

가이더를 이용한 Cambered Web의 사행거동 제어에 관한 연구

지혁중* · 신기현**

Control of cambered web's lateral dynamics by a using steering guider

Hyuk-Jong Jee, Kee-Hyun Shin

Key Words : 횡 방향 거동(Lateral Dynamics), 캠버(Camber), 연속공정(Continuous Process), 웹(Web), 가이더(Guider)

Abstract

It is almost impossible to have a straight web for processing in the continuous process systems. The cambered web usually causes the strip walking and damage during process. It is necessary to identify the lateral dynamics of the cambered web for the precise control of lateral behavior. In this paper, a dynamic model of the lateral behavior for a cambered web is developed by introducing the concept of steering angle equivalent to moment caused by the camber. This model can be extended to include terms associated with moment, induced by roller's tilting, web slippage, and shear force, etc. Using this model, a new feed-forward controller is proposed to enable the on-line camber estimation, which is difficult to be measured directly, and the prediction of lateral deflection caused by camber. Computer simulation study shows that the proposed controller successfully eliminates the effect of camber and has better control performance than that of the existing PID controller.

기호설명

- C : 롤러 끝 단의 회전 반경
- EI : 굽힘 강성
- L : i 번째 스펠 길이
- M : 웹에 가해진 모멘트
- T : 웹의 운전장력
- V : 웹의 운전속도
- u : 롤 끝 단의 변위
- y_L : 웹의 측 방향 일탈량
- θ : 웹의 이송방향 기울기
- θ_{eq} : 캠버에 의한 웹의 등가 기울기
- ρ : 웹의 곡률반경
- w : 롤의 y 방향 변위

1. 서론

두께가 길이나 폭에 비해 아주 얇은 소재인 웹을 생산하는 연속공정시스템에 있어서 웹의 사행 현상은 웹의 장력제어와 더불어 생산성 향상에 큰 영향을 미치는 요소이다. 특히 최근 철강산업에서는 더욱 고정밀도의 사행제어를 요구하고 있으며 롤러의 형상에 의한 사행제어의 한계점을 인식하고 평 롤러로 이루어진 가이더 시스템을 이용하기도 한다.^[6]

웹의 휘어짐을 의미하는 캠버(Camber)는 특히 철강산업에서 사행을 일으키는 중요한 요소로서 로내의 불균일한 온도분포, 불균일한 압연, 테이퍼진 롤러(Tapered roller)나 어큐뮬레이터에서의 용접 각 불량등에 의해 자주 일어난다. 정적인 상태의 캠버에 의한 웹의 기울기와 사행량에 대해서 이미 연구된 바가 있다.^[7] 하지만 이러한 연구들은 실시간으로 캠버를 측정하고 제어하기에는 많은 한계점을 가지고 있다.

* 건국대학교 대학원 기계설계학과

** 건국대학교 기계항공공학부

본 연구에서는 흰 웹(Cambered web)의 동 특성을 적절히 표현할 수 있고 확장성이 뛰어난 모델을 개발하고자 한다. 또한 이러한 모델을 통해 캠버를 실시간으로 측정할 수 있고 또한 향상된 사행 제어능력을 가진 앞섬보상(Feed-forward) 제어기를 제안하고, 시뮬레이션을 통해 우수성을 입증한다.

2. 곧은 웹 (Straight web)의 사행 모델

Shelton^[1]은 롤 사이의 이동되는 웹을 빔으로 가정하여 롤의 수평 및 정렬오차가 있을 때의 웹의 동적 사행 모델을 유도하였다. 연속공정시스템에서는 Fig. 1 과 같이 스패의 양단에 장력이 가해진 경우 웹을 빔으로 가정할 수 있으며 식 (1)의 일 반해와 식(2)의 경계조건을 이용하여 식 (3)과 같은 탄성 곡률식을 얻을 수 있다.^[9]

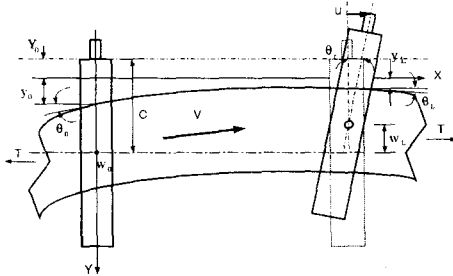


Fig. 1 Boundary condition of Shelton's model

$$y = C_1 \sinh(Kx) + C_2 \cosh(Kx) + C_3 x + C_4 \quad (1)$$

$$y(0) = y_0, \theta(0) = \theta_0, y(L) = y_L, \theta(L) = \theta_L \quad (2)$$

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

단, C_i, f_i : 계수, $K^2 = T/EI$

Fig. 2 는 웹의 탄성곡률을 고려한 웹의 사행 동적모델이며 식 (4)로 표현된다. 식 (4)를 통해 두 점사이의 속도차를 이용하면 식 (5)의 웹 측방향 가속도식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dy_L}{dt} = V(\theta_r - \frac{\partial y_L}{\partial x}) + \frac{dw_L}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 y_L}{dt^2} = V^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_L + \frac{d^2 w_L}{dt^2} \quad (5)$$

식(3)을 식 (5)에 대입 정리하면 웹 사행에 대한 동적 모델식 식 (6)을 구할 수 있다.

$$\frac{d^2 y_L}{dt^2} = a_1 \frac{dy_L}{dt} + a_2 y_L + a_3 \frac{dy_0}{dt} + a_4 y_0 + a_5 u_L + a_6 u_0 + b_0 \frac{d^2 w_L}{dt^2} + b_1 \frac{dw_L}{dt} + b_2 \frac{dw_0}{dt} \quad (6)$$

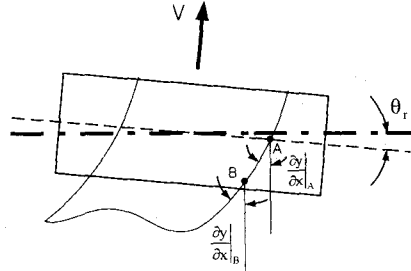


Fig. 2 Velocity change in a roller with elastic curvature

3. 흰 웹의 사행 모델

Fig. 3 과 같이 균일캠(Uniform camber)을 갖는 웹의 경우 장력을 가하지 않은 상태에서 평평한 면 위에 웹을 두고 양 끝 단의 직선거리(L_c)와 그 직선과 웹의 호사이의 거리(D)를 측정함으로써 식 (7)에 의해 캠버를 계산할 수 있다^[7]. 이러한 캠버의 측정은 웹이 이동중일 경우 실시간으로는 측정하기 어려우며, 불균일캠(Nonuniform camber)일 경우 적용이 더욱 힘들다.

$$\rho = L_c^2 / 8D \quad (7)$$

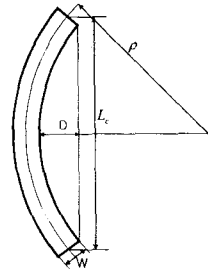


Fig. 3 Measurement of camber

3.1. 경계조건에 의한 웹의 형상

캠버 현상에 의한 사행모델을 유도하기 위해서는 적합한 경계조건을 선정이 중요하다. 제안된 경계조건은 식 (8) 및 식(9)과 같으며 각각 캠버가 발생하여 사행이 일어나기 전과 사행이 일어나서 새로운 평형상태에 도달한 후의 경계조건을 나타낸다.

$$y(0) = 0, \theta(0) = 0, y(L) = 0, \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -1/\rho \quad (8)$$

$$y(0) = 0, \theta(0) = 0, \theta(L) = 0, \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -1/\rho \quad (9)$$

위의 경계조건을 보이론에 기초한 일반해 (1)에 적용하여 해를 구하면 각각 식(10),(11)과 같다.

$$y_{mi} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{K^2} \frac{1}{(-\sinh(KL) + \cosh(KL) \cdot KL)}$$

$$\left[-(\cosh(KL) - 1)\sinh(Kx) + (\sinh(KL) - KL)\cosh(Kx) \right] \quad (10)$$

$$+ (\cosh(KL) - 1)x - (\sinh(KL) - KL)$$

$$y_{new} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{K^2} \left[-\frac{\sinh(KL)}{\cosh(KL) - 1} \sinh(Kx) \right. \quad (11)$$

$$\left. + \cosh(Kx) + \frac{\sinh(KL)}{\cosh(KL) - 1} x - 1 \right]$$

이러한 경계조건에 대한 웹의 형상을 Fig. 4 에 도시하였다. 캠버에 의한 곡률반경에 의해 풀리와 웹 사이의 각도가 생성되고 사행이 유발되어 결국 롤에 수직으로 정렬되어 정상상태에 도달하는 현상을 확인할 수 있다.

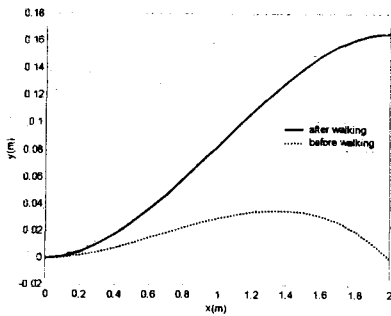


Fig. 4 Static behavior of cambered web

3.2. 흰 웹 사행의 정량적 분석

웹 사행의 정적 모델에서 롤의 수평 기울임각, 사행량 그리고 추가적인 모멘트는 중첩성의 원리가 적용된다.^[4] 그러나 동적 모델에서는 모멘트에 대해서 중첩성을 적용할 수 없다. Fig. 5 에서 보듯이 동일한 크기와 방향의 모멘트에 대해 수평의 롤에 캠버에 의한 모멘트가 가해진 경우인 (a)에서는 소재의 y 축 변위가 양(+)의 값을 띄고, 곧은 웹에 롤의 수평회전이 가해진 경우인 (b)는 사행량이 음(-)의 값이 되는 것을 확인할 수 있다. 즉 캠버를 고려하지 않고 롤러의 수평회전만을 고려한 식 (5)에 수학적으로 동일한 형태라고 해서 모멘트의 중첩성을 적용하는 것은 타당하지 않는 결과를 초래하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해, Fig. 6 에서 보듯이 캠버에 의해 나타난 모멘트의 효과를 증가의

롤 수평회전각 θ_{eq} 로 변환시킨다.

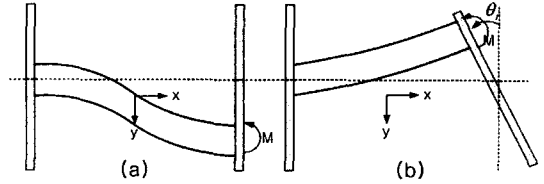


Fig. 5 Effect of moment superposition

식 (10)으로부터 식 (12)의 등가기울기를 얻을 수 있으며 이때 음의 부호는 부호체계에 의해 θ_{eq} 와 캠버의 기울기의 방향이 반대이기 때문이다. 식 (13)은 임의의 정상상태에서의 θ_{eq} 를 실제 가이드의 작동기 입력인 롤 끝단의 변위 u 로 변환한 것이다.

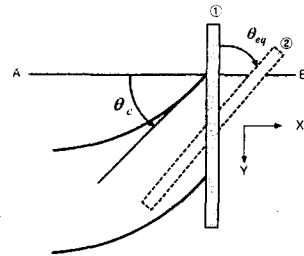


Fig. 6 Equivalent angel of camber

$$\theta_{eq} = -(\partial y_{mi} / \partial x)_{x=L} \quad (12)$$

$$(u_{eq})_{x,s} = C \cdot \theta_{eq} \quad (13)$$

그러나 이러한 논리를 적용하기 앞서 변환의 타당성 검증이 필요하다. 이를 위해 식 (6)의 정상상태 방정식인 식 (14)에 (13)의 결과를 대입하여 정상상태 사행량을 계산한다. 이 값을 식 (11)과 정량적으로 비교한다. 두 결과 모두 식 (15)의 동일한 값을 가지며 이것으로 이러한 이론은 타당함을 증명할 수 있다.

$$y_{new} = 1/a_2 \cdot (-a_4 y_0 - a_5 u_1 - a_6 u_0) \quad (14)$$

$$y_L = \frac{2 - 2 \cosh(KL) + \sinh(KL)KL}{\rho K^2 (\cosh(KL) - 1)} \quad (15)$$

또한 식 (15)를 이용하여 정렬불량이 없는 두 개의 연속된 롤러에서의 사행량의 차이를 이용하여 웹의 캠버를 측정할 수 있을 것이다.

롤의 이동이 없다고 가정할 때 웹의 캠버를 고려하여 등가 기울기를 중첩시킨 웹 사행의 동적 모델식은 식 (16)과 같다.

$$\frac{d^2 y_L}{dt^2} = a_1 \frac{dy_L}{dt} + a_2 y_L + a_3 \frac{dy_0}{dt} + a_4 y_0 \quad (16)$$

$$+ a_5 (u_1 + u_{eq}) + a_6 u_0$$

3.3. 흰 웹의 사행 동특성

휘어진 웹의 동특성을 해석하기 위하여, 단일 스펠에 대한 사행 모델인 식 (16)을 이중 스펠 (Two span)으로 확장하였다. 이 확장된 모델을 이용하여 캠버의 계단 입력에 대한 롤 위에서의 사행량을 시뮬레이션 하였고 결과를 Fig. 7 에 도시하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1 과 같다.

Table 1. Simulation parameter

Acronym	Description	Value
EI	Bending Stiffness	12.7 N·m ²
L_i	Span Length	2 m
V_i	Machine velocity	1 m/s
T_i	1 st Span Tension	4 kgf
W	Width of web	0.33 m
T	Thickness of web	12e-6 m
ρ	Curvature radius	78.6 m

캠버에 의해 곡률반경이 78.6 m 발했하였을 때 후행 롤러에서 20 Cm 의 사행이 발생하였고 시정수는 약 1 초이며 Shelton 의 1 차 모델^[1]의 시정수 L/V 와 거의 유사한 값을 나타낸다. Fig. 8 은 곡률 반경과 사행량과의 관계를 도시한 것으로 캠버량이 적을수록(적게 흰 웹: 큰 곡률반경) 사행량은 작아짐을 나타낸다. Fig. 9 는 웹 스펠의 길이와 사행량과의 관계가 $L \geq 2m$ 인 경우 거의 선형적임을 보이고 있다. 최종 권취공정에서 롤러를 최대한 권취롤에 가까이 붙이는 이유도 이러한 결과를 통해 확인할 수 있다. Fig. 8 과 Fig. 9 에 표시된 O.P 지점은 시뮬레이션을 진행한 운전점을 나타내며 두 결과 모두 동일한 사행량을 나타내고 있다.

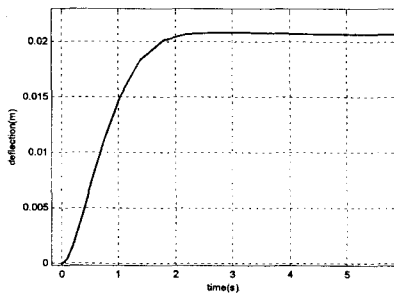


Fig. 7 Lateral dynamics by camber

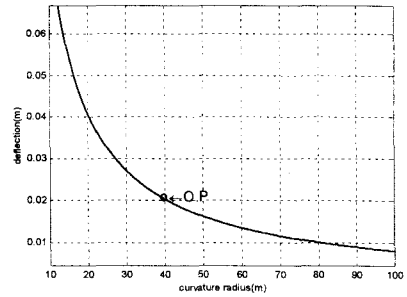


Fig. 8 Deflection with respect to curvature

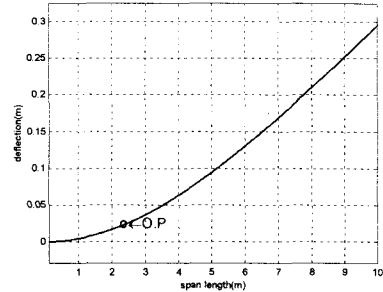


Fig. 9 Deflection with respect to span length

4. 흰 웹의 사행 제어

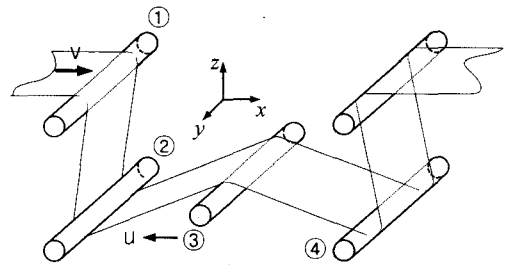


Fig. 10 Schematic of guider system

Fig. 10 의 시스템은 ③번 수평가이더를 통해 ④번 롤러에서의 사행량을 제어하는 시스템을 나타낸다. 현장설치에 편리한 1 개 롤을 가진 수평회전가이더(Steering guider)를 사용하였다. Fig. 11 은 제어하지 않았을 때 웹의 사행 거동특성을 나타낸다. 캠버가 발생한 지점이 웹과 함께 흘러가므로 시간 지연시스템처럼 캠버의 영향이 나타나고 있으며 각 롤마다 캠버의 영향이 중첩되어 증가함을 확인할 수 있다.

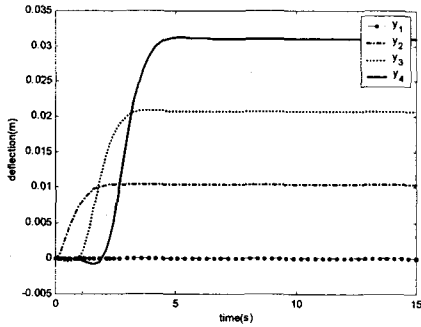


Fig. 11 Lateral deflection without controller

Fig. 12 는 일반적인 PID 제어기의 블록선도로서 작동기는 시정수 T_m 을 갖는 단순한 1 차 시스템으로 가정하였고 각 스패의 동특성은 식 (5)와 같이 모델링 될 수 있다. 이때 시행착오법에 의해 PID 제어기의 게인값을 설정하였다. θ_{eq} 은 미리 알려진 캠버로부터 계산된 값으로 롤의 기울임 각에 선형으로 중첩된다.

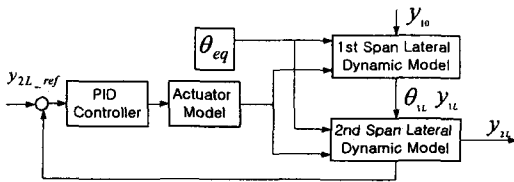


Fig. 12 Block diagram of PID controller

Fig. 13 은 사행제어의 성능향상을 위해 새로이 제안된 앞섬보상 제어기의 블록선도이다. 관측기(Estimator)는 Fig. 10 에 나타난 롤 ①과 ②에서의 사행량의 차와 식 (15)을 사용하여 캠버를 실시간으로 관측한다. 예측기(Predictor)에서는 관측된 캠버(ρ_{est})와 식 (16)의 모델식을 사용하여 가이딩 동작이 없을 때의 웹 사행량($y_{4,est}$)을 계산한다. 이 때 매 순간을 정상상태로 간주하여 변환기에서 식 (13)을 사용하여 예측된 웹 사행량을 보상할 수 있도록 작동기에 입력 u_{eq} 를 가하게 된다.

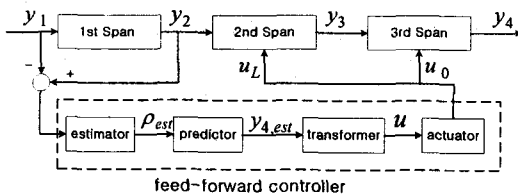


Fig. 13 Block diagram of feed-forward controller

5. 제안된 제어기의 성능비교

제어기의 성능비교를 위해 Fig. 14 에서 일반적인 PI 제어기(게인 P:0.22, I:0.1), PID 제어기(게인 P:0.22, I:0.15, D:0.15), 그리고 제안된 앞섬보상제어기에 대해 사행특성을 비교 도시하였다. PID 제어기의 경우 y_4 에 대해 10 초 이내의 정착시간을 갖고 최대 오버슈트는 0.015m 으로 안정된 제어성을 보임을 알 수 있다. 그러나 현장에서는 미분계인(D)의 경우 잡음을 증폭시키므로 PI 제어기를 주로 사용한다. PI 제어기의 경우 y_4 의 사행제어가 가능하지만 과도 상태시 진동 및 오버슈트도 크고 정착시간도 20 초 이상으로 제어성능이 떨어짐을 알 수 있다.

제안된 제어기의 경우 PID 제어기와 비교하더라도 최대오버슈트는 50%, 정착시간의 경우 약 10% 정도 성능향상을 보이며 진동도 적은 안정된 시스템임을 보이고 있다. 초기에 음의 사행량이 증가하는 이유는 Fig. 13 의 예측기가 실제 모델의 시간지연효과를 고려하지 않은 모델을 사용함으로써 제어입력이 선행되었기 때문이다. 또한 제안된 제어기는 예측된 사행량이 정상상태에 도달하기 전에는 실제 캠버의 영향보다 작은 제어입력을 만들게 되어 충분한 제어능력을 발휘하지 못한다. 그러나 Fig. 11 에서 y_4 가 정상상태에 도달하는 시점인 4.5 초 부근에서 제안된 제어기가 적절한 제어 성능에 추종해 감을 확인할 수 있다.

Fig. 15 를 통해 앞섬보상 제어기를 사용한 경우 최종 출구측 롤러뿐 만이 아니라 선행롤러 위에서도 적절한 사행거동이 유도되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 16 에 나타난 제어동작을 살펴보더라도 큰 진동이 없이 안정되게 수렴하며 이것은 PID 제어기에 비해 웹의 긁힘(Scratch)과 주름(Wrinkle)의 발생가능성도 줄일 수 있는 장점이 있다.

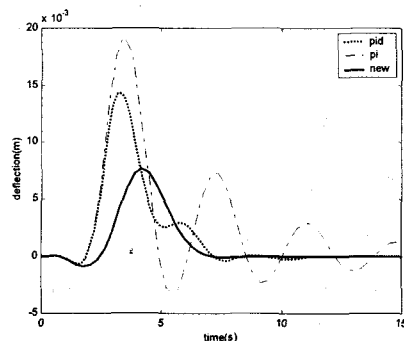


Fig. 14 Comparison control performance of controllers

인 연구와 장력과의 관계성을 규명하는 연구도 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) J. J. Shelton, 1968, "Lateral Dynamics of a Moving Web", Ph. D. thesis. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
- (2) Tsai-Chen Soong, Li, Chun, 1979, "An elastic analysis of Multiroll Endless Web System", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, Vol. 101, No. 4, Dec., pp. 308-313
- (3) G. E. Young, and K. N. Reid, "Lateral and Longitudinal Dynamic Behavior and Control of Moving Web", Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, June, 1993.
- (4) R. P. Swanson, 1999, "Mechanics of non-uniform webs", Proceeding of the International Conference on Web Handling", Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
- (5) Hiroyuki Uchida, Noriyuki Suzuki, 1993, "Strip Walk Simulation for Continuous Processing Lines", Proceeding of the International Conference on Web Handling", Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma
- (6) J. B. Otten, C.H. L. Limpens, 1997, "The Effect of Dual Actuating Strip Guidance Systems in Continuous Steel Annealing Line", Proceeding of the International Conference on Web Handling", Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma
- (7) J. J. Shelton, 1997, "The Effect of Camber on Handling", Proceeding of the International Conference on Web Handling", Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma
- (8) Marcel P. G. J. Besteman, Camille H. L. Limpens, 1998, "Modeling and Identification of a Strip Guidance Process with Internal Feedback", IEEE, Vol., NO. 1
- (9) 신한식, 이영로, 신기현, 1999, " 웹 표면 수직 방향 롤 정렬 불량에 의한 측방향 웹 거동에 대한 연구", 대한기계학회 동역학 및 제어부분-생산 및 설계공학 부문 1999년 학술대회 논문집
- (10) Timoshenko, Stephen P., and Goodier, J. N., 1961 "Theory of Elasticity", Third Edition. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, N.Y., pp 35-65
- (11) Chi-Tsong Chen, 1984, "Linear System Theory and Design", Harcourt Brace Jovanovich, Inc.

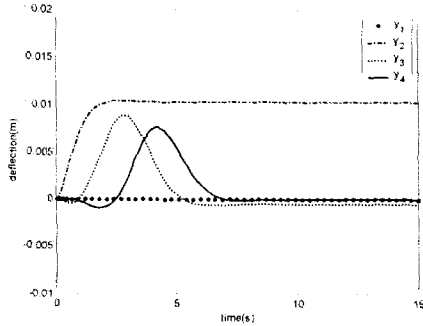


Fig. 15 Lateral deflection with feed-forward controller

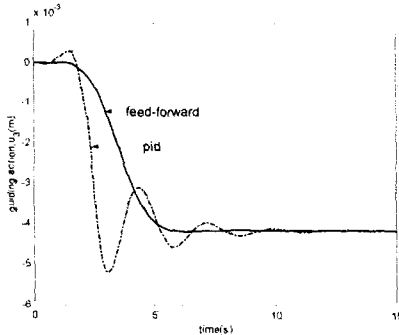


Fig. 16 Comparison with control actions of controllers

6. 결론

본 논문에서는 휘어진 웹의 동특성을 표현할 수 있는 모델을 개발하고 이 모델을 기반으로 보다 향상된 성능을 가진 제어기를 제안하였다. 그리고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제어기의 성능을 검증하였다.

개발된 휘어진 웹의 모델은 등가 수평회전 기운기의 개념을 도입하여 중첩성을 증명함으로써 수직기운기, 미끄럼, 불균일한 응력분포등과 같은 추가적인 모멘트를 유발하는 영향들에 의한 문제 해결에 확장해서 사용될 수 있다. 제안된 제어기는 현장에서 공정중에 측정하기 어려운 캠버를 실시간으로 측정할 수 있다는 점에서도 생산현장의 사행제어에도 큰 역할을 할 수 있을 것이다. 또한 현장에서 주로 사용되는 PI 제어기에 비해 월등히 우수한 제어성능을 보였고 PID 제어기에 비해서도 우수한 추종성능과 안정도를 가짐을 확인하였다.

제안된 제어기의 성능향상을 위해서는 제안된 모델에 캠버의 지연효과도 고려되어야 하며 추후 가이드 동작과 캠버에 의해 생길 수 있는 느슨함(Slackness), 주름(Wrinkle)을 방지하기 위해 추가적