NCDB, respectively

을 박리파괴의 발생 정도에 따라서 O, Δ , 및 X로 구분하여 도시하였다. 신선 공정으로 가공된 강선의 경우, 총 감면율이 89%인 10 패스에서 박리파괴가 관찰되기 시작하여 이미 신선 가공한계에 도달하였음을 확인할 수 있었다. 반면, 비원형 신선 공정의 경우에는 가공경로와 무관하게 10 패스에서 박리파괴가 발생되지 않았다. 총 감면율이 93%인 12 패스에서는 비원형 신선 가공경로 B의 경우만 박리파괴가 발생하지 않았고, 신선 공정으로 가공된 강선에서는 전형적인 박리파괴가 관찰되었다. 비원형 신선 가공경로 A의 경우에는 신선 공정에 비해서는 그 정도가 약한 평탄면에 가까운 박리파괴가 발생하였다. 즉, 비원형 신선으로 가공된 강선의 비틀림 연성은 기존의 신선 공정으로 가공된 강선보다 우수하다고 할 수 있으며, 그 중에서도 특히 가공경로 B로 가공된 강선의 비틀림 연성이 가장 우수하다고 할 수 있다. 즉, 신선 및 비원형 신선 공정 모두 신선가공 도중 단선이 발생하지 않고 12 패스까지 가공이 가능하였으나, 신선 공정의 경우는 10 패스에서 박리파괴가 발생하였으므로 이미 신선 가공한계에 도달하였음을 확인할 수 있었고, 12 패스의 비원형 신선 가공경로 B의 경우는 박리파괴가 발생되지 않아 공업적으로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

3.2 집합조직 발달

박리파괴의 발생에 영향을 미치는 원인은 매우 다양한 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 이러한 원인을 집합조직 관찰을 통하여 살펴보고자 하였다. 체심입방(body-centered cubic, BCC) 결정

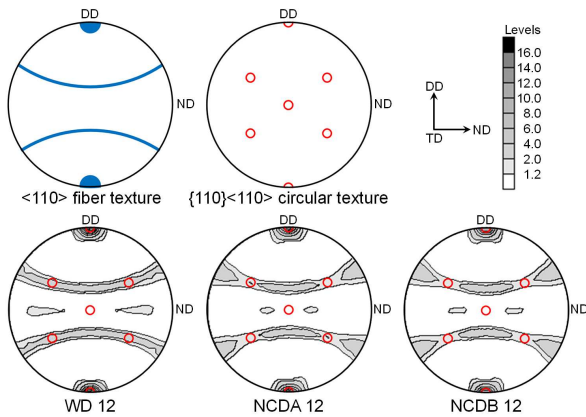


Fig. 3 (110) pole figures of the drawn wires by the WD, NCDA, and NCDB for the 12th pass, respectively

구조를 갖는 소재를 신선 가공하면 <110> 섬유집합조직(fiber texture)과 {110}<110> 원형집합조직(circular texture)이 주로 발달하는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾ 이 중 {110}<110> 원형집합조직은 임의의 소성변형을 수용하기에는 슬립계(slip system)의 활성화도가 충분하지 않기 때문에 응력집중이 쉽게 발생하게 되고 박리파괴 발생의 가능성이 높아지는 것으로 보고되었다.⁽⁴⁾ Fig. 3에 12 패스의 신선과 비원형신선 가공경로 A와 B로 가공된 강선의 (110) 극점도를 도시하였다. 신선 공정에 비하여 비원형 신선으로 가공된 강선의 {110}<110> 원형집합조직 성분의 발달강도가 약함을 확인할 수 있다. Fig. 4에 도시된 방위분포함수를 이용하면 극점도에서 겹쳐서 나타날 수 있는 각 집합조직 성분들을 구분하여 보다 정량적으로 분석할 수 있다. 그림에서 삼각형 기호로 표시된 {110}<110> 원형집합조직 성분의 체적분율(volume fraction)은 신선 및 비원형 신선 가공경로 A와 B에 대하여 각각 4, 2, 1%였다. 즉, 비원형 신선 가공경로 B의 경우 박리파괴를 촉진하는 원형집합조직의 발달이 가장 적고 이러한 집합조직 발달이 강선의 비틀림 연성 향상에 기여했을 것으로 판단된다. 이 결과는 선행연구^(5,6)에서 유한요소해석 및 실험을 통해 확인된 바와 같이 비원형 신선 공정이 기존 원형 신선 공정에 비해 소재의 중심부까지 보다 균일한 소성변형을 가할 수 있기 때문으로 사료된다. 특히, 가공경로 B의 경우 홀수 패스에서 가공된 타원형 소재의 장축이 짝수 패스에서 원형 신선 가공 후 다시 홀수 패스에서 단축이 되도록 교대로 번갈아가며 가공하였기 때문에 가공경로 A보다 균일한 소성변형

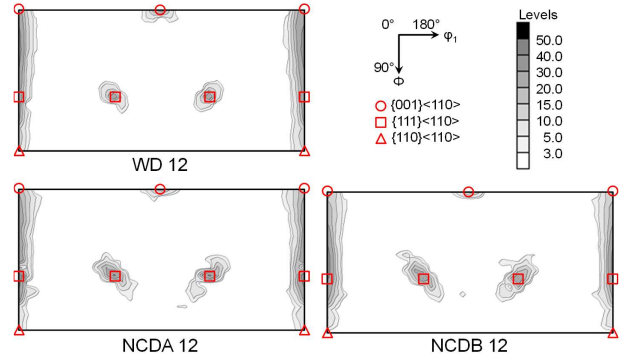


Fig. 4 $\phi_2=45^\circ$ plot section of the ODFs of the drawn wires by the WD, NCDA, and NCDB for the 12th pass

을 소재에 가할 수 있었고, 이러한 소재의 변형 거동은 집합조직뿐만 아니라 미세조직 발달에도 영향을 미쳤을 것이다. 따라서 비원형 신선 가공경로 B를 통하여 소재를 가공하면, 집합조직 및 미세조직이 비교적 균일하게 발달하도록 강선을 가공할 수 있어 박리파괴의 발생을 저감시킬 수 있을뿐만 아니라 신선 가공한계를 연장시켜 강도의 향상에도 기여할 것이다.

3.3 인장 특성

신선 및 비원형 신선 가공경로 A와 B를 통하여 가공된 강선의 공칭 응력-변형률 선도를 Fig. 5(a)에 도시하였고, 강도와 연성 및 인성을 Figs. 5(b)-5(d)에 구분하여 나타내었다. 세 공정 모두 12 패스까지 가공 시에 단선이 발생하지 않았으므로 비틀림 시험에서의 박리파괴 발생 여부를 기준으로 강도를 비교하였다. 비원형 신선 가공경로 B로 12 패스까지 가공된 강선의 극한인장강도와 항복강도 값이 신선으로 10 패스까지 가공된 강선보다 각각 73 MPa (3.2%)와 169 MPa (7.9%)만큼 높았으므로 신선 가공한계를 12 패스까지 연장시켜 고강도 강선을 제조할 수 있음을 확인하였다.

동일 패스에서 각 공정 간의 극한인장강도와 항복강도 값을 비교하면, 4 패스까지는 비원형 신선으로 가공된 강선의 강도 값이 신선 공정으로 가공된 강선보다 높았으나, 8 패스 이후부터는 신선 가공으로 제조된 강선의 강도 값이 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 선행 연구⁽⁶⁾에서 저탄소강에 대해 수행된 실험 결과의 경향과 유사하며, 이러한 원인은 저탄 패스에서 비원형 신선 공정이 신선 공정보다 많은 소성변형을 소

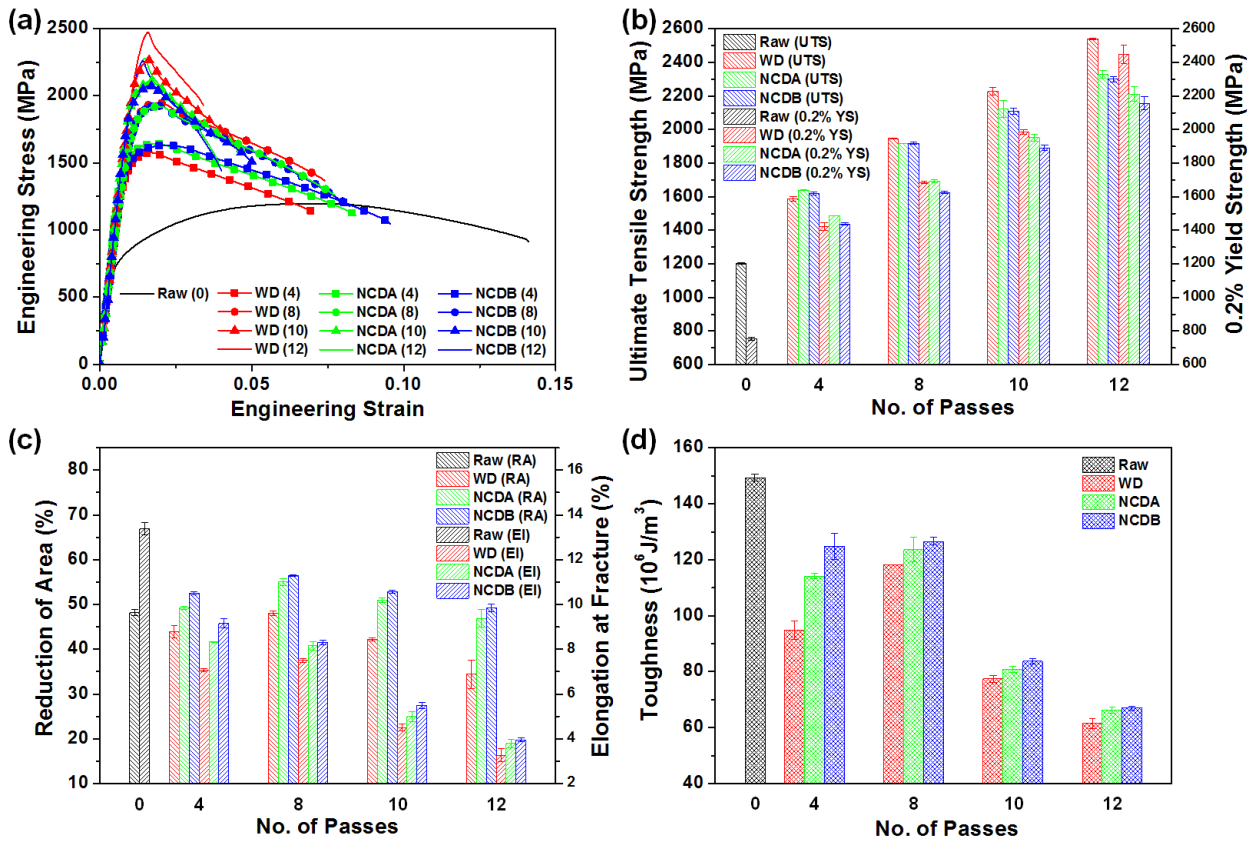


Fig. 5 Experimental results of the tension tests: (a) engineering stress-strain curves, (b) strength, (c) ductility, and (d) toughness of the drawn wires by the WD, NCDA, and NCDB for the difference passes, respectively

재에 부가할 수 있어 강도향상에 효과적이지만, 패스 수가 증가하면 특정 패스 수 이후부터는 바우싱거 효과(Bauschinger effect)가 증폭되어 동일한 패스에서 낮은 강도를 나타내는 것으로 판단된다. 앞서 설명한 바와 같은 영향이 본 연구에서 사용된 고탄소강 소재에 대해서도 Fig. 5(b)와 같이 특정 패스 수 이후에 유사한 결과를 보이는 것으로 사료된다.

동일 패스에서 비원형 신선으로 가공된 강선의 단면감소율과 과단까지의 연신율이 기존의 신선 공정으로 가공된 강선에 비해서 모든 패스에서 향상된 값을 나타냄을 Fig. 5(c)에서 볼 수 있다. 앞서 강도 값을 비교한 10 패스 신선과 12 패스 비원형 신선 가공경로 B의 경우를 비교하면, 비원형 신선 공정에서 단면감소율은 우수하며, 과단까지의 연신율은 다소 감소한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 고탄소 강선의 경우에 일반적으로 과단까지의 연신율이 10% 미만으로 정량적인 비교가 용이치 않기 때문에 주로 단면감소율이 연성 평가의 지표로 활용된다는 점을 고려한다

면, 12 패스까지 비원형 신선 가공경로 B로 가공된 강선의 연성이 12 패스까지 신선 가공된 강선보다 18%만큼 향상되었음을 확인하였고, 강도 비교를 수행하였던 10 패스 신선 공정보다는 8% 향상되었음을 확인하였다. 본 연구에서 수행된 신선 및 비원형 신선 가공경로 A와 B 공정이 모두 최종 선경까지 단선이 발생하지 않고 가공이 가능하였지만, 추가적인 공정 진행 시 단면감소율이 가장 우수한 비원형 신선 가공경로 B의 단선 발생가능성이 가장 낮다고 할 수 있다. 이러한 결과로부터 비원형 신선 가공경로 B를 통하여 강선을 가공하면 단선 발생을 지연시킬 수 있을 것이며, 신선 가공한계를 지연시켜 강선의 고강도화를 달성할 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 5(d)에 도시한 정적 인성 값은 모든 패스에 대해서 신선 공정보다 비원형 신선으로 가공된 강선의 인성이 높음을 확인할 수 있었다. 특히, 가공경로 B의 인성 값이 가장 우수함을 확인할 수 있었다. 이러한 특성은 전술한 강도와 연성 특성에서 확인할 수 있는 데, 비원형 신선의

경우 강도가 8 패스부터는 신선 공정보다 낮았지만, 연성이 우수하였기 때문에 강도와 연성의 균형을 이루는 소재를 제조한다는 측면에서 비원형 신선 공정이 유리함을 확인할 수 있다. 특히, 비원형 신선의 가공경로 효과를 비교하면, 강도와 연성의 측면에서 큰 차이를 보이지는 않지만 모든 패스에서 가공경로 A의 강도가 우수한 반면, 연성은 가공경로 B의 경우가 우수하였다. 이렇게 상대적으로 우수한 연성은 가공 시 소재의 불균일성이 적음을 의미하며, 인장 하중에서의 우수한 단면감소율은 비틀림 하중 하에서의 연성과도 관련이 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 신선 가공한계의 증대에 따른 교량용 강선의 고강도화를 달성하고자 비원형 신선 공정을 도입하고 2 가지 가공경로에 대해 실험을 수행하였다. 동일 패스에서 인장시험 시의 강도와 연성은 가공경로간 큰 차이를 보이지 않았으나 최종 선경에서의 비틀림 연성은 비원형 신선 가공경로 B의 경우가 가장 우수하였다. 신선 및 비원형 신선 가공경로 A와 B의 세 공정 모두 가공 시 단선이 발생하지 않았으나, 비틀림 시험 시 10 패스 신선의 경우는 박리파괴가 발생하여 이미 신선 가공한계에 도달하였고, 12 패스 비원형 신선 가공경로 B의 경우는 발생하지 않았다. 즉, 10 패스 신선의 경우는 박리파괴의 발생으로 인하여 후속 연선 공정의 적용이 어렵지만 비원형 신선 가공경로 B의 경우에는 적용이 가능할 것으로 보인다. 이러한 박리파괴 발생 저감의 원인으로는 비원형 신선 가공경로 B에서 박리파괴를 촉진시킬 수 있는 것으로 알려져 있는 {110}<110> 원형집합조직 성분이 가장 적게 발달하였기 때문으로 판단된다. 신선 가공한계를 기준으로 10 패스까지 신선 가공된 강선과 비원형 신선 가공경로 B로 12 패스까지 가공된 강선을 비교하면, 비원형 신선 가공경로 B의 경우가 극한인장강도와 항복강도 값이 각각 73 MPa (3.2%)와 169 MPa (7.9%)만큼 높고 단면감소율은 8%만큼 향상되었으며, 비틀림 연성 또한 우수하기 때문에 신선 가공한계를 증대시켜서 강선의 고강도

화를 달성하였고 고강도-고연성의 강선을 제조할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 POSCO의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다. 실험장비 사용에 협조해 주시고 실험을 도와주신 POSCO 기술연구원의 박용식, 최명수님께 감사 드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Nam, W. J. and Bae, C. M., 2003, "Factors on the Drawability in Pearlitic Steels," *Trans. of Mater. Process.*, Vol. 12, No. 7, pp. 610-614.
- (2) Languillaume, J., Kapelski, G. and Baudelet, B., 1997, "Cementite Dissolution in Heavily Cold Drawn Pearlitic Steel Wires," *Acta Mater.*, Vol. 45, No. 3, pp. 1201-1212.
- (3) Kim, D. W., Lee, S. K., Kim, B. M., Jung, J. Y. and Ban, D. Y., 2010, "Prediction of Axial Residual Stress in Drawn High-Carbon Wire Resulting due to Increase in Surface Temperature," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 10, pp. 1479-1485.
- (4) Liu, Y., Jiang, Q., Wang, G., Wang, Y., Tidu, A. and Zuo, L., 2005, "Influence of Microstructure and Textures on the Torsional Behavior of Pearlitic Wires," *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 21, No. 3, pp. 357-360.
- (5) Hwang, S. K., Baek, H. M., Lee, J. W., Son, I. H., Im, Y. T. and Bae, C. M., 2014, "The Effect of Microstructure and Texture Evolution on Mechanical Properties of Low Carbon Steel in a Non-Circular Drawing Sequence," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 214, No. 2, pp. 318-325.
- (6) Lee, J. W., Baek, H. M., Hwang, S. K., Son, I. H., Bae, C. M. and Im, Y. T., 2014, "The Effect of Multi-Pass Non-Circular Drawing Sequence on Mechanical Properties and Microstructure Evolution of Low-Carbon Steel," *Mater. Des.*, Vol. 55, pp. 898-904.