

롤의 웹 표면 수직방향 기울임을 이용한 새로운 웹 가이드 설계에 관한 연구

신한식**, 지혁종*, 신기현*

A Study on the Design of a New Web Guiding Mechanism Using a Tilting Roller

Han Shic Shin**, Hyuk Jong Jee*, Kee Hyun Shin*

ABSTRACT

The alignment of the rollers carrying the web is found to be one of important factors to the lateral behavior of the moving web and to the quality of the final web products. But, the perfect alignment of the rollers is not always possible and the web itself can be cambered. Thus the control of lateral behavior of the moving web is critical in the most of web handling systems. The web guiding system that adjusts the angle of the alignment between two adjacent rollers is commonly used in industry. But, in this paper a new web guiding system is proposed by using the lateral dynamics of the moving web induced by a tilted roller in normal direction of a web. The computer simulation study was carried out to verify the steering performance of the suggested guiding system. Computer simulation study shows that the performance of the new guiding mechanism is better than that of an existing guiding mechanism.

Key Words : guider(가이드), tilting roll/roller(기울임 롤), web(웹), web handling system(연속공정시스템), lateral dynamics(측 방향 거동)

기호설명

L = length of span
 W = width of web
 V = longitudinal velocity of web
 C = rotational radius of roll
 w = shifted displacement of roll
 z = vertical displacement of roll
 ε = strain
 θ = deflection angle of web
 θ_r = tilting angle of roll
 θ_s = rotating angle of roll
 σ = stress
 u = displacement of roll's end

1. 서론

연속공정시스템은 두께가 길이나 폭에 비해 아주 얇은 소재인 웹을 생산하는 데 사용된다. 연속공정시스템에서 생산되는 웹의 품질과 생산성은 각 스펀의 장력(tension), 롤러의 품질, 롤러간의 정확한 정렬 등에 의해 영향을 받게 된다. 특히 원치 않는 웹의 측 방향 거동을 방지하기 위하여, 아무리 롤러간의 정렬을 정확히 한다고 하더라도 소재 자체가 휠 수도 있으며(cambered web), 롤러간의 정렬은 운행 중에 변화될 수 있으므로, 이송되는 웹 소재에 대한 측 방향 거동 제어는 대부분의 연속공정 시스템에서 매우 중요하다.

현재 생산 현장에서는 일반적으로 이용하는 두 개의 롤러 사이의 정렬각도를 이용하여 웹의

* 건국대학교 기계설계학과

** 주성 엔지니어링

측 방향 거동을 제어하고 있다. 이러한 제어방법은 기본적으로 웹의 측 방향 거동에 대한 Shelton^[1]의 연구 결과에 바탕을 둔 것이라고 하겠다.

본 연구에서는 웹 평면의 수직방향 기울임을 고려하여 새로이 제안된 모델^[4]을 이용하여, 웹 평면 수직방향으로 움직이는 새로운 웹 가이드(leader)를 제안하였다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통해서, 본 논문에서 제안한 웹 가이드의 웹 측 방향 거동 제어 성능을 검증하였고, Shelton 모델에 기초한 기존의 가이드의 성능과 비교하였다. 본 논문에서 제안한 새로운 가이드가 기존의 가이드 보다 구조는 더욱 단순한 반면, 측 방향 제어 성능은 더 우수함을 확인하였다.

2. 기울임 각을 고려한 사행 모델의 확장

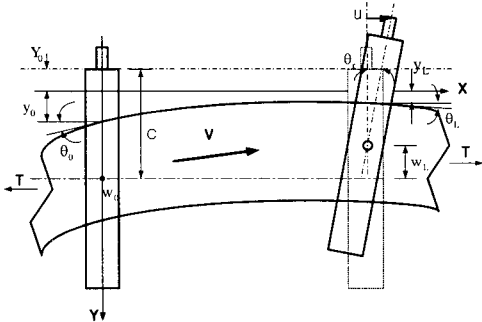


Fig. 1 Boundary Conditions of Shelton's Model

Shelton 이 제안한 모델은 Fig.1 과 같이 웹을 2차원 빔으로 가정하여, 스펠 양단의 경계조건을 통해, 정역학적 평형 방정식의 해를 구함으로써 웹의 거동을 예측한 모델이다. Shelton 모델의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - K^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad K^2 = \frac{T}{EI} \quad (1)$$

식 (1)의 일반해는

$$y = C_1 \sinh(Kx) + C_2 \cosh(Kx) + C_3 x + C_4 \quad (2)$$

이다^[1]. Fig. 1 의 경계조건 $y(0)=y_0$, $\theta(0)=\theta_0$, $y(L)=y_L$, $\theta(L)=\theta_L$ 을 이용하여 식 (2)의 계수를 결정하여 정리하면, 아래의 식 (3)과 같다.^[2]

$$\frac{\partial^2 y_L}{\partial x^2} = \frac{f_1(KL)}{L^2} (y_0 - y_L) + \frac{f_2(KL)}{L} \theta_L + \frac{f_3(KL)}{L} \theta_0 \quad (3)$$

단,

$$f_1(KL) = \frac{(KL)^2 [\cosh KL - 1]}{KL \sinh KL - 2 \cosh KL + 2}$$

$$f_2(KL) = \frac{KL [KL \cosh KL - \sinh KL]}{KL \sinh KL - 2 \cosh KL + 2}$$

$$f_3(KL) = \frac{KL [\sinh KL - KL]}{KL \sinh KL - 2 \cosh KL + 2}$$

식 (3)은 웹의 평면상의 롤러 정렬 불량에 기인한 측 방향 거동에 대한 정적 모델이다. 그렇지만, 식 (3)만으로는 Fig. 2 와 같이 웹 평면과 기울임 각 θ , 만큼 기울어진 롤러에 의해 발생하는 측 방향 거동을 해석할 수 없다.

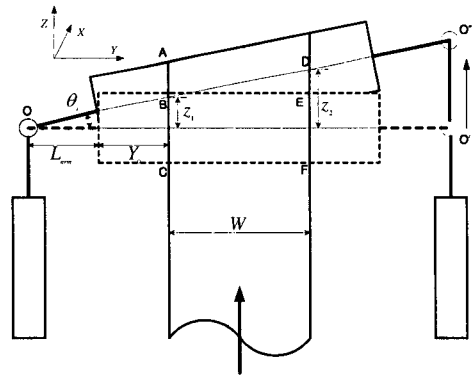


Fig. 2 The moving web on the tilted roller

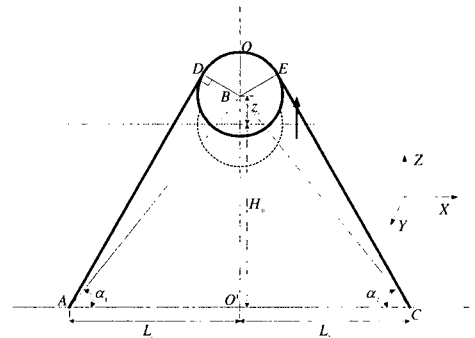


Fig. 3 Elongation induced by the tilted roller

Fig.2 의 기울어진 롤러에 의해 발생하는 웹 양 측 단에서 각각의 길이 변화는 Fig. 3 과 같이

도시할 수 있다. 이러한 길이변화에 의해 소재내부에 응력이 발생하고 식 (4)에 의해 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} z_1 &= \overline{BC} = \tan \theta_i \cdot (Y_0 + L_{arm}) \\ z_2 &= \overline{EF} = \tan \theta_i \cdot ((Y_0 + L_{arm}) + W) \\ L'_{12} &= \text{arc}(ADEC) = \overline{AD} + \text{arc}(DE) + \overline{EC} \quad (4) \\ \varepsilon_i &= \frac{L'_{12} - L^0_{12}}{L^0_{12}}, \sigma_i = \varepsilon_i E \end{aligned}$$

길이 변화로 인해 발생하는 불균일한 응력은 웹 끝 단에 모멘트를 유발하게 된다.(Fig. 4 참조)

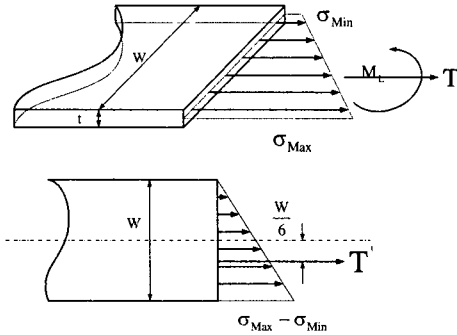


Fig. 4 Moment and tension induced by non-uniform stress

따라서, 불균일한 응력에 의해 발생한 모멘트로 경계 조건을 $y(0) = y_0 = 0, y(L) = y_L = 0, M(0) = -M_L, M(L) = M_L$ 라 정의하고 이를 도시하면 Fig.5 와 같다.

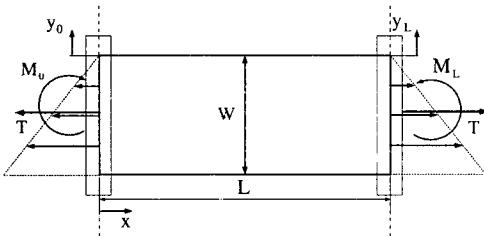


Fig. 5 New Boundary conditions

단, $M_L = \frac{tW^2}{6} \left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right)$

위 경계조건으로 식 (2)와 같은 지배방정식의 해를 구하면 다음 식 (5)와 같다.

$$\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)_z = \frac{WT'}{6} \left(\frac{1 + \cosh(KL)}{\sinh(KL)} \times \sinh(Kx) - \cosh(Kx) \right) \quad (5)$$

식 (5)를 식 (3)과 중첩하여 정리하면, 제안된 정적모델은 식(6)과 같다.

$$\frac{\partial^2 y_L}{\partial x^2} = \frac{f_1(KL)}{L^2} (y_0 - y_L) + \frac{f_2(KL)}{L} \theta_L + \frac{f_3(KL)}{L} \theta_0 + \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)_z \Big|_{x=L} \quad (6)$$

웹의 측 방향 속도 및 가속도 모델은 식(7) 및 식(8)과 같다.

$$\frac{dy_L}{dt} = V \left(\theta_r - \frac{\partial y_L}{\partial x} \right) + \frac{dw_L}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{d^2 y_L}{dt^2} = V^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_L + \frac{d^2 w_L}{dt^2} \quad (8)$$

웹의 측 방향 가속도 모델 식 (8)에 식 (6), (7)을 대입 정리하면, 웹 측 방향 거동에 대한 제안된 모델은 식 (9)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_L}{dt^2} &= -\frac{f_2}{\tau} \frac{dy_L}{dt} - \frac{f_1}{\tau^2} y_L - \frac{f_3}{\tau} \frac{dy_0}{dt} + \frac{f_1}{\tau^2} y_0 \\ &+ f_2 \frac{V^2}{Lc} u_L + f_3 \frac{V^2}{Lc} u_0 + \frac{d^2 w_L}{dt^2} + \frac{f_2}{\tau} \frac{dw_L}{dt} \\ &+ \frac{f_3}{\tau} \frac{dw_0}{dt} + V^2 \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)_z \Big|_{x=L} \end{aligned} \quad (9)$$

단, $u \approx \theta_r \cdot c$

3. 확장 모델을 이용한 가이드 설계

본 장에서는 웹 평면 수직 방향의 기울임 각으로 인한 웹의 측 방향 거동을 역으로 이용하여, 오히려 웹 수직방향으로의 기울임 각을 제어함으로써, 웹의 측 방향 거동을 제어할 수 있는 새로운 가이드를 제안하고자 한다.

Fig. 6 과 같은 형태로 롤러를 정렬하고, 가운데 롤러의 기울임 각을 θ , 만큼 회전시킬 수 있다면, 가이드의 기울임 θ_i 의 변화로 롤러의 측 방향으로의 중심 이동 w 와 기울임 각의 효과를 동시에 얻을 수 있다. 기울임 각 θ_i 에 따른 롤러 중심이동을 도시하면 Fig. 7 과 같다.

Fig. 7 과 같은 롤러의 기울임 각으로 인해 웹의 양 끝 단에는 불균일한 응력이 발생하게 되고, 불균일한 응력은 웹 끝 단에 모멘트로 작용하게 된다. (Fig 4 참조) 롤러의 기울임 각에 의한 측 방향 거동과 롤러 측 방향 이동에 의한 거동은 서로

독립적인 성분이므로, 롤러의 기울임 각에 의한 축 방향 거동을 해석하기 위해, 기울임 각에 의한 웹의 종 방향 연신만을 도시하면 Fig.3 와 같다. 웹의 기울임에 의한 축 방향 거동과 롤러의 축 방향 이동에 의한 축 방향 거동에 대한 모델은 식 (9)와 같다.

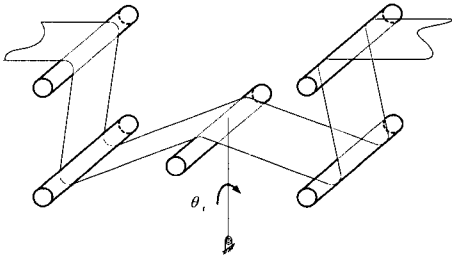


Fig. 6 Schematic of a new guider

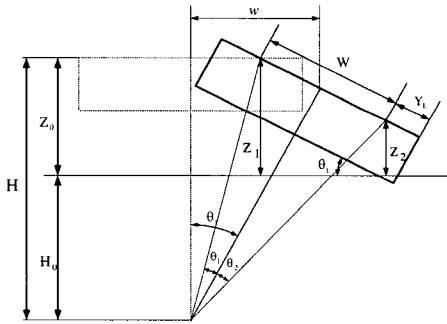


Fig. 7 New guider using the tilting angle

본 논문에서 제안한 가이드는 식 (9)에서 볼 수 있듯이, θ 의 변화만으로 기울어진 롤러에 의한 축 방향 거동과 롤러의 축 방향으로의 이동 w 에 의한 축 방향 거동을 동시에 일으킬 수 있으므로, 가이드가 일으킬 수 있는 사행량을 극대화시킬 수 있다.

4. 시뮬레이션

새로 제안된 가이드의 사행 거동을 시뮬레이션 하기 위해, 3장에서 제시한 모델 식 (9)를 라플라스 변환하고 식(10)과 같이 변수를 정의하면 식 (11)의 기본 상태방정식을 유도할 수 있다.

$$\hat{x}_{(2j-1)}(s) = 1/s \cdot [a_{j1}\hat{y}_L(s) + a_{j3}\hat{y}_0(s) + b_{j1}\hat{w}_L(s) + b_{j2}\hat{w}_0(s) + \hat{x}_{2j}(s)]$$

$$\hat{x}_{(2j)}(s) = 1/s^2 \cdot [a_{j2}\hat{y}_L(s) + a_{j4}\hat{y}_0(s) + a_{j5}\hat{u}_L(s) + a_{j6}\hat{u}_0(s)]$$

$$a_{j1} = -f_2(KL)/\tau, \quad a_{j2} = -f_1(KL)/\tau^2$$

$$a_{j3} = -f_3(KL)/\tau, \quad a_{j4} = f_1(KL)/\tau^2 \quad (10)$$

$$a_{j5} = f_2(KL) \cdot V^2/LC, \quad a_{j6} = f_3(KL) \cdot V^2/LC$$

$$b_{j1} = 1, b_{j2} = f_2(KL)/\tau, b_{j3} = f_3(KL)/\tau$$

단, $j=1,2$: j 번째 스패, $\tau = L/V$

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 1 & 0 & 0 \\ a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{23} & 0 & a_{21} & 1 \\ a_{24} & 0 & a_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{13} & b_{12} & 0 \\ a_{14} & 0 & a_{16} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_{10} \\ w_{10} \\ u_{10} \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} b_{11} + a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{12} & a_{15} & 0 & 0 \\ b_{22} + a_{23} & 0 & b_{21} + a_{21} & 0 \\ a_{24} & a_{26} & a_{22} & a_{25} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{1L} \\ u_{1L} \\ w_{2L} \\ u_{2L} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ V^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{1L} \\ 0 \\ V^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{2L} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Fig.8 의 새로운 가이드의 제어시스템은 식 (3)에서 유도된 각 스패의 모델, 2 차 시스템으로 가정한 식 (12)의 작동기 모델 및 PID 제어기로 구성하였다. 또한, 이전 스패 출구의 사행량을 다음 스패에서의 외란 형태로 간주하였고 제어기 계인은 시행착오법에 의해 선정하였다.

Table 1 Simulation Parameters

Acronym	Description	Value
EI	Bending Stiffness	127.2 N·m ²
L ₁	1 st Span Length	1 m
L ₂	2 nd Span Length	1 m
V	Machine velocity	1 m/s
T ₁	1 st Span Tension	4 kgf
T ₂	2 nd Span Tension	4 kgf
W	Width of web	0.33 m
t	Thickness of web	12 μm
T _m	Actuator time constant	0.1
K _m	Actuator gain constant	1

$$G_a(s) = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (12)$$

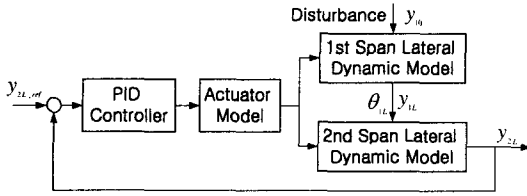


Fig. 8 Block diagram of the control system

Fig. 8의 제어시스템과 Table 1에 제시된 조건을 이용하여 현장에서 흔히 발생하는 계단(step) 형태의 외란에 대한 시뮬레이션을 수행하여, 시간에 따른 사행량을 도식하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 제안된 가이드를 이용하였을 때, Fig. 10의 입측(enter) 롤러 위치에서 10 mm의 측방향 외란에 대하여, 가이드 롤러 및 출측 롤러 위치에서 웹의 측방향 거동이 적절히 레귤레이션됨을 확인할 수 있다.

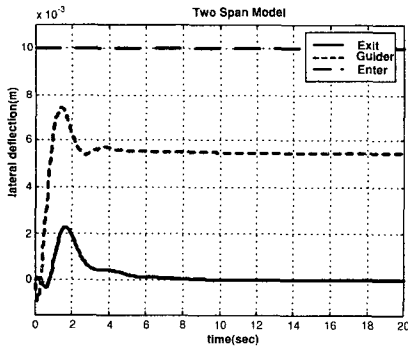


Fig. 9 Closed-Loop simulation with PID Controller (New guider, $y_{10} = 10\text{mm}$)

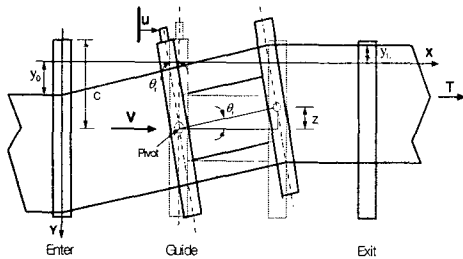


Fig. 10 General Guide

Fig.10은 기존의 일반적인 형태의 피벗오프셋(Pivot offset) 가이드이다. 평행하게 구축된 두개의

롤 조합을 이용하여 출구측의 사행량을 극대화 시킴으로써 사행거동을 제어하며 PID 제어를 사용한다. 제안된 모델과의 성능비교를 위해 동일한 시뮬레이션 조건과 PID 제어기로써 동일 외란에 대한 제어 성능을 살펴보았다. 시간에 따른 사측 방향 거동의 변화는 Fig. 11과 같다.

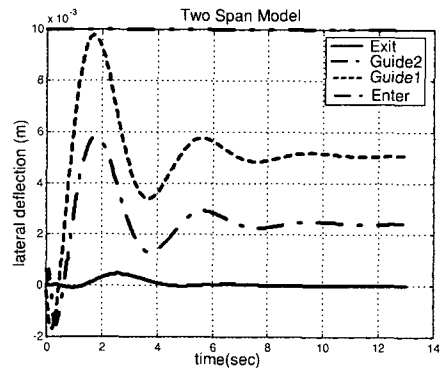


Fig. 11 Closed-Loop simulation with PID controller (General guider, $y_{10} = 10\text{mm}$)

기존이 가이드와 제안된 가이드를 이용하였을 때, 두 가이드 모두 외란을 적절히 레귤레이션하는 것을 확인할 수 있었으며, 출구측 롤러의 측방향 제어 성능은 크게 차이가 없는 것을 알 수 있었다.

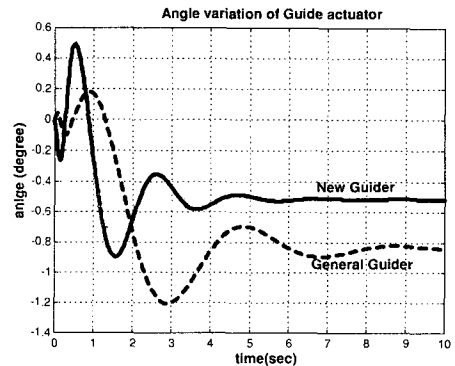


Fig. 12 Comparison in new guider with general guider

그러나, 외란에 대한 시뮬레이션에서 구동부가 움직인 각도를 Fig. 12를 통해 비교해 보면, 새로 제안한 가이드가 기존의 형태 가이드보다 외란 제

거에 필요한 이동각이 적음을 알 수 있고, 외란에 대하여 보다 효율적으로 거동함을 알 수 있다. 이것은 기울임 각으로 발생한 사행과 롤러의 축 방향 이동에 의해 발생한 사행의 효과가 중첩된 결과로 생각된다.

후기

본 연구는 과학 재단의 지원(KOSEF 핵심 971-1001-003-2)에 의해 수행되었습니다.

5. 결론

본 논문에서는 웹 표면 수직방향의 롤러 기울임을 이용한 새로운 가이드 메커니즘을 제안하였고 시뮬레이션을 통해 제안된 가이드의 제어 가능성과 성능을 확인하였다.

시뮬레이션을 통해, 제안된 가이드 메커니즘이 기존의 일반적 형태의 가이드와 비슷한 제어 성능을 보임을 알 수 있었으며, 동일한 외란에 대한 두 가이드의 움직임 각을 비교함으로써, 새로 제안된 가이드 메커니즘이 작은 이동각을 통해, 기존 가이드 보다 효율적으로 동작함을 알 수 있었다. 이러한 특성은 연속공정시스템에서 사용되는 소재의 전단변형(shear deflection)에 의한 구김(wrinkling) 및 롤 위에서의 미끄러짐 등을 방지하는 이점을 얻을 수 있다.

또한 시스템의 현장적용의 입장에서 기존에 제어성능의 향상을 위해 제안되었던 피벗옵셋 가이드보다 공간적인 제약이 적다. 하지만 높은 장력 하에서 운전되는 시스템의 경우 작동기에 무리한 부하가 가해질 수도 있다.

참 고 문 헌

1. Shelton, J. J., "Lateral Dynamics of a Moving Web," Ph. D. thesis. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, 1968.
2. Shelton, J. J., 1984, "Guiding with with a Center or End Pivoted Steering Roller," Report to Fife Corporation, 1984.
3. Young, G. E., and Reid, K. N., "Lateral and Longitudinal Dynamic Behavior and Control of

- Moving Web," Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, June, 1993.
4. 신한식, 이영로, 신기현, "웹 표면 수직방향 롤 정렬 불량에 의한 측 방향 웹 거동에 대한 연구," 대한기계학회 동역학 및 제어부문 - 생산 및 설계공학 부문 1999 년도 공동학술대회 논문집, pp. 327-332, 1999.
5. 남성현, 이준정 "연속공정라인에서의 스트립 사행 예측," 대한기계학회 동역학 및 제어부문 - 생산 및 설계공학 부문 1999 년도 공동학술대회 논문집, pp. 320-326, 1999.
6. Kee Hyun Shin, "Tension Control," TAPPI Press, Atlanta, 2000. 2.