고속 롤투롤 인쇄기의 장력제어시스템 안정도 해석

강철구† · 이봉주*

Stability Analysis of the Tension Control System of a High-speed Roll-to-Roll Printing Machine

Chul-Goo Kang, and Bong-Ju Lee

Key Words : Gravure printing machine(그러뷰어 인쇄기), Tension control (장력제어), Stability analysis(안정도 해석), Dancer (댄서)

Abstract

Stability of high-speed roll-to-roll printing machines is one of the most important factors that are required for the printing machines to operate properly and to obtain reasonable printing performance. This paper proposes a new model for the web-tension system of a high-speed gravure printing machine considering span-length variations due to dancer rollers, and analyzes the stability of plant dynamics of the printing machine using the proposed model. Span-length variations due to dancer motions are considered for the modeling of plant dynamics in two ways; one is to include the effect of span-length variations without considering dancer inertias and viscous frictions, and the other is to include the effect of span-length variations with considering dancer inertias and viscous frictions. The stability of the plant model is analyzed for various web-speeds using the eigenvalues of the linearized model about operating points.

1. 서 론

오늘날 사회에서 요구하는 인쇄물은 대량이면서 적시에 공급되기를 요구하고 있다. 따라서 오목판 인쇄의 일종인 그러뷰어 인쇄기(gravure printing machine)와 같은 고속 롤투롤(roll-to-roll) 인쇄기가 점차 사용이 확대되고 있다. 이러한 고속 롤투롤 인쇄기의 설계에서 고려해야 할 가장 중요한 요소 중의 하나로서 장력제어시스템의 안정도(stability)를 들 수 있다. 장력제어시스템의 안정도가 만족되지 않으면 시스템이 적절하게 작동하지 않을뿐더러 원하는 인쇄성능을 얻을 수 없게 된다.

고속 롤투롤 인쇄기의 장력제어시스템은 내재적으로 비선형성이 강하고 또한 커플링 효과(coupling effect)가 강한 동특성을 가지고 있는 다중입출력(multi-input multi-output) 시스템이다. 따라서서 이러한 고속 롤투롤 인쇄기의 안정도를 판단하는 것은 쉽지 않다. 하지만 다행인 것은 이러한 롤투롤 고속 인쇄기가 실제로 설치되어 작동 중일 때는 일정한 웹속도로 작동한다는 것이다. 그러므로 이러한 일정한 작동조건에 대해 비선형성이 강하고 커플링 효과가 강한 동특성을 선형화하여 그 작동조건에서의 안정도를 해석할 수 있다.

웹속도가 증가되거나 감소되는 과도구간 에서는 이산 속도 조건에서 각각 선형화된 시스템의 안정도를 가지고 전체 시스템의 안정도를 예측할 수 있다. 실제 시스템의 작동에서도 각 이산 속도 조건에서 최적화된 제어기 파라미터로 과도구간을 부드럽게 지나 정상상태에 도달하게 하고 있다.

본 논문에서는 Fig. 1 과 같은 롤투롤 인쇄기인 고속 그러뷰어 인쇄기에 대해, Shin[1]의 모델링

† 건국대학교 기계공학부 교수
Email: cgkang@konkuk.ac.kr
Phone: (02)447-2142, Fax: (02)447-5886
* 건국대학교 기계공학과 대학원

방법을 확장하여 스팬길이변화를 적극적으로 고려한 새로운 플랜트 장력모델을 제시한다. 그리고 이 새로운 플랜트 모델을 이용하여 댄서 동특성이 고려된 플랜트 시스템의 안정도 해석을 수행한다. 스팬길이변화는 터릿(turret)을 사용하는 롤투롤 인쇄기에 있어서, 두 부분에서 발생하고 있다. 하나는 풀림터릿(unwinder turret)과 감김터릿(rewinder turret)의 회전에 의한 스팬길이변화이고[2], 다른 하나는 댄서(dancer)의 움직임에 의한 스팬길이변화이다. 이 중 터릿에 의한 스팬길이변화는 플랜트의 안정도에 큰 영향을 주지 않기 때문에, 즉, 선형화된 모델에서는 플랜트의 안정도에 영향을 주기 않기 때문에, 본 논문에서는 댄서의 움직임에 의한 스팬길이변화를 주목한다.

Fig. 1 Gravure printing machine (Courtesy of FDRC, Konkuk University)

댄서에 의한 스팬길이변화는 본 논문에서 두 가지 경우에 대해 모델링에서 고려되는데, 첫째는 댄서의 관성과 점성마찰을 고려하지 않은 경우이고, 둘째는 댄서의 관성과 점성마찰을 고려하는 경우이다. 둘째 경우에는 댄서 상류와 하류의 웹 장력이 달라지게 되어 시스템의 차수가 증가하게 되고 복잡성이 증가한다.

2 절에서는 스팬길이변화를 두가지 방법으로 고려한 비선형 모델을 제시하고, 3 절에서는 전체 플랜트에 대한 비선형 모델을 구하고, 이를 작동점 부근에서 선형화 한다. 4 절에서는 선형화된 플랜트 모델에 대한 안정도를 해석하고, 5 절에서는 결론을 기술한다.

2. 비선형 장력 모델링

Shin[1]은 흘러가는 웹에서 두 구동롤 사이의 한 스팬(span)을 검사체적(control volume)으로 보고 이 검사체적 내의 질량보존법칙에 의해 웹의 장력모델을 유도하고, 이로부터 정상상태에서 속도변화량과 장력변화량 사이의 선형모델을 제시하였다. 그리고 댄서의 영향은 이 선형모델에서 탄성 변형률을 추가함으로써 고려하였다. 그러나 이러한 방법에 의해서는 댄서의 동특성 영향을 전체 장력제어시스템의 안정도 해석에 포함시키는데 어려움이 있다.

롤투롤 인쇄기에 있어서 댄서는 일반적으로 외란에 대한 웹의 장력을 조정(regulation)하는 역할과 웹 장력을 감지하는 센서의 역할을 수행한다. 댄서가 장력 센서의 역할을 수행할 때는 웹 장력과 측정된 댄서팔(dancer arm) 각도 사이의 통특성을 무시하고 있기 때문에 유의해야 한다. 특히, 댄서팔 각도를 장력되먹임 신호로 사용할 때는 제어시스템의 성능에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 유의해야 한다. 더 좋은 방법은 공주롤러(idle roller)에 로드셀을 설치하여 웹 장력을 직접 측정한 다음 이를 되먹임(feedback) 하는 것이다.

본 절에서는 Fig. 2 와 같은 공압구동방식의 댄서를 포함하는 다중스팬(multi-span) 웹 장력시스템에 대한 새로운 비선형 모델을 제시한다.

Fig. 2 Dancer system

먼저 댄서롤러를 포함한 흘러가는 웹의 검사체적을 Fig. 3 의 점선 사각형과 같이 둔다. 본 논문에서 회색롤러는 구동롤러를, 흰색롤러는 공주롤러를, 점선롤러는 댄서롤러를 나타낸다. Fig. 3 에서 V_1, V_2는 구동롤러(driven roller)의 속도를, L 은 검사체적내의, 즉, 한 스팬내의 웹 길이를, T_1, T_2 는 상류측 및 하류측 스팬의 장력을, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 는 상류측 및 하류측 스팬의 변형률을 나타낸다. 한 스팬내에서 단면적과 속도는 연속적으로 다를 수 있으나, 장력과 변형률은 일정하다고 가정한다.

그리고 이 값들은 모두 시간에 따라 다를 수 있다. 이러한 조건하에서, Fig. 3 의 검사체적에 대해 질량보존법칙을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\left(\int_{x_1}^{x_2}\rho(x,t)A(x,t)dx\right)=\rho_1(t)A_1(t)V_1(t)-\rho_2(t)A_2(t)V_2(t) \quad (1)$$

여기서 x 는 웹의 위치, ρ 는 밀도, A 는 웹의 단면적을 나타내고, 하첨자 $_{1,\ 2}$ 는 두 구동롤러의 위치를 나타낸다.

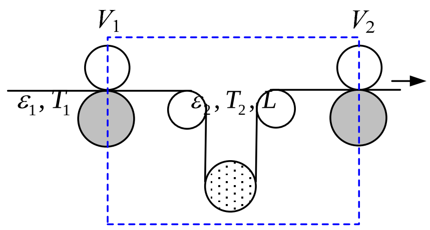

Fig. 3 Control volume for a running web including a dancer roller (dotted roller)

식 (1)을 웹의 변형률 ε 에 대해 표현하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{L(t)}{1+\varepsilon_2(t)}\right]=\frac{V_1(t)}{1+\varepsilon_1(t)}-\frac{V_2(t)}{1+\varepsilon_2(t)} \quad (2)$$

웹의 변형률은 일반적으로 매우 작은 값을 가진다. 따라서 식 (2)에서 변형률 ε 이 1 보다 훨씬 작다고 가정하면, 식 (2)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\left[\left(1-\varepsilon_2(t)\right)L(t)\right]=\left[1-\varepsilon_1(t)\right]V_1(t)-\left[1-\varepsilon_2(t)\right]V_2(t) \quad (3)$$

웹의 단면적에 Hooke 의 법칙을 적용하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T(t)=A(x,t)E(x,t)\varepsilon(t) \quad (4)$$

여기서 E 는 웹 재질의 Young's modulus 를 나타낸다. 웹의 Young's modulus 는 온도, 습도 등의 영향을 받아 약간 달라질 수 있다.

식 (4)를 식 (3)에 적용하고, $A(x,t)E(x,t)$ 대신에 평균값 AE 를 사용하면, 길이변화가 고려된 다음과 같은 새로운 비선형 장력모델을 얻을 수 있다.

$$L(t)\frac{dT_2(t)}{dt}=V_1(t)T_1(t)-\left[V_2(t)+\frac{dL(t)}{dt}\right]T_2(t)+AE\left[V_2(t)-V_1(t)+\frac{dL(t)}{dt}\right] \quad (5)$$

일반적으로 롤투롤 인쇄기에서 $A(x,t)E(x,t)$ 값의 변화량은 크기 않기 때문에 평균값을 사용하여도 이 시스템의 동특성을 표현하는데 무리가 없다. 참고로, 식 (5)에서 길이변화율을 0 으로 두면 Shin[1]의 장력모델이 얻어진다.

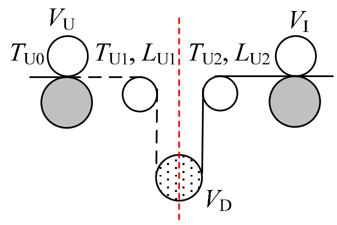

Fig. 4 Tension model considering dancer dynamics

댄서롤러의 관성과 점성마찰이 고려되면 Fig. 4 와 같이 댄서롤러의 상류측과 하류측의 장력이 달라지게 된다. Fig. 4 에서 V_D 는 댄서롤러에서의 웹 속도를 나타낸다. 이 경우에 검사체적을 V_U 롤러에서 점선까지와 점선에서 V_I 롤러까지의 2 개의 사각형으로 둔다. 각각의 검사체적에서 웹속도가 댄서롤러의 상하 직선 속도에 비해 크다고 가정한다. 그러면 T_{U1}, T_{U2} 대한 다음과 같은 비선형 장력모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}L_{U1}\dot{T}_{U1}&=V_UT_{U0}-(V_D+\dot{L}_{U1})T_{U1}+(V_D-V_U+\dot{L}_{U1})AE\\L_{U2}\dot{T}_{U2}&=V_DT_{U1}-(V_I+\dot{L}_{U2})T_{U2}+(V_I-V_D+\dot{L}_{U2})AE\end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\dot{}$ 은 시간에 대한 미분을 나타낸다. 편의를 위해 시간함수를 나타내는 (t)는 앞으로 생략하기로 한다. 그리고 본 논문에서 댄서롤러의 관성과 점성마찰이 고려된 이 경우를 '상세모델'로 표기하기로 한다.

Fig. 5 는 공압실린더로 구동되는 댄서 구동 메커니즘을 보여주고 있다. 댄서구동에서 사용되는

공압실린더는 일반적으로 Fig. 6 과 같이 스프링으로 preload 된 방식을 채택한다. Fig. 5 에서 θ_D 는 중립위치로부터 댄서팔의 각도를, d_D 는 힌지에서 댄서롤러까지의 댄서팔 길이를, d_P 는 힌지에서 공압실린더까지의 댄서팔 길이를, P_0, A_P 는 각각 실린더의 공기압력과 피스톤넓이를 나타낸다.

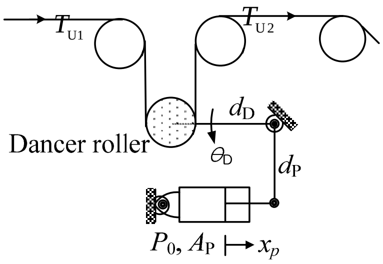

Fig. 5 Dancer driving mechanism

Fig. 5 에서 댄서롤러에 대한 자유물체도로부터 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$J_D \dot{V}_D = (T_{U2} - T_{U1}) r_D^2 - b_D V_D \tag{7}$$

여기서 r_D 는 댄서롤러의 반경을, V_D 는 댄서롤러에서의 웹의 속도를 나타낸다. 댄서롤러에서 웹의 미끄러짐은 없다고 가정한다.

그리고 댄서팔의 자유물체도에 뉴턴의 운동법칙을 적용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} J_{eq}\ddot{\theta}_D &= -(m_D d_D \ddot{\theta}_D + T_{U1} + T_{U2}) d_D + P_0 A_P \\ &- \left[\frac{F_{\max} - F_{\min}}{x_{p\max}} \left(\frac{x_{p\max}}{2} + d_P \theta_D \right) + F_{\min} \right] d_P \\ &- b_{eq}\dot{\theta}_D \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 J_{eq} 는 댄서팔의 힌지중심에 대한 등가 관성모멘트를, b_{eq} 는 댄서팔의 힌지중심에 대한 등가 점성마찰계수를, m_D 는 댄서롤러의 질량을 나타낸다. 그리고, $F_{\max}, F_{\min}$ 은 공압실린더에서 스프링의 최대압축력, 최소압축력을, $x_{p\max}$ 는 피스톤의 최대행정을, x_p^* 는 작동점을 나타낸다. Fig. 6 에서 F_S 는 스프링힘을, x_p 는 피스톤변위를, k 는 스프링상수를 나타낸다. Fig. 6 의 오른쪽 그래프에서 수치는 FDRC 에 설치된 Fig. 1 시스템의 실제 값을 나타낸다.

식 (7)과 (8)에서 댄서롤러의 질량, 관성모멘트 및 점성마찰을 무시하면, $T_{U1} = T_{U2} = T$ 이고, 다음과 같은 댄서의 수학적 모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} J_{eq}\ddot{\theta}_D + b_{eq}\dot{\theta}_D + \frac{F_{\max} - F_{\min}}{x_{p\max}} d_P^2 \theta_D &= \\ \left(P_0 A_P - \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}\right) d_P - 2T d_D & \end{aligned} \tag{9}$$

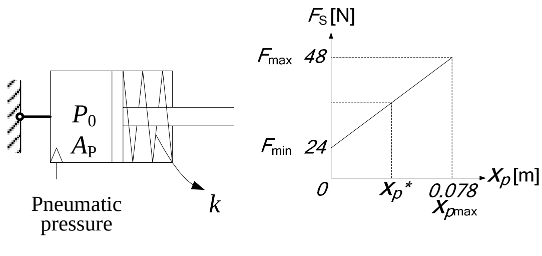

Fig. 6 Preload 된 공압실린더 모델

3. 전체 플랜트 모델

Fig. 7 은 일반적인 롤투롤 인쇄기의 동특성을 모두 가지는 실제 3 도 인쇄기(Fig. 1)의 개략도를 보여주고 있다. Fig. 7 에서 하첨자 U, I, O, R 은 각각 풀림부(unwinder), 유입부(infeeder), 유출부(outfeeder), 감김부(rewinder)를, P1, P2, P3 는 3 도 인쇄부(printing unit)를, 그리고 D1, D2, D3, D4 는 각각 풀림부댄서, 유입부댄서, 유출부댄서, 감김부댄서를 의미한다. T_0 는 풀림부의 초기장력을 나타낸다.

일반적으로 스팬별로 다른 장력을 구현하는 것이 인쇄성능에 유리하다고 알려져 있고[3], 보통 풀림구역(unwind zone), 유입구역(infeed zone), 유출구역(outfeed zone), 감김구역(rewind zone)의 4 구간으로 나누고, 인쇄구역(printing zone)은 유입구역과 같은 또는 증가하는 형태의 장력을 취한다. 최적의 장력구현은 다양한 운전조건 및 웹 재질에 따라 달라질 수 있다. 본 논문에서는 풀림구역, 유입구역, 유출구역, 감김구역의 장력지령치를 각각 100%, 110%, 120%, 50%로 두고 시뮬레이션한다.

오목판인쇄를 수행하는 Fig. 7 의 3 도 그러뷰어 인쇄기에 대해, 웹장력 모델인 식 (5)와 댄서롤러의 질량, 관성모멘트 및 점성마찰을 무시한 식 (9)를 적용하면 다음과 같은 플랜트 모델을 얻을 수 있다. 여기서 $\dot{l}_U, \dot{l}_R$ 은 풀림터릿과 감김터릿의 회전속도로서, 일정한 값으로 주어진다.

$$\begin{aligned} L_U \dot{T}_U &= V_U T_{U0} - (V_I + \dot{L}_U) T_U + (V_I - V_U + \dot{L}_U) AE \\ \dot{L}_U &= \dot{l}_U + 2 d_D \dot{\theta}_{D1}, \quad \dot{l}_U = V_U \text{ (given)} \end{aligned} \tag{10}$$

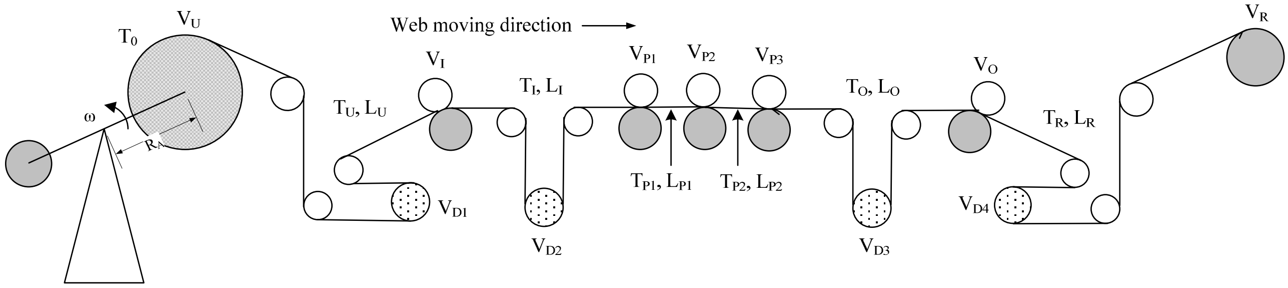

Fig. 7 Schematic diagram of an actual gravure printing machine

$$
\begin{aligned}
&J_{eq}\ddot{\theta}_{D1} + b_{eq}\dot{\theta}_{D1} + \frac{F_{\max} - F_{\min}}{x_{p\max}} d_P^2 \theta_{D1} = \\
&\qquad (P_{U0}A_P - \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}) d_P - 2T_U d_D \\
&L_I \dot{T}_I = V_I T_U - (V_{P1} + \dot{L}_I) T_I + (V_{P1} - V_I + \dot{L}_I) AE \\
&\quad \dot{L}_I = 2 d_D \dot{\theta}_{D2} \\
&J_{eq}\ddot{\theta}_{D2} + b_{eq}\dot{\theta}_{D2} + \frac{F_{\max} - F_{\min}}{x_{p\max}} d_P^2 \theta_{D2} = \\
&\qquad (P_{I0}A_P - \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}) d_P - 2T_I d_D \\
&L_{P1}\dot{T}_{P1} = V_{P1} T_I - V_{P2} T_{P1} + (V_{P2} - V_{P1}) AE \\
&L_{P2}\dot{T}_{P2} = V_{P2} T_{P1} - V_{P3} T_{P2} + (V_{P3} - V_{P2}) AE \\
&L_O \dot{T}_O = V_{P3} T_{P2} - (V_O + \dot{L}_O) T_O + (V_O - V_{P3} + \dot{L}_O) AE \\
&\quad \dot{L}_O = 2 d_D \dot{\theta}_{D3} \\
&J_{eq}\ddot{\theta}_{D3} + b_{eq}\dot{\theta}_{D3} + \frac{F_{\max} - F_{\min}}{x_{p\max}} d_P^2 \theta_{D3} = \\
&\qquad (P_{O0}A_P - \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}) d_P - 2T_O d_D \\
&L_R \dot{T}_R = V_O T_O - (V_R + \dot{L}_R) T_R + (V_R - V_O + \dot{L}_R) AE \\
&\quad \dot{L}_R = \dot{l}_R + 2 d_D \dot{\theta}_{D4}, \quad \dot{l}_R = V_R \text{ (given)} \\
&J_{eq}\ddot{\theta}_{D4} + b_{eq}\dot{\theta}_{D4} + \frac{F_{\max} - F_{\min}}{x_{p\max}} d_P^2 \theta_{D4} = \\
&\qquad (P_{R0}A_P - \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}) d_P - 2T_R d_D
\end{aligned}
\tag{10}
$$

한편 댄서롤러의 질량, 관성모멘트 및 점성마찰을 고려한 상세모델인 식 (6)과 식 (7), (8)을 적용하면 플랜트의 상세모델을 얻을 수 있다. 상세모델의 일부를 표시하면 아래와 같다.

$$
\begin{aligned}
&L_{U1}\dot{T}_{U1} = V_U T_{U0} - (V_{D1} + \dot{L}_{U1}) T_{U1} + (V_{D1} - V_U + \dot{L}_{U1}) AE \\
&\quad \dot{L}_{U1} = \dot{l}_U + d_D \dot{\theta}_{D1}, \quad \dot{l}_U = V_U \text{ (given)} \\
&J_D \dot{V}_{D1} = (T_{U2} - T_{U1}) r_D^2 - b_D V_{D1} \\
&(J_{eq} + m_D d_D)\ddot{\theta}_{D1} + b_{eq}\dot{\theta}_{D1} + \frac{F_{\max} - F_{\min}}{x_{\max}} d_P^2 \theta_{D1} \\
&\qquad = -(T_{U1} + T_{U2}) d_D + (P_{U0}A_P - \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}) d_P \\
&L_{U2}\dot{T}_{U2} = V_{D1} T_{U1} - (V_I + \dot{L}_{U2}) T_{U2} + (V_I - V_{D1} + \dot{L}_{U2}) AE \\
&\quad \dot{L}_{U2} = d_D \dot{\theta}_{D1} \\
&L_{I1}\dot{T}_{I1} = V_I T_{U2} - (V_{D2} + \dot{L}_{I1}) T_{I1} + (V_{D2} - V_I + \dot{L}_{I1}) AE \\
&\quad \dot{L}_{I1} = d_D \dot{\theta}_{D2} \\
&J_D \dot{V}_{D2} = (T_{I2} - T_{I1}) r_D^2 - b_D V_{D2}
\end{aligned}
\tag{11}
$$

식 (10)에서, 상태변수를 $x_1 = T_U$, $x_2 = \theta_{D1}$, $x_3 = \dot{\theta}_{D1}$, $x_4 = T_I$, $x_5 = \theta_{D2}$, $x_6 = \dot{\theta}_{D2}$, $x_7 = T_{P1}$, $x_8 = T_{P2}$, $x_9 = T_O$, $x_{10} = \theta_{D3}$, $x_{11} = \dot{\theta}_{D3}$, $x_{12} = T_R$, $x_{13} = \theta_{D4}$, $x_{14} = \dot{\theta}_{D4}$ 라 두면, 다음과 같은 14 개의 상태변수와 7 개의 입력변수로 구성된 비선형 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$
\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \tag{12}
$$

여기서 입력벡터 $\mathbf{u} = [V_U, V_I, V_{P1}, V_{P2}, V_{P3}, V_O, V_R]^T$ 이다. 선형화를 위해 작동점을 $x_1^* = T_U^*$, $x_2^* = \theta_{D1}^* = 0$, $x_3^* = \dot{\theta}_{D1}^* = 0$, $x_4^* = T_I^*$, $x_5^* = \theta_{D2}^* = 0$, $x_6^* = \dot{\theta}_{D2}^* = 0$, $x_7^* = T_{P1}^*$, $x_8^* = T_{P2}^*$, $x_9^* = T_O^*$, $x_{10}^* = \theta_{D3}^* = 0$, $x_{11}^* = \dot{\theta}_{D3}^* = 0$, $x_{12}^* = T_R^*$, $x_{13}^* = \theta_{D4}^* = 0$, $x_{14}^* = \dot{\theta}_{D4}^* = 0$ 라 두고, 또 $\mathbf{u}^* = [V_U^*, V_I^*, V_{P1}^*, V_{P2}^*, V_{P3}^*, V_O^*, V_R^*]^T$ 라 둔다. 그러면 다음과 같은 선형 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$
\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \tag{13}
$$

여기서 상태행렬 A 는 14×14 행렬로 주어지고, 입력행렬 B 는 14×7 행렬로 주어진다.

같은 방법으로 상세모델에 대한 비선형 상태방정식을 구하여 이를 작동점 부근에서 선형화하면 식 (13)과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다. 이 경우에 상태행렬 A 는 22×22 행렬로 주어지고, 입력

행렬 B 는 22×7 행렬로 주어진다.

4. 플랜트의 안정도 해석

그러뷰어 인쇄기를 고속화했을 경우에 플랜트의 안정도 추이를 예측하는 것은 인쇄성능을 위해 중요하다. 롤투롤 인쇄기의 플랜트 안정도를 해석하기 위하여 식 (13)의 A 행렬에 대한 고유값(eigenvalue)을 구한다. Fig. 1 의 그러뷰어 인쇄기의 실제 파라미터인 A=20×10^{-6}, E=2.1×10^{-9}, L_{U1}=3.78, L_{U2}=2.34, L_{I1}=1.34, L_{I2}=4.33, L_{P1}=9.55, L_{P2}=10.22, L_{O1}=8.22, L_{O2}=3.73, L_{R1}=1.26, L_{R2}=4.80, d_D=0.3, d_P=0.15, m_D=9.676, J_D=0.0295, r_D=0.06, b_D=0.0005, A_P=0.00273 을 사용한다.

먼저 웹속도가 100 mpm (meter/min)일 때 14 개의 고유값을 구해 복소평면에 표시하면 Fig. 8 과 같다. 여기서 $T_U^* = 100N/m$, $T_I^* = 110N/m$, $T_O^* = 120N/m$, $T_R^* = 50N/m$ 로 두었다. Fig. 8 에서 모든 고유값은 음의 실수부를 가지고 있기 때문에 안정하지만, -0.008 의 4 중근이 존재하므로 한계안정도(marginal stability)에 가까움을 알 수 있다.

다음에는 속도 증가에 따른 안정도 추이를 알아보기 위하여, 웹속도를 100 mpm, 200 mpm, 300 mpm, 400 mpm, 500 mpm 으로 증가시키면서 고유값을 구하고, 이를 Fig. 9 와 같이 복소평면에 표시하였다. 이 그림을 보면 웹속도가 증가함에 따라 플랜트의 고유값은 복소평면에서 왼쪽으로 이동함을 알 수 있고, 따라서 웹속도가 증가하더라도 플랜트 안정도는 악화되지 않고 오히려 좋아짐을 알 수 있다.

같은 방법을 상세모델에 적용할 경우에도 Fig. 8 과 Fig. 9 의 결과와 유사한 결과를 얻었다. 단지 원점에 고유값을 가져 한계안정도를 보여주었다.

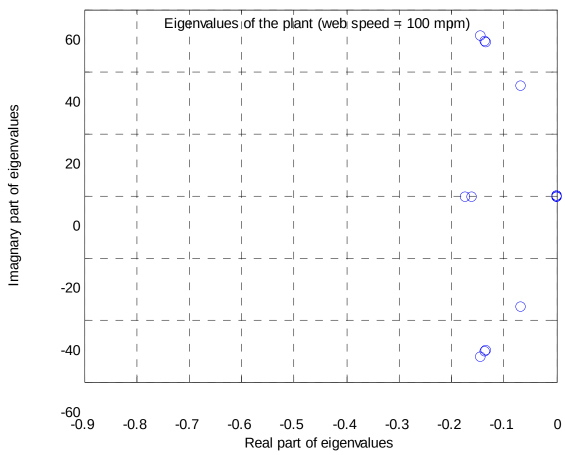

Fig. 8 Eigenvalues of the linearized plant model

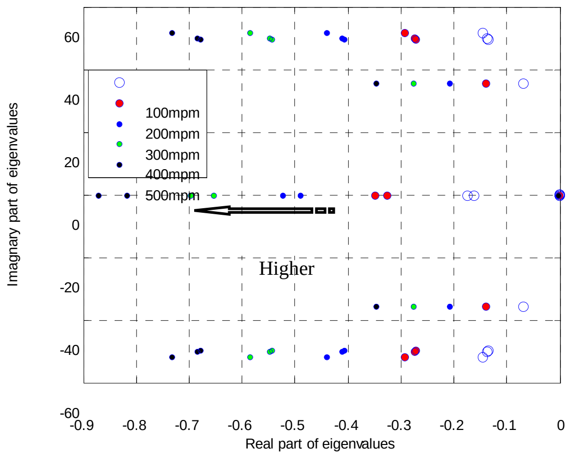

Fig. 9 Eingenvalue movement for increasing web-speed

5. 결 론

본 논문에서는 롤투롤 인쇄기에서 스팬길이 변화를 고려한 비선형 장력모델을 제안하고, 플랜트의 안정도를 해석하였다. 댄서롤러의 질량, 관성모멘트 및 점성마찰을 고려하지 않은 14×14 선형화 시스템이나, 고려한 22×22 선형화 시스템은 모두 불안정하지 않고, 14×14 선형화 시스템은 한계안정도에 가까운, 그리고 22×22 선형화 시스템은 한계안정도를 보여주었다. 웹속도가 증가함에 따라 이 플랜트의 안정도는 모두 더 안정한 쪽으로 고유값의 변화를 보여주었다.

따라서, 본 논문에서 고려하고 있는 3 도 그러뷰어 인쇄기는 웹의 구동속도를 증가시키더라도 플랜트의 안정도는 악화되지 않는다고 결론지을 수 있고, 이는 장력 및 속도제어시스템 설계에 하나의 가이드라인으로 삼을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 서울시 전략산업 혁신 클러스터 육성 지원사업(과제번호 10848)의 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌

(1) K. Shin, 2000, Tension Control, *TAPPI Press*.

(2) Gravure Education Foundation and Gravure Association of America, 2003, *Gravure Process and Technology*, pp. 285~335.

(3) Herbert L. Weiss, 1985, *Rotogravure and Flexographic Printing Presses*, Converting Technology Corp., pp. 307~487.