

롤투롤 시스템에서의 비 접촉 이송 시스템을 위한 수학적 장력 모델에 관한 연구

A study on the Mathematical Tension Model for a Non-contact Transfer of a Moving Web in R2R e-Printing Systems

이창우, 김호준, 강현규, 신기현*
(Chang-Woo Lee, Ho-Joon Kim, Hyun-Kyoo Kang, and Kee-Hyun Shin)

Abstract: In a post printing section of roll to roll printing systems, scratch problem is the major defects. The functional qualities such as conductivity, mobility could deteriorate because of the scratch defect. In general, the scratch of the printed pattern on the flexible substrate was induced from a contact between rolls and printed pattern in the post printing section. In this paper, for non-contacting transfer of a moving web, a mathematical tension model has been developed considering strain due to air floatation and the proposed mode has been validated by numerical simulation. Additionally, the correlation between floatation height and speed compensation to control the tension and register are investigated. On the basis of the proposed model, a guide line of speed control in R2R printing system is presented to guarantee the non-contact between rolls and R2R printed pattern on the flexible substrate.

Keywords: non-contacting, printed electronics, roll to roll printing systems, tension

I. 서론

Roll to Roll(R2R) 시스템이란 필름, 종이, 철판 등과 같이 폭에 비해 두께가 매우 얇아 잘 휘어지는 성질을 가지며 길이가 매우 긴 소재를 구동 롤과 비 구동 롤을 이용하여 완제품에 필요한 여러 공정들을 연속적으로 처리하는 시스템이다. 이러한 R2R 시스템은 섬유, 인쇄, 제지, 그리고 제철 산업에 널리 이용되고 있다. 특히 인쇄 산업에서의 R2R 시스템은 종이, 필름 등과 같이 다양한 소재를 이용하여 신문, 식품의 포장재 등을 생산하는데 이용되고 있다[1].

최근에는 전자 소자를 생산하는데 있어서 생산성의 향상에 이점이 있는 전통적 인쇄 방법을 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. R2R 인쇄 방법을 이용하여 전자 소자를 생산하는데 있어서 중요하게 고려되어야 할 것은, 인쇄 공정을 거친 후 소재에 전이된 인쇄 패턴을 어떠한 방법으로 보호할 것인가에 대한 고찰이다. R2R 시스템에서는 그림 1과 같이 필연적으로 패턴이 인쇄된 소재는 다음 공정을 거치기 전에 롤과 접촉이 발생하기 때문에 소재에 인쇄된 패턴과 롤간의 접촉 문제가 발생할 수 있으며, 이로 인하여 발생된 스크래치는 제품의 품질 저하를 가져온다. 특히, 전자 소자의 생산에 이용되는 전도성 잉크의 인쇄 패턴은 건조 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라, 경화 공정을 거쳐야만 완벽한 결정체로서의 성능을 가지게 된다. 그러나, 건조 및 경화가 완벽하게 수행되지 않은 상황에서 롤과 접촉이 일어날 경우 인쇄된 패턴의 변형 및 파손을 야기할 뿐만 아니라, 경화된 후에도 인쇄된 패턴과 롤간의 접촉문제로 인하여 결함(scratch defect)가

발생된다.

비 접촉 소재 이송 시스템은 그림 2와 같이 공기의 압력을 이송되는 소재의 하부에 가하여 소재가 부양된 상태에서 소재의 이송이 이루어 지는 시스템이다. 비 접촉 소재 이송 시스템에 대한 연구는 정적 상태에서의 부양 롤 구멍(air hole) 위치에 대한 연구에 대해서 중점적으로 이루어졌고, 이들 연구에는 부양 롤 구멍의 개수와 위치가 중요한 변수인 것을 입증하였다[2,3].

본 연구에서는, 인쇄 패턴의 결함을 방지하기 위하여, 부양 롤 구멍의 개수와 위치가 최적화된 비 접촉 소재 이송 시스템의 해석을 기초로 부양 롤에서 나오는 공기의 압력으로 인

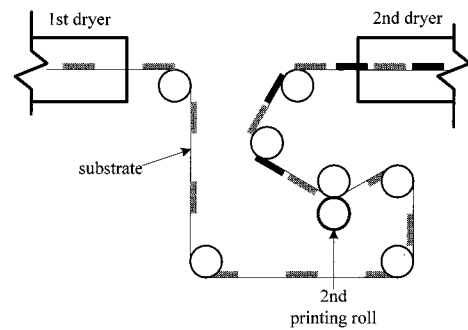


그림 1. Roll to Roll 시스템에서의 이송 개략도.
Fig. 1. The schematic of Roll to Roll web transfer systems.

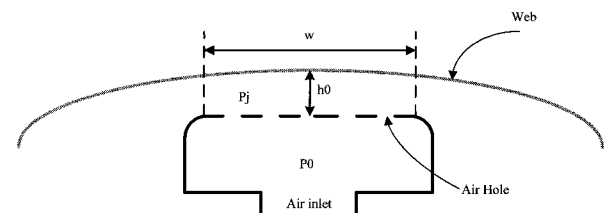


그림 2. 비 접촉 소재 이송 시스템의 개략도.
Fig. 2. The schematic of non contacting web transfer systems.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 5. 15., 채택확정: 2009. 6. 15.

이창우: 건국대학교 FDRC(leewoo1220@konkuk.ac.kr)

김호준, 강현규: 건국대학교 기계설계학과

(zimboy@konkuk.ac.kr/hyunkyoo@konkuk.ac.kr)

신기현: 건국대학교 기계공학부(khshin@konkuk.ac.kr)

※ 본 연구는 서울시 산학연 협력사업(10848) / 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원(No. K20701040600-09A0404-05410)하에 수행되었습니다.

하여 발생하는 소재의 변형 및 형상을 고려한 동적 장력 모델을 확장하였다. 또한 속도 변화에 따른 소재의 부양 높이 변화를 제시된 동적 모델의 수학적 시뮬레이션을 통하여 예측함으로써, 비 접촉 소재 이송 시스템의 안정적 구동을 위한 속도 변화 가이드라인을 제시하였다.

II. 공기의 압력에 의한 변형을 고려한 장력 모델

1. 공기의 압력에 의해 발생하는 소재의 변형률에 대한 수학적 모델

공기의 압력에 의해 발생하는 소재 변형의 수학적 모델을 위해 훅의 법칙(Hook's law)을 이용하여 정리 할 수 있다.

$$\frac{F^{air}}{L} = k_{air} \times \frac{x^{air}}{L} \tag{1}$$

식 (1)은 공기의 압력을 받는 소재의 길이에 대하여 가해지는 힘과 변화량에 대하여 정의 된다. 장력 모델의 확장을 위해 소재의 변형률에 대하여 정의하면 식 (2)와 같이 정의 된다.

$$\varepsilon^{air} = \frac{x^{air}}{L} = \frac{F^{air}}{Lk_{air}} \tag{2}$$

식 (2)에서 소재에 가해지는 공기의 힘(F^{air})은 그림 2에서와 같이 부양 롤의 형상에 따라 결정되는 값으로서, slot nozzle의 간격, 부양 롤의 폭 그리고 공기와 소재가 닿는 각도에 의해 결정되는 값이다[3]. 이는 식 (3)과 같이 정리 된다.

$$F^{air} = P_b \left[1 - \exp \left\{ \left(-\frac{2b}{h} \right) (1 + \cos \theta) \right\} \right] \left[\frac{w}{b} + \frac{2h \sin \theta}{b(1 + \cos \theta)} \right] \tag{3}$$

식 (3)에서 공기의 압력이 소재에 전달되는 각도로 정의되는 θ 를 90° 로 가정하면 식 (4)와 같이 간소화 된다.

$$F^{air} = P_b \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{2b}{h} \right) \right\} \left(\frac{w + 2h}{b} \right) \tag{4}$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리하면,

$$F^{air} = P_b \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{2b}{h} \right) \right\} \left(\frac{w + 2h}{b} \right) \tag{5}$$

와 같다. 공기의 압력에 대한 소재의 변형률은 부양 롤에서 떠 있는 소재의 높이와 부양 롤의 구멍(air hole)에서 나오는 공기의 압력 조건에 의해 정의 된다.

2. 단일 스펠에서의 장력 모델의 확장

일반적으로 R2R 시스템에서의 동적 장력 모델은 그림 3과 같이 R2R 시스템의 연속 이송되는 소재의 변형률에 변화에 따른 특성을 기본으로 하며, 현 스펠에서의 변형률은 이전 스펠에서의 변형률과 현 스펠의 양 끝을 잡고 있는 구동 롤의 속도의 함수로 정의된다[4]. 이러한 소재의 거동에 대한 수학적 변형률 모델은 다음의 식 (6)과 같다.

$$L \frac{d}{dt} (\varepsilon_{2,eq}(t)) = \varepsilon_{1,eq}(t) v_1(t) - \varepsilon_{2,eq}(t) v_2(t) + (v_2(t) - v_1(t)) \tag{6}$$

그림 3과 같은 단일 스펠에서 그림 2와 같은 비 접촉 소재

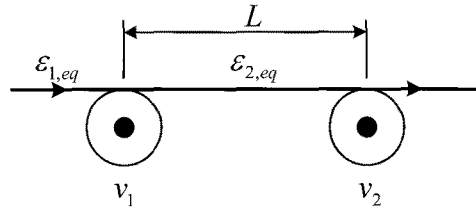


그림 3. 단일 스펠.

Fig. 3. One span with two driven roll.

이송 시스템이 있을 경우, 속도 변화에 따른 소재의 탄성 변형과 함께 비 접촉 소재 이송 시스템에서 공기의 압력에 의한 소재의 변형이 발생하게 된다. 따라서 현 스펠에서 변형률의 합은 다음의 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon^e + \varepsilon^{air} \tag{7}$$

식 (7)에서 ε^e 는 속도 변화에 의한 소재의 탄성 변형률, ε^{air} 는 비 접촉 소재 이송 시스템에서의 공기의 압력에 의한 소재의 변형률을 의미한다. 각각의 변형률은 다음과 같이 시간(t)의 함수로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_{eq}(t) = \varepsilon^e(t) + \varepsilon^{air}(t) \tag{8}$$

식 (8)을 시간에 대하여 미분하면 식 (9)와 같이 표현된다.

$$d \frac{\varepsilon_{eq}(t)}{dt} = d \frac{\varepsilon^e(t) + \varepsilon^{air}(t)}{dt} \tag{9}$$

식 (9)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$L \frac{d}{dt} \{ \varepsilon_2^e(t) + \varepsilon_2^{air}(t) \} = \varepsilon_1^e(t) v_1(t) + \varepsilon_1^{air}(t) v_1(t) - \varepsilon_2^e(t) v_2(t) - \varepsilon_2^{air}(t) v_2(t) + \{ v_2(t) - v_1(t) \} \tag{10}$$

식 (10)의 양변에 $AE_{2,eq}$ 를 곱하고 정리하면 식 (11)과 같다.

$$LAE_{2,eq} \frac{d}{dt} \{ \varepsilon_2^e(t) + \varepsilon_2^{air}(t) \} = AE_{2,eq} \{ \varepsilon_1^e(t) + \varepsilon_1^{air}(t) \} v_1(t) - AE_{2,eq} \{ \varepsilon_2^e(t) + \varepsilon_2^{air}(t) \} v_2(t) + \{ v_2(t) - v_1(t) \} \tag{11}$$

식 (11)은 비선형 미분방정식이므로 실제 동적 수화 모델에 대한 정확한 해석을 수행하기 어렵다. 따라서 모든 변수들을 식 (12)와 같이 초기 정상 상태의 값으로부터 작은 양의 변화를 겪는다고 가정하고, 초기 정상 상태에서는 식 (13)과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} E_n^e &= \varepsilon_n^e - \varepsilon_{n,0}^e \\ E_n^{air} &= \varepsilon_n^{air} - \varepsilon_{n,0}^{air} \\ V_n &= v_n - v_{n,0} \end{aligned} \tag{12}$$

$$\varepsilon_{10}^e v_{10} - \varepsilon_{20}^e v_{20} + \varepsilon_{10}^{air} v_{10} - \varepsilon_{20}^{air} v_{20} + v_{20} - v_{10} = 0 \tag{13}$$

식 (12)와 (13)을 식 (11)에 대입하고 변화 양의 곱으로 이루어진 항들은 다른 항들에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 비 접촉 소재 이송 시스템에서 소재의 거동에 대한 선형화된 수학적 장력 모델은 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\{T_2^e(t) + T_2^{air}(t)\} = & -\frac{v_{20}}{L}\{T_2^e(t) + T_2^{air}(t)\} \\ & + \frac{v_{10}E_{2,eq}}{LE_{1,eq}}\{T_1^e(t) + T_1^{air}(t)\} \\ & + \frac{AE_{2,eq}}{L}\{V_2(t) - V_1(t)\} \end{aligned} \quad (14)$$

3. 비 접촉 이송 시스템에서의 장력의 계산

식 (5)와 (14)는 시간(t)에 대한 동일한 함수이고, 속도 변화에 따른 소재의 탄성 변형률(ϵ_2^e)과 공기 압력에 의해 발생하는 변형률(ϵ_2^{air})을 시간에 따라 미분하여야 하기 때문에 동시에 계산하는 것이 불가능 하다. 따라서 계산을 수행하기 위해서는 순차적인 계산 과정이 필요하다. 초기 정상 상태에서의 운전 장력, 그리고 접촉 이송 시스템에서의 공기의 압력을 이용하여 정적인 상태에서의 소재의 부양 높이를 계산한다. R2R 시스템에서 구동 중 운전 속도의 오차로 발생하는 장력의 오차와 정상 상태 공기 압력에 따라 변화되는 소재의 부양 높이를 재 계산하고, 부양 높이의 변화는 식 (5)에 따라 공기의 압력에 의한 소재의 변형률로 계산이 된다. 공기의 압력에 의한 소재의 변형률은 식 (14)에 의해 비 접촉 이송 시스템 구간의 장력을 계산할 수 있게 된다. 이를 순서대로 나타내면 그림 4와 같다.

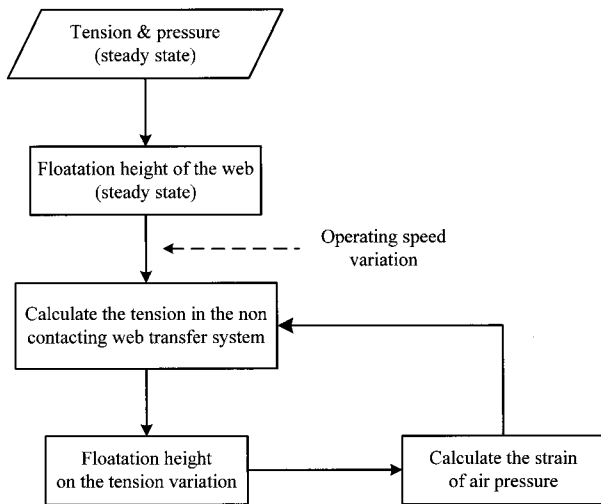


그림 4. 비 접촉 이송 시스템에서의 장력 계산 순서도.
Fig. 4. The flow chart of tension calculation in non contacting web transfer systems.

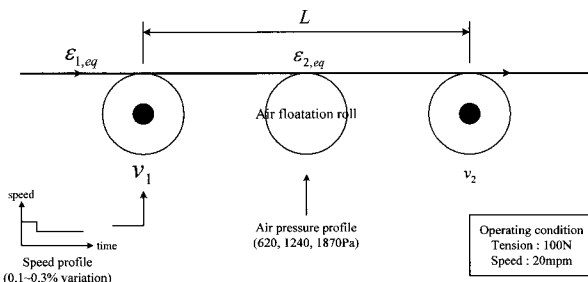


그림 5. 수학적 시뮬레이션 개략도.
Fig. 5. The schematic of numerical simulation.

III. 수학적 시뮬레이션 및 결과

1. 시뮬레이션 조건

R2R 비 접촉 이송 시스템에 속도 변화가 입력되었을 경우, 비 접촉 이송 시스템의 공기 압력에 따라 소재의 부양 높이를 확인하기 위한 수학적 시뮬레이션을 수행하였다.

R2R 비 접촉 이송 시스템의 공기 압력 값 및 운전 장력 값의 선정은 정적인 상태에서의 부양 높이 자료가 있는 값을 선정하였고, 운전 속도의 값은 Seoul R&BD multi-layer printing machine의 운전 속도 값으로 선정하였다. 또한 비 접촉 이송 시스템에서 소재와 롤간의 비접촉을 보장하는 속도변화량에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 부양 높이와 속도 변화량 간의 관계

소재 부양을 위해 공급되는 공기의 압력에 따른 속도에 영향을 검증하기 위하여 다음과 같이 서로 다른 공기 부양 압력과 속도 변화에 따른 부양 높이에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. Air floatation roll로 입력되는 공기의 압력이 620Pa일 경우에 속도 변화를 운전 속도 대비 0.1%(0.02mpm)에서 0.3%(0.06mpm)까지 0.1%간격으로 변화를 주었다.

그림 6에서, 속도 변화가 존재하지 않을 경우, 정상 상태에서의 소재의 부양 높이는 0.0146m 이다. 시뮬레이션 시간이 10초 일 때, 속도 변화를 가하여 소재의 부양 높이를 시뮬레이션 하였다. 속도 변화 입력에 따른 소재의 부양 높이는 0.273%의 속도 변화가 발생하는 경우에는 부양되어 있던 소재가 air floatation roll에 접촉하는 것을 시뮬레이션으로 확인할 수 있었다.

다음으로 공기부양롤로 입력되는 공기의 압력이 1240Pa일 경우에 대하여 620Pa의 시뮬레이션 조건과 동일하게 속도 변화를 주며 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7에서, 속도 변화가 존재하지 않을 경우, air floatation roll로 입력되는 공기의 압력이 1240Pa에서는 소재의 부양 높이가 0.0232m이다. 그림 6의 경우와 동일하게 속도 변화를 가하여 부양 높이에 대한 시뮬레이션을 수행하면, 속도 변화가 0.263% 발생할 경우에 소재의 부양 높이가 0m(소재와 롤간 접촉 발생)가 되는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 그림 8은 air floatation roll로 입력되는 공기의 압력이 1870Pa인 경우에 대하여 동일한 속도 변화에 대한 시뮬레이

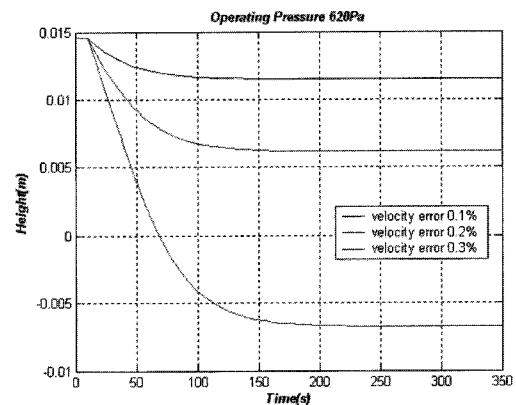


그림 6. 속도 변화에 따른 소재의 부양 높이 변화(620Pa).
Fig. 6. The variation of floatation height among the speed variation (Operating pressure 620Pa).

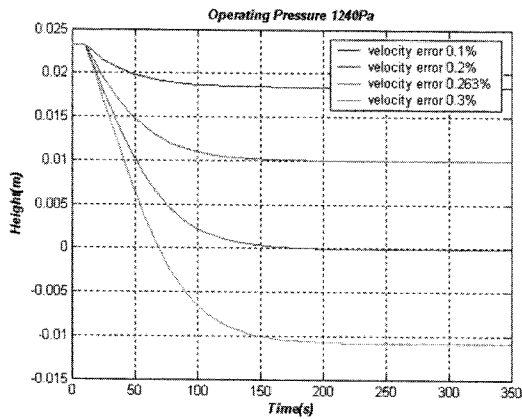


그림 7. 속도 변화에 따른 소재의 부양 높이 변화(1240Pa).

Fig. 7. The variation of floatation height among the speed variation (Operating pressure 1240Pa).

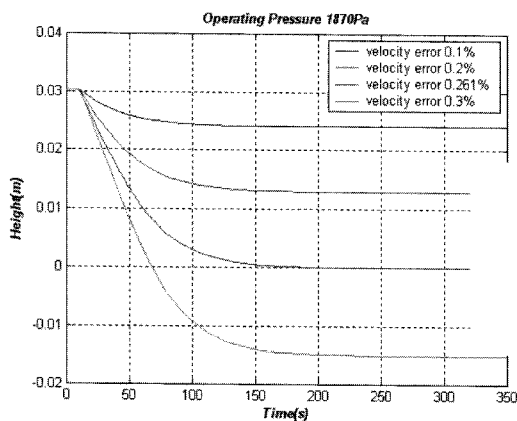


그림 8. 속도 변화에 따른 소재의 부양 높이 변화(1870Pa).

Fig. 8. The variation of floatation height among the speed variation (Operating pressure 1870Pa).

선 결과를 보여준다. 정상 상태에서 소재의 부양 높이는 0.03033m이다. 속도 변화량이 0.261% 입력이 되었을 경우에는 부양되어 있던 소재가 비 접촉 부양 롤과 접촉하는 것을 확인 할 수 있었다.

시뮬레이션 결과를 통하여 입력되는 공기의 압력 증가에 따라서, 부양높이의 증가함을 확인하였으며, 부양높이가 높을 수록, 장력 제어 및 레지스터 제어를 위한 속도 변화량을 증가시킬 수 있었다. 장력 및 레지스터는 속도 변화량의 함수이므로, 장력 및 레지스터 에러 발생 시에는 속도 변화를 통하여 보상할 수 있다. 그러나 빠른 응답성을 보장하기 위해서 발생한 에러에 대한 속도 보상량을 과하게 설정할 경우 장력 혹은 레지스터에러는 빠른 수렴을 할 수 있는 반면에 소재에 인쇄된 패턴과 롤간의 접촉 문제가 발생할 수 있다.

즉, 제안된 수학적 모델 및 결과를 통하여 소재에 인쇄된 패턴과 롤간의 비 접촉 이송을 보장하기 위한 속도 보상량 선정에 대한 기준을 마련 할 수 있다.

IV. 결론

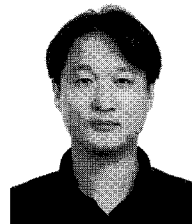
본 논문에서는, 수학적 시뮬레이션을 통하여 R2R 인쇄 전자 공정에서 이용되어야 하는 비 접촉 소재 이송 시스템에

대한 소재의 동적 모델 연구 및 인쇄된 패턴 보호를 위한 속도 변화량에 대한 연구를 수행하였다. 제안된 수학적 모델을 기반으로, 소재에 인쇄된 패턴과 롤 사이에서 발생하는 접촉 문제와 장력 및 레지스터 제어를 위한 속도 보상량 간의 관계를 검증하였다. 접촉문제로 인한 인쇄된 패턴의 품질저하를 방지하기 위해서는, 소재의 부양높이에 따라 R2R 공정에서의 속도 변화량이 제한되어야 한다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인 하였다. 본 논문에서는, 특정한 air floatation roll 형상에 따른 소재의 부양 높이 연구가 수행되었으나, 다양한 air floatation roll 형상에 따른 소재의 부양 높이에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

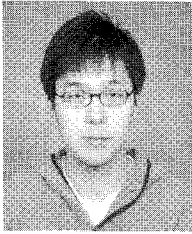
참고문헌

- [1] D. R. Roisum, *The Mechanics of Rollers*, TAPPI press, Technology Park/Atlanta, 1996.
- [2] Y. B. Chang and P. M. Moretti, "Aerodynamic characteristics of pressure-pad air bars," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 67, pp. 177-182, Mar. 2000.
- [3] Y. B. Chang, R. P. Swanson, and P. M. Moretti, "Longitudinal and out-of-plane stiffness of a web in an air-flotation oven," *Noise Control and Acoustics Division-ASME*, vol. 4, pp. 435-443, 1999.
- [4] K. H. Shin, *Tension Control*, TAPPI press, Technology Park/Atlanta, 2000.
- [5] J. N. Goodier and S. P. Timoshenko, *Theory of Elasticity*, 3rd Ed., McGraw-Hill, Singapore, 1970.
- [6] H. S. Jeong, S. H. Yoo, and K. N. Paek, "Strip temperature control for the heating furnace in the continuous-annealing line," *Proceedings of 90' Korea Automatic Control Conference*, Oct. 1999.
- [7] K. H. Shin and W. K. Hong, "Real-time tension control in a multi-stand rolling system," *KSMIE International Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 12-21, 1998.
- [8] S. Muftu, T. S. Lewis, K. A. Cole, and R. C. Benson, "A two-dimensional model of the fluid dynamics of an air reverser," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 65, pp. 171-177, Mar. 1998.
- [9] B. S. Rice and R. F. Gans, "Predictive models of web-to-roller traction," *Journal of Tribology*, vol. 127, pp. 180-189, Jan. 2005.
- [10] S. Muftu, "Mechanics of a thin, tensioned shell, wrapped helically around a turn-bar," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 23, no. 5, pp. 767-785, Jul. 2007.

이 참 우

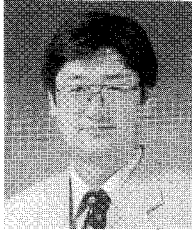


2001년 건국대학교 기계공학과 졸업(공학사). 2003년 건국대학교 기계설계학과 졸업(공학석사). 2008년 건국대학교 기계설계학과 졸업(공학박사). 2008년~2009년 건국대학교 유연디스플레이롤투롤연구센터 박사후 연구과정. 2009년~현재 건국대학교 유연디스플레이롤투롤연구센터 연구교수. 관심분야는 롤투롤 인쇄 시스템 설계, 장력제어, 레지스터 제어, 비접촉이송시스템 제어 및 설계.



김 호 준

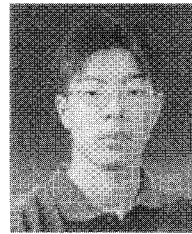
2008년 건국대학교 기계공학과 졸업(공학사). 2008년~현재 건국대학교 기계설계학과 대학원 재학. 관심분야는 롤투롤 인쇄시스템에서의 잉크전달 메커니즘, 연속공정시스템에서의 장력제어, 비접촉이송시스템의 설계.



신 기 현

1981년 서울대학교 기계설계학과 졸업(공학사). 1982년 서울대학교 기계설계학과 졸업(공학석사). 1991년 Oklahoma State University 졸업(공학박사). 1992년~현재 건국대학교 기계설계학과 정교수. 2005년~현재 건국대학교 유연디스플레이

이롤투롤연구센터 연구소장. 2001년 “Tension control, Tappi”의 저서. 관심분야는 롤투롤 인쇄시스템의 설계 및 공정제어, 실시간분산제어시스템, 장력제어, 사행제어, 레지스터 제어, 롤투롤인쇄시스템에서의 잉크전달 메커니즘.



강 현 규

2001년 건국대학교 기계공학과 졸업(공학사). 2003년 건국대학교 기계설계학과 졸업(공학석사). 2003년~현재 건국대학교 기계설계학과 대학원 재학(박사과정). 관심분야는 롤투롤 인쇄시스템에서의 레지스터 및 장력제어, 사행제어, 실시간제어시스템.