

이송중인 웹과 롤러간의 마찰 특성에 관한 실험적 연구

권순오*, 신기현*, 한영호*, 김효섭**

An Experimental Study on the Characteristics of Friction Between a Moving Web and a Roller

Soon O Kwon*, Kee Hyun Shin*, Young Ho Hahn*, Hyo Sub Kim**

ABSTRACT

In the continuous process systems, traction between a moving web and rollers is one of key mechanisms for the study of major issues including the distributed control of tension, guiding, wrinkling, winding, and scratching. Energy is transferred from the driven rollers to the web and from the web to the idle rollers through traction. The characteristics of friction play major role in the determination of the traction force between the moving web and the rollers. In this paper the characteristics of friction between the moving web and the rollers are studied, A procedure to determine the friction coefficient between the moving web and rollers is developed. An experimental setup to validate the procedure is devised. Experimental results showed that the value of traction coefficient decreases as the operating web speed increases and increases as the operating web tension increase.

Key Words : moving web(이송중인 웹 소재), roller(롤러), friction(마찰), traction force(구동 마찰력), traction coefficient(구동 마찰계수), air entrainment(공기유입)

기호설명

- T = tension(N)
- V = velocity of web (m/s)
- β = warpage angle (deg.)
- μ = coefficient of friction
- T = coefficient of driving
- τ = torque (N-m)

1. 서론

연속공정 프로세스에서 웹(web, 박판 소재:

필름, 철판, 종이 등) 소재의 이송 및 가공에는 일반적으로 풀림롤(unwinding roll), 감김롤(winding roll), 보조롤(idle roll), 구동롤러(driven roller), 작업롤(working roll) 등이 사용된다. 구동 롤러와 웹 사이의 마찰력에 의하여 웹은 이송되고, 보조롤과 웹 사이의 마찰력은 보조롤을 구동하게 된다. 롤 및 롤러와 웹 사이에 적절한 마찰력을 유지하는 것은 웹의 이송, 웹 표면의 보호, 웹 소재의 가공조건 확보(예: 비간섭 장력제어), 연속공정시스템의 안정적인 운용 등을 위하여 매우 중요하다. 또한, 소재의 특성과 이송 속도 등의 시스템 운용조건에 따라 웹과 롤러 사이에 적절한 마찰력을 확보할 수 있는

* 건국대학교 기계설계학과

** (주) SKC

시스템 설계조건(감김각, 롤러 양단의 장력차이 등)을 찾아내는 것도 웹 소재의 안정적인 이송 및 가공에 매우 중요하다.

구동마찰력에 영향을 미치는 인자는 매우 다양하며, 대표적 인자로는 소재와 롤러의 표면 조도(surface roughness), 소재의 장력(tension), 소재의 이송 속도 및 공기유입(air entrainment)량, 감김각(wrap angle), 롤러 직경(roller diameter) 등이 있는 것으로^{[1][2][3]} 보고된 바 있으나, 사용되는 소재, 운전조건마다 결과가 다르므로 실제 실험 등을 통하여 연구 결과가 보고된 경우는 많지 않다. 특히 생산공정의 웹 이송 속도가 점차 고속화됨에 따라 웹과 롤러 사이에 미끄럼 발생이 증가하며, 이는 롤러와 웹 소재 사이에 유입되는 공기에 의한 영향이 큰 것으로 알려져 있다. Knox와 Sweeney^[4]는 이러한 공기유입 현상을 박막 베어링(foil bearing)으로 모델링하고, 공기막(air film)의 두께와 웹과 롤러 사이의 구동 마찰력과의 관계를 규명하였다. 제안된 공기 박막 베어링에 대한 모델은 웹 소재와 롤러 표면이 완전히 매끄럽다고 가정하였으므로 실제와는 상당한 차이를 보이게된다. 따라서, 마찰특성은 각각의 경우에 대해 실험적으로 결정되고 있으며, Baumeister(1963)^[6], Ma(1965)^[7], Eshel와 Elrod(1965)^[8], Barlow(1967)^[9], 그리고 Licht(1968)^[10] 등은 실험결과를 이용하여 수정된 모델들을 제안한 바 있다.

본 논문에서는 이송중인 웹 소재와 롤러 사이에 작용하는 마찰력(구동마찰력: traction)을 결정하는 실험적 방법을 제시하고, 제시된 방법을 이용하여 특정 소재와 롤러 사이의 마찰계수에 미치는 물리적 변수들 간의 관계를 규명하였다. PET 필름과 가장 일반적으로 사용되는 크롬 도금된 롤러를 이용하여 제안된 측정 방법을 실험적으로 검증하였으며, 또한 운전 장력(operating tension), 속도, 감김각 등과 같은 운전조건과 마찰력의 관계를 실험적으로 규명하였다.

실험결과로부터, 소재 이송속도가 0~1 m/s의 범위 내에서는 운전장력이 증가할수록 구동마찰계수는 증가하고, 운전속도가 증가함에 따라 구동마찰계수가 감소하였다. 그러나 1 m/s 가까이 에서부터 구동마찰계수는 0.1로 수렴하였다. 본 연구 결과는 시스템의 운전속도 및 특정소재와 롤러 결정되었을 때 소재와 롤 사이에 미끄러짐을 방지하기 위한 최소한의 감김각(wrap angle)을 결정하는데 유용

하게 사용될 수 있다.

2. 벨트 방정식

벨트 방정식은 벨트에 의해 풀리를 회전시키기 위한 유효장력을 계산하기 위한 관계식이다. Fig.1은 롤러를 감고 지나가는 소재의 미소 요소에 가해지는 힘들을 표시한 것이다.

미소 체적 요소에서 각각 롤에 대하여 접선 및 직경 방향으로의 힘의 평형 방정식은 다음과 같다.

$$(T_\phi + dT_\phi)\cos\frac{d\phi}{2} - T_\phi\cos\frac{d\phi}{2} - dF_1 = 0 \tag{1}$$

$$(T_\phi + dT_\phi)\sin\frac{d\phi}{2} + T_\phi\sin\frac{d\phi}{2} - dF_{n1} = 0 \tag{2}$$

$1d\phi \approx 1$ 일 때, $\sin\frac{d\phi}{2} \approx \frac{d\phi}{2}$, $\cos\frac{d\phi}{2} \approx 1$ 라고 단순화하여 식 (1), (2)를 정리하면 다음과 같다.

$$dT_\phi = dF_1 \tag{3}$$

$$dF_{n1} = dT_\phi \tag{4}$$

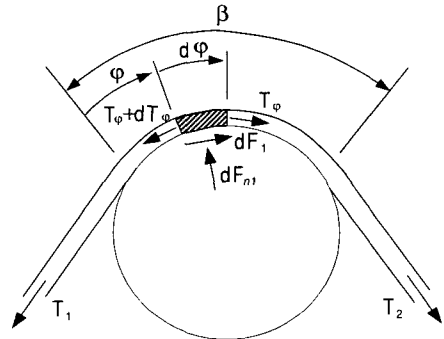


Fig.1 Forces acting on a moving web segment on a roller

또한, 마찰력 dF_1 은 식 (5)와 같이 정의된다.

$$dF_1 = \mu dF_{n1} \tag{5}$$

식 (2),(4),(5)로부터 다음의 관계식이 유도된다.

$$dT_\phi = \mu T_\phi d\phi \quad (6)$$

위의 식 (6)을 적분하면 감김각 β 에서 장력 T_1 및 T_2 의 관계는 다음 식(7)과 같다.

$$\frac{T_2}{T_1} = e^{\beta\mu} \quad (7)$$

식(7)을 벨트 방정식(belt equation)이라고 한다. 식(7)을 이용하여 미끄러짐이 발생하는 순간의 장력(T_1 , T_2)을 측정함으로써 이송중인 웹과 롤러 사이의 마찰계수(μ)를 계산할 수 있다.

3. 구동 마찰계수

롤러를 감싸고 주행하는 웹 이송 시스템에서 구동 마찰력은 이동 중인 웹과 롤러 사이의 마찰계수에 따라 크게 좌우되며, 구동마찰력은 웹 이송속도가 증가함에 따라 발생하는 웹과 롤러 사이의 공기유입에 가장 큰 영향을 받는다. 공기유입과 같은 요소들에 의하여 변화된 구동 마찰력의 특성을 나타내는 마찰계수를 본 논문에서 구동 마찰계수 (traction coefficient, μ_T)라 정의하고, 식 (7)을 이용하여 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$\mu_T = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{T_d}{T_u}\right) \quad (8)$$

롤러와 웹 소재 사이의 미끄럼은 롤러의 출 측으로부터 발생하기 시작한다. 입, 출 측의 장력 차이가 커짐에 따라 웹 소재와 롤러의 점착부(no slip region)는 점차 감소하고 미끄럼 구간(slip region)은 점차 확대된다. 따라서, 롤러 입 측에서 웹 소재가 닿는 한 점을 제외한 전체 감김각 구간에서 미소 미끄럼이 발생하는 순간에 최대 장력 차이가 발생한다. 그러므로, 전 구간에서 미끄럼이 발생하는 순간에 롤러 양단의 장력을 측정하고 식 (8)을 사용하여 구동 마찰계수(μ_T)를 구할 수 있다.

Fig.2는 구동마찰계수를 측정하기 위한 실험 장치의 개념도를 나타낸다. T_u , T_d 는 롤러의 입,출측에서 소재의 장력을 의미한다. 미끄럼 없이 이송 중인 롤러에 외부로부터 역방향의 토크가 가해지면, 롤러와 웹 소재간에 미끄럼이 발생한다. 미끄럼이 발생하는 순간에 측정된 장력(T_u , T_d)과 식 (8)을 이용하여 구동 마찰계수(μ_T)를 구할 수 있다.

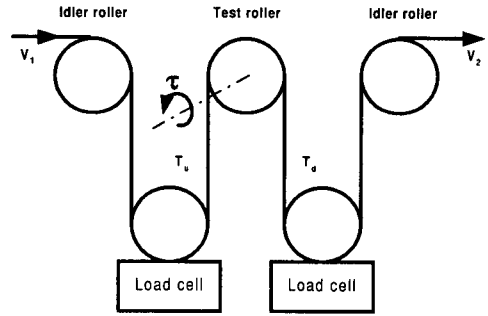


Fig. 2 Configuration of traction measurement

4. 실험

4.1 실험 장비의 구성

마찰계수를 측정할 시험 롤러(test roller)와 소재의 사양은 Table. 1과 같다.

Table 1 Specification of a test roller and web

시험 롤러	직경	ϕ 100
	표면 재질	크롬
소재	종류	polyethylene
	두께	14, 100 μ m
	폭	330 mm

Fig.2의 시험 롤러에 외부로부터 토크를 가하기 위해, Fig.3과 같이 시험 롤러의 축단에 전기 브레이크(electric brake)를 사용하였으며, 인가된 토크는 토크 센서를 통해 측정된다. 시험 롤러의 입,출측에서 소재의 장력을 측정하기 위해 두 개의 장력측정 롤러를 사용하였다. 또한 장력 조절기(tensioner)를 이용하여, 무한 루프 로 연결된 소재의 운전장력을 설정하도록 하였다. 웹 소재의 이송은 고무롤에 연결된 직류 서보모터를 사용하여, 구동롤과 웹 소재 간의 미끄럼이 가능한한 발생하지 않도록 하였다.

실험 장비의 운전은 68030 CPU를 탑재한 타겟 보드(target board)와 VME 버스로 연결된 신호입출력 보드를 사용하였다.

4.2 실험 조건 및 절차

Fig. 3과 같은 연속공정 시스템에서 주요한 운전 변수인 장력, 속도, 감김각이 각각 구동 마찰계

수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 2.와 같은 조건들로 분류하여 실험을 수행하였다.

Table 2 Experiment conditions

운전 장력	222.5, 323.4 N/m
운전 속도	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 m/s
감각각	90°, 180°

이와 같은 실험 조건들에 대해 구동 마찰계수를 측정하기 위한 실험 절차는 다음과 같다. 우선 Fig. 3와 같이 감각각에 따라 소재를 무한루프로 연결하고, 장력 조절기를 이용하여 초기 운전장력을 조절한다. 웹 소재의 운전 속도 궤적은 Fig. 4와 같다. 25초까지 정상상태 운전속도로 가속하고, 55초부터 시험롤러에 연결된 전기 브레이크로부터 토크를 서서히 증가시켜 시험 롤러를 정지시킨다. 이때 소재는 구동모터를 이용하여 일정한 속도를 유지하도록 한다. 구동 마찰계수를 측정하기 위해서는 웹 소재와 롤러간에 미끄럼이 발생하는 순간의 장력을 측정해야한다. Fig. 5 ~ Fig. 7은 각각 측정된 롤러 및 웹 소재의 속도, 장력, 토크의 예를 나타낸다.

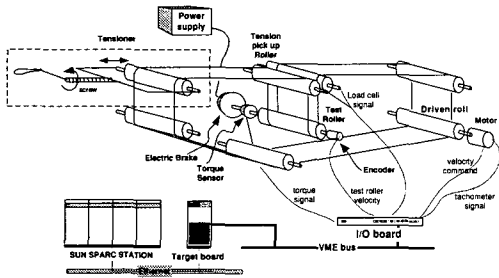


Fig. 3 Experimental equipment for the measurement of the traction force

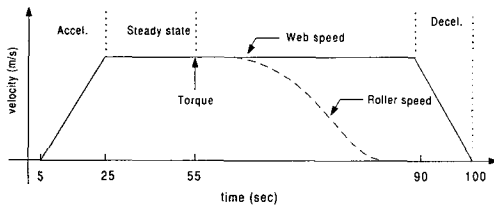


Fig. 4 Reference web velocity

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 계획에 따라 운전되었을 때 측정된 롤러와 웹 소재의 이송속도를 나타내며, 웹의 이송속도는 구동모터에 의해 일정하게 유지되지만 전기 브레이크가 연결된 롤러의 선속도는 그림에서와 같이 감소하게되는 순간을 미끄럼이 발생하기 시작하는 시각으로 간주할 수 있다. 미끄럼이 발생한 후, 롤러의 선속도가 단속적(계단모양)으로 감소하는 것은 사용한 주파수변환기(F/V converter)가 롤러의 회전속도가 급격히 감소함에 따라 엔코더의 출력펄스를 변환하는 주기(conversion rate)가 길어져 실제의 선속도를 측정하지 못한 것인데, 실험 결과에는 영향을 미치지 않는다. Fig. 6은 장력의 변화를 보이는데, 미끄럼 순간에서의 장력차를 알 수 있다. 미끄럼이 발생하는 순간의 소재 양단의 장력과 식 (8)을 이용하여 구동 마찰계수를 구한다. Fig. 7은 시험 롤러에 가해진 토크의 변화를 측정한 결과이다. 토크와 롤러의 직경을 이용하여 롤러에 가해진 입,출측에서의 장력차를 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 측정된 장력 신호의 타당성을 확인할 수 있다.

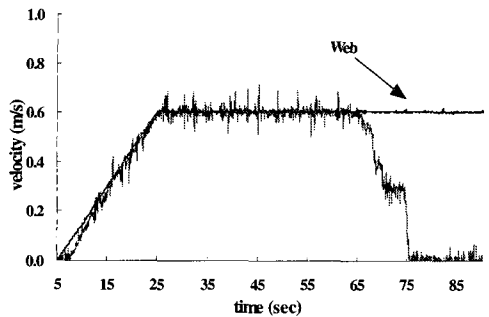


Fig. 5 Velocity of web and roller

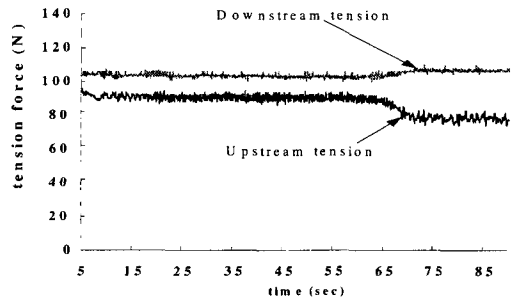


Fig. 6 Tension profile

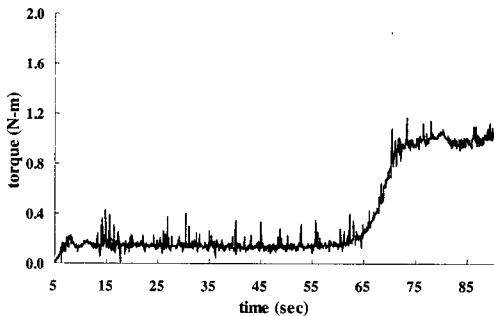


Fig. 7 Torque applied to the test roller

5. 결과

각각의 실험 조건들에 대해 4.2에서와 같은 방법으로 반복 실험하여 구동마찰계수를 계산한 결과는 Fig. 8 ~ Fig. 10과 같다. Fig. 8은 감김각 90도, 소재 두께 14 μm 의 경우에 동일한 조건에서 초기 장력의 변화와 마찰계수의 관계를 나타낸 그래프이다. 저속에서는 초기 장력이 클수록 구동 마찰계수가 큰 값을 알 수 있다. 이는 장력이 증가할수록 웹과 롤러 사이에 유입된 공기가 감소하고, 이에 따라 소재와 롤러 표면이 직접 접촉하는 면적이 고속인 경우에 비해 상대적으로 넓기 때문에 구동 마찰력을 증가시키게 된다. 그러나 속도가 1 m/s부근에서는 초기 장력의 크기에 상관없이 구동 마찰계수가 거의 동일하다. 이것은 소재 속도가 증가할수록 유입되는 공기량이 증가하고, 웹과 롤러 사이의 표면 마찰 계수를 감소시키기 때문이다. 이러한 공기유입 현상은 주름(wrinkling) 발생을 감소시키는 효과가 있다. 주름은 소재의 폭 방향으로 작용하는 전단응력에 의해 발생하는데, 유입되는 공기는 소재를 롤러 표면에서 띄워 전단응력을 감소시켜 주름을 감소시키게 된다.

Fig. 9는 소재의 두께에 따른 구동 마찰계수의 변화를 나타낸다. 저속에서는 두 경우 모두 거의 같은 구동 마찰계수를 나타내고 있으나 속도가 증가함에 따라 가벼운 소재의 경우에 구동 마찰계수가 더욱 크게 감소함을 볼 수 있다, 소재가 두꺼울수록 자중이 커지고, 고속에서 공기 유입에 의해 롤러 표면과 떨어지는 경향이 적게 발생할 것으로 추정된다.

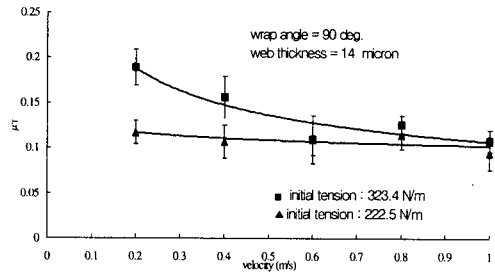


Fig. 8 Effect of operating tension on traction coefficient

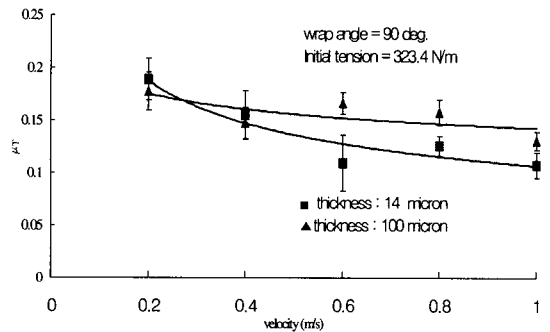


Fig. 9 Effect of web thickness on traction coefficient

Fig. 10은 감김각이 90° 와 180° 인 경우에, 속도에 따른 구동 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 감김각이 180° 와 90° 인 경우 구동 마찰계수는 현저한 차이는 나타나지 않았다. 마찰계수는 접촉면적의 크기와는 관계없으므로 당연한 결과라고 하겠다. 그러나, 구동 마찰력을 결정하는 인자는 장력, 감김각, 그리고 마찰계수이므로. 감김각이 90° , 180° 인 두 경우, 구동 마찰계수가 일정하여도 소재와 롤러 사이에 작용하는 구동 마찰력은 감김각이 클수록 커진다.

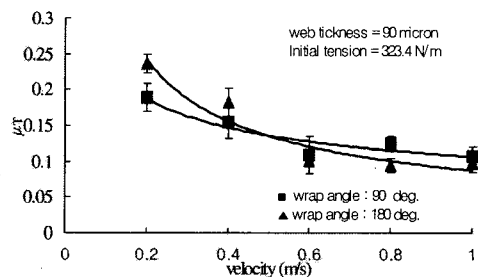


Fig. 10 Effect of wrap angle on traction coefficient

6. 결론

본 연구에서는 이동 중인 웹 소재와 롤러가 미끄럼이 없이 구동되기 위한 구동 마찰력과 구동 마찰 계수를 측정하기 위한 실험적 방법을 개발하였고, 각 변수들이 마찰력에 미치는 영향을 분석하였으며, 실험을 통해 그 방법을 검증하였다. 실험적 검증을 위하여 구동롤러(driven roller), 로드셀(load cell), 전기 브레이크, 토크 센서 및 비구동 롤러들로 구성된 실험 장치를 제작하였고, 특정 웹(PET 필름)과 롤러에 대하여 실험하였다.

실험 결과로부터 제안된 실험방법이 운전 장력이 증가할수록 구동마찰계수는 증가하고, 운전 속도가 증가함에 따라 공기 유입(air entrainment)에 의해 소재의 초기 장력이 구동마찰력(traction)에 미치는 영향이 감소함을 알 수 있었다. 또한, 감김각은 구동 마찰계수의 변화에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 그러나, 구동 마찰력은 마찰 계수와 감김각에 의해 결정되므로 감김각이 증가하면 구동 마찰력은 증가된다. 또한, 속도가 증가할수록 구동 마찰계수는 감소하며, 이는 구동 마찰계수가 소재를 따라 롤러의 표면 위를 지나게 되는 공기의 유입량에 영향을 받은 결과라 할 수 있다. 웹 이송 시스템을 설계할 때, 이상과 같은 실험절차를 통하여 롤 표면과 웹과의 미끄럼을 방지하기 위한 장력과 감김각 및 구동 마찰계수를 결정할 수 있다.

후기

본 연구는 (주)SKC와 건국대학교 산업기술연구원의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. David R. Roisum, "The mechanics of rollers," Tappi press, 1996.
2. David R. Roisum, "The mechanic of winding," Tappi press, 1996.
3. D. A. Daly, "Factors Controlling Traction Between Webs and Their Carrying Rolls," Tappi press, Vol. 48, No. 9, September 1965.
4. K.L. Knox, T.L. Sweeney, "Fluid Effects Associated with Web Handling," Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., Vol. 10, p. 201, 1971.

5. Kee Hyun Shin, "Tension Control," Tappi Press, 2000.
6. Baumeister, H.K., "Nominal Clearance of the Foil Bearing," IBM Journal, Vol. 7, No. 2, p. 153, 1963.
7. Ja, J.T.S., "An Investigation of Self-Acting Foil Bearings," Journal of Basic Engineering, pp. 837-846, Dec., 1965.
8. Eshel A. and Elrod, H.G. Jr., "The Theory of the Infinitely Wide, Perfectly Flexible, Self-Acting Foil Bearing," Journal of Basic Engineering, pp. 831-836, Dec. 1965.
9. Barlow, E.J., "Self-Acting Foil Bearings of Infinite Width," Journal of Lubrication Technology, Vol. 89, pp. 341-345, July, 1967.
10. Licth, L., "An Experimental Study of Elastohydrodynamic Lubrication of Foil Bearings," Journal of Lubrication Technolgy, Vol. 90, pp. 199-220, Jan. 1968.