

# 와이어의 연선평정시 스틸 코드에서의 잔류 비틀림 모멘트의 해석

이규남\* · 이형만\*\* · 김기태\*\*\*  
(1999년 4월 3일 접수)

## Analysis for Residual Twisting Moment in a Steel Cord during Twisting Wires

Gyu Nam Lee, Hyung Man Lee and Ki Tae Kim

**Key Words :** Steel Cord(스틸 코드), Over-Twisting(오버트위스팅), Untwisting(언트위스팅), Residual Torsional Stress(잔류 비틀림 응력), Hysteresis Modulus(히스테리시스계수).

### Abstract

The effects of various factors were studied on the process of a steel cord by twisting wires. To remove residual twisting moment after the steel cord process, the twisting angles of residual elastic twisting and over-twisting were measured and compared with finite element results. The agreement between experimental data and finite element calculations was good for the angles of residual elastic twisting and over-twisting. The stress distributions in a steel cord under complex loading conditions were also obtained by using the finite element analysis.

### 1. 서론

스틸 코드(steel cord)는 타이어, 컨베이어 벨트, 타이밍 벨트 및 고압 호스등과 같은 고무 제품들의 보강재로 널리 사용되고 있다. 스틸코드 제조공정의 중요 인자로는 인장강도, 인장하중, 선경등이 있으며 신선(wire drawing)과 연선평정(twisting wires)공정에서 코드의 탄성 회복량에 영향을 주게 된다. 연선평정에서 꼬인 코드(twisted wires)내의 소선(single wire)들은 높은 탄성계수와 높은 항복강도로 인해 공정후 원상태로 복귀되려고 하는 탄성 회복(spring back)현상을 일으킨다. 일반적으로 탄성회복을 제거한 코드를 만들기 위해서는 코드를 오버트위스팅(over-twisting)하고 다시 언트위스팅(untwisting)하여 잔류 비틀림 모멘트를 제거하는 방법이 이용된다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 방법으로 가공된 코

드는 비틀림, 나선형 굽힘(spiral bending), 인장하중, 인접 와이어들 간의 전단력, 접촉 마찰력 등을 받게 되어 아주 복잡한 응력상태에 놓이게 된다.

Kunda<sup>(3)</sup>는 단선의 소성가공에서 이론에 의한 계산치와 실제공정의 실험치를 비교하여 탄성 회복량의 차이가 있음을 보였다. Jones와 Christodoulides<sup>(4)</sup>와 Utting 과 Jones<sup>(5,6)</sup>는 여러 가닥의 와이어로 이미 제조된 스틸코드의 인장 또는 비틀림하에서의 거동에 대하여 연구하였으며 Jiang, Yao 및 Walton<sup>(7)</sup>은 적은 수의 유한요소격자를 사용하여 스틸코드의 인장 또는 비틀림하에서의 거동을 예측하는 해석적 기법에 대하여 연구하였다. 반면, 직선의 와이어들을 꼬아서 스틸코드를 제조하는 연선평정에 대한 실험과 해석적 접근은 아직 수행되지 않았다.

본 논문에서는 2도 연선평정<sup>(8,9)</sup>에서 스틸 코드 제조 시에 인장강도, 인장하중, 선경등의 인자들이 탄성회복과 비틀림 양에 미치는 영향들을 실험을 통해 조사하였다. 또한, 잔류 비틀림 모멘트를 제거한 코드를 만들기 위해서 추가적으로 가해야 할 비틀림 양을 실험을 통해 구하고, 3차원 유한요소 해석의 결과와 비교 검토하였다.

\* 포항공과대학교 철강대학원 기계공학과

\*\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : korean@postech.ac.kr

TEL : (0562)279-2164 FAX : (0562)279-5899

## 2. 와이어의 비틀림 가공

와이어는 신선공정에서 냉간 가공경화에 의해 인장강도가 아주 높아지고 이방성 구조를 이루게 되며 와이어 자체에 길이 방향, 반지름 방향, 원주 방향의 잔류응력이 존재한다. 또한, 와이어가 비틀리게 되면 신선공정에서 생성되었던 잔류응력은 감소하게 된다. 비틀림 과정에서 와이어의 길이는 초기에는 늘어 났다가 탄성영역이 아주 작아질 때 반대로 시편은 줄어든다.

비틀림에 의해 생성된 전단응력과 신선공정에서 발생한 잔류응력은 와이어의 소성변형에 영향을 준다. 비틀림 과정에서 전단응력의 영향으로 가장 큰 응력을 받는 와이어의 표면 층에서는 길이 방향의 잔류응력의 평균값이 유효응력의 20%를 초과하지 않는다.<sup>(10)</sup> Huber<sup>(11)</sup>의 공식을 이용하면 재료의 소성변형을 결정하는 전단응력을 계산할 수 있다.

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_p^2 - \sigma_{\omega\tau}^2} \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 유효응력이고,  $\sigma_{\omega\tau}$ 는 신선된 와이어에서의 잔류응력이다. 잔류응력을 고려하여 Huber에 의해 계산된 전단응력은 잔류응력을 고려하지 않고 계산한 전단응력과 2%차이 밖에 나지 않는다. 따라서 일반적으로 비틀림하의 소성변형 거동에서는 신선된 선의 잔류응력의 영향을 고려하지 않는다.

비틀림 가공은 금속의 항복강도와 인장강도를 높이기 위한 냉간 소성가공의 일종으로 비틀림 과

정 시에 가공경화로 인해 강도가 증가된다.<sup>(12)</sup> 비틀림 가공의 특성으로는 비틀림 과정 시에 와이어의 단면적의 변화없이 축 방향의 비틀림만이 일어나며, 와이어에 큰 비틀림 변형을 가한다 할지라도 항상 탄성영역이 존재한다는 것이다.

원형 단면 봉에 대한 탄성영역에서의 비틀림 모멘트  $M$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉,

$$M = \int_0^R \tau r dA = \int_0^R G r^2 \theta dA = G \theta \int_0^R r^2 dA = G \theta J \quad (2)$$

여기서  $\tau$ ,  $r$ ,  $J$ ,  $G$ , 및  $\theta$ 는 각각 전단응력, 반경, 극관성 모멘트, 전단 탄성계수, 및 비틀림 각이다. 또한, 탄성 영역에서의 비틀림 양  $\theta$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_{\tau} = \frac{M}{GJ} \quad (3)$$

한편, Kunda<sup>(3)</sup>는 실험을 통하여 탄성 회복 선도가 탄성 기울기  $G$ 와 일치하지 않고 히스테리시스 곡선(hysteresis loop)의 폭에 따라 기울기가 작아짐을 보였다. Kunda는 Fig. 1과 같이 전단 탄성계수  $G$  대신에 히스테리시스 계수라 정의한  $G_z$ 를 도입하여 실험치에 더 근접한 잔류 탄성 비틀림 양을 계산하였다. 본 논문에서는 세 가닥의 와이어에 대한 이론적인 잔류 탄성 비틀림 양이 식(3)과 같이 선형적으로 일어난다고 가정하고, 잔류 탄성 비틀림 양의 이론치와 실험치를 비교하였다.

## 3. 실험 및 유한요소해석

### 3.1 시편

인장강도가 다른 시편을 제조하기 위해 Table 1과 같이 두 가지 조성을 갖는 직경 5.5 mm 와이어

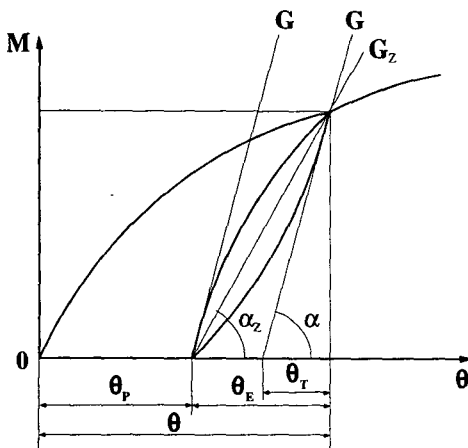


Fig. 1 Definition of hysteresis modulus( $G_z$ )

Table 1 Chemical composition of a wire rod

Chemical Composition	High Tension(wt%)	Normal Tension(wt%)
C	0.820	0.720
Si	0.200	0.185
Mn	0.520	0.580
P	0.004	0.004
S	0.003	0.003
Cr	0.010	0.020
Al	0.001	0.001

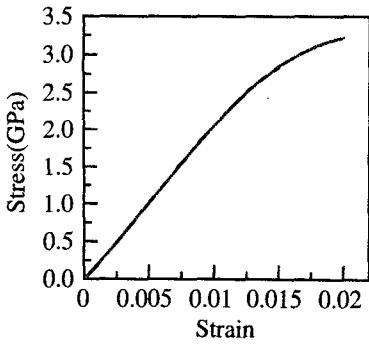


Fig. 2 Stress-strain relation of 0.30 mm wire under tension

를 직경 3.5mm 로 신선한 후 퍼텐팅(patenting)처리를 하였다. 또한 직경 1.60 mm 까지 신선을 하고 퍼텐팅처리 후 황동 도금을 시킨 다음 직경 0.30mm 까지 신선을 하였다. 스틸 코드의 연선공정에서 탄성회복에 영향을 미치는 인자들을 조사하기 위해 최종 신선공정에서 인장강도와 선경을 변화시켜 여러 종류의 소선들을 제조하였다.

3.2 인장시험

강선의 인장강도, 탄성계수, 항복강도, 및 탄소성 거동 등을 조사하기 위해 일축 인장시험을 하였다. Fig. 2는 강선의 일축 인장시험 결과를 나타낸다. 강선은 지름이 0.30 mm 로 가늘기 때문에 그립부에서 파단이 발생하지 않도록 하기 위해 특수한 공압 클램프를 사용하였고 시편의 표점 거리는 250 mm, 인장속도는 50 mm/min 이었다.

3.3 비틀림시험

비틀림시험은 전단변형각과 인장변형률을 측정할 수 있는 시스템과 정밀한 토크센서가 장착된 비틀림 시험기(model T015, Adelaide, Canada)에서 실시 하였으며 3x0.30 mm 구조의 코드 제조 시의 토오크-비틀림 각 선도를 얻기 위해 직경 0.30 mm 인 와이어 세 가닥의 한 끝을 비틀림 시험기 하부의 고정된 콜렛에 고정시키고 다른 한 끝은 자유로이 회전하는 상부콜렛에서 미끄러짐이 발생하지 않도록 단단히 고정시킨 후 비틀림을 가하였다. 이때 비틀림 과정에서 말림(curling)현상을 방지하기 위해 10 N의 인장하중을 가해 주었으며 시편 길이는 110 mm 이었다.

3.4 코드의 비틀림 각

코드를 원하는 피치로 비틀림 한 후 코드에 존재하는 탄성회복을 제거하기 위해 추가로 가해줘

\* 와이어의 인성(toughness)을 높이기 위해 연욕(lead bath, 900°C)처리를 하는 것이다.

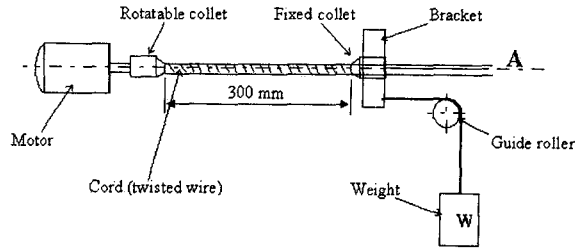
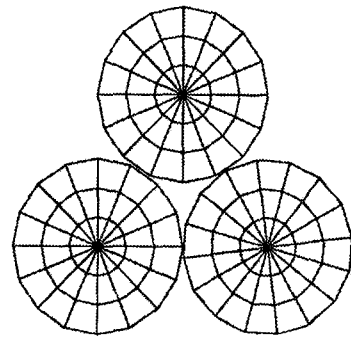
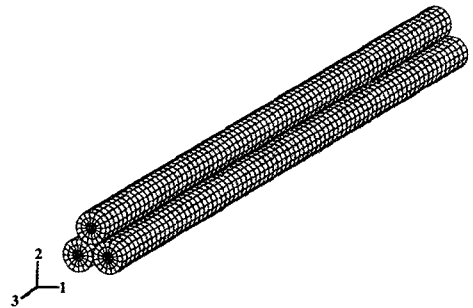


Fig. 3 Experimental device for measurement of the twisting angle



(a)



(b)

Fig. 4 A finite element model for the analysis of residual twisting moment

야 할 비틀림 양을 잔류 비틀림 시험기에서 측정 하였다. Fig. 3은 잔류 비틀림 시험기의 개략도와 측정방법을 나타낸다. 시편 길이 500 mm 와이어 세 가닥의 한 끝은 고정시키고 시편의 표점 거리가 300 mm 가 되는 지점을 콜렛에 물려 10 rpm의 속도로 회전을 시켜 원하는 피치가 형성될 수 있도록 하였다.

3.5 유한요소해석

와이어에 대한 3차원 형상을 모델링하기 위하여 SDRC I-DEAS<sup>(13)</sup>(Structural Dynamics Research

Corporation, USA)를 사용하였다. I-DEAS에서 작성한 자료를 ABAQUS<sup>(14)</sup>를 이용하여 스틸 코드의 잔류 비틀림 모멘트를 해석하였다. Fig. 4(a)와 (b)는 스틸 코드의 잔류 비틀림 모멘트 해석에 사용된 유한 요소 격자를 나타낸다. 사용된 요소는 C3D6(continuum stress/displacement three-dimensional 6nodes)과 C3D8의 두 종류로 각각 3840개와 7680개로 총 11520개의 요소를 사용하였다. 또한, 와이어의 마찰 계수  $\mu=0.3$  과 푸아송비  $\nu=0.3$  을 사용하였다. 와이어의 소성거동은 수축의 인장시험을 통하여 구한 결과를 평균하여 유한요소 해석에 사용하였다. 실험에서와 같은 조건으로 피치가 14 mm가 되는 지점에서 제하여 탄성회복량을 구했으며 잔류 비틀림 모멘트를 없애기 위해 추가적으로 가해줘야 할 비틀림 양은 피치가 14 mm인 지점에서 +z 축 방향에 대해 각 변위를 주고 다시 -z 축 방향으로 같은 양만큼의 각 변위를 주어 잔류 비틀림 모멘트가 제거되는 각을 시행 착오에 의해 구하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

인장강도 3.3 GPa을 갖는 0.30 mm 와이어 세가닥에 10 N의 인장하중을 가하고 비틀림 속도를 2, 10, 및 15 rpm으로 변화시켜 실험을 하였다. 비틀림 속도 2, 10, 및 15 rpm의 속도에서 측정된 잔류 탄성 비틀림 양은 각각 0.1565, 0.1571, 및

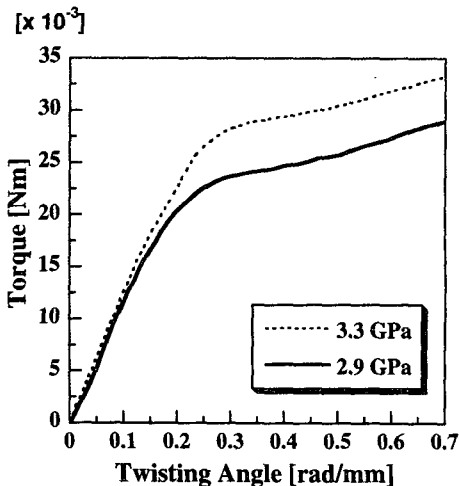


Fig. 5 Variations of torque with twisting angle for cords with high and low tensile strengths under uniaxial tensile load of 10N

0.1571 rad/mm 이고 코드의 비틀림 모멘트를 제거하는데 필요한 추가 비틀림 양은 각각 0.1738, 0.1745, 및 0.1738 rad/mm이다. 비틀림 속도가 잔류 탄성회복량과 추가 비틀림 양에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

인장강도 3.3 GPa를 갖는 0.30 mm 와이어 세가닥을 비틀림 시험기에서 10 N의 인장하중과 2 rpm의 비틀림 속도로 연선하여 피치를 각각 14 mm( $\theta = 0.44745$  rad/mm)와 10 mm( $\theta = 0.62463$  rad/mm)로 변화시켜 실험을 하였다. 피치 14 mm와 10 mm에서 측정된 코드의 잔류 비틀림 모멘트를 제거하는데 필요한 추가 비틀림 양은 각각 0.1745와 0.1536 rad/mm이다. 코드의 피치가 클수록 단위길이 당 비틀림 각도가 작으므로 소성변형이 작게 일어난다. 따라서 잔류 탄성 변형물을 제거하기 위해서는 피치가 작은 코드보다 큰 코드에 더 큰 변형을 가해야 한다.

Fig. 5는 각각 3.3 GPa과 2.9 GPa의 인장강도를 갖는 와이어로 제작된 코드를 비틀림 시험기에서 10 N의 인장하중과 2 rpm의 비틀림 속도로 실험

Table 2 Effect of tensile strength on the angle of residual elastic twisting and the additional angle of twisting for removing residual twisting moment

Specification	Value	
Tensile strength(GPa)	3.3	2.9
Angle of residual elastic twisting(rad/mm) when the load is removed at pitch=14mm	0.1571	0.1379
Additional angle of twisting(rad/mm) for removing residual twisting moment	0.1745	0.1535

Table 3 Effect of the total tension on the angle of residual elastic twisting and the additional angle of twisting for removing residual twisting moment

Specification	Value		
Total tension(N)	98.0	127.4	166.6
Angle of residual elastic twisting(rad/mm) when the load is removed at pitch=14	0.1571	0.1536	0.1527
Additional angle of twisting(rad/mm) for removing residual twisting moment	0.1717	0.1673	0.1649

**Table 4** Comparisons between theoretical and experimental angle of residual elastic twisting when the load is removed at pitch=14mm( $\theta = 0.44745 \text{ rad/mm}$ )

Specification	Value	
Tensile strength(GPa)	3.3	2.9
Theoretical angle of residual elastic twisting(rad/mm)	0.2392	0.2169
Experimental angle of residual elastic twisting(rad/mm)	0.1571	0.1379
Percent(%)	65.7	64

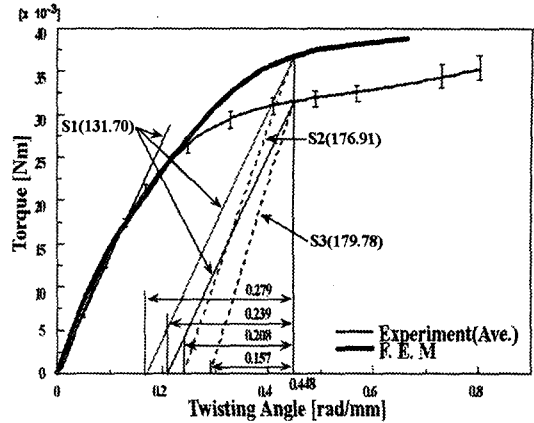
**Table 5** Comparisons between experimental angle of residual elastic twisting and additional angle of twisting

Specification	Value	
Tensile strength(GPa)	3.3	2.9
Experimental angle of residual elastic twisting(rad/mm)	0.1571	0.1379
Experimental additional angle of twisting(rad/mm)	0.1745	0.1535
Percent(%)	111.1	111.4

한 결과를 나타낸다. 높은 인장강도의 소선이 항복점이 높게 나타남을 알 수 있다. 인장강도의 변화에 따른 잔류 탄성 비틀림 양과 코드의 잔류 비틀림 모멘트를 제거하는데 필요한 추가 비틀림 양에 대한 실험 결과를 Table 2 에 나타내었다. 고 인장강도의 소선일수록 비틀림 시에 Fig. 5 와 같이 항복점이 높게 나타나므로 하중을 제거하였을 때 잔류 탄성 변형률이 크고 이것을 제거하기 위해서는 낮은 인장강도의 소선보다 더 큰 변형을 가해줘야 한다.

Table 3 은 인장강도 3.3 GPa 을 갖는 0.30 mm 와이어 세 가닥을 비틀림 시험기에서 2 rpm 의 비틀림 속도로 각각 인장하중 5, 10, 및 15 N 을 가하여 실험한 결과를 나타낸다. Table 3 에서 인장하중이 낮을수록 잔류 탄성 비틀림 양이 크고 이를 제거하기 위해서는 더 큰 비틀림 변형을 가해줘야 함을 알 수 있다.

인장강도 3.3 GPa 을 갖는 0.294, 0.300, 및 0.304 mm 각각의 세 가닥을 10 N 의 인장하중에서 2 rpm 의 비틀림 속도로 연선하여 측정된 잔류 탄성 비틀림 양은 각각 0.1501, 0.1536, 및 0.1571 rad/mm 이고 코드의 비틀림 모멘트를 제거하는데 필요한 추가 비틀림 양은 각각 0.1623, 0.1673, 및 0.1707 rad/mm 이다. 선경이 클수록 비틀림 모멘트가 크



**Fig. 6** Comparison of the angle of residual elastic twisting, when the load is removed at pitch=14mm, between experimental data and finite element results(tension=10N, tensile strength=3.3 GPa)

게 작용하므로 항복점이 높게 나타난다. 이러한 이유로 선경이 클수록 잔류 탄성 비틀림 양이 크고 이의 제거를 위해서는 작은 선경에 비해 더 큰 비틀림 변형을 가해줘야 한다.

Table 4 는 서로 다른 인장강도를 갖는 와이어를 피치가 14 mm 인 지점에서 하중을 제거 했을 때 잔류 탄성 비틀림 양의 이론치와 실험치를 나타낸다. Table 4 에서 이론치는 식 (3)과 같이 탄성영역에서 스틸 코드의 비틀림 양과 비틀림 모멘트가 선형적인 관계를 가짐을 가정하여 구한 값이다. 인장강도 3.3 GPa 과 2.9 GPa 를 갖는 와이어들에서의 이론치에 대한 실험치의 비는 거의 동일하게 65% 정도임을 알 수 있다. Table 5 는 잔류 탄성 비틀림 양과 이것을 제거하기 위해 추가로 가해줘야 할 비틀림 양의 실험치를 나타낸다. 잔류 탄성 비틀림 양보다 10%정도 더 많은 양을 추가로 가해줘야 잔류 비틀림 모멘트가 제거됨을 알 수 있다.

Fig. 6 은 인장강도가 3.3 GPa 인 0.30 mm 와이어 세 가닥을 피치 14 mm 로 연선하여 하중을 제거 했을 때 실험과 유한요소해석에 의한 잔류 탄성 비틀림 양의 비교를 나타낸다. Fig. 6 에서 S1 은 식 (3)과 같이 탄성영역에서 스틸 코드의 비틀림 양과 비틀림 모멘트가 선형적인 관계를 가짐을 가정하여 구한 탄성회복 선도이고 S2 와 S3 은 각각 유한요소해석과 실험에서 구한 탄성회복 선도이다. 실험에서와 마찬가지로 유한요소해석의 결과에서도 잔류 탄성 비틀림 양이 이론적인 예측치 보다 작음을 알 수 있다. 이러한 이유는 여러가닥의

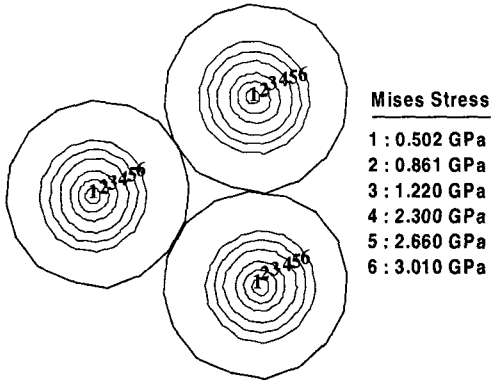


Fig. 7 Mises stress contour of the twisted cord at the center cross section ( $\theta = 0.448$  rad/mm)

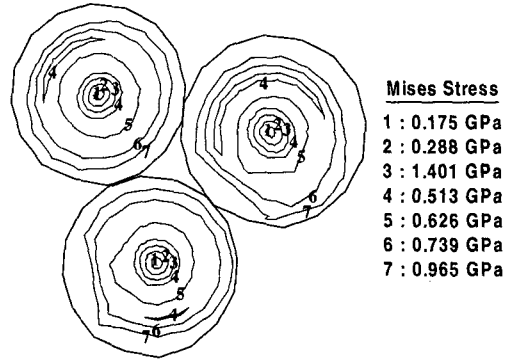


Fig. 8 Mises stress contour of the twisted cord unloaded from  $\theta = 0.448$  rad/mm

와이어를 비틀림 할 때 비틀림 모멘트뿐 아니라 나선형 굽힘, 마찰력, 및 인접 와이어들 간의 전단력 등이 동시에 작용하여 소성변형이 더 많이 진행되었기 때문이다. 또한, Fig. 6에서 실험에서 구한 비틀림 모멘트 값이 유한요소해석에서 구한 값보다 탄성영역을 벗어나면서부터 작게 나타남을 볼 수 있다. 실험에 사용한 와이어는 선선공정에서 과도한 냉간 가공경화를 받아 이방성 구조를 갖게 된다. 이방성으로 인한 재료의 불균일성으로 와이어는 연선공정에서 국부적인 응력집중과 빠른 소성변형을 하게 된다. 이로 인해 실험 결과는 등방성을 가정한 유한요소해석에 비하여 비틀림 모멘트 값이 낮게 나타나는 것으로 예측된다.

Fig. 7은 피치가 14 mm 되도록 와이어 세 가닥을 연선했을 때 유한요소해석에 의한 코드의 반경 방향으로의 Mises 응력의 분포상태를 나타낸다. Fig. 7에서 와이어 단면의 가장 바깥부분에서 Mises 응력 값이 가장 큼을 볼 수 있다.

Fig. 8은 토르크를 제거한 후에 잔류 Mises 응력의 분포상태를 나타내는데 단선의 잔류응력의 분포와 유사함을 알 수 있다.<sup>15)</sup> 반경의 중심과 반경의 2/3 되는 두 지점에서 가장 낮은 잔류응력이 분포한다. 또한, 반경의 1/3 되는 지점에서 잔류응력이 다소 증가하다 감소함을 볼 수 있다. 이 잔류응력의 분포상태에서 탄성과 소성영역의 경계를 예측할 수 있다. Fig. 8에서 중심에서 반경의 1/2 되는 지점, 즉 0.075 mm까지 소성이 진행되었음을 알 수 있다.

Fig. 9는 피치가 14 mm인 지점에서 하중 제거시의 잔류 탄성 비틀림 양과 이의 제거를 위해 추가로 가해 줘야 할 비틀림 양에 대한 실험치와 유

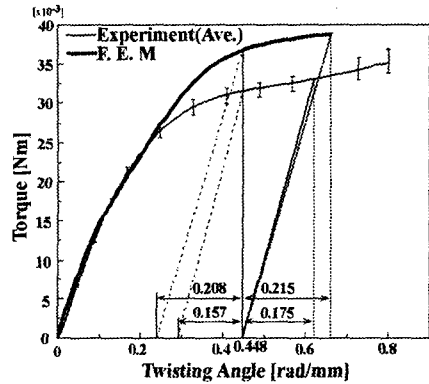
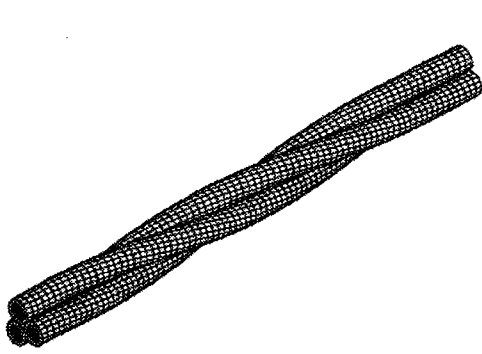


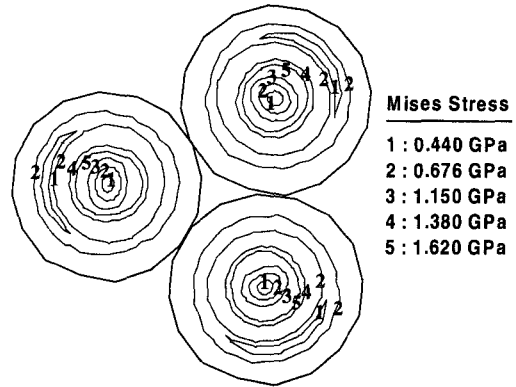
Fig. 9 Comparison between experimental data and finite element results for the additional angle of twisting to remove residual twisting moment

한요소해석의 결과를 나타낸다. Fig. 9에서 0.157과 0.208 rad/mm은 각각 피치가 14 mm인 지점에서 제하 후의 실험과 유한요소해석에서의 탄성회복량을 나타내며, 0.215와 0.175 rad/mm는 각각 잔류 비틀림 모멘트를 없애기 위해 추가로 가해져야 되는 실험과 유한요소해석에서의 비틀림 양을 나타낸다.

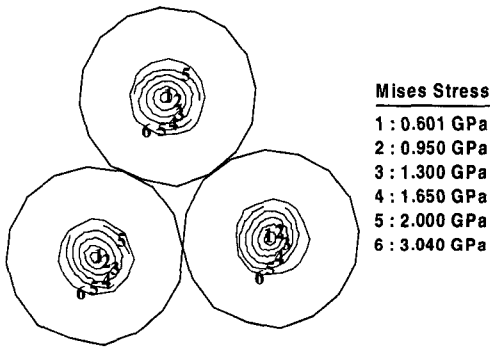
Fig. 10(a)는 유한요소해석에서 예측된 오버트위스팅후의 스틸코드의 변형된 형상을 나타낸다. Fig. 10(b)는 오버트위스팅된 코드의 반경 방향으로의 Mises 응력의 분포상태를 나타낸다. Fig. 7과 Fig. 10(b)를 비교하면 Fig. 10(b)에서의 Mises 응력의 최대값과 최소값이 다소 증가하고 최대값이 분포하는 영역이 반경의 1/2 되는 지점까지 확장되었음을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 10(b)에서 오버트



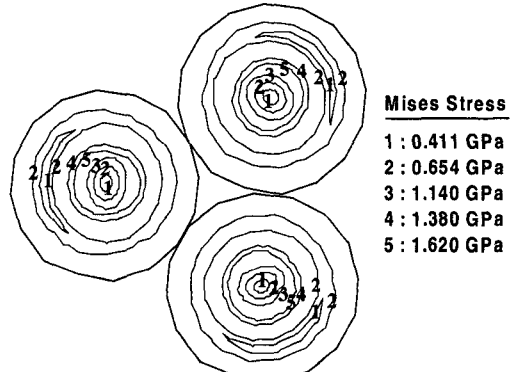
(a)



(a)



(b)



(b)

**Fig. 10** (a) The deformed shape of the over-twisted cord (b) Mises stress contour of the over-twisted cord at the center cross section ( $\theta = 0.663$  rad/mm)

**Fig. 11** Mises stress contour of the over-twisted cord (a) untwisted from  $\theta = 0.663$  rad/mm to  $\theta = 0.448$  rad/mm (b) unloaded from  $\theta = 0.448$  rad/mm

위스칭이 스틸코드 내부의 응력분포에 미치는 영향을 알 수 있다.

Fig. 11(a)는 오버트위스칭한 양만큼 다시 언트위스칭을 한 후의 반경 방향으로의 Mises 응력의 분포상태를 나타낸다. Fig. 7 과 Fig. 11(a)를 비교하면 14mm의 같은 피치를 갖지만 언트위스칭으로 인해 Fig. 11(a)에서 잔류응력이 감소된 결과를 볼 수 있다. Fig. 11(b)는 제하 후 잔류응력의 분포상태를 나타낸다. Fig. 8 과 Fig. 11(b)를 비교하면 추가 가공에 의해 Fig. 11(b)의 잔류응력이 다소 증가하였음을 알 수 있다. 또한 언트위스칭에 의해 Fig. 11(b)의 잔류응력의 분포도 달라졌음을 볼 수 있다. 잔류응력의 최대값이 Fig. 8에서는 가장자리에 분포하지만, Fig. 11(b)에서는 바깥에서 반경의 1/3 되는 곳에 분포한다.

## 5. 결론

고 탄소 강선의 연선 공정에서 발생하는 잔류 탄성 비틀림 양과 이것을 제거하기 위해 추가적으로 가해줘야 할 비틀림 양을 실험과 유한요소해석을 통해 비교 검토하였고 이에 영향을 미치는 인자들을 실험적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 코드의 잔류 탄성 비틀림 양에 영향을 미치는 인자는 인장강도, 인장하중, 선경 등이고 피치는 잔류 비틀림 모멘트를 제거하기 위한 추가 가공의 양에 영향을 미침을 알 수 있었다.

(2) 스틸 코드의 잔류 탄성 비틀림 양은 단선의 이론적 탄성 회복량보다 약간 작게 나타남을 보였다.

(3) 코드의 잔류 탄성 회복을 제거하기 위해

서는 코드가 가지고 있는 잔류 탄성 비틀림 양의 약  $1.1 \pm 0.02$  배 정도의 양만큼 추가로 비틀림 가공해야 함을 알 수 있었다.

(4) 유한요소해석을 통해 스틸 코드에서의 잔류응력의 분포, 탄성회복량, 및 잔류 비틀림 모멘트를 제거하기 위한 추가 비틀림 양을 예측하였다.

### 참고문헌

- (1) Wall, C. A., 1972, "Wire Twister," *U. S. Patent No. 3685271*.
- (2) Taketomi, K., 1973, "Twisting Motion and Process for Producing Wire Cords," *U. S. Patent No. 3771304*.
- (3) Kunda, B., 1968, "Plastic Twisting of Steel Wire," *The Wire Industry*.
- (4) Jones, N. and Christodoulides, J., C., 1980, "Static Plastic Behavior of a Strand," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 22, pp. 185~195.
- (5) Utting, W. S. and Jones, N., 1987, "The Response of Wire Rope Strands to Axial Tensile Loads-Part I. Experimental Results and Theoretical Predictions," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 29, pp. 605~619.
- (6) Utting, W. S. and Jones, N., 1987, "The Response of Wire Rope Strands to Axial Tensile Loads-Part II. Comparison of Experimental Results and Theoretical Predictions," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 29, pp. 621~636.
- (7) Jiang, W. G., Yao, M. S. and Walton, J. M., 1999, "A Concise Finite Element Model for Simple Straight Wire Rope Strand," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 41, pp. 143~161.
- (8) Bravin, B., 1984, "Twisting Machines; Analysis of Mechanics and Properties," *Wire Journal*, pp. 48~55.
- (9) Alexander, D., 1990, "Double-twist Stranding," *The Wire Industry*, Jul., pp. 494~499.
- (10) Knap, F., 1984, "Effect of Residual Stresses in Wire Drawing," *Wire World Int.*, Nov./Dec., pp. 253~255.
- (11) Knap, F., 1987, "Effects of Torsion on Residual Stresses in Wire," *Wire World Int.*, Jan./Feb., pp. 8~9.
- (12) Knap, F., 1987, "Twisting Wire and Round Bar to Increase Strength," *Wire World Int.*, Aug., pp. 94~96.
- (13) I-DEAS™ Simulation's I and II Manual, 1995, Structural Dynamics Research Corporation.
- (14) ABAQUS User's I, II, and III Manual, 1997, Hibbit, Karlsson and Sorrensen.
- (15) Ugural, A. C., 1991, *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill, pp. 343~346.