

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 VII

롤투롤 와인딩 시스템에서 테이퍼 장력과 감김롤 응력분포에 관한 연구

Effect of Taper Tension Profiles on Radial Stress of a Wound Roll in Roll-to-roll Winding Process

이창우^{1,✉}
Changwoo Lee^{1,✉}

1 창원대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National Univ.)
✉ Corresponding author: leecw@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3618

Manuscript received: 2013.12.3 / Revised: 2014.1.12 / Accepted: 2014.1.16

Winding is an integral operation in almost every roll-to-roll continuous process and center-winding is suitable and general scheme in the winding system. However, the internal stresses within center-wound rolls can cause damage such as buckling, spoking, cinching, etc. It is therefore necessary to analyze the relationship between taper tension in winding section and internal stress distribution within center-wound roll to prevent the winding failure. In this study, an optimal taper tension control method with parabolic taper tension profile for producing high quality wound roll was developed. The new logic was designed from analyzing the winding mechanism by using the stress model in center-wound rolls. The performance of the proposed taper tension profile was verified experimentally.

Key Words: Roll-to-roll Winding Systems (롤투롤 와인딩 시스템), Taper Tension Profile (테이퍼 장력 형태), Taper Value (테이퍼 량), Radial Stress Distribution (반경방향 응력분포), Wound Roll (감김롤)

기호설명

a = core radius
 A = cross sectional area of web
 E_c = hub core stiffness
 E = tensile modulus of elasticity of the web
 r = radius ratio
 R = outer roll radius ratio (maximum radius ratio)
 s_{ij} = elastic compliances
 σ_{rr} = radial stress in a wound roll
 σ^* = effective residual stress (ERS)
 T = tension of a moving web

1. 서론

최근, 점착성소재, 투명전극, 분리막등의 기능성 필름에 대한 시장성장과 함께 롤투롤 연속공정 시스템에 대한 수요가 급증하고 있다. 특히, 최종 단계인 와인딩공정에서 생산되는 감김롤(wound roll)의 품질관리를 위해서 감김롤 내부 응력분포에 대한 연구가 진행되고 있다. 감김롤 내부의 응력은 그 분포 형태나 크기의 정도에 따라서 소재의 파손을 유발할 수 있으며, 인쇄나 코팅된 웹(web)에 대해서는 층간 잉크 전이나 번짐이 발생하거나, 과도한 응력으로 인해 소재특성이 변형되기도 한

다. 이는 시스템의 최종단계에서 발생하기에 결함 보상이 불가능하므로, 생산성 저하 및 고품질 제품 생산을 어렵게 하는 중대한 문제점 들이다.¹⁻⁵

기존 테이퍼 장력은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저, 장력을 일정한 기울기로 감소시키는 선형 테이퍼 형태(linear taper tension profile)와 와인딩 동경 증가에 따라 장력의 감소율을 변화시키는 하이퍼볼릭 테이퍼 형태(hyperbolic taper tension profile)이다. 최대 와인딩동경을 고려하여 테이퍼 형태를 설정하며 각 테이퍼 형태에 대해 적절한 테이퍼량(taper value)을 선정한다.

감김롤 내부에서 발생하는 응력분포해석을 위하여, 비선형 유한요소법(nonlinear FEM)이나 연신율 기반 모델(strain based formula) 또는 선형 탄성 모델(second order differential Eqn for the linear elastic material) 등이 연구되었지만, 기능성필름이 아닌 일반적인 PET 나 종이에 대해 적용되었으며, 전통적인 테이퍼 장력에 대한 영향만을 분석하였다.²⁻⁵

본 연구에서는 와인딩 공정에서의 테이퍼 장력 형태와 감김롤 내부의 응력분포간 상관관계를 분석하고, 기존 테이퍼 장력 형태 적용시 발생하는 한계점을 분석 및 검증하였다. 기존 테이퍼 장력의 한계점을 극복하기 위한 새로운 테이퍼 장력 형태를 개발하여, 과도한 응력발생으로 인한 결함을 최소화하였으며, 실험적 검증을 통하여 제안된 테이퍼 장력 형태의 우수성을 확인하였다.

2. 응력 해석 모델

2.1 테이퍼 형태 모델

Fig. 1은 필름이 코어(core)에 감기는 와인딩공정에 대한 개략도를 표현한 것이다. a 는 코어의 반경, T 는 장력을 나타낸다. r 은 현재의 와인딩 반경 증가비율이며 코어의 반지름 a 로 나누어진 무 차원의 값으로 표현된다. 식(1)은 일정한 감소율을 지니는 선형 테이퍼 형태, 식(2)는 와인딩 반경증가비율에 따라 감소하는 하이퍼볼릭 테이퍼 형태를 나타낸다. 일반적으로, 선형 테이퍼 형태는 최대 와인딩 반경이 작을 때 적용하며, 최대 와인딩 반경이 증가할수록 내부 응력 최소화를 위하여 하이퍼볼릭 테이퍼 형태를 사용하고 있다.^{6,7}

$$\sigma_w(r) = \sigma_0 \left(1 - \left(\frac{\text{taper}}{100} \right) \left(\frac{r-1}{R-1} \right) \right) \quad (1)$$

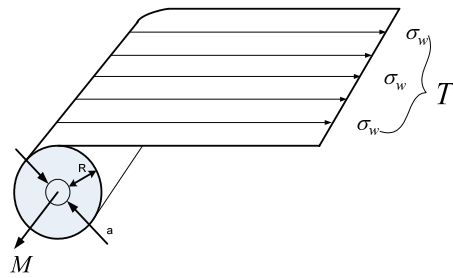


Fig. 1 A schematic of winding process in roll to roll continuous systems

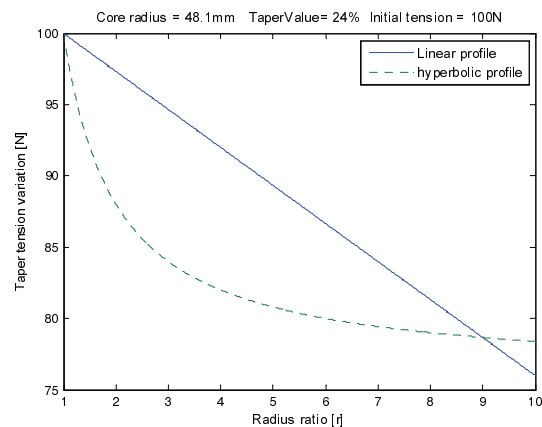


Fig. 2 Conventional taper tension profiles for a wound roll (linear and hyperbolic profile)

$$\sigma_w(r) = \sigma_0 \left(1 - \left(\frac{\text{taper}}{100} \right) \left(\frac{r-1}{r} \right) \right) \quad (2)$$

Fig. 2는 식(1), (2)의 선형 및 하이퍼볼릭 테이퍼 형태를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과에서 보이는 바와 같이, 선형 테이퍼 형태는 초기 와인딩부터 종료시까지 일정한 기울기를 지니고 장력이 감소하는 형태이다. 하이퍼볼릭 형태는 초기에 급격히 장력이 감소되지만 공정 후반부에는 감소율이 일정하게 유지되는데, 이는 감김롤의 반경 증가비에 비례하여 감소량이 결정되기 때문이다.

2.2 유효잔류응력

식(3)은 감김롤 내부에 존재하는 유효잔류응력(ERS: effective residual stress)에 대한 수학적 모델이며, ν 는 소재의 푸아송비이다.⁴ 와인딩 종료 후 감김롤 내부에 존재하는 유효잔류응력의 분포 형태 및 잔류응력을 결정하는 주요 인자가 테이퍼 장력

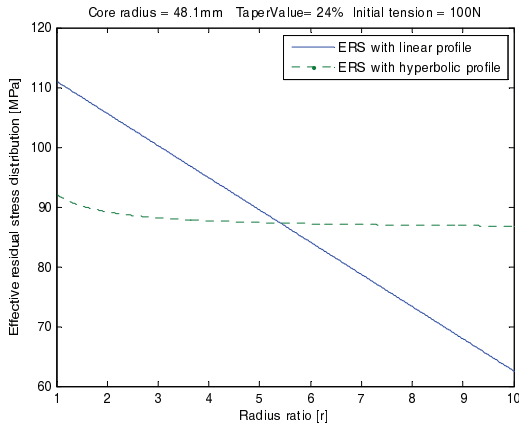


Fig. 3 Effective residual stresses (linear and hyperbolic)

형태 및 테이퍼 장력의 변화량 입을 알 수 있다.

2.1절에서 제시된 선형 테이퍼 형태 및 하이퍼볼릭 테이퍼 형태를 식(3)에 적용하여 정리하면 선형 및 하이퍼볼릭 형태에 대한 유효잔류응력 모델을 식(4), (5)와 같이 표현할 수 있다.

Fig. 3은 선형 및 하이퍼볼릭 테이퍼 형태 적용 시 발생하는 감김물 내부 잔류 응력분포를 나타낸다. 선형 테이퍼 형태에 대한 감김물 내부 잔류응력은 일정한 기울기를 가지고 만권까지 감소하는 변화량을 지니고 있지만, 하이퍼볼릭 테이퍼 형태의 경우에는 와인딩 초기에 발생한 잔류응력이 거의 일정하게 유지된다. 즉, 잔류응력으로 인해 발생하는 감김물의 반경방향 응력은 와인딩 초기에 발생한 잔류응력의 크기가 작을수록, 그리고 잔류응력 변화량의 기울기가 작을수록 감소하게 된다. 그러므로, 감김물 내부 반경방향응력을 최소화하기 위해서는 선형 형태보다는 하이퍼볼릭 테이퍼 형태가 유리함을 알 수 있다.

$$\sigma^*(r) = \left(\frac{\sigma_0}{1-\nu^2} \right) \left((1+\nu)\sigma_w(r) + r \frac{d}{dr}(\sigma_w(r)) \right) \quad (3)$$

$$\sigma^*(r) = \sigma_0(1+\nu) \left(\frac{1}{1-\nu^2} \right) - \sigma_0 \left(\frac{1}{1-\nu^2} \right) \left(\frac{taper}{100} \right) \left(\frac{(1+\nu)(r-1)+r}{R-1} \right) \quad (4)$$

$$\sigma^*(r) = \sigma_0(1+\nu) \left(\frac{1}{1-\nu^2} \right) - \sigma_0 \left(\frac{1}{1-\nu^2} \right) \left(\frac{taper}{100} \right) \left(\frac{r-(r-1)\nu}{r} \right) \quad (5)$$

2.3 동경방향응력

감김물 내부에서 동경방향으로 발생하는 응력에 대한 수학적 모델은 식(6)과 같다.^{1,4,5-8} 또한, 인자 B 는 식(7)에 의해 결정되는 상수값이다. 본 모델은 와인딩의 초기 상태부터 만권 시까지 연속적인 관계를 가정하고 있다. 즉, 감김물의 각 층(layer)을 개별적으로 가정하지 않고, 코어와 소재 사이의 연속적인 관계로 정의한 것이다.

식(6)과 식(7)에서 표현된 s_{ij} 및 β 는 소재종류에 따라 결정되는 인자들이며, E_c 는 코어의 탄성계수를 의미한다. 앞의 2.2절에서와 동일한 방법으로 각 테이퍼 형태에 대한 모델을 식(6)에 대입하여 정리하면, 선형 테이퍼 형태에 대한 반경방향 응력(Radial stress)인 식(8)과 하이퍼볼릭 테이퍼 형태에 대한 반경방향 응력인 식(9)를 얻을 수 있다

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{r} \left(B \left(r^\beta - \frac{R^{2\beta}}{r^\beta} \right) + \frac{1}{2r\beta} \left(r^{-\beta} \int_r^R t^\beta \sigma^*(t) dt - r^\beta \int_r^R t^{-\beta} \sigma^*(t) dt \right) \right) \quad (6)$$

$$B = \frac{2\beta\sigma_0 E_c s_{22} - \left\{ (E_c(s_{12} - \beta s_{22}) - 1) \int_1^R t^\beta \sigma^*(t) dt \right\}}{2\beta \left((s_{12} E_c - 1)(1 - R^{2\beta}) + \beta E_c s_{22} (1 + R^{2\beta}) \right)} - \frac{\left\{ (E_c(s_{12} - \beta s_{22}) - 1) \int_1^R t^{-\beta} \sigma^*(t) dt \right\}}{2\beta \left((s_{12} E_c - 1)(1 - R^{2\beta}) + \beta E_c s_{22} (1 + R^{2\beta}) \right)} \quad (7)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{r} \left\{ \left(B \left(r^\beta - \frac{R^{2\beta}}{r^\beta} \right) \right) + \left(\frac{1}{2\beta} \right) \left(\frac{\sigma_0}{1-\nu} \right) \left(\left(\frac{R^{\beta+1} - r^{\beta+1}}{\beta+1} \right) r^{-\beta} + \left(\frac{R^{1-\beta} - r^{1-\beta}}{\beta-1} \right) r^\beta \right) \kappa \right\}$$

$$\text{where, } \kappa = \left(\frac{2+\nu}{1+\nu} \right) \left(\frac{1}{R-1} \right) \left(\frac{taper}{100} \right) - \left(1 + \left(\frac{1}{R-1} \right) \left(\frac{taper}{100} \right) \right) \quad (8)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{r} \left\{ \left(B \left(r^\beta - \frac{R^{2\beta}}{r^\beta} \right) \right) + \frac{\sigma_0}{2\beta} \left\{ \left(\frac{1}{1-\nu} \right) \left(1 - \frac{taper}{100} \right) \eta + \nu \left(\frac{1}{1-\nu^2} \right) \left(\frac{taper}{100} \right) \lambda \right\} \right\}$$

$$\text{where, } \eta = \left(\left(\frac{R^{\beta+1} - r^{\beta+1}}{\beta+1} \right) r^{-\beta} - \left(\frac{R^{1-\beta} - r^{1-\beta}}{1-\beta} \right) r^\beta \right) \lambda = \frac{\left(\frac{R}{r} \right)^\beta - \left(\frac{r}{R} \right)^\beta - 2}{\beta} \quad (9)$$

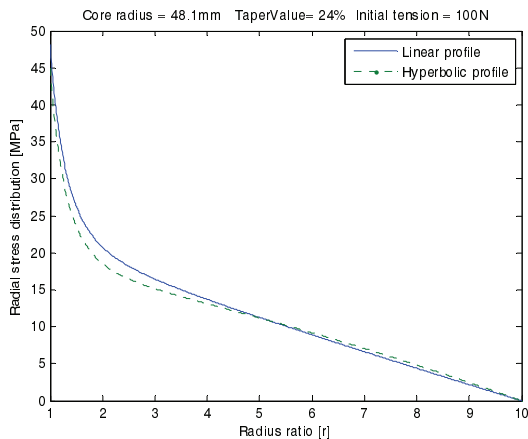


Fig. 4 Radial stress distributions (linear and hyperbolic)

식(8), (9) 를 통하여 와인딩 반경에 따라 형성되는 감김률 내부 응력분포를 예측할 수 있다(Fig. 4). 일반적으로, 감김률 최대 권취 동경의 50% 이내 영역에서 과도한 응력으로 인한 결함이 주로 발생한다. 이러한 관심영역($r < 5$ in Fig. 4)에서 하이퍼볼릭 테이퍼 형태를 통하여 반경방향 응력을 감소시킬 수 있음을 확인 할 수 있다.

2.4 하이퍼볼릭 테이퍼 장력의 한계점

하이퍼볼릭 테이퍼 형태를 통하여, 감김률 반경방향 응력을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 와인딩 초기 장력의 감소량을 증가시키고, 후반부에는 저장력을 유지하여 감김률 내부 응력을 최소화하는 것이다.

그러나, 하이퍼볼릭 장력 형태는 식(2) 에서 표현된 바와 같이 감김률의 와인딩 반경 증가비(R)에 따라 장력을 감소시키는 형태를 가지고 있다. 결과적으로, 최대 와인딩 반경값에 따라서 설정된 테이퍼 량으로의 수렴여부가 달라지는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5). 최대 와인딩 반경 비율이 큰 경우($R > 10$), 설정된 테이퍼 량(24%)만큼 감소하여 초기장력인 100 N에서 76 N 으로 수렴하지만, 최대 와인딩 반경 비율이 작은 경우 ($R < 10$)에는 설정된 테이퍼 량(24%)보다 작은 값으로 수렴한다(Fig. 6).

식(1)과 같이 표현되는 선형 테이퍼 형태는 최대 와인딩 반경비(R)를 고려하여 주어진 테이퍼 량에 따른 기울기가 결정되지만, 식(2)의 하이퍼볼릭 테이퍼 형태는 최대 와인딩 반경 비(R)에 대한 고려 없이 와인딩 반경 비(r) 증가율에 비례하여 장력을 감소시키기 때문에 이와 같은 한계점을 지

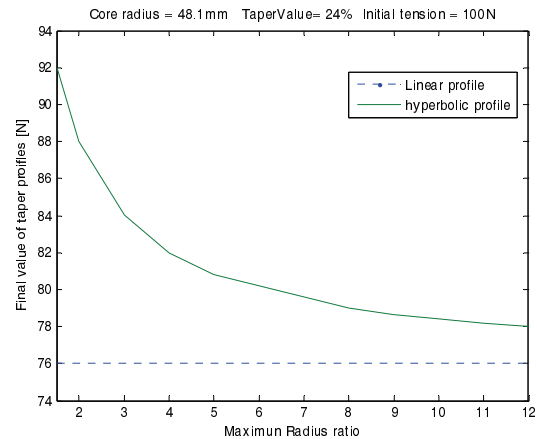


Fig. 5 Variation in final value of taper profiles according to maximum radius ratio

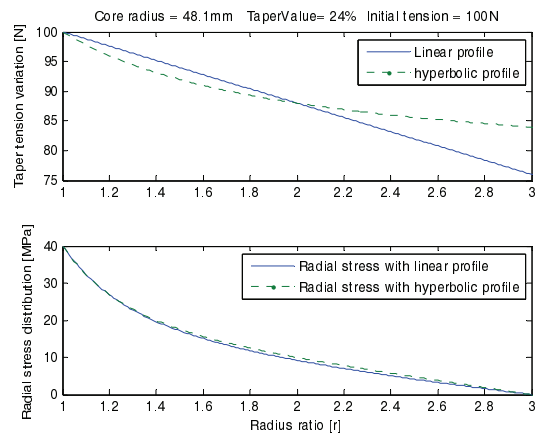


Fig. 6 Radial stresses distribution according to taper tension profiles (R=3)

니게 된다.

식(8), (9)에서 알 수 있듯이, 와인딩 롤 내부 반경방향 응력분포는 테이퍼장력에 직접적인 영향을 받으므로 설정된 테이퍼 량에 따라 테이퍼 장력이 감소하지 않게 되면, 반경방향 응력이 허용범위를 초과하는 현상이 발생한다. 이로 인하여 최대 와인딩 동경의 50%에 해당하는 내측에서는 버클링과 같은 소성변형을 유발하게 된다.

최대 와인딩 반경 비(R)가 작은 조건에서는, 내부응력 감소에 유리한 하이퍼볼릭 테이퍼 형태를 적용한 경우에 비하여, 선형 테이퍼 형태 적용 시 오히려 반경방향 응력이 감소되는 현상이 발생하게 되며(Fig. 6), 이는 와인딩 공정에서 장력에 대

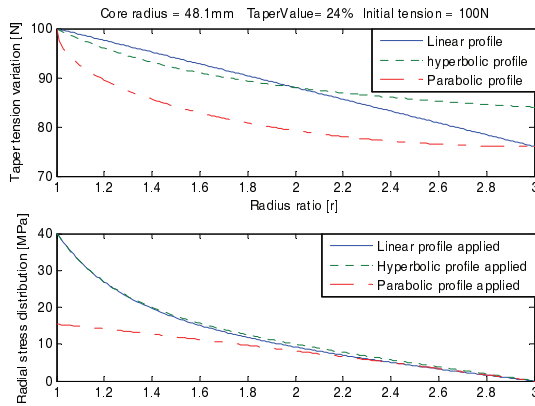


Fig. 7 Radial stresses distribution according to taper tension profiles (R=3)

한 되먹임 제어를 수행하지 않고, 일정 토크 제어 적용 시 빈번하게 발생하는 문제점 중 하나이다.

최근 다품종 소량생산을 고려하여, 최대 와인딩 반경 비율이 작은 경우에, 설정된 테이퍼 량에 수렴함과 동시에 효과적으로 감김률 내부 응력을 감소시킬 수 있는 테이퍼 장력 형태가 요구된다.

3. 테이퍼 장력 최적화

3.1 파라볼릭 테이퍼 장력

하이퍼볼릭 형태를 통하여 과도한 감김률 내부 응력을 감소시킬 수 있지만, 최대 와인딩 반경 비가 작을 경우(R<5)에는 오히려 내부 응력이 증가함을 확인하였다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 파라볼릭 테이퍼 형태는 식(10)과 같다. Fig. 7에서, 하이퍼볼릭 형태는 와인딩 종료 시 설정된 테이퍼 량(24%)의 절반 수준인 약 15%로 수렴하지만, 개발된 파라볼릭 형태는 설정된 값으로 정확하게 수렴하는 동시에 반경방향 응력이 감소됨을 확인할 수 있다.

$$\sigma_w(r) = \sigma_0 \left(1 - \left(\frac{taper}{100} \right) \frac{1}{(R-1)} \sqrt{(r-1)(2R-r-1)} \right) \quad (10)$$

3.2 실험적 검증

실험에 적용된 소재는 유리기관(LCD panel 용)의 표면보호를 위해 부착되고, 후공정을 위해 다시 제거되는 점착성 필름이다. 본 필름의 특징은 일정한 점착력을 유지하여 쉽게 기관에 부착됨과 동시에 일정한 힘으로 쉽게 제거되어야 한다. 그

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Values
Web thickness (t)	0.000012 m
Web width (w)	1.8 m
Young's modulus (E)	1.2 GPa
Operating speed (v)	1.83 m/s
Operating tension (T)	11 N/m
Max build-up ratio (R)	2.4

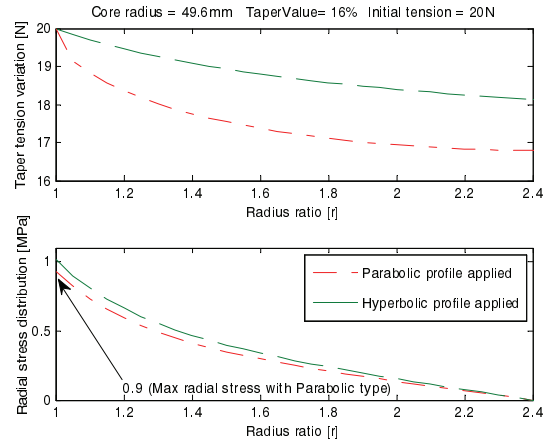


Fig. 8 Estimated radial stresses and taper profiles

러나, 점착필름 감김률의 내층으로 갈수록 점착력이 감소하여 감김률의 60%(총 감긴길이의 60%)만 사용 가능하다는 문제점을 지니고 있다. 이는 내층으로 갈수록 증가된 반경방향응력으로 인하여 소재 표면에 존재하는 점착특성이 저하되기 때문이다. 그러므로, 개발된 파라볼릭 형태를 적용하여 반경방향응력 최소화 및 최적화하였다. 실험 시 적용된 조건은 Table 1과 같다.

Fig. 8에서, 파라볼릭 형태 적용 시에 감김률 내부(1<r<2.2) 영역에서 반경방향 응력이 감소하였으며, 또한, 최대 반경방향 응력도 약 10% 이상 감소하는 것을 볼 수 있으며, 결과적으로 반경방향 응력감소로 인하여 소재 표면에 존재하는 점착특성이 향상될 것으로 예측할 수 있다.

기존 하이퍼볼릭 형태(Fig. 9)와 개발된 파라볼릭 형태(Fig. 10)을 와인딩 시스템에 적용하여 성능 검증을 수행하였다. 또한, 압력측정센서(FSR: force sensing resistor) 센서를 일정 와인딩 길이 별로 삽입하여 감김률 내부 반경방향응력을 측정하였다(Fig. 11). 롤 교체 공정(splicing process)으로 인하여 와인딩 초기 비교적 큰 장력 외란이 발생하지만,

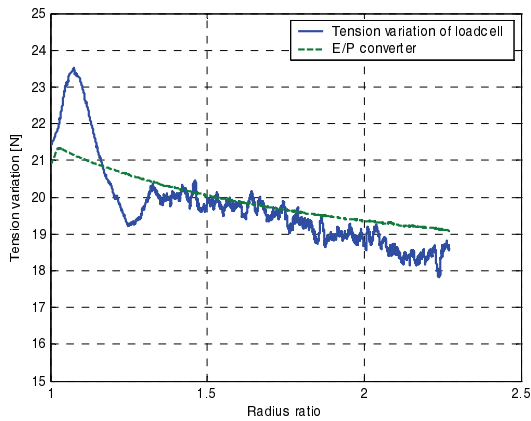


Fig. 9 Conventional hyperbolic taper profile

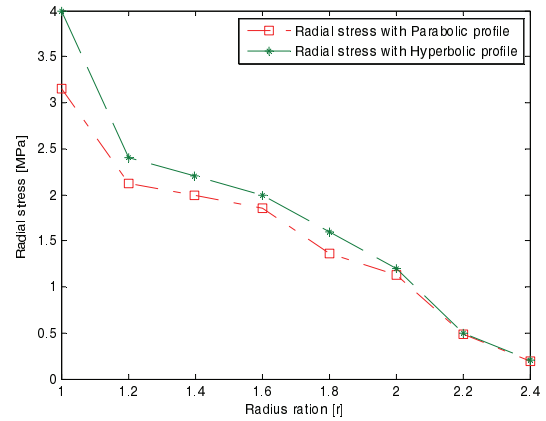


Fig. 12 Radial stresses distribution in wound rolls

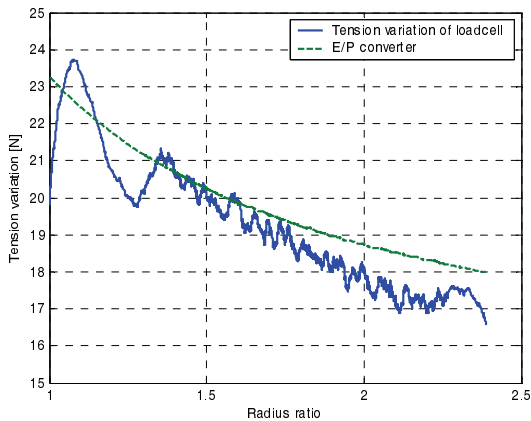


Fig. 10 Proposed parabolic taper profile

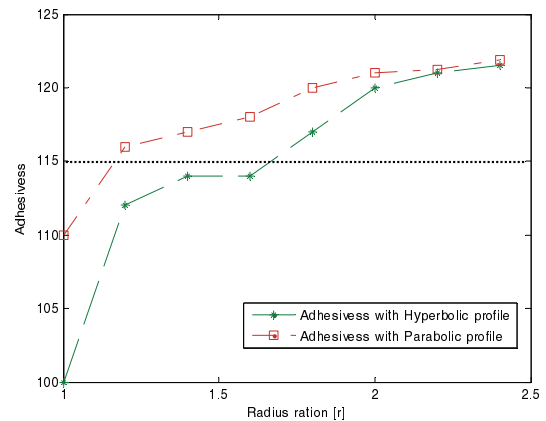


Fig. 13 Adhesive force by using TA method

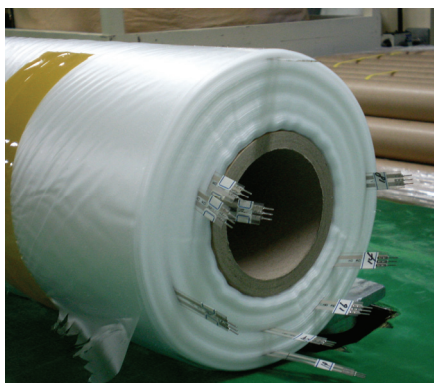


Fig. 11 Wound roll with FSR sensors

기존 하이퍼볼릭 형태는 기존 테이퍼값의 절반수준인 8%에 수렴하며, 파라볼릭 형태는 설정된 값(16%)으로 정확히 수렴하는 것을 알 수 있다. 설

정된 테이퍼값으로의 수렴여부가 결과적으로 감김롤 내부 반경방향 응력을 증가 또는 감소시키는 원인이 된다. 테이퍼값을 증가시킬수록 반경방향 응력이 감소하여 소재의 점착특성을 향상시킬 수 있지만, 감김롤 자체의 경도가 감소하여 그 형태를 유지하기 어려운 문제가 발생하여, 최대값을 기준 운전 장력의 16%로 설정하였다.

각 테이퍼 형태 적용 결과로 나타난 감김롤 내부 반경방향 응력분포는 Fig. 12와 같다. 시뮬레이션에서 예측한 바와 같이, 파라볼릭 형태 적용 시 감김롤 내층 영역 전반에 걸쳐 반경방향응력이 감소함과 동시에 최대 반경방향 응력은 기존 하이퍼볼릭 형태 대비 약 20% 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한, 테이프 점착력 테스트(TA method)를 통하여, 감김롤 내부 소재의 점착력이 증가됨과 동시에 기준점착력(115)을 만족하는 범위가 기준

대비 80% 이상 증대된 것을 확인 하였다(Fig. 13).

4. 결론

본 연구에서는 와인딩공정에서 테이퍼장력과 반경방향 응력간의 상관관계를 해석하였고, 기존 테이퍼 형태의 한계점 검증 및 이를 극복하기 위한 새로운 파라볼릭 테이퍼 형태를 개발하였다. 최근 다품종 소량방식의 시장 요구 증대로 인하여 감김률의 최대 와인딩 비율은 상대적으로 감소하고 있다. 이로 인하여, 설정된 테이퍼값으로 수렴이 어려운 하이퍼볼릭 형태의 한계점이 발생하였다. 개발된 파라볼릭 형태는 최대 와인딩비율이 작은 경우에도 효과적으로 설정된 테이퍼값으로 수렴하여 최대 와인딩 비가 작은 경우에도 적합함을 확인하였다.

또한, 와인딩 공정에 적용하여 반경방향 응력의 감소를 통한 점착력 향상에 매우 효과적임을 실험적으로 확인하여 그 성능을 검증하였다.

후 기

본 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Hakiel, Z., "Nonlinear Model for Wound Roll Stresses," Tappi Journal, Vol. 70, No. 5, pp. 113-117, 1987.
2. Altmann, H. C., "Formulas for Computing the Stresses in Center-Wound Rolls," Tappi Journal, Vol. 51, No. 4, pp. 176-179, 1968.
3. Yagoda, H. P., "Resolution of a Core Problem in Wound Rolls," Journal of applied Mechanics, Vol. 47, No. 4, pp. 847-854, 1980.
4. Berns, S. J., Meehan, R. R., and Lambropoulos, J. C., "Strain-based Formulas for Stresses in Profiled Center-Wound Rolls," Tappi Journal, Vol. 82, No. 7, pp. 159-167, 1999.
5. Good, J. K., Pfeiffer, J. D., and Giachetto, R. M., "Losses in Wound-On-Tension in the Center Winding of Wound Rolls," Proc. of the web handling symposium on ASME applied mechanics division, Vol. 149, pp. 1-12, 1992.

6. Lee, C., Kang, H., and Shin, K., "Advanced Taper Tension Method for the Performance Improvement of a Roll-To-Roll Printing Production Line with a Winding Process," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 59, No. 1, pp. 61-72, 2012.
7. Lee, C. and Shin, K., "A study on Taper-Tension Control Considering Telescoping in the Winding System," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 2, pp. 687-693, 2010.
8. Bo, Z., "Application of Taper Tension Control in Coiling of Hot Strip Mill," Electric Drive, Vol. 8, Paper No. 019, 2010.