

송전선용 고질소강선의 비틀림 특성에 미치는 열처리의 영향

Effect of Heat Treatment on Torsion Characteristics of High Nitrogen Steel Wire for Overhead Conductors

김정훈^{1,a}, 김봉서¹, 박수동¹, 김병걸¹, 이희웅¹

(Jung-Hoon Kim^{1,a}, Bong-Seo Kim¹, Su-Dong Park¹, Byung-Geol Kim¹, and Hee-Woong Lee¹)

Abstract

The effect of heat treatment on torsion characteristics of high nitrogen steel wire has been studied by torsion test, tensile test, specific resistivity, X-ray diffraction and scanning electron microscopy. After heat treatment at 600~700°C, torsion cycle was increased with increasing temperature. Especially, in case of high nitrogen steel wire heat treated at 650°C, torsion cycle was sharply increased. It is estimated that cold worked high nitrogen steel wire started to recrystallize and phase transform at 640°C in air atmosphere.

Key Words : High nitrogen steel wire, Heat treatment, Torsion test, Recrystallize, Phase transform

1. 서론

기존의 송전선용 강선으로 사용되는 고탄소강은 강자성 특성을 지니고 있어 송전시 와전류손에 의한 송전손실을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 개발 중인 고질소강은 상자성 특성을 지니고 있어 송전시 와전류손에 의한 송전손실을 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 고강도, 내식성이 우수하다. 이러한 전선의 제조공정은 소선으로 압출, 신선 공정을 거쳐 연선 공정을 거치게 되는데 연선된 과정에서 강선이 비틀어지면서 꼬여진다. 이러한 과정에서 비틀림 응력을 받게 되며 연선된 상태에서는 비틀림으로 인한 잔류 응력과 영구적인 소성변형이 존재하게 된다. 일반적으로 강선의 가공에 의한 비틀림 특성은 가공량이 증가함에 따라서 비틀림 특성 및 연성이 크게 감소하게 된다.

고질소강선의 경우 7mm에서 45회를 나타내고 냉간 신선에 의해 직경이 6mm이하로 가공하게 되면 비틀림 특성이 크게 감소하여 약 4회 정도를 나타낸다고 보고[1]하였다. 위와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 직경 3.5mm로 냉간가공된 고질소강선을 열처리에 의해 향상시켜 보고자 하였다. 비틀림 특성에 미치는 열처리의 영향을 조사하기 위하여 특정 온도에서 열처리를 하여 공냉한 후 고질소강선의 비틀림 특성을 조사하였다. 또한 열처리 온도에 따라 나타나는 고질소강선의 조직을 관찰하여 비틀림 특성에 미치는 열처리의 영향을 규명해 보고자 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 재료는 직경 3.5mm로 냉간 가공된 고질소강선을 사용하였으며 그 화학조성은 표 1에 나타내었다. 이 시편은 온도 620, 630, 640, 650, 670, 690°C에서 10, 30, 60분 간격으로 등온에서 열처리 한 후 공냉하였다. 열처리 후 비틀림 시험은 미국표준공업협회(ASTM E558)에 근거하여

1. 한국전기연구원 신소재응용그룹
(경남 창원시 성주동 28-1)
a. Corresponding Author : kim7618@daum.net
접수일자 : 2003. 9. 29
1차 심사 : 2003. 10. 11
심사완료 : 2003. 10. 31

시험편 길이를 강선 직경의 100배로 하였다. 이 때 비틀림 속도는 비틀림 시험편이 열로 인한 영향을 받지 않도록 하기 위하여 5cycle/min로 하였으며 하중은 시험편의 인장강도 1%인 18.16kg로 하여 실험하였다. 인장 시험은 일본공업표준(JIS Z2201)규격에 근거하여 표점거리 100mm, 그림 사이의 거리 150mm로 하여 실험하였다. 경도는 마이크로 비커스(micro vickers)를 이용하여 하중 200g, 하중 유지 시간 15초 조건에서 7회 측정하여 평균값을 나타내었다. 기계적 특성 평가 후 X선 회절(X-ray diffraction)분석을 통하여 상 분석을 하였으며 주사전자현미경(Scanning electron microscopy)을 이용하여 파단면을 관찰하였다.

표 1. 고질소강선의 화학 조성(wt-%).

Table 1. Chemical composition of high nitrogen steel wire(wt-%).

	Fe	C	N	S	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	P	Si
wt-%	Bal.	0.11	0.3	0.01	0.1	17.8	0.11	9.7	5.42	0.02	0.51

3. 결과 및 고찰

3.1 비틀림 특성 변화

그림 1은 고질소강선의 비틀림 특성에 미치는 열처리의 영향을 관찰하기 위하여 열처리 온도, 시간에 따른 비틀림 횟수 변화를 나타낸 것이다. 열처리 온도와 시간이 증가함에 따라 열처리 하지 않은 경우보다 비틀림 횟수가 증가하였으며 특히, 640℃ 이상의 온도에서 크게 향상되었다. 열처리에 의한 연화과정은 주로 회복, 재결정, 결정립 성장의 3단계로 분류할 수 있는데 연화과정의 첫 번째 단계인 회복단계는 냉간가공된 금속의 현미경 조직의 변화는 별로 없이 금속의 물리적 성질이 회복되는 단계이다. 회복 중 전기전도도는 급격히 증가하고 격자의 변형은 상당히 감소한다. 그러나 전위에 의해 제어되는 강도는 회복온도에 별로 영향을 받지 않는다. 재결정은 냉간가공된 조직이 변형이 없는 새로운 결정립으로 대체되는 것을 말한다. 재결정은 현미경조직을 관찰함으로써 쉽게 알아낼 수 있으며 강도나 경도는 감소하고 연성이 증

가하며 전위밀도가 현저히 감소하고 가공경화의 모든 효과가 없어진다. 회복과 재결정의 구동력은 냉간가공에 의하여 저장된 에너지이다[2]. 본 연구에서 640℃ 이하의 온도에서 열처리 한 경우 냉간가공된 고질소강선이 주로 회복에 의하여 전위가 재배열되거나 국부적으로 재결정이 시작되는 단계로 생각되어지며 640℃ 이상의 온도에서 열처리 한 경우 냉간가공된 고질소강선이 열처리 온도와 시간의 증가에 따라 회복과 재결정에 대한 구동력이 크게 작용하여 비틀림 특성이 크게 향상될 것으로 생각된다. 10분 동안 열처리 한 경우 640℃ 이하의 온도에서는 열처리 하지 않은 경우보다 비틀림 횟수가 감소하였는데 이는 금속의 이전 변형량, 온도, 시간 초기 결정 입도, 금속과 합금의 조성은 회복과 재결정에 중요한 영향[3,4,5]을 미치며 10분 동안 열처리 한 경우는 회복과 재결정을 일으키는데 충분하지 않은 시간이기 때문이라 생각된다[6]. 그림 2,3은 열처리 온도와 시간에 따른 고질소강선의 비틀림 전단 응력과 전단 항복응력을 나타낸 것이다. 원형 선재의 경우 비틀림 표면에는 최대 전단 응력이 발생하며 중심에서의 응력은 영이 된다. 즉 반경 방향을 따라 응력이 변하게 되는데 탄성 범위 내에서는 응력이 직선적으로 변하여 측정이 가능하다. 이를 근거로 하여 측정한 결과 비틀림 전단 응력과 비틀림 전단 항복 강도는 온도와 시간의 증가에 따라 감소하고 있다.

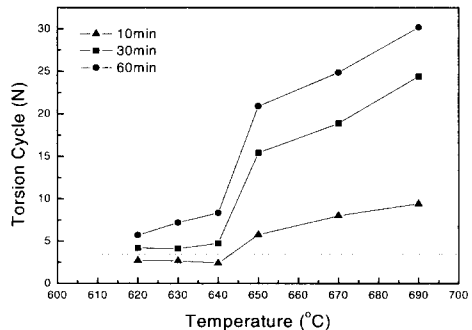


그림 1. 고질소강선의 비틀림 특성에 미치는 열처리의 영향.

Fig. 1. Effect of heat treatment on torsion characteristics of high nitrogen steel wire.

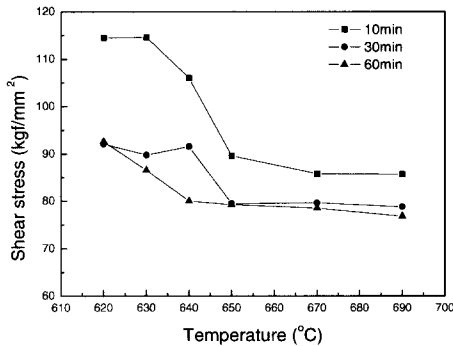


그림 2. 열처리 온도에 따른 고질소강선의 비틀림 전단응력 변화.

Fig. 2. Variation of torsion shear stress of high nitrogen steel wire with heat treatment temperature.

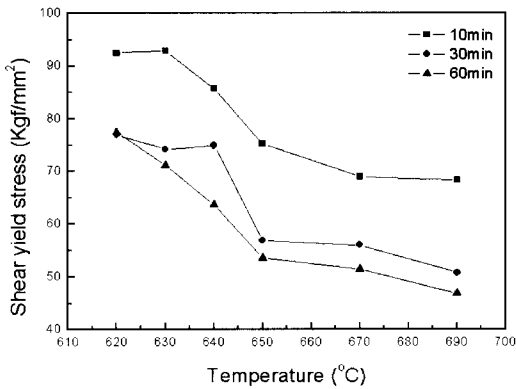


그림 3. 열처리 온도에 따른 고질소강선의 비틀림 항복 전단응력 변화.

Fig. 3. Variation of torsion shear yield stress of high nitrogen steel wire with heat treatment temperature.

3.2 기계적 특성 변화

그림 4는 30분 동안 열처리 후 온도의 증가에 따른 고질소강선의 경도 변화를 나타낸 것이다. 온도의 증가에 따라 경도는 감소함을 나타내었으며 특히, 640°C 이상의 온도에서 크게 감소하였다. 이는 그림 1에 나타낸 비틀림 결과에서 고찰한 바와 같이 640°C 이하에는 주로 회복에 의하여 전위가 재배열되거나 국부적으로 재결정이 시작되며 640°C 이상에서 회복 및 재결정 과정에 의하여 보다 안정

한 결정립계가 생성되어 연화되기 때문이라 생각된다. 그림 5는 30분 동안 열처리 후 고질소강선의 온도의 증가에 따른 전기비저항의 변화를 나타낸 것이다. 온도가 증가할수록 전기 비저항은 감소하고 있다. 이는 열처리에 의해 냉간가공된 고질소강선의 전위밀도 감소로 인해 잔류응력이 제거되어 전기비저항이 점차 감소하고 있음을 알 수 있다.

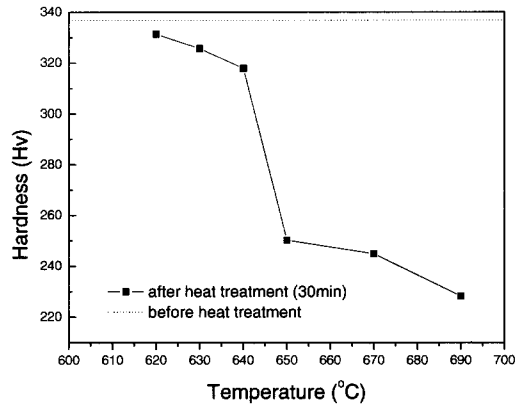


그림 4. 열처리 온도에 따른 고질소강선의 경도 변화.

Fig. 4. Variation of hardness of high nitrogen steel wire with heat treatment temperature.

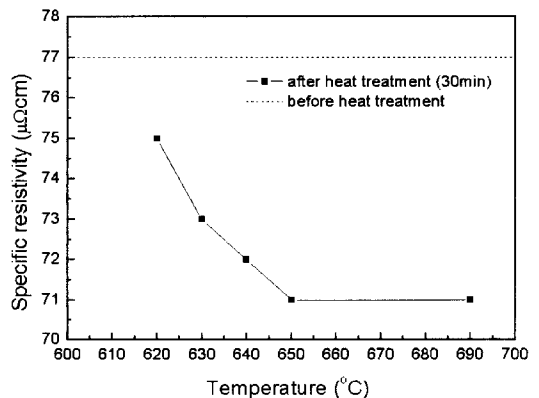


그림 5. 열처리 온도에 따른 고질소강선의 전기비저항 변화.

Fig. 5. Variation of specific resistivity of high nitrogen steel wire with heat treatment temperature.

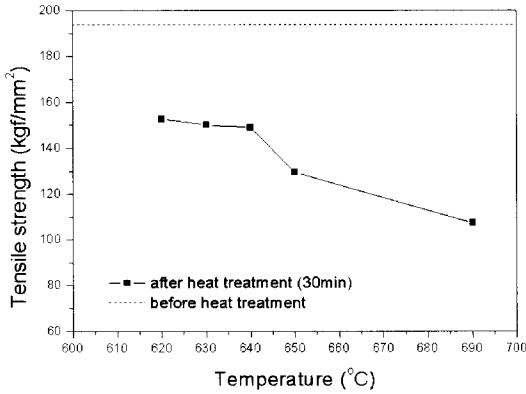


그림 6. 열처리 온도에 따른 고질소강선의 인장강도 변화.

Fig. 6. Variation of tensile strength of high nitrogen steel wire with heat treatment temperature.

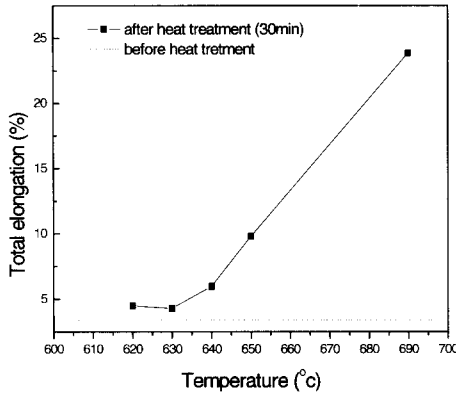


그림 7. 열처리 온도에 따른 고질소강선의 연신율 변화.

Fig. 7. Variation of total elongation of high nitrogen steel wire with heat treatment temperature.

그림 6,7은 열처리 온도에 따른 고질소강선의 인장강도 및 연신율 변화를 나타낸 것이다. 열처리 온도가 증가함에 따라 인장강도는 감소하고 있으며 640°C 이하의 온도에서는 인장강도의 변화가 그다지 크지 않으며 640°C 이상의 온도에서 인장강도가 크게 감소하고 있다. 또한 연신율 변화는 비틀림 결과와 유사한 경향성을 나타내었다. 이는 640

°C 이하의 온도에서 열처리된 고질소강선의 경우 전위의 재배열로 인해 잔류응력이 점차 제거되다가 640°C 이상에서 재결정의 핵생성장으로 작용하는 전위집적부의 밀도가 크게 감소하기 때문에 인장강도가 크게 감소하고 연신율이 증가할 것으로 생각된다.

3.3 X-선 회절 분석

그림 8은 열처리 하지 않은 경우와 650°C, 30분 동안 열처리 한 고질소강선의 비틀림 특성에 미치는 열처리의 영향을 조사하기 위하여 X-선 회절을 이용하여 비교 분석한 것이다. 열처리를 하지 않은 경우 γ 상에 비해 α' 상의 피크가 증가함을 보이고 있으며 650°C, 30분 열처리 한 경우는 α' 상에 비해 γ 상의 피크가 증가함을 보이고 있다. 이는 열처리에 의해 냉간가공으로 변화되었던 고질소강선의 상이 냉간가공 이전의 상으로 되돌아가기 시작하여 열처리 후 α' 상 $\rightarrow\gamma$ 상으로 역변태가 진행되었으며 이로 인해 연신율 및 비틀림 특성의 향상에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. F. Gauzzi 등 [7,8,9]은 AISI304강을 X-선 회절 분석에 의해 400°C 등온에서 열처리 시간에 따른 α' 상의 체적분율을 조사하였는데 열처리 시간의 증가에 따라 α' 상의 체적분율이 점차 감소한다고 보고하였다. 본 연구에서도 열처리 온도와 시간이 증가함에 따라 γ 상에 비해 α' 상의 상대 체적분율이 감소하여 α' 상의 체적분율이 비틀림 특성의 향상에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

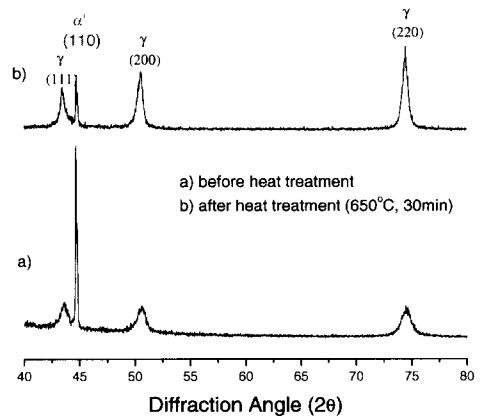
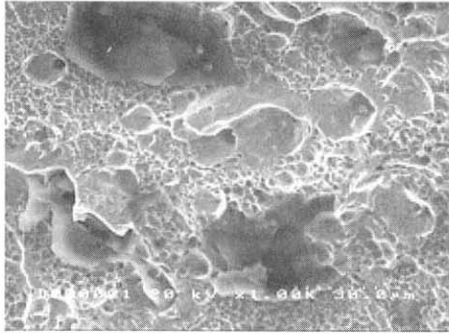
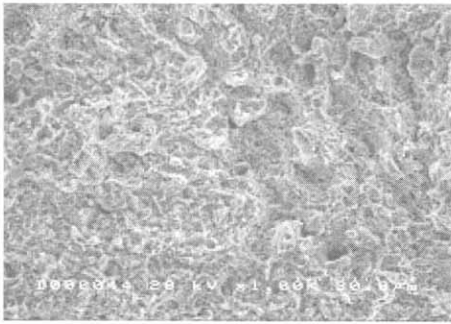


그림 8. 고질소강선의 X-선 회절 피크.

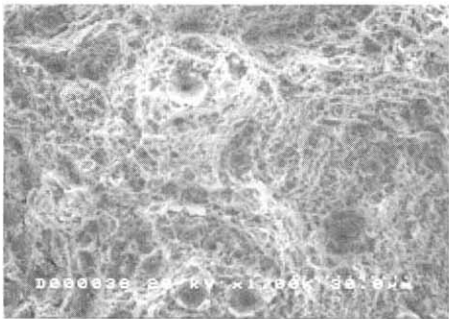
Fig. 8. X-ray diffraction peaks of high nitrogen steel wire.



(a)



(b)



(c)

그림 9. 비틀림 시험 후 고질소강선의 SEM사진
(a) 열처리 하지 않은 경우 (b) 620°C (c) 650°C.

Fig. 9. SEM micrographs high nitrogen steel wire after torsion test (a) before heat treatment (b) 620°C (c) 650°C.

3.4 SEM 분석

그림 9는 열처리 하지 않은 경우와 30분 동안 620, 650°C에서 열처리 한 경우 고질소강선의 비틀림 파단면 사진을 나타내었다. 열처리 하지 않은

경우 취성 파단면의 특징인 평탄한 파단면의 형상을 보이고 있으며 열처리 한 경우 온도가 증가함에 따라 연성 파단면의 특징인 물결 모양과 같이 움푹 들어간 형상을 보이고 있다. 이는 620°C에서 냉간가공으로 일어난 내부응력이 점차 제거되다가 650°C 이후 재결정 및 역변태가 진행되어 연성 파단면의 형상을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

직경 3.5mm로 냉간가공된 고질소강선을 600에서 700°C 까지 열처리를 하여 비틀림 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고질소강선의 비틀림 특성은 열처리에 의해 열처리 하지 않은 경우보다 향상 되었다.
2. 고질소강선의 비틀림 특성은 640°C 이상의 온도에서 역변태 및 재결정이 시작되어 크게 향상 되었다.
3. 고질소강선의 비틀림 특성은 열처리에 의해 향상되는 반면 인장강도가 크게 감소하는 사실을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국전기연구원에서 주관하는 국가지정연구실사업과제에 의해 수행되었음을 알려드립니다.

참고 문헌

- [1] 김봉서, 김병걸, 이희웅, 정원섭. "냉간인발에 따른 고질소 오스테나이트계 스테인레스강의 비틀림 특성", 2002 Spring Meeting Abstract of the Korean institute of Metals and materials.
- [2] 오세욱. "재료가공학", 원창출판사, p. 47, 1993.
- [3] 이백수, 이덕출 "열처리가 유리섬유 강화 복합재료의 전기적 및 기계적 성질에 미치는 영향", 전기전자재료학회지, 11권, 3호. p. 174, 1998.
- [4] 이창중, 김진수, 박강식, 한상욱, "전력케이블 절연접속계면의 절연파괴 특성에 미치는 열처리 효과", 전기전자재료학회지, 11권, 7호, p. 502, 1998.
- [5] 정성훈, 김선태. "The annealing effects of

- Au/Te/Au/n-GaAs structure”, 전기전자재료학회지, 9권, 10호, p. 1013, 1996.
- [6] 김형욱, “반복 겹침 접합압연으로 제조된 Al100 알루미늄합금 판재의 기계적 특성”, 대한금속재료학회지, 39권, 5호, p. 546, 2001.
- [7] F. Gauzzi, “Martensite formation during heat treatments of AISI304 steel with biphasic structure Material Science and Engineering”, A273-275, p. 443, 1999.
- [8] K. B. Guy. E. P. Butler, and D. R. F. West, “Reversion of bcc α' martensite in Fe-Cr-Ni austenitic stainless steels”, Metal Science, Vol. 17, p. 167, 1983.
- [9] V. Seetharman and R. Krishan, “Influence of the martensite transformation on the deformation behavior of an AISI 316 stainless at low temperature”, Chapman and Hall Ltd, p. 523, 1981.