

이송중인 웹과 롤러의 슬립에 관한 연구

권순오[†] · 신기현^{*}

A Study on the Slippage between a Moving Web and a Roller

Soon-Oh Kwon, Kee-Hyun Shin

Key Words : web(웹), Roller(롤러), Traction(구동력), Friction(마찰), Traction coefficient(구동 마찰계수), Slip(미끄러짐)

Abstract

Air entrainment can become a significant problem in a web handling process. The development of air film between a web and an idle roller can cause a reduction of traction and traction coefficient, by which a slip is occurred. Computational and experimental study was carried out to describe the slippage of an idle roller for given operating conditions, tension and web velocity. An extended mathematical model to find out a slip condition was developed by using the models of air film height, dynamic traction coefficient, and torque balance of a rotational roller. And by using the extended model, a mechanism to define the slippage between the roller and the moving web was suggested. The results of simulation and experiment showed that the extended dynamic model could properly characterize the rotational motion of the idle roller by considering dynamic traction coefficient. By examining the rotational motion of the idle roller with web dynamics(speed), the mechanism to define al slip condition between the roller and the web was found to be effective.

기호설명

k	= 상수 = 0.643
m	= 단위면적 당 소재의 질량
Ra	= 평균 표면 거칠기
Rq	= rms 표면 거칠기
R	= 롤러 반경
V _w	= 소재의 이송속도
V _R	= 롤러의 선속도
T	= 운전 장력
U	= V _w +V _R
W	= 소재의 폭
φ	= 감김각
η	= 공기의 동점성계수
μ _s	= 정 마찰계수

μ_T = 구동 마찰계수 (traction coefficient)

α = 공기 투과율 (permeability)

1. 서론

회전하는 롤러를 지나가는 소재에 대해, 롤러와 소재 사이에는 공기층(Air Layer)이 형성되고, 이는 소재와 롤러의 표면 사이에서 윤활(Lubrication) 작용을 함으로써 두 표면간의 마찰력(Friction) 또는 구동력(Traction)을 감소시키게 된다. 이러한 구동력의 감소는 소재와 롤러의 선속도 차이를 발생시키켜 소재와 롤러가 미끄러지는 현상을 유발하게. 얇은 박판 소재를 이송하면서 다수의 공정을 거치게 되는 연속공정 시스템에서 롤러와 소재의 미끄럼은 소재 표면에 긁힘(scratch) 등의 손상을 일으켜 품질에 심각한 영향을 미치게 되므로, 롤러의 설계, 소재 이송경로 설정 및 운전조건(장력, 속도 등)을 결정함에 있어 이러한 미끄럼의 발생여부를 예측할 수 있어야 한다.

[†] 건국대학교 기계공학과
E-mail : dkso@konkuk.ac.kr
TEL : (02)450-3493

^{*} 건국대학교 기계항공공학부

Knox 와 Sweeney[1]는 윤활 베어링(Foil Bearing)에 대한 해석을 적용하여, 운전중인 매끄러운 소재와 롤러 표면에서의 공기층의 두께를 계산한 바 있다. 이를 바탕으로 Ducotey 와 Good[2,3,4]은 소재와 롤러의 표면 거칠기, 소재의 공기 투과율(Permeability)을 고려하고, 홈을 낸 롤러(Grooved Roller)를 이용한 경우에 구동력을 예측할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 또한 Hashimoto[5]도 롤러-소재 사이와 감김롤(Winer roll)의 감긴 소재간(inter layer)에 발생하는 공기층의 두께를 예측하기 위한 새로운 2 차원 해석모델을 제안한 바 있다.

본 논문에서는 이러한 기존의 연구 결과들로부터 얻을 수 있는 공기층 두께와 구동 마찰계수(Traction coefficient)에 관한 해석결과와 모델을 바탕으로 구동력(Traction)을 구하고, 이를 롤러의 회전 동역학 모델에 적용하여, 미끄럼의 발생여부를 판별하고, 가감속 및 장력의 변화를 포함한 운전 조건의 변화에 대해, 비구동 롤러의 회전운동을 표현 함으로써, 롤러와 소재 간의 미끄럼이 발생할 조건과 그에 따른 롤러의 속도 변화를 예상 할 수 있는 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 풀림롤(Unwinder) 및 감김롤(Rewinder)를 포함한 3 중 스펀 웹 이송 시스템의 모의 시험 장치를 이용하여 롤러와 소재의 선속도를 측정하고, 미끄럼 현상을 관찰함으로써, 구동 마찰계수를 고려한 개선된 롤러의 운동방정식을 통해 롤러와 이송중인 소재의 미끄럼 조건을 효과적으로 정의할 수 있음을 확인 하였다.

2. 수학적 모델

2.1 소재와 롤러 간 공기층 두께모델

Fig. 1 은 이송중인 소재와 회전하는 롤러 사이에 생성되는 공기층의 두께(h)를 나타낸다. 롤러를 감싼 소재의 장력이 T 로 일정하고, 소재의 이송속도가 V_w 이며, 필름과 롤러 표면이 매끄럽다고 가정할 때, 필름과 같이 공기가 투과할 수 없는 소재(Nonpermeable web)의 경우에 대해 공기층의 두께(h)는 감김각 전체의 약 95%에 해당하는 면적에서 일정하다고 알려져 있으며, 투과성 소재에 대해서는 롤러를 기준으로 출측(Exit Region)으로 갈수록 감김각에 대해 선형적으로 공기층의 두께가 얇아진다.

식(1)은 이러한 공기층의 두께를 예측할 수 있는 알려진 모델이다. 식(1)에서 α 는 소재의 공기 투과율로서, 주어진 장력으로 인해 받는 압력

의 변화(ΔP)에 대해 주어진 면적(A_o)을 통해 빠져나가는 공기의 유량으로 정의되며, 아래와 같다.

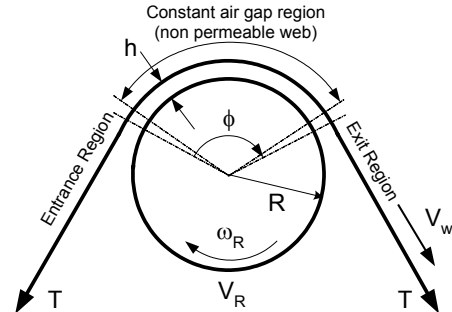


Fig. 1 Foil bearing model of a web and a roller

$$h(\phi) = \begin{cases} 0.643R \left[\frac{6\eta U}{T} \right]^{\frac{2}{3}} - 2 \left(\frac{\alpha T}{U} \right) \phi & \text{if } h > 0 \\ 0 & \text{if } h \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\text{Volume / time}}{A_o \Delta P}$$

공기가 소재를 통해 투과할수 없는 필름과 같은 소재에 대해서는 식(1)에서 $\alpha = 0$ 이 되므로, 공기층의 두께(h)는 감김각과 상관없이 시스템의 대표적인 운전조건인 장력(T)과 소재의 이송속도(V_w) 및 롤러의 선속도(V_R)의 함수가 됨을 알 수 있다.

2.2 구동 마찰계수 (Traction Coefficient μ_T)

Knox 와 Sweeney 는 공기층의 두께와 롤러-소재간의 마찰력이 밀접한 상관관계가 있음을 발견 하였다. 공기층 두께가 매우 얇은 경우에 롤러-소재간 마찰계수는 정마찰계수와 같고, 공기층의 두께가 증가함에 따라 마찰계수는 선형적으로 감소하며, 이는 Stribeck 곡선과 매우 유사함을 실험적으로 확인하였다.

이러한 마찰력의 감소는 소재와 롤러 표면의 거칠기와 공기층의 두께와의 상대적 크기에 따라 결정되며, 구동 마찰계수가 최소가 되는 공기층의 최소 두께는 소재와 롤러의 등가 제곱근 거칠기(rms roughness, $Rq_c = \sqrt{Rq_w^2 + Rq_R^2}$)의 3 배 임이 Harris 의 연구를 통해 알려져 있다. 따라서, 소재-롤러간 구동력(Traction)이 작용하기 위해서는 운전 조건에 따른 공기층의 두께가 등가 거칠

기의 3 배를 넘지 않아야 한다는 것을 알 수 있다.

또한, 마찰계수가 정 마찰계수로부터 감소하기 시작하는 조건은 공기층 두께가 롤러 및 소재의 평균 거칠기 보다 두꺼워 지기 시작하는 시점임이 알려져 있다.

Ducotey 와 Good 은 이상의 연구결과들을 종합하여 소재-롤러간의 구동 마찰계수에 대한 모델은 아래 식(2)와 같이 제안하고, 일반적으로 알려진 벨트 방정식(Belt Equation)을 이용하여 실험적으로 얻어진 구동 마찰계수를 비교함으로써 오차 범위 안에서 모델의 정확성을 검증하였다.

$$\mu_T = \begin{cases} \mu_{st} & \text{if } 0 \leq h_o \leq R_q \\ -\frac{\mu_{st}}{2R_q} h_o + \frac{3}{2} \mu_{st} & \text{if } R_q \leq h_o \leq 3R_q \\ 0 & \text{if } h_o \geq 3R_q \end{cases} \quad (2)$$

2.3 구동력 (Traction Force)

2.1 및 2.2 절의 식(1)과 식(2)를 통해 소재의 장력과 이송속도가 주어지고, 반경이 R 인 롤러와 소재간에 생성되는 공기층의 두께와 표면 거칠기의 관계에 따라 구동 마찰계수를 예상할 수 있다.

소재 장력에 의해 롤러 표면에 가해지는 압력으로부터 수직항력을 구하고, 구동 마찰계수와 곱함으로써 구동력(Traction force)를 얻을 수 있다. 운전장력 T 와 롤 반경 R, 소재의 폭 W 및 소재의 속도 V_w, 단위 면적당의 소재의 질량 m 으로부터 롤러 표면에 가해지는 압력(P_T)은 식(3)과 같이 표현되며, 이때 소재의 질량을 무시하여 간소화 하였다.

$$P_T = \frac{T - mV_{web}^2}{RW} \approx \frac{T}{RW} \quad (3)$$

식(3)으로부터 롤러에 가해지는 수직력(Normal Force, F_n)는 롤러의 접촉면적에 대하여 적분함으로써 식(4)와 같이 얻어진다.

$$F_n = \int_A P_T W dA = \int_0^\phi \frac{T - mV_{web}^2}{RW} WR d\phi = T\phi \quad (4)$$

소재와 롤러 사이에 작용하는 구동력(F_T)은 식(4)에서 구한 수직력과 식(1) 및 식(2)를 통해 얻

을 수 있는 구동 마찰계수를 곱하여 얻을 수 있으며 아래 식(5)와 같다.

$$F_T = \mu_T F_n = \mu_T T\phi \quad (5)$$

식(5)에서 구한 구동력은 소재의 장력과 속도 및 감김각 등에 의해 소재-롤러 간에 작용할 수 있는 마찰력을 의미하며, 롤러의 반경을 곱함으로써 소재의 장력에 의해 비구동 롤러(Idle Roller)에 작용하는 토크(Torque)를 얻을 수 있으며 식(6)과 같다.

$$\tau_T = F_T R = \mu_T TR\phi \quad (6)$$

2.4 비구동 롤러의 회전운동 모델

소재의 장력으로부터 전달되는 구동력에 의해 회전력을 얻게되는 비구동 롤러에서 운동방정식은 식(7)과 같다.

$$J\dot{\omega}_R + B\omega_R = \tau_{ext} \quad (7)$$

소재와 롤러간의 미끄럼이 없을 경우에 소재의 이송속도(V_w)와 롤러의 선속도(V_R)는 같고, 이때 롤러를 회전시키기 위해 요구되는 토크는 식(7)에서 롤러의 각속도를 소재의 선속도로 바꾸어 표현함으로써 식(8)과 같이 얻을 수 있다.

$$J\dot{\omega}_R + B\omega_R = \frac{J}{R} \dot{v}_w + \frac{B}{R} v_w = \tau_{no_slip} \quad (8)$$

마찰력은 작용하는 외력에 대한 반작용으로 나타나는 힘이므로 외력보다 클 수 없으며, 마찰력의 최대값은 미끄럼이 없는 경우에 작용하는 외력과 같다. 이와 같은 이유로 미끄럼이 없을 경우에 식(6)으로 표현된 구동력으로부터 얻어진 토크(τ_T)는 (8)에서 구한 토크(τ_{no_slip})와 동일한 값이 된다. 따라서 식(6)에서 얻은 τ_T의 계산결과가 식(8)에서 얻은 τ_{no_slip} 값 이상인 경우, 실제로는 τ_T = τ_{no_slip} 와 같음을 의미한다.

이와는 반대로 롤러와 소재간의 미끄럼이 발생하는 경우에는 식(6)으로부터 계산되는 토크(τ_T)가 식(8)에서 계산한 미끄럼이 없는 경우에 필요한 토크(τ_{no_slip})보다 작아지며, 이때 실제로 롤

러에 가해지는 토크는 τ_T 이 된다. 따라서 롤러의 회전운동 모델은 식(6)을 식(7)에 대입하여 얻은 식(9)와 같다.

$$J\dot{\omega}_R + B\omega_R = \mu_T TR\phi \quad (9)$$

따라서 비구동 롤러의 회전운동을 구동 마찰계수를 이용하여 미끄럼의 발생여부에 따라 식(10)과 같이 정리 할 수 있다.

$$J\dot{\omega}_R + B\omega_R = \begin{cases} \frac{J}{R}\dot{V}_w + \frac{B}{R}V_w & \text{if } \tau_T \geq \tau_{no-slip} \\ \mu_T TR\phi & \text{if } \tau_T < \tau_{no-slip} \end{cases} \quad (10)$$

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션

소재의 운전조건에 따른 구동 마찰계수의 변화를 이용하여 비구동 롤러의 회전운동을 시간에 대해 표현함으로써, 소재와 롤러의 미끄럼 현상을 확인할 수 있는 시뮬레이션 절차는 다음과 같다.

소재의 장력과 이송속도를 운전 계획에 따라 시간에 따른 궤적을 결정하고, 롤러의 선속도 초기값을 설정한다. 시간에 따른 운전 궤적과 초기값, 그리고 모델에 사용된 각 파라미터들로부터 식(1)을 이용하여 공기층의 두께(h)를 구하고, 그 결과를 식(2)에 대입함으로써 구동 마찰계수(μ_T)를 얻는다. 얻어진 구동 마찰계수와 식(6)을 활용하여 구동 토크(τ_T)를 구한다. 또한 주어진 소재의 운전 속도를 식(8)에 대입하여 미끄럼이 발생하지 않기 위해 요구되는 구동 토크(τ_{no_slip})를 구한다. 계산된 두 가지 토크값을 식(10)의 미끄럼 발생조건에 따라 실제로 롤러에 가해지는 토크를 선택하고, 이에 따른 해를 구함으로써 비구동 롤러의 회전운동을 시간변화에 따라 기술 할 수 있다.

시뮬레이션에서 사용된 파라미터들은 Table 1과 같다. 소재의 이송속도 궤적은 구동 마찰계수의 변화를 나타내기 위해 15 초간의 가속구간을 포함하여 2m/s 로 운전되고, 운전장력은 3kgf로부터 5kgf로 증가하도록 설정하였다.

Table 1 Simulation parameters

R	0.038 m
J	0.0022 kg-m ²
B	0.015
W	0.33 m
R _q	4.44 μm
η	18.3×10 ⁻⁶ N-s/m ²
φ	π/2 rad
μ _s	0.3

3.2 실험

시뮬레이션을 통해 예측되는 공기층 두께의 변화에 따른 소재-롤러 간 미끄럼 현상과, 이에 따라 비구동 롤러의 선속도가 소재의 이송속도와 차이가 발생함을 확인하기 위해 Fig. 2 에서 보는 바와 같은 모의 실험장치를 사용하였다.

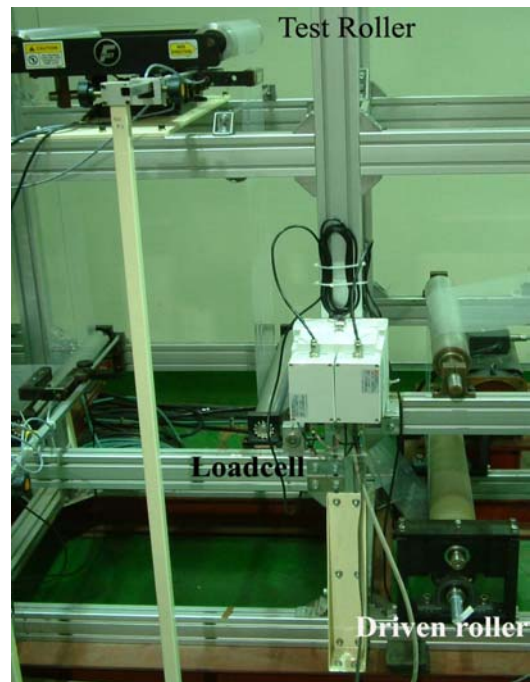


Fig. 2 Simulator

소재의 이송속도와 장력은 비구동 롤러의 입, 출측에 있는 구동롤러를 이용하여 제어되도록 하였다.

3.3 결과

비구동 롤러의 선속도 변화, 구동 마찰계수의 시간에 따른 변화와 롤러에 가해진 토크에 대한

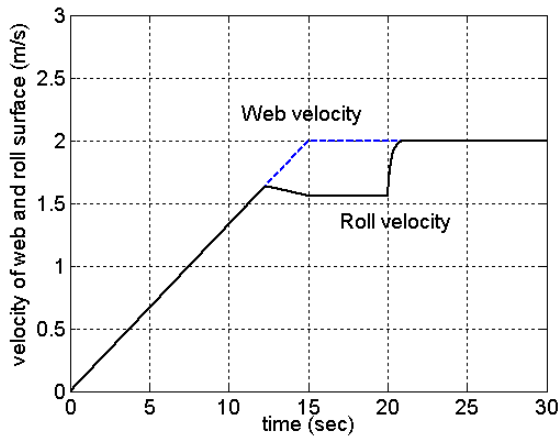


Fig. 3 The velocity of a web and a roller

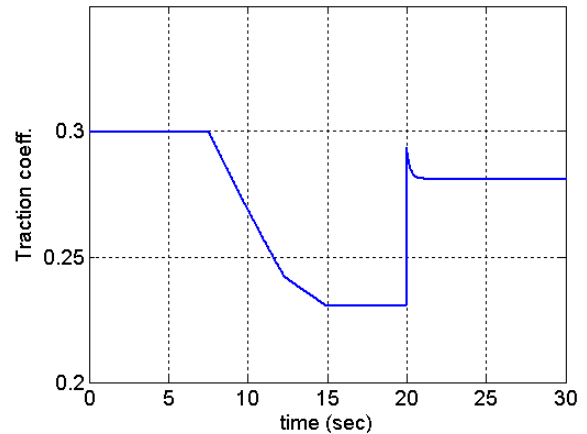


Fig. 5 Traction coefficient

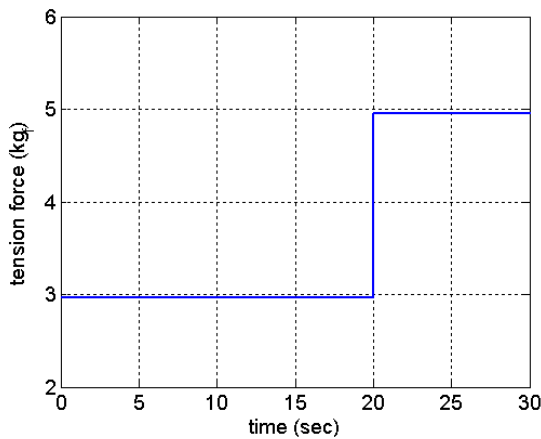


Fig. 4 Web tension

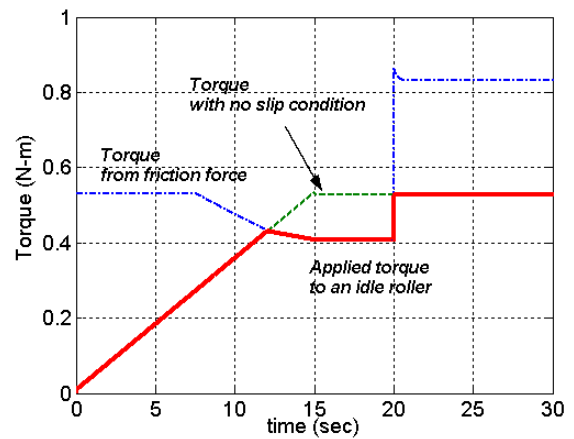


Fig. 6 Applied torque to an idle roller

시뮬레이션 결과들은 Fig.3 ~ Fig.6 과 같다. 소재의 이송속도는 구동롤러에 의해 Fig.3 과 같이 가속구간을 거쳐 15 초 후에 2m/s 의 정속운전을 하게된다. 이때 운전장력은 Fig. 3 과 같이 가속구간을 포함하여 20 초간 3kgf(=90N/m)의 장력으로 일정하게 유지되고, 20 초에 5kgf 로 증가되었다.

이러한 운전조건에서 시간에 따른 구동 마찰계수의 변화는 Fig.5 와 같이 장력이 3kgf 으로 일정한 20 초 동안, 최초 약 7 초간은 소재의 이송속도 (V_w)가 낮아 공기층의 두께(h)가 소재와 롤러의 표면 거칠기(R_q)를 넘지 않아 구동마찰계수(μ_T)는 정마찰계수(μ_s)를 유지하다가, 이송속도가 증가함에 따라 구동 마찰계수가 점차 감소해 감을 알 수 있다. 그 결과 구동력(Traction force)도 동일한 경향으로 감소하게 되고, 이에 따라 마찰 토크는 Fig. 6 의 굵은 점선으로 보이는 바와 같이 감소하게 된다.

Fig. 6 에서 얇은 점선으로 나타낸 것과 같이 미끄러움이 없이 롤러를 구동하기 위해 요구되는 토크

보다 작아지게 되는 시점(약 12 초)으로부터 롤러는 소재와 미끄러짐이 발생하게 되며, 그 결과 Fig. 3 에서와 같이 롤 속도가 소재속도와 차이가 발생하기 시작함을 알 확인 할 수 있다.

20 초에 운전장력을 Fig. 4 와 같이 증가시키게 되면 공기층의 두께가 작아지고, 구동 마찰계수는 증가하게 됨으로써, Fig.5 와 같이 구동 마찰력에 의한 토크가 미끄러짐이 발생되지 않기 위한 토크량 보다 커지게 되어, 같이 롤의 속도는 다시 소재의 이송속도와 동일해 짐을 Fig. 3 에서 알 수 있다.

이상과 같은 비구동 롤러의 선속도 변화는 실험적으로도 관측되었으며, 시뮬레이션과 동일한 조건에서 수행된 실험에서의 장력 변화와 비구동 롤러 및 소재의 이송속도를 각각 Fig.7 과 Fig. 8 에 나타내었다. 비구동 롤러의 선속도는 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 약 1.6m/s 가 되는 지점에서 소재와 미끄러움이 발생하기 시작함을 알 수 있는데, Fig.3 의 시뮬레이션 결과에서 미끄러지기 시작하

는 속도와 매우 유사한 결과임을 알 수 있다. 시뮬레이션과 실험결과의 다소의 차이는 시뮬레이션 파라미터 중, 롤러의 회전에 따른 베어링에서의 점성 마찰계수(Coulomb friction coefficient)가 실제와 차이가 있었기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6에서 소재의 운전장력이 약 43 초에서 증가함에 따라, Fig. 3의 시뮬레이션 결과에서와 같이 Fig. 7에서 롤러의 선속도가 소재의 이송속도와 동일한 값으로 증가함을 확인 할 수 있다.

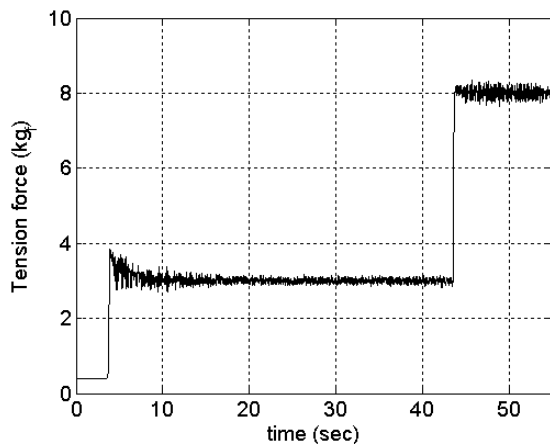


Fig. 7 Web tension (experiment)

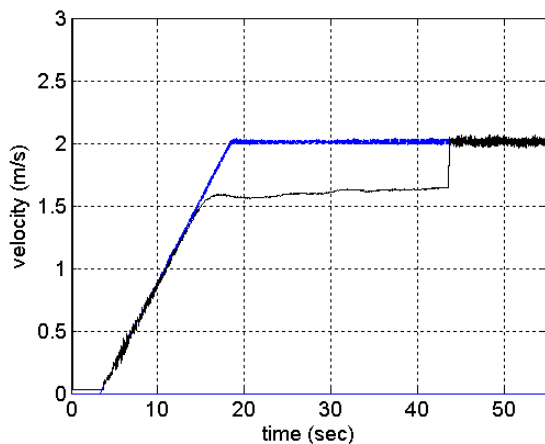


Fig. 8 The velocity of a web and an idle roller (experiment)

4. 결론

본 논문에서는 운전 중에 소재와 롤러 사이에 생성되는 공기층의 두께를 예측할 수 있는 알려진 모델과 롤러 및 소재의 표면 거칠기를 고려하여 구동 마찰계수의 변화에 관한 기존의 연구 결과들을 롤러의 회전운동 방정식에 적용함으로써, 구동 마찰력에 의해 롤러에 가해지는 토크를 계

산함으로써 미끄럼 발생하는 조건을 보다 효과적으로 판별할 수 있는 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 롤러의 선속도 변화를 예측하였다. 또한, 웹 이송 시스템에 대한 모의 시험 장치를 이용하여 시스템 운전시에 발생하는 비구동 롤러와 소재간의 미끄럼 현상을 확인하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교함으로써, 주어진 운전조건에 따라 이송중인 소재와 롤러 간의 미끄럼 현상과 롤러의 운동을 효과적으로 표현 할 수 있음을 확인하였다.

이는 비구동 롤러를 포함한 웹 이송 시스템의 설계 및 해석에 있어 편의를 위해 롤러와 소재의 미끄럼이 없다고 가정하거나, 마찰계수를 임의로 가정함으로써 발생하는 오차를 줄일 수 있는 해석 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

또한, 롤러와 소재간의 미끄럼은 소재 표면에 심각한 손상을 초래하는데, 본 연구에서와 같은 시뮬레이션을 통해 가감속을 포함한 속도 변화와 장력변화 따른 미끄럼의 발생여부를 예측함으로써 이를 방지하기 위한 타당한 운전조건을 설정하거나, 롤러의 설계에 있어서 관성(J)과 베어링에서의 마찰특성(B) 등의 범위를 결정함에 활용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00385-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) K. L. Knox, T. L. Sweeney, 1971, "Fluid Effects Associated With Web Handling", Industrial Engineering Chemical Process Design Development, Vol. 10, No. 2, pp. 201-205.
- (2) K. S. Ducotey, J. K. Good, 2000, "A Numerical Algorithm for Determining the Traction Between a Web and a Circumferentially Grooved Roller", ASME Journal of Tribology, Vol. 122, pp. 578-584.
- (3) K. S. Ducotey, J. K. Good, 1999, "Predicting Traction in Web Handling", ASME Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 618-624.
- (4) K. S. Ducotey, J. K. Good, 1998, "The Effect of Web Permeability and Side Leakage on the Air Film Height Between a Roller and Web", ASME Journal of Tribology, Vol. 120, pp. 559-565.
- (5) J. K. Good, D. M. Kedl, J. J. Shelton, 1997, "Shear Wrinkle in Isolated Spans", Proceedings of the 4th Conference on Web Handling, pp.462-471.
- (6) Hiromu Hashimoto, 1999, "Air Film Thickness Estimation in Web Handling Processes", ASME Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 50-55.