

롤투롤 시스템에서의 사행현상을 고려한 장력제어에 대한 연구 A Study on the Taper Tension Control Considering the Telescoping in a Roll to Roll Machine

*이창우¹, 이장원², #신기현³, 권순오⁴

*C. W. Lee¹, J. W. Lee², #K. H. Shin³ (khshin@konkuk.ac.kr), S. O. Kwon⁴

¹ 건국대학교 대학원 기계설계학과, ² 건국대학교 기계항공공학부

³성안 기계 (주)

Key words : Center Wound Roll, Taper Tension, Telescoping, Roll to Roll

1. 서론

일반적으로 롤투롤 시스템에서 와인딩 공정(winding process)은 고 품질의 감김 롤 제품 생산을 위하여 테이퍼 장력 제어(e.g. taper tension control)가 이뤄지며, 적용되는 방법으로 장력을 직선 형태로 일정하게 감소시키는 리니어 테이퍼(linear taper) 방식과 곡선 형태로 감소시키는 하이퍼볼릭 테이퍼(hyperbolic taper) 방식이 대표적이다. 그러나 두 가지 장력 제어 방식은 롤 생산 시에 각각의 장단점을 가지고 있다. 이에 두 장력 제어 방식을 혼용함으로써 고 품질의 감김 롤을 생산할 수 있는 방식인 하이브리드 테이퍼(hybrid taper) 방식을 제안하며, 각각의 장력 제어 방식에 대하여 실험을 시행하였다.

본 연구에서는 와인딩 시 소재의 폭 방향 거동에 관한 텔레스코핑(telescoping)의 발생을 효과적으로 방지할 수 있는 테이퍼 텐션 프로파일(taper tension profile)의 설계를 제안한다. 또한 연구를 통하여 감김 롤의 사행 거동을 효과적으로 감소할 수 있는 방식임을 확인하였다.

2. Mathematical models

다음의 식 (1)은 현장에서 주로 사용되는 리니어 및 하이퍼볼릭 테이퍼 프로파일에 대한 수학적 모델을 표현하고 있다.² 식 (1)에서, σ_0 는 와인딩 초기 운전 장력, r 은 무차원 값으로 코어 반지름으로 나누어진 현재의 반지름, R 은 무차원 값으로 최대 감김 반경을 표현한다.

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

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

그러나 두 가지 장력 제어 방식은 롤 생산 시 장단점을 가지고 있다. 하이퍼볼릭 프로파일을 사용할 경우, 감김 롤 내에 반경 방향으로 안정적인 응력 분포를 유도할 수 있으나, 텔레스코핑 측면에서는 리니어 프로파일이 효과적인 방법임을 확인할 수 있다. 이러한 두 가지 타입에서 나타나는 장,단점 분석을 통하여 아래와 같은 하이브리드 형태를 제안하였다. 하이브리드 프로파일은 리니어 프로파일에 비해 안정적인 응력 분포를 유도할 수 있으며, 하이퍼볼릭 프로파일에 비해 텔레스코핑의 크기를 감소시킬 수 있는 방식이다. 하이브리드 테이퍼 프로파일에 대한 수학적 모델은 다음 식(2)와 같다.²

$$\sigma_w(r) = \sigma_0 \left\{ 1 - \left[\frac{\text{taper}}{100} \right] \left[\frac{(r-1)}{(r + \alpha(R-r-1))} \right] \right\} \quad (\text{hybrid}) \quad (2)$$



Fig. 1 Roll to Roll machine and Edge position sensor

식 (2)의 α 는 하이브리드 인자로서 $\alpha=1$ 에 대하여 리니어, $\alpha=0$ 에 대하여 하이퍼볼릭 프로파일을 표현한다. 하이브리드 프로파일은 α 의 조절을 통하여 원하는 프로파일을 형성할 수 있는 장력 제어 방식이다.

$$y_{\text{telescoping}} = \frac{2 - 2\cosh(KL) + \sinh(KL) \cdot KL}{\left[\frac{12EI}{(F_{\max} - F_{\min})W} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right] K^2 (\cosh(KL) - 1)} \quad (3)$$

식(3)은 와인딩 롤에서 발생하는 텔레스코핑과 장력과의 관계를 표현하고 있다. 식 (3)의 K 는 소재의 강성계수, L 은 스펠, α 는 감김각을 나타낸다.^{2,3}

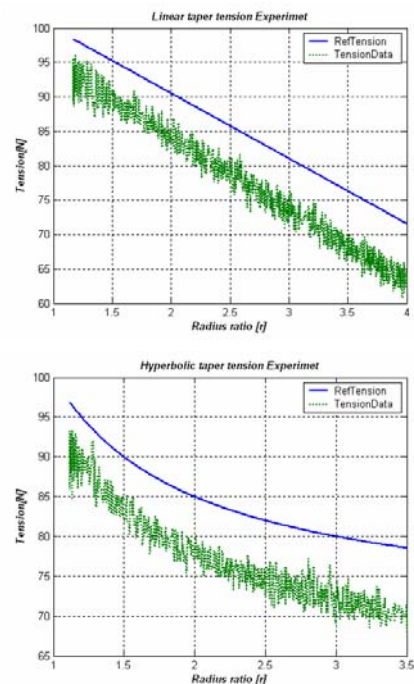
$$\sigma_{rr} = \frac{1}{r} \left\{ \left[B \left(r^\beta - \frac{R^{2\beta}}{r^\beta} \right) \right] + \frac{1}{2\beta} \left[r^{-\beta} \int_r^R t^\beta \sigma^*(t) dt - r^\beta \int_r^R t^{-\beta} \sigma^*(t) dt \right] \right\} \quad (4)$$

식(4)는 장력 프로파일에 따른 감김 롤 내부의 스트레스를 표현하고 있다. 식 (4)에서, B 는 코어와의 경계조건 인자이며, σ^* 는 장력 프로파일로 인한 롤 내의 잔류 응력 인자, β 는 소재 물성 인자를 나타낸다.¹

3. Experiments

Fig. 1의 롤투롤 머신의 와인딩 구간에서 실험이 수행되었으며, Fig.2의 각각의 장력 프로파일에 대한 반경방향 응력 및 텔레스코핑 현상을 실험적으로 확인하였다. Fig. 2의 taper tension profile 들은 식(2)를 바탕으로 구현되었다.

각각의 장력 프로파일 적용 시 와인딩롤에서 발생하는 텔레스코핑은 Fig. 3과 같다.



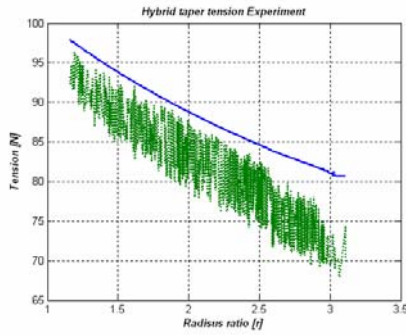


Fig. 2 Taper tension profiles

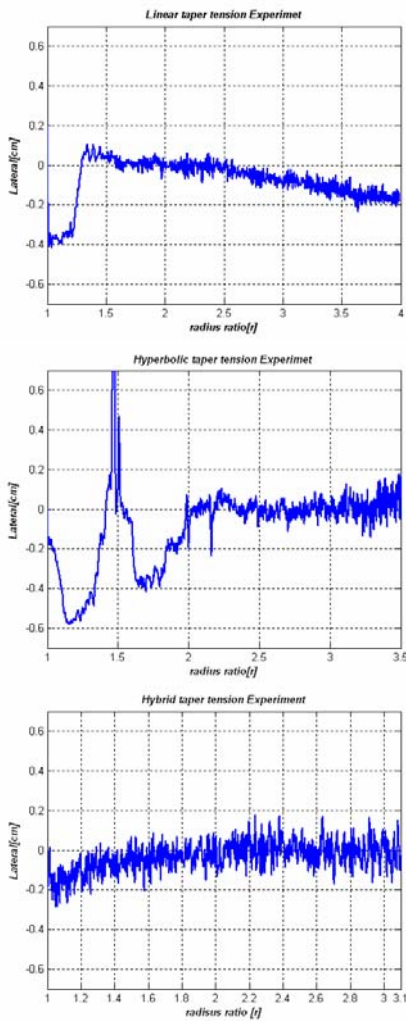


Fig. 3 Telescoping of substrate

Fig.3 에서, 텔레스코핑은 주로 와인딩 초기에 발생하고 있음을 알 수 있으며, 리니어 테이퍼 텐션 적용시 발생량이 작음을 확인할 수 있다. 즉, 와인딩 초기에는 하이퍼볼릭 형태보다는 리니어 형태를 적용하는 것이 텔레스코핑 방지에 보다 효과적임을 알 수 있다.

Table 1 Experiment conditions

Symbol	value	Expression
α	1, 0, 0.5	Hybrid factor (Linear, Hyperbolic, Hybrid)
t	0.02[mm]	Thickness
w	1010[mm]	Width
ν	0.3	Poisson's ratio
E	1180[Mpa]	Young's Modulus
Substrate : O.P.P		

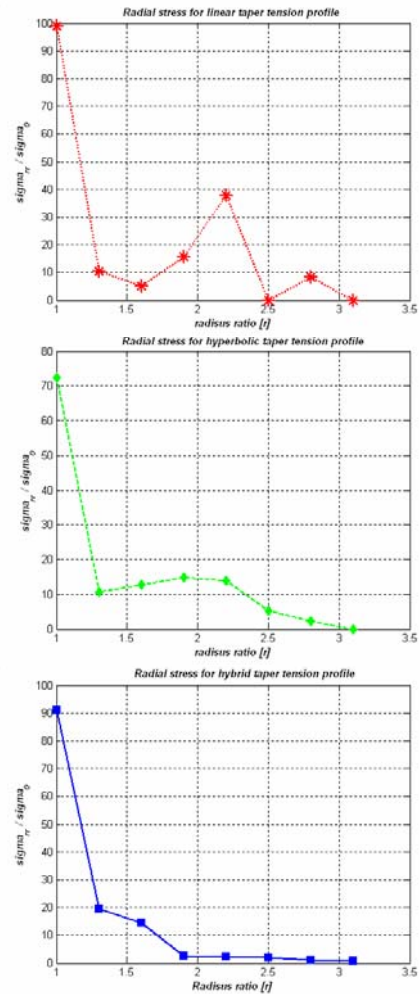


Fig. 4 Radial stress distributions in the wound roll

각각의 테이퍼 장력 프로파일에 따른 반경 방향 응력 분포를 Fig. 4 에서 표현하고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 하이퍼볼릭 형태 적용시에 내부 응력분포상태를 보다 안정적으로 유지할 수 있다. 그러나, 하이퍼볼릭 형태는 와인딩 초기에 텔레스코핑을 쉽게 발생시킬 수 있으므로, 제안된 하이브리드 형태를 적용함으로써, 텔레스코핑을 최소화 하는 동시에 내부 응력분포를 보다 안정적으로 유도할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 테이퍼 텐션의 형태와 텔레스코핑, 그리고 반경방향 응력분포에 대한 상관관계를 수학적 모델을 통하여 규명하였으며, 이를 실험적으로 검증하였다.

참고문헌

- Burns S.J., Richard, R. Meehan and Lambropoulos, J.C., " Strain-based Formulas for Stresses in Profiled Center-Wound Rolls, " Tappi journal, **82**, 159-167, 1999
- C. W. Lee, J. W. Lee, K. H. Shin, S.O. Kwon, "Hybrid Taper tension Logic in a Rewinding System," KSME spring annual meeting, 2006.
- J. Shelton, K.N. Reid, "Lateral Dynamics of a Real Moving Web, " ASME Journal Dynamics, Syst. Measurement, Control, **93**, 180-186, 1971
- Hakiel, Z, "Nonlinear model for wound roll stresses, " Tappi journal, **70**, 113-117, 1987