컨버팅 머신에서의 웹과 롤러의 슬립에 관한 연구
A Study of Slippage between a Web and a Cylindrical Roller in Converting Machine

*이장원 [1], 성창엽 [2], 이창우 [3], #신기현 [4]
*J. W. Lee[1], C. Y. Sung[2], C. W. Lee[3], #K. H. Shin(khshin@konkuk.ac.kr)[4]
[1] 건국대학교 기계설계학과, [2]건국대학교 기계설계학과, [3]건국대학교 기계설계학과, [4]건국대학교 기계항공공학부

Key words : Winding Process, Traction, Slip, Telescoping, Taper Tension

1. 서론

고속 회전하는 롤러와 롤러를 지나는 소재 사이에는 소재와 함께 인입되는 공기로 인하여 공기층(air layer)이 형성된다. 발생된 공기층은 롤러의 표면과 소재 사이의 구동력의 저하로 나타난다. 구동력(Traction)의 저하는 소재와 롤러의 선속도 차이로 나타나며, 슬립(Slippage) 현상이 유발된다.

특히 연속공정의 마지막 공정인 와인딩 공정(Winding process)에서는 운전 장력의 변화(e.g. Taper tension)가 발생하므로, 슬립의 발생이 예측된다. 소재와 롤러간의 슬립은 매우 얇은 소재(Web)의 표면에 긁힘을 발생시키며, 생산 제품의 품질 저하로 나타난다. 슬립을 최소화하기 위해서는 롤러의 형상, 롤러와 소재간의 이송경로 설정, 운전 조건(속도, 장력)등의 여러 가지 조건을 통한 해석이 요구된다.

이에 대하여 본 논문에서는 기존에 발표된 슬립 발생에 대한 모델을 바탕으로, 실험을 통한 컨버팅 머신의 와인딩 공정에서 운전 장력 및 속도의 변화에 따른 소재와 비 구동롤 사이의 슬립 현상을 확인하였다.

2. Mathematical model

일반적으로 비 구동 롤러의 운동 표현은 해석의 편의를 위하여 소재와 일정한 마찰계수가 형성되며, 소재와 동일한 선 속도를 가진다고 가정된다.[4] 그러나 생산성의 향상을 위한 소재의 고속 이송으로 인하여 소재와 비 구동롤 사이에는 속도 차이가 발생하게 된다.[1]

Fig. 1 은 이송 중인 소재와 비 구동 롤러 사이의 공기 유입으로 인한 공기층의 발생을 표현하고 있다.

다음의 식(1)은 공기층을 예측할 수 있는 모델로서, 식을 통하여 공기가 투과하지 않는 소재에 대하여 공기층(h_0)는 감긱각(ϕ)과는 상관 없이 운전 장력(T) 운전속도(V_{driven}, V_{idle})로 표현되는 함수임을 확인할 수 있다.

$$h_o = 0.65R\left[6(\eta/T)(V_{web}+V_{roller})\right]^{2/3} \tag{1}$$

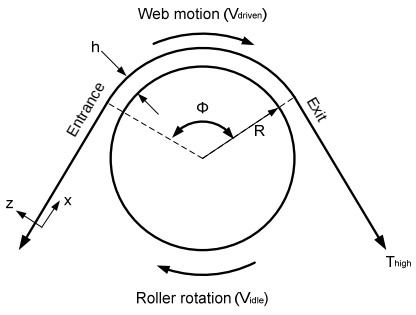

Fig. 1 Foil bearing model of a web and a roller

Fig. 2 Converting machine for slip experiment

식 (2)를 통하여 소재 이송 중 발생한 공기 층의 두께와 소재와 비 구동롤 사이의 거칠기가 운전 마찰계수를 결정함에 있어서 중요 인자임을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_T &= \mu_{st} && h_o \le Rq \\ \mu_T &= -(\mu_{st}/2Rq)h_o + (3/2)\mu_{st} && Rq \le h_o \le 3Rq \\ \mu_T &= 0 && h_o \ge 3Rq \end{aligned} \tag{2}$$

비 구동롤의 표면 거칠기 대비 공기층의 두께가 증가할수록 슬립은 발생하며, 슬립의 발생에 따른 구동 마찰계수 변화는 비 구동롤의 토크로 표현된다. 이는 다음 식(3)을 통하여 슬립의 발생 여부를 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} J\dot{\omega}_{roller} + B\omega &= \tau_{friction} && (non-slip) \\ J\dot{\omega}_{roller} + B\omega &= f(T,\mu_T,R,\phi) && (slip) \end{aligned} \tag{3}$$

3. Experiments

Fig. 2 는 winding unit, feeding unit, printing unit 으로 구성된 converting machine 이며, 본 실험은 converting machine 의 가장 마지막 구간인 winding 구간에서 이루어졌다. Fig. 3 은 winding 구간의 구동롤과 슬립의 여부를 확인하기 위한 비 구동롤, 외부 엔코더를 보여주고 있다.

Fig .4 는 winding 구간에서의 장력 변화를 나타내고 있다. 일반적으로 winding 구간에서는 다양한 방식으로 taper tension 을 시행하고 있다.[3] 일정한 기울기를 가지고 장력을

Table 1 Experiment parameters

Symbol	*value*	*Expression*
R	0.05935 m	Radius of roller
J	0.03 $kg \cdot m^2$	Inertia of roller
B	0.02	Bearing friction coefficient
w	1.01 m	Width of web
Rq	0.5 μm	Asperity between web and roller (mean)
ϕ	0.838 rad	Wrap angle
μ_{st}	0.2	Static coefficient

Fig. 3 Driven and idle roller in converting machine

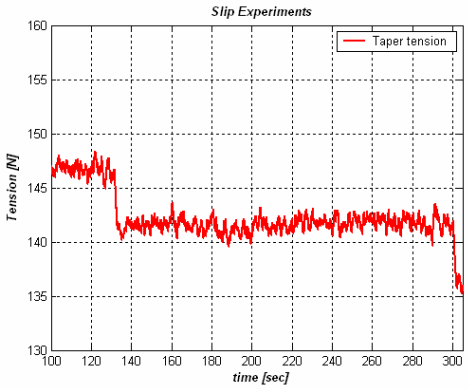

Fig. 4 Tension variation in rewinding section

감소시키는 방법 (linear taper tension), 곡선 형태로 장력을 감소시키는 방법(hyperbolic taper tension) 또는 반경의 증가에 따라 장력을 조절하여 토크(torque)를 일정하게 유지시키는 방법 등으로 구성된다.[5]

Fig. 5 는 Fig. 4 의 장력의 변화에 따라, 발생되는 소재와 비 구동 롤러 사이의 속도 변화를 보여주고 있다. 이송되는 소재의 속도는 이전 스팬의 닙핑된 출측 구동 롤의 선 속도와 동일하므로, 모터로부터 측정된 구동롤의 선 속도를 표현하였으며, 비 구동롤의 선 속도는 외부 엔코더를 이용하여 회전 속도를 측정하였다. 실험 결과를 통하여 장력의 변화에 따라서 소재와 비 구동 롤러의 상대 속도 차이가 확연하게 발생함을 확인할 수 있다.

장력의 감소함에 따라, 이송되는 소재와 비 구동 롤러 사이에서는 슬립이 발생되며, 이로 인한 구동력의 감소는 소재의 사행 현상으로 나타날 수 있다.[2] 와인딩 구간에서 발생하는 사행은 일반적으로 텔레스코핑이라 칭하며, 텔레스코핑은 생산 품질과 직접적으로 연관되므로, 텔레스코핑의 발생을 최소화하는 것이 매우 중요하다.

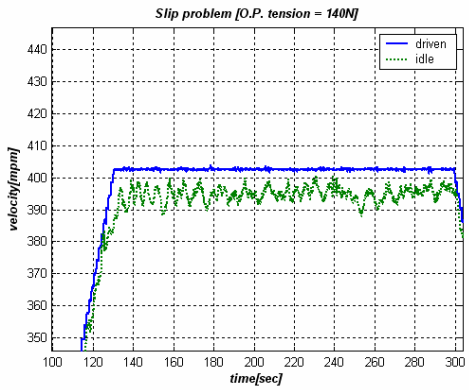

Fig. 5 Velocity difference between web and idle roller

4. 결론

본 논문에서는 운전 장력의 변화가 발생되는 와인딩 구간에서, 고속으로 이송하는 소재와 롤러 사이에서 생성되는 공기층의 두께 및 소재와 롤러 사이의 거칠기를 통한 구동 마찰계수의 변화에 대하여 기존 연구 결과를 바탕으로 슬립의 발생 여부에 대한 실험을 실행하였다.

본 논문의 실험 결과를 통하여 운전 장력 및 운전 속도의 변화는 소재와 비 구동롤 사이의 슬립에 중요한 원인이 됨을 확인하였다. 또한 운전 장력의 변화를 이용하여 롤을 형성하는 와인딩 구간에서 슬립의 발생을 확인하였다.

실험 결과를 바탕으로 는 슬립의 발생을 최소화하기 위하여 운전 설계 (롤 형상, 롤 종류, 소재조건 etc.) 및 운전 조건(운전 속도, 운전 장력 etc.)을 설계하는데 효과적으로 활용될 수 있다.

참고문헌

1. S. O. Kwon, K. H. Shin, "A Study on the Slippage between a Moving Web and Roller," KSME spring annual meeting, 2003.
2. K. H. Shin, S. O. Kwon, "The Effect of Tension on the Lateral Dynamics and Control of a Moving Web," IEEE Transaction on Industry Applications, **43**, 403~411, 2007.
3. 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.
4. K. H. Shin, "Tension Control," Tappi press, 2000.
5. D. R. Roisum, "Mechanic of winding," Tappi press, 1994.
6. D. R. Roisum, "Mechanic of rollers," Tappi press, 1996.