

냉연재 권취공정의 응력해석[§]

박규태* · 박용희** · 박현철*† · 원성연*** · 홍완기***

* 포항공과대학교 기계공학과, ** 포항공과대학교 엔지니어링대학원, *** POSCO 기술연구원

Stress Analysis of Cold Rolled Strip Coiling Process

Kyu Tae Park*, Yong Hui Park**, Hyun Chul Park*†, Sung Yeun Won*** and Wan Kee Hong***

* Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH., ** GEM, POSTECH.,

*** Technical Research Laboratories, POSCO.

(Received February 2, 2016 ; Revised November 18, 2016 ; Accepted December 23, 2016)

Key Words: Strip Coiling(권취), Structural Analysis(구조해석), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 두께가 얇은 스트립의 권취공정에서는 맨드릴과 함께 슬리브가 사용된다. 이때 스트립과 슬리브의 응력분포는 코일의 좌굴 및 슬리브의 두께 결정에 중요한 요인으로 작용한다. 하지만 스트립 권취 시 압력이 과도하게 누적됨에 따라 이를 실측하는 데에는 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 권취공정에 대한 유한요소모델을 수립하였다. 제안된 모델을 이용하여 슬리브의 반경, 원주방향 응력 및 스트립 층간 응력에 대해 분석하였다. 스트립 두께 변화에 따른 응력분포를 확인하였으며, 1 mm 스트립의 경우 권취 시작점에서 6.3배 큰 응력이 발생하였다. 맨드릴이 제공하는 반력에 의해 스트립 90 mm 적층 시 슬리브의 반경방향 응력이 선행이론대비 14.8 % 증가하였다.

Abstract: In the thin strip coiling process, it is necessary to use a sleeve with a mandrel to prevent excessive deformation of the strip. The stress distribution in the sleeve and strip is an important factor to determine the size of the sleeve. However, an experimental approach is almost impossible because of the accumulation of high pressure. A finite element (FE) model of the strip coiling process was developed in this study. Then, the radial and hoop stresses on the sleeve and strip were investigated using FE analyses. The theoretical values and analysis results under idealized conditions were compared to verify the FE model. The effect of the strip thickness on the stress distribution was also investigated. The radial stress increased by 6.3 times for a 1-mm-thick strip at the coil starting point. The radial stress at the sleeve increased by 14.8 % with a stacked thickness of 90 mm because of the reaction force applied by the mandrel.

- 기호설명 -

1. 서론

- r : 반경방향 거리(m)
- r_1 : sleeve의 내경(m)
- r_2 : sleeve의 외경(m)
- r_3 : strip coil의 외경(m)
- $\sigma_{r,strip}$: strip 층간 반경방향 응력(MPa)
- $\sigma_{h,strip}$: strip의 원주방향 응력(MPa)
- $\sigma_{r,sleeve}$: sleeve의 반경방향 응력(MPa)
- $\sigma_{h,sleeve}$: sleeve의 원주방향 응력(MPa)

압연된 판재는 운송 및 보관의 용이성을 위해 동심원 형태의 스트립 코일(strip coil)로 권취되어 소비자에게 공급된다. 두꺼운 판재의 경우 스트립(strip)과 맨드릴(mandrel)이 직접 접촉하여 권취가 가능하나, 두께가 얇은 판재의 경우 맨드릴 위에 슬리브(sleeve)를 끼운 상태에서 스트립을 권취하게 된다. 이는 스트립의 두께가 얇아질수록 외압에 대하여 형상유지를 위한 반력이 감소하여 소재의 심각한 변형이 발생하므로 이를 방지하기 위함이다.

권취공정에서 스트립은 장력이 부과된 상태로 슬리브 위에 감기게 되는데, 권취장력이 약할 경

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015.11.10.-14., ICC 제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, hcpark@postech.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

우 스트립 코일의 풀림 현상 및 스트립 층간의 슬립(slip)으로 인해 스트립 코일의 형성에 실패하게 된다. 반대로 권취장력이 과다할 경우에는 슬리브 및 스트립 코일 내부에서 과도한 반경방향 응력이 발생함에 따라 스트립 코일의 좌굴 및 소재의 심각한 변형이 발생하게 된다.⁽¹⁾ 또한, 반경방향 응력이 커지게 되면 슬리브와 코일의 분리를 위해 추가적인 공정들이 요구됨에 따라 막대한 추가비용이 발생하는 문제점이 있다.

이러한 현상들로 인해 권취공정에서는 장력을 포함한 다양한 공정변수들을 적절히 제어함으로써 코일 내부에 적절한 응력분포를 형성하는 것이 중요하다. 또한, 공정변수들로부터 슬리브 및 스트립 코일에서 발생하는 응력과 변형에 대한 정확한 예측이 필수적이며, 이와 관련된 많은 연구가 진행되어오고 있다.

선행 연구들을 살펴보면 굽힘에 대한 저항이 없는 웹(flexible web)과 굽힘에 대한 저항이 큰 강재의 권취로 나눌 수 있다. 먼저 웹의 경우, Burns 등⁽²⁾은 장력에 따른 감김 롤 내부의 응력분포 해석을 위해 연신을 기반의 수학적 모델을 제시하였다. 이창우 등⁽³⁾은 연신을 기반 모델을 바탕으로 테이퍼 장력 형태와 감김 롤 내부의 응력분포 간의 상관관계를 분석한 바 있다. 또한, 이창우 등⁽⁴⁾은 telescoping 및 starring과 같은 공정 결함을 저감시키기 위한 테이퍼 장력 형태를 제시하였다. 이들 해석 모델은 평면 변형을 가정을 도입하고, 층간 마찰의 영향을 무시하였으며 PET나 종이와 같은 웹 및 기능성 필름에 대해 적용되었다.

본 연구와 같은 강재 권취의 경우, Yanagi 등⁽⁵⁾은 권취공정을 두꺼운 실린더와 얇은 실린더 간의 결합으로 이상화하여 코일 내부의 응력분포에 대한 수학적 모델을 제시하였다. 이들은 스트립 코일의 폭방향 두께 변화를 고려하였는데, 축대칭 변형 가정을 통해 Love의 응력함수로부터 해를 도출하였다. 박원웅 등⁽⁶⁾은 이러한 탄성 응력 해석 모델을 바탕으로 권취공정 시에 발생하는 응력 분포를 예측, 평탄도 결함의 저감 방안을 모색한 바 있다. 또한, Inglis⁽⁷⁾는 스트립 코일을 균질한 실린더(homogeneous tube)로 가정함으로써, 중공형 실린더에 냉간 압연된 스트립이 권취될 경우 발생하는 응력에 대한 이론적 모델을 제시하였다.

하지만 대부분의 선행 연구들은 축대칭 가정을 통해 스트립을 실린더로 고려하였으며, 마찰 및 자중의 영향을 무시하였다. 또한, 맨드렐 및 슬리브의 영향을 고려한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

실제 압연된 판재의 권취공정에서는 맨드렐이 강력한 유압을 통해 슬리브에 압력을 전달함으로써 슬리브의 수축을 지지하고 반경을 유지한다. 또한, 동시에 스트립이 권취됨에 따라 슬리브 및 스트립에는 수십 MPa 이상의 높은 압력이 반경방향으로 누적되므로 스트립 코일의 응력 및 변형에 대한 실험적 접근은 거의 불가능하며 수치 해석적 접근이 적합하다.

본 연구에서는 권취공정에 대한 비선형 유한요소해석 모델을 개발하였으며, 이상화 된 조건 속에서의 해석결과를 선행이론과 비교함으로써 해석 모델의 타당성을 검증하였다. 이를 바탕으로 마찰과 자중 및 맨드렐을 고려한 해석을 수행하였다. 해석을 통해 권취 시작점 주위의 응력분포와 함께 스트립 두께 및 맨드렐이 제공하는 반력의 영향에 대해 분석하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 이론적 배경

해석의 대상이 된 권취공정은 Fig. 1과 같이 맨드렐, 슬리브, 스트립으로 구성되어 있다. 이때, Inglis⁽⁷⁾는 맨드렐이 부재하며 슬리브와 같은 중공형 실린더 위에 스트립이 바로 권취되는 경우에 대하여 슬리브와 스트립에서 발생하는 응력에 대한 이론식을 제시하였다. 슬리브와 스트립을 각각 실린더로 고려함으로써 스트립이 한 층씩 적층되는 과정을 권취장력에 해당하는 인장응력이 누적되는 과정으로 이상화하였다. 권취된 스트립에서 발생하는 반경방향 응력($\sigma_{r,strip}$)과 원주방향 응력($\sigma_{h,strip}$)은 Inglis⁽⁷⁾에 의해 식 (1)과 같이 나타난다 ($r_2 < r < r_3$). 슬리브는 식 (1)로부터 구해진 $r=r_2$ 에서의 반경방향 응력을 외압으로 받는 두꺼운 중공형 실린더로 고려될 수 있다. 이에 따라 힘의 평형으로부터 슬리브 내부에 발생하는 반경방향 응력($\sigma_{r,sleeve}$)과 원주방향 응력은($\sigma_{h,sleeve}$) 식 (2)와 같이 나타난다 ($r_1 < r < r_2$).

$$\begin{aligned}\sigma_{r,strip} &= \frac{(r^2 - r_1^2)T}{2r^2} \ln \frac{(r_3^2 - r_1^2)}{(r^2 - r_1^2)} \\ \sigma_{h,strip} &= T \left[1 - \frac{(r^2 + r_1^2)T}{2r^2} \ln \frac{(r_3^2 - r_1^2)}{(r^2 - r_1^2)} \right]\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{r,sleeve} &= \frac{r_2^2 \sigma_r}{(r_2^2 - r_1^2)} \left(\frac{r_1^2}{r^2} - 1 \right) \\ \sigma_{h,sleeve} &= -\frac{r_2^2 \sigma_r}{(r_2^2 - r_1^2)} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right)\end{aligned}\quad (2)$$

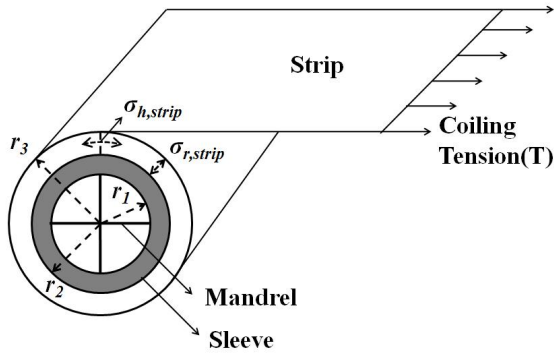


Fig. 1 Schematic diagram of strip coiling process

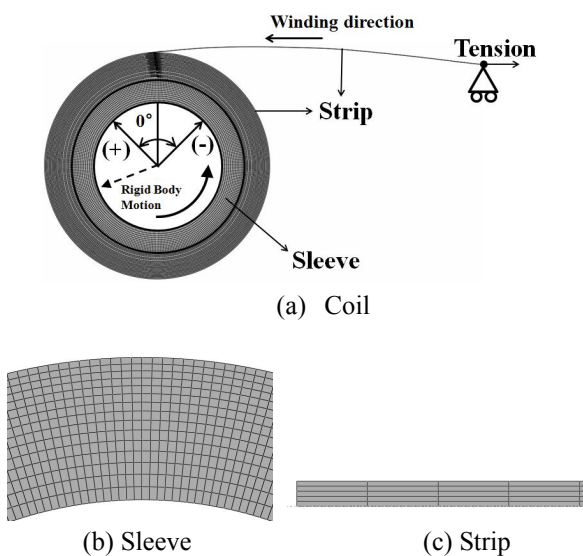


Fig. 2 Finite element model for strip coiling process

2.2 유한요소모델

응력해석을 위해 슬리브와 스트립의 유한요소모델을 구성하였다. 폭방향 스트립 두께 변화가 없다고 가정하여 2D 모델링 하였다. 상용 프로그램인 ABAQUS S/W를 사용하였으며, Dynamic Implicit 해석을 수행하였다. Fig. 2(a)에는 해석에 사용된 유한요소모델을 나타내었으며, 스트립 일부가 권취된 형상을 나타내었다. 슬리브의 원주방향 위치에 대해서는 권취가 시작되는 지점을 기준(0°)으로 하여 반시계방향을 (+), 시계방향을 (-) 각으로 규정하였다. 슬리브의 요소 수는 총 4,800개이다. 스트립에는 두께방향으로 5개의 요소를 사용하였으며 총 요소 수는 권취 층수에 따라 17,600~49,600개로 설정하였다. 슬리브의 경우 맨드렐을 강체로 가정함에 따라 안쪽면의 병진운동을 구속하였으며, 권취를 위해 반시계방향 4π rad/s로 회전한다. 스트립의 경우, 선단부는 슬리브의 0°점을 따라 함께 이동하도록 구속조건을 부여하였으며 끝단에는 권취장력이 Pressure load로 작용한다. 스트

Table 1 Analysis conditions for the coiling process

Inner radius of sleeve(r_1) (m)	0.304
Outer radius of sleeve(r_2) (m)	0.424
Coiling tension(T) (MPa)	50
Strip thickness(t) (mm)	1, 2, 3
Stacked thickness(s) (mm)	10, 21, 90
Elastic modulus(E) (GPa)	214
Yield stress(σ_Y) (MPa)	205
Poisson's ratio(ν)	0.28
Angular velocity(w) (rad/s)	4π
Frictional coefficient(μ)	0, 0.05
Gravitational acceleration(g) (m/s ²)	0, 9.81

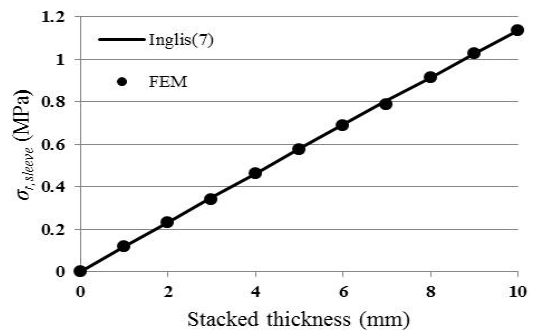


Fig. 3 Comparison of theoretical model and FE analysis

립을 구간별로 분할함으로써 n번째 층의 스트립이 권취되는 동안 (n+2)번째 스트립 이후부터는 수직방향 병진운동 및 회전운동이 구속되도록 경계조건을 설정하였다. 아울러, 슬리브와 스트립 간의 접촉 및 스트립 자체접촉을 정의하여 접촉압력을 분석하였다. 해석에 사용된 조건을 Table 1에 나타내었다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 유한요소모델 검증

수립된 권취 유한요소모델의 유효성 검증을 위해 Inglis⁽⁷⁾의 이론과 동일한 조건에 대한 해석을 수행하였다. 즉, 슬리브의 안쪽면($r=r_1$)을 자유면으로 가정하여 병진운동을 허용하였고($\sigma_{r1,sleeve}=0$), 중력과 층간 마찰을 무시하였다($g=0, \mu=0$). 1 mm 두께의 스트립을 10층까지 권취하여 슬리브 바깥면의 반경·원주방향 응력과 스트립의 층간 반경방향 응력을 분석하였다. Fig. 3에서는 반경방향 응력에 대한 해석결과와 Inglis⁽⁷⁾ 이론값의 비교를 나타내었으며 두 결과의 일치성을 통해 유한요소모델의 타당성을 확인하였다.

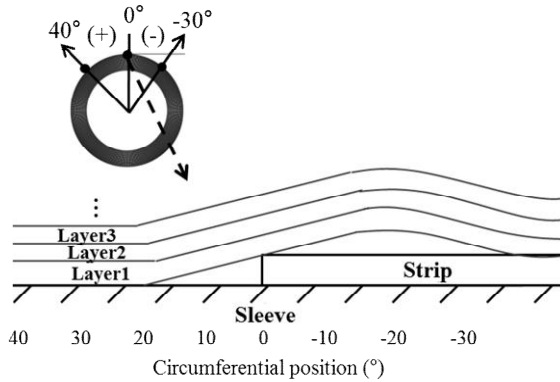


Fig. 4 Strip overlap near the coil starting point

3.2 스트립 두께의 영향

본 논문에서는 제안된 모델을 이용하여, 맨드릴과 마찰($\mu=0.05$), 중력($g=-9.81 \text{ m/s}^2$)을 고려하여 해석을 수행하였다. 또한, 실제 공정에서 맨드릴은 유압 장치를 통해 강력한 힘으로 반경을 유지하므로 강제로 가정하였고 그에 따라 맨드릴과 접촉한 슬리브 안쪽면의 반경방향 변위를 구속하였다.

스트립은 목표 두께가 될 때까지 여러 단계에 걸쳐 냉간 압연 되는데 단계마다 스트립의 두께가 조금씩 감소된 상태에서 권취공정을 수행한다. 본 논문에서는 스트립의 두께가 1 mm, 2 mm, 3 mm인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 스트립의 두께가 변할 때 슬리브 바깥면($r=r_2$)에 발생하는 반경방향 응력과 스트립에 층간 반경방향 응력에 대해 분석하였다. 해석결과 총 적층 두께가 동일할 경우, 스트립 자체의 두께에 의한 반경방향 응력의 차이는 1% 이내임을 확인하였다. 이는 반경방향 응력이 스트립 단위면적당 권취력에 의해 발생함을 의미한다. 해석시간이 총 권취 층수에 비례하여 증가하게 되므로 본 논문에서는 두께 3 mm의 스트립을 해석에 사용함으로써 해석시간을 단축하였다.

3.3 응력집중

권취가 시작되는 지점에서는 Fig. 4와 같이 스트립과 스트립이 겹치게 되면서 응력이 집중되어 다른 위치에 비해 큰 응력이 발생한다. Fig. 5에는 총 적층 두께를 21 mm로 고정하고, 스트립의 두께가 1 mm와 3 mm일 때 권취 시작점 주위에서 슬리브 바깥면의 반경방향 응력분포를 나타내었다. 각 부재는 외압을 받는 상태에 있으므로 반경방향 압축 응력의 부호를 (+)로 규정하였다. 권취 시작점 주위에서는 스트립과 슬리브의 접촉면적 변화로 인해 불균일한 응력분포가 나타나는데, 그 범위는 1 mm 스트립의 경우 $-10^\circ \sim 10^\circ$, 3 mm 스트립의 경우

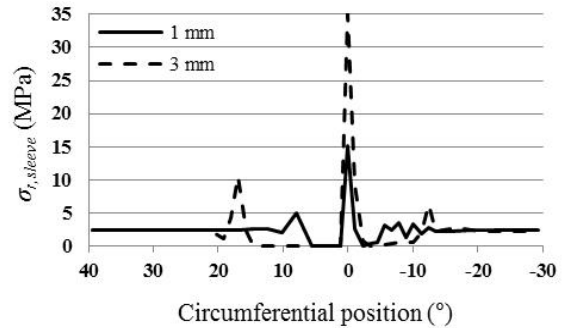


Fig. 5 Radial stress at the sleeve near the coil starting point

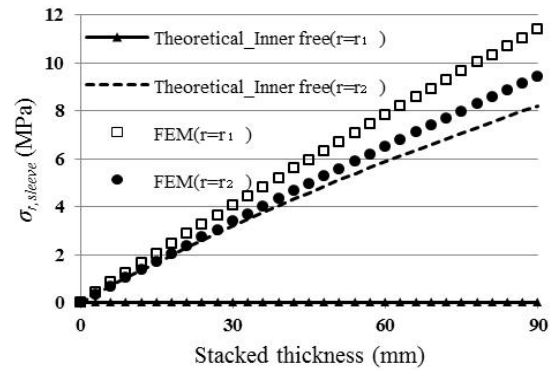


Fig. 6 Radial stress distribution in the sleeve($\theta=180^\circ$)

$-20^\circ \sim 15^\circ$ 로 두꺼운 스트립에서 그 범위가 증가하였다. 스트립의 굽힘강성에 의해 음의 각도 위치에서도 '0'의 반경방향 응력이 발생하여 스트립끼리 접촉하지 않는 구간이 발생하였다. 스트립이 두꺼워질수록 권취 시작점(0°)에서 높은 응력집중이 발생하였다. 본 논문에서는 권취 시작점에서의 응력을 균일한 응력분포가 나타나는 180° 지점에서의 응력 값으로 나누어 줌으로써 응력집중계수를 정의하였다. 응력집중계수는 1 mm 스트립에서 약 6.3, 3 mm 스트립에서 약 14.4로 나타났다.

3.4 맨드릴과 중력의 영향

두께 3 mm 스트립을 이용하여 총 90 mm 두께의 적층에 대한 해석을 수행하였다. 3.2절과 마찬가지로, 3.1절의 해석모델 및 Inglis⁽⁷⁾ 이론의 조건에서 실제 공정과 같이 맨드릴의 영향, 중력 및 마찰을 추가로 고려한 해석을 수행하였다. 해석결과 180° 지점에서 발생하는 응력값을 Inglis⁽⁷⁾의 결과와 비교분석 하였다. Fig. 6에는 슬리브에서 발생하는 반경방향 응력을 나타내었다. Inglis⁽⁷⁾의 결과에서는 슬리브의 바깥면에서 안쪽면으로 갈수록 반경방향 응력이 '0'으로 감소하는데 반해, 해석결과 슬리브 안쪽면에서 바깥면에 비해 응력이 약

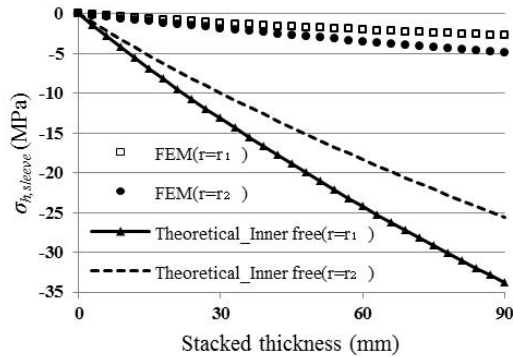


Fig. 7 Hoop stress distribution in the sleeve($\theta=180^\circ$)

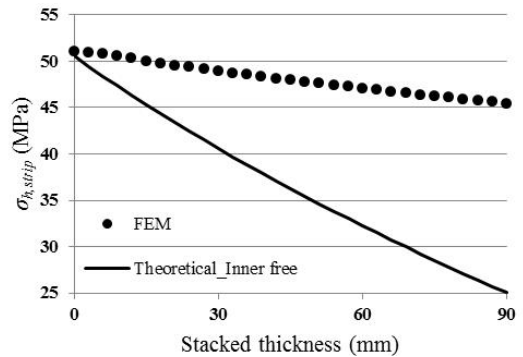


Fig. 9 Hoop stress at the neutral surface of 1st layer strip ($\theta=180^\circ$)

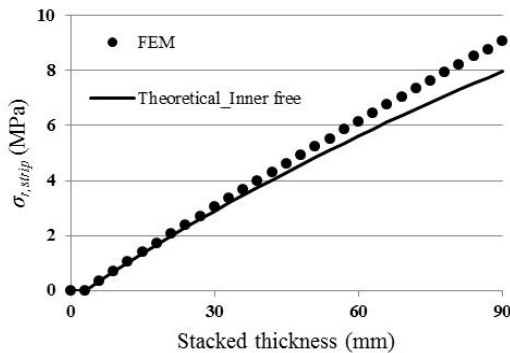


Fig. 8 Radial stress between strip layers at $r=427$ mm ($\theta=180^\circ$)

1.2배 증가하였다. 이는 해석에서 맨드렐을 슬리브 안쪽면의 변형을 구속한 결과로 판단된다. 또한, 슬리브 바깥면에서의 반경방향 응력은 Inglis⁽⁷⁾ 이론보다 약 14.8%(1.2 MPa) 큰 것으로 나타났다. 이것은 맨드렐의 반력 및 스트립 자중의 영향이 복합적으로 작용한 결과이다. 3 mm 스트립 30층이 적층될 경우 권취된 스트립의 총 길이는 88.4 m이며 무게는 2.08 KN이다. 이로 인한 반경방향 압력은 슬리브의 수직 투영면적으로부터 2.4 KPa로 예측되며 Inglis⁽⁷⁾ 이론과의 차이(1.2 MPa)에 있어서 그 영향이 미미하였다. 즉 스트립의 자중은 권취장력과 맨드렐에 의한 응력에 비해 그 효과가 미미함을 알 수 있다.

90 mm 적층 시 슬리브 바깥면의 권취 시작점에서는 반경방향 응력이 약 135 MPa로 나타났다. 이는 3 mm 스트립의 응력집중계수 14.4에 상응하는 값이며 이로부터 스트립 90 mm 적층 시 슬리브는 탄성영역 내에 존재함을 알 수 있다.

Fig. 7에는 슬리브에서 발생하는 원주방향 응력을 나타내었다. 90 mm 적층 시 슬리브 바깥면의 원주방향 응력은 Inglis⁽⁷⁾ 이론보다 약 80.8% (20.7 MPa) 작은 것으로 나타났다. 또한, 해석결과 Fig.

6의 반경방향 응력(9.4 MPa)이 Fig. 7에서의 원주방향 응력(4.9 MPa)보다 약 1.9배 크게 나타났다. 즉, 원주방향 응력에 비해 반경방향 응력이 지배적으로 나타나며 이로 인해 스트립 권취량을 과도히 설정 시 코일의 좌굴이 발생할 수 있다.

Fig. 8에서는 $r=427$ mm 위치에서 스트립 층간 반경방향 응력의 해석결과와 Inglis⁽⁷⁾의 결과를 비교하였다. 층간 반경방향 응력은 슬리브 바깥면의 반경방향 응력에 대한 결과와 유사한 경향성을 보였다. 즉, Inglis⁽⁷⁾보다 큰 값이 예측되었으며, 권취층이 증가할수록 그 차이가 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 9에는 1층에 권취된 스트립의 중립축에서 발생하는 원주방향 응력을 나타내었다. 권취층이 쌓일수록 원주방향 응력이 감소함을 알 수 있는데, 이것은 스트립 코일에 작용하는 외압이 증가함에 따라 권취장력에 의해 인장된 스트립이 압축되는 것이다. 원주방향 응력은 Inglis⁽⁷⁾의 이론에서는 25 MPa 감소하였으나 해석결과는 5 MPa만 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 맨드렐이 제공하는 내압이 스트립 코일의 수축에 대한 반력으로 작용한 결과이다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석모델을 기반으로 냉연재의 권취공정에서 발생하는 응력을 예측함으로써, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스트립 두께 1 mm~3 mm 범위의 권취공정에서 발생하는 반경방향 응력은 스트립 코일의 총 적층 두께에 따라 증가하나, 권취된 코일의 중량에 의한 영향은 미미하며 스트립 단위면적당 권취장력에 의한 영향이 지배적이다.

(2) 권취가 시작되는 지점에서는 응력집중현상이 발생하며 스트립의 두께가 1 mm인 경우 응력

집중계수가 6.3, 3 mm인 경우 14.4로 나타났다. 이로부터 본 모델과 함께 슬리브의 소성거동에 대한 추가적인 분석을 통해 스트립 두께별 최대 권취 층수를 예측할 수 있을 것이다.

(3) 맨드렐이 슬리브에 제공하는 내압효과에 의해, 선행이론과 달리 반경방향 응력이 원주방향 응력보다 약 1.9배 크게 예측되었으며 슬리브 안쪽면에서 최대 반경방향 응력이 발생하였다. 또한, 3 mm 스트립 90 mm 적층 시 슬리브는 탄성영역 내에 존재함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)(2015년 엔지니어링 전문대학원 지원사업, 과제번호: H2001-13-1001)과 POSCO(과제코드: 2015Y011)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌 (References)

- (1) Lee, J. S., Shin, K. H., Kang, H. K. and Park, S. S., 2010, "An Analysis of Tension at Rewinding Process Considering Mechanical Property Change in Roll to Roll System," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 257~258.
- (2) Burns, S. J., Meehan, R. R. and Lambropoulos, J. C., 1999, "Strain-based Formulas for Stresses in Profiled Center-Wound Rolls," *Tappi Journal*, Vol. 82, No. 7, pp. 159~167.
- (3) Lee, C. W., 2014, "Effect of Taper Tension Profiles on Radial Stress of a Wound Roll in Roll-to-roll Winding Process," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 2, pp. 125~131.
- (4) Lee, C. W., Kang, H. K. and Shin, K. H., 2012, "Advanced Taper Tension Method for the Performance Improvement of a Roll-to-roll Printing Production Line with a Winding Process," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 59, No. 1, pp. 61~72.
- (5) Yanagi, S., Hattori, S., Maeda, Y., Ibata, H., Sugimoto, Y. and Sawada, M., 1998, "Coil Deformation and Flatness Change through Strip Coiling Process," *Proc. 7th Int. Conf. on Steel Rolling*, pp. 150~155.
- (6) Park, W. W., Kim, D. K., Lim, Y. T., Kwon, H. C., Choi, D. K. and Chun, M. S., 2012, "Stress Analysis for Strip Coiling Process based on Elastic Model," *Proc. KSTP Fall Conference*, pp. 273~276.
- (7) Sims, R. B. and Place, J. A., 1953, "The Stresses in the Reels of Cold Reduction Mills," *Brit. J. Appl. Phys.*, Vol. 4, No. 7, p. 213.
- (8) Case, J., 2014, *The Strength of Materials (Second Edition)*, Edward Arnold & Co, London, pp. 437~455.