

인쇄성능 향상을 위한 롤코터용 임프레션 실린더의 압력 제어 New Approach to Pressure Control of a Impression Cylinder for Roll Coater

윤소남 · 함영복 · 박중호
S. N. Yun, Y. B. Ham and J. H. Park

(접수일 : 2009년 2월 23일, 수정일 : 2009년 4월 15일, 채택확정 : 2009년 5월 2일)

Key Words : Roll-to-Roll(롤투롤), System Identification(시스템 동정), Blanket Roll(블랭킷 롤), Impression Roll(임프레션 롤), PID Control(PID 제어), Decoupling Control(디커플링 제어)

Abstract : This study presents a new approach to pressure control of a impression cylinder for roll coater which is a kind of face pressure control between blanket roll and impression roll. Roll-to-Roll method for printing is a very useful tool for mass production such as RFID elements, smart sensors and solar cell devices. In this study, a decoupling control strategy of the roll coater which is a combination of a cylinder system, a dry system and two pressure regulators with two pneumatic cylinders was discussed. Also, the characteristics of component such as a pressure regulator having a pressure reducing function and the movement of a blanket roll and a impression cylinder were analyzed using the Matlab software. From this results, the techniques of a shock and a vibration reduction were suggested.

1. 서 론

오늘날 마이크로 패턴으로 이루어진 RFID(Radio Frequency IDentification) 태그나 스마트센서 등은 일반적인 제조공법으로 만들기 위해서는 제조장비 크기의 소형화와 정밀도가 요구된다. 따라서 기술이 뛰어난 선진국가에서는 일반적인 형태의 가공이 아닌 인쇄전자소자(Printed Electronics)를 대량으로 생산할 수 있는 인쇄방식에 주목하고 있다. 전자소자의 인쇄가 유비쿼터스 기반을 형성하는데 막대하게 소요되는 RFID태그와 무선센서 등을 생산하는 기술로 크게 사용될 전망에 따라 선진 여러 국가들은 많은 연구투자를 하고 있다. 핀란드의 경우 Oulu 대학팀의 Seppo Leppavuori 교수는 최근 미세한 전자회로인쇄를 위한 사전실험 결과를 발표하였는데¹⁾, 현재 나노 사이즈의 온가루로 만든 PTF잉크를 사용하여 롤(Roll)인쇄의 가능성을 검토하였다. 같은 핀란드의 VTT 연구팀은 PANIDBSA(polyaniline

doped with dodecylbenzene sulfonic acid)의 전도성 폴리머로 잉크를 만들어 1.7m/s의 고속 그라비아(Cravure) 인쇄를 하여 잉크, 인쇄속도, 인쇄압 그리고 전도도에 관한 기초실험을 수행하였다²⁾. 미국의 GE와 태양전지로 유명한 ECD Ovonic의 기계개발 프로젝트는 미 상무성 국가표준기술연구소(NIST)의 연구자금 지원으로 4년간에 걸쳐 그라비아 인쇄프로세스와 스크린 인쇄프로세스를 조합한 세계최초로 롤투롤(Roll-to-Roll) 인쇄방식의 전자인쇄물 대량인쇄기의 개발을 추진하고 있다. 이 중 성능면에서 뛰어난 방식으로 주목되고 있는 것이 롤투롤(Roll-to-Roll) 인쇄방식이다. 이 인쇄방식은 패턴이 가공된 임프레션롤에 잉크를 묻히고 블랭킷롤에 전사시켜 전사된 패턴을 인쇄 대상물에 인쇄하는 방식이다. 이 때 패턴의 크기가 서로 다르므로 작은 패턴과 큰 패턴에 가해지는 압력은 다르게 적용되어야 한다. 예를 들어 큰 패턴에 작용하던 힘을 가지고 블랭킷 롤로 작은 패턴을 누르게 되면 블랭킷 롤에 잉크가 서로 번지게 전사되거나, 작은 패턴에 사용하던 힘을 가지고 블랭킷 롤로 큰 패턴을 누르면 잉크가 완전히 전사되지 못해 인쇄 성능이 저하되는 결과를 초래한다. 따라서 롤투롤 방식에서는

윤소남(책임저자) : 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부
E-mail : ysn688@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7155
함영복, 박중호 : 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부

임프레션 롤과 블랭킷 롤 사이의 압력이 적절하게 공급되어야 성능이 우수한 인쇄물을 만들 수 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 대상 인쇄시스템을 보이는 것으로, 임프레션 롤의 양 끝단에 인쇄압력을 인가할 수 있는 실린더가 붙어있는데 한쪽 실린더에 힘을 가하게 되면 다른쪽 실린더에서는 힘이 외란으로 작용하는 구조로 되어있다. 따라서 이 논문에서는 외란을 제거하기 위하여 디커플링(Decoupling) 제어 기법을 사용하여 다른쪽 실린더에서 오는 압력오차를 제거하는 연구를 수행하였다.

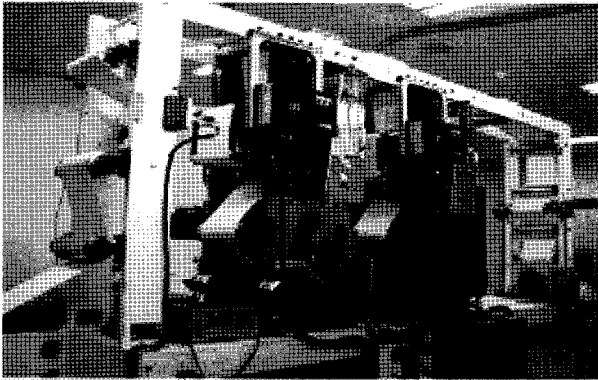


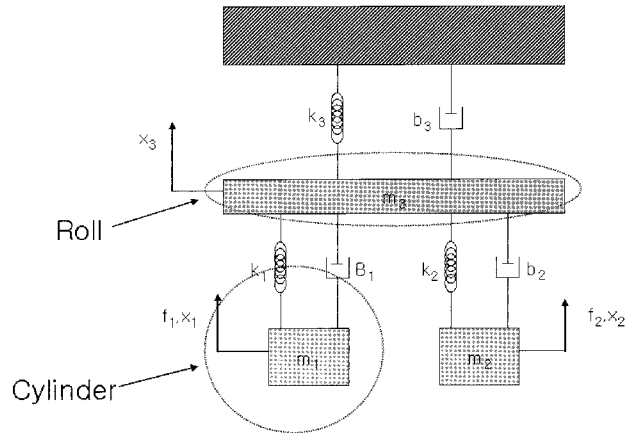
Fig. 1 Roll-to-Roll printing system

2. 제어대상 시스템

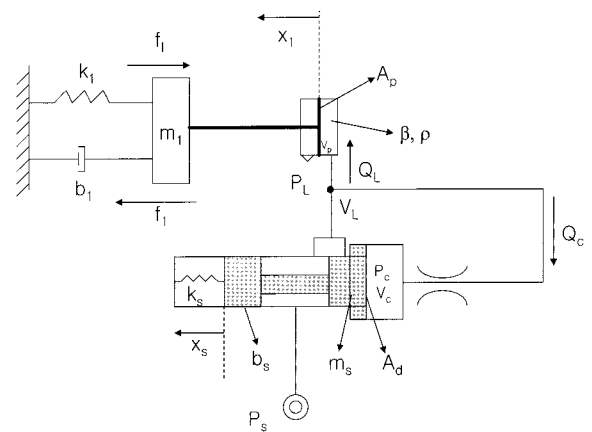
Fig. 2는 실제 제어대상 시스템의 수학적 모델링을 위한 해석 모델을 보이는 것이다. Fig. 2의 a)는 연구 대상으로 하는 롤투롤 시스템의 전체 모델을 나타내는 것이고, Fig. 2의 b)는 롤투롤 시스템에서 공기압력 제어부의 모델을 보이는 것이다. 이 시스템은 실린더가 임프레션 롤의 양단에 각각 하나씩 설치되어 있으며 실린더에 공기가 인가되면 임프레션 롤을 밀게 되고 임프레션 롤이 밀리면 임프레션 롤과 블랭킷 롤 사이에 인쇄압력이 작용한다. 그러나 양단의 실린더 중에 어느 한쪽에 힘이 더 증가하게 되면 나머지 한쪽에서는 그 힘에 대한 압력오차가 외란으로 작용하는 문제가 발생한다. 본 연구의 관심대상은 롤투롤 시스템의 롤 면압력 제어에 있기 때문에 공기압 시스템 모델링은 실험을 통하여 관측하여 제어모델로 사용하는 것으로 하였다. 롤의 양측에 설치되어 있는 공압식 실린더 시스템과 롤의 관계는 식 (1)-(3)과 같이 쓸 수 있다³⁾.

$$f_1 = m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_1 x_3 + b_1 \dot{x}_1 - b_1 \dot{x}_3 \quad (1)$$

$$f_2 = m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 - k_2 x_3 + b_2 \dot{x}_2 - b_2 \dot{x}_3 \quad (2)$$



a) Roll-to-Roll system model



b) Pressure control system model

Fig. 2 Analysis model of impression roll

$$0 = m_3 \ddot{x}_3 - k_1 x_1 + k_1 x_3 - b_1 \dot{x}_1 + b_1 \dot{x}_3 - k_2 x_2 + k_2 x_3 - b_2 \dot{x}_2 + b_2 \dot{x}_3 + k_3 x_3 + b_3 \dot{x}_3 \quad (3)$$

식(1)에서 좌측 실린더 발생력 f_1 이 작용하면 좌측 피스톤 변위 x_1 뿐만 아니라 우측 피스톤 변위 x_2 도 영향을 받는 것을 확인할 수 있고, 식(2)에서 우측 실린더 발생력 f_2 가 작용하면 우측 피스톤 변위 x_2 뿐만 아니라 좌측 피스톤 변위 x_1 도 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 따라서 한쪽의 힘에 의해 다른쪽이 영향을 받는 상호연결 구조로 시스템이 만들어져 있다. 식(3)은 최종적으로 임프레션 롤이 움직이는 것을 나타내고 있다. 여기서, m_1, m_2 는 실린더의 질량, k_1, k_2 는 실린더가 가지는 스프링 상수, b_1, b_2 는 실린더가 가지는 마찰계수, m_3 는 롤의 질량, k_3 는 롤이 가지는 스프링 상수, b_3 는 롤이 가지는 마찰계수, x_1, x_2, x_3 는 실린더와 롤의 변위를 나타낸다.

Fig. 2의 b)에서 실린더와 감압밸브부의 연속의 식과 운동방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{dP_L}{dt} = \frac{1}{\beta \left(V_{L0} + A_p \frac{dx_1}{dt} \right)} \left(C_v \cdot A_v \sqrt{\frac{2(P_L - P_c)}{\rho}} - A_p \frac{dx_1}{dt} - C_c A_c \sqrt{\frac{2(P_L - P_c)}{\rho}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{1}{\beta \left(V_{c0} + A_d \frac{dx_s}{dt} \right)} \left(C_c \cdot A_c \sqrt{\frac{2(P_L - P_c)}{\rho}} - A_d \frac{dx_s}{dt} \right) \quad (5)$$

$$\ddot{x}_s = \frac{1}{m_s} \left(A_d \cdot P_c - b_s \frac{dx_s}{dt} - k_s(x_{s0} + x_s) \right) \quad (6)$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} \left(A_p \cdot P_L - b_x \ddot{x}_1 - k_1(x_{10} + x_1) \right) \quad (7)$$

Fig. 3은 식(4)~식(7)을 해석하기 위한 시뮬링크 블록을 보이는 것이며, 이론해석에 사용된 변수의 정의 및 변수값들은 Table 1에 나타내었다. Table 2는 실험대상체를 이용하여 사용압력 0.5[MPa]에서 실험된 값과 이론해석 결과를 비교하여 나타낸 것으로, 이 실험값이 상승시간과 안정시간이 20ms 낮게 나타났다. 실험값이 작은 이유도 기계마찰과 유체점성계수의 적절한 값들이 실험적으로 고려되지 않은 결과라 사료된다.

3. 제어시스템 설계

3.1 시스템 동정

전술한 바와 같이 연구 대상 공압제어 시스템의 수학적모델을 실험적인 동정기법을 이용하여 구하였다. 시스템 동정은 시스템의 응답 실험을 통하여 얻어진 실험데이터로부터 수학적인 표현 방법을 통하여 시스템을 가장 잘 묘사할 수 있는 전달함수를 구해내는 것이다. 이 논문에서 사용한 시스템 동정은 Mathworks社에서 나온 Matlab(Ver. 7.0)의 PEM (Prediction Error estimate of a general linear model)기법을 이용하였다⁴⁾. Fig. 3은 시스템 동정을 위한 실험 블록선도이며, 실험에 사용된 장비들은 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Simulation parameters for Roll-to-Roll system

Parameter	Value
P_s (공급압력)	5×10^5 [Pa]
C_c (감압 오리피스 유량계수)	0.75
C_v (감압밸브 유량계수)	0.65
ρ (공기의 밀도)	1.293 [kg/m ³]
β (공기 압축율)	1.46×10^{-5} [m ² /N]
V_{c0} (감압밸브 내 체적)	3.5×10^{-8} [m ³]
V_{L0} (부하에 대한 전체 체적)	1.24×10^{-4} [m ³]
x_m (스풀의 최대변위)	3×10^{-3} [m]
m_1 (Roll의 질량)	34.32 [kg]
k_1 (Roll의 스프링 계수)	100 [N/m]
b_1 (Roll의 마찰 계수)	1.5 [N·s/m]
k_s (감압밸브 내 스프링 계수)	1×10^3 [N/m]
m_s (감압밸브 내 스프링 질량)	0.04 [kg]
b_s (감압밸브 점성마찰 계수)	1×10^3 [N·s/m]
D_s (스풀 직경)	15×10^{-3} [m]
D_d (다이아프램 직경)	48×10^{-3} [m]
D_p (피스톤의 직경)	63×10^{-3} [m]
D_c (감압밸브 제어용 오리피스 직경)	1.5×10^{-3} [m]
x_{10} (롤의 초기 변위)	0.01×10^{-3} [m]
x_{s0} (밸브 스프링의 초기변위)	0.001×10^{-3} [m]

Table 2 Pressure response characteristics

	T_s [s]	T_r [s]
Experiment	0.3	0.16
Simulation	0.28	0.12

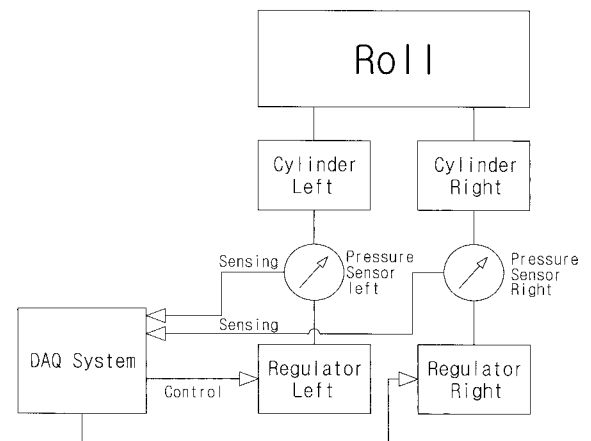


Fig. 3 Experimental block-diagram for Identification

Table 3 Components for control and measurement

Component	Company	Model	Spec.
Cylinder	FESTO	ADVU635APA	30.9N
Pressure sensor	NTS	PCH10	1[MPa]
Regulator	SMC	ITV2030	0.5[MPa]
DAQsystem	NI	6062E	

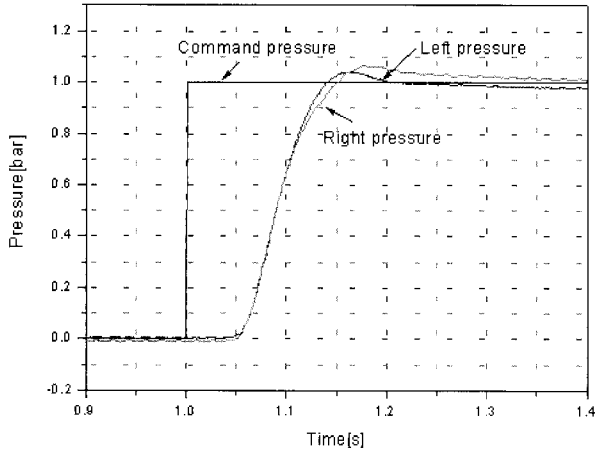


Fig. 4 Experimental results of impression roll

Fig. 4는 실험으로 구해진 좌.우측의 실린더에 대한 스텝응답특성 결과 그래프이다. 이 실험 결과를 이용하여 시스템 동정을 하였으며, 구해진 전달함수는 다음과 같다.

$$G_L(s) = \frac{-1.4s + 154.4}{s^2 + 21.42s + 312.2} \quad (8)$$

$$G_R(s) = \frac{-2.3s + 151.1}{s^2 + 18.6s + 311.8} \quad (9)$$

여기서, G_L 은 왼쪽 실린더에서 구해진 전달함수이며, G_R 은 오른쪽 실린더에서 구해진 전달함수를 나타낸다.

3.2 디커플링(Decoupling)제어

이 연구에서 실린더는 임프레션 롤에 연결이 되어있고 연결된 롤에 의해 각각의 실린더 압력은 서로 외란으로 작용하여 상호 간섭을 받게 된다. 이러한 외란을 최소화하기 위하여 디커플링(Decoupling) 제어를 구성하였다. 디커플링 제어는 두개의 제어 대상이 한 시스템에 존재할 때 제어기는 각각에 대하여 제어를 하고 각각의 제어 결과가 미치는 외란적 요소를 다시 피드백으로 받아 하나의 제어 대상

처럼 만드는 제어기법이다. Fig. 5는 디커플링 제어 기법을 설명하기 위한 기본적인 디커플링 제어기 블록선도를 나타낸다. 위 블록선도에서 상호 연결된 전달함수를 $g_{11}, g_{12}, g_{21}, g_{22}$ 라 하며, 상호 연결된 전달함수에 대한 제어기가 $d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}$ 이다. 이 시스템의 제어기를 구하기 위해서 디커플링제어 해법⁵⁾을 이용하여 풀면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$d_{11} = \frac{g_{22}}{\Delta} \quad (10)$$

$$d_{21} = -\frac{g_{21}}{\Delta} \quad (11)$$

$$d_{12} = -\frac{g_{12}}{\Delta} \quad (12)$$

$$d_{22} = \frac{g_{11}}{\Delta} \quad (13)$$

여기서, Δ 는 $g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}$ 로 나타낸다.

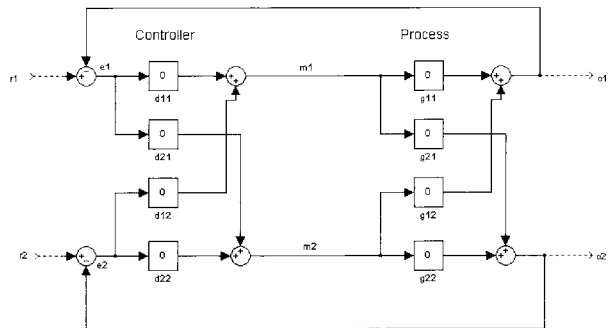


Fig. 5 Decoupling control block-diagram

4. 이론해석 및 실험 결과

시스템 동정으로 구해진 전달함수를 이용하여 디커플링 제어를 수행하였다. 전술한 바와 같이 Fig. 5의 기본 모델로부터 PID 제어 기능을 첨가하였으며, 이론해석에 사용된 블록선도는 Fig. 6과 같으며, 실험 결과는 기존 밸브시스템의 응답특성 결과를 보이는 것이다. 위 블록선도에서 실제로 실린더는 두개이고 임프레션 롤에 의해서 상호연결 되어 있으므로 전달함수 g_{11}, g_{22} 만이 존재하는 꼴이며, 각각의 출력을 다른 시스템의 출력으로 피드백 시킨 것으로 상호연결의 형태가 된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 실험에 의한 결과와 디커플링 제어를 사용한 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 시뮬레이션에 사용된 PID 게인값은 Table 4에 나타내었으며, 실험결과와 시뮬레이션 결과에 대한 응답

특성은 Table 5에 나타내었다. Fig.7, 8과 Table 5의 결과에서 상승시간 T_r (정상상태 응답의 10%~90%) 범위의 시간은 실험이 빠른 결과를 가져오나 안정시간 T_s 는 시뮬레이션이 빠른 결과를 보인다. 여기서, 실험결과는 상승시간이 빠른 반면에 오버슈트가 발생하는 것을 확인할 수 있는데 롤투롤 인쇄

방식에서 인쇄압력은 갑작스러운 힘을 요하는 것이 아니라 빠르면서도 안정적인 압력을 요구하므로 안정시간이 빠르고 오버슈트가 없는 디커플링제어가 유리하다는 것을 예측할 수 있다. 또한, 임펄스 형태의 응답은 불량 인쇄를 가져오기 때문에 인쇄물의 불량률을 높이는 원인이 되어, 안정적으로 롤을 제어할 수 있는 최적제어기법이 요구됨을 알 수 있다.

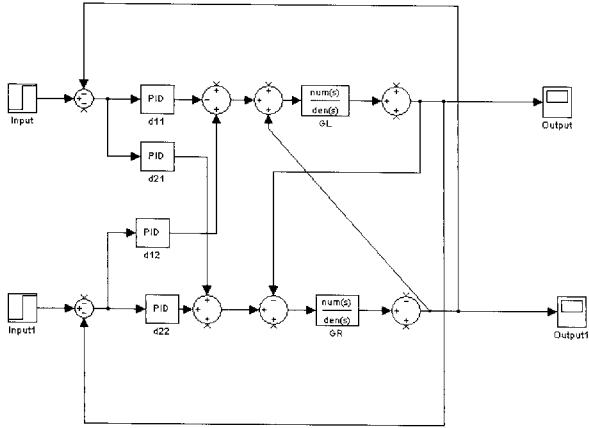


Fig. 6 Decoupling control block-diagram

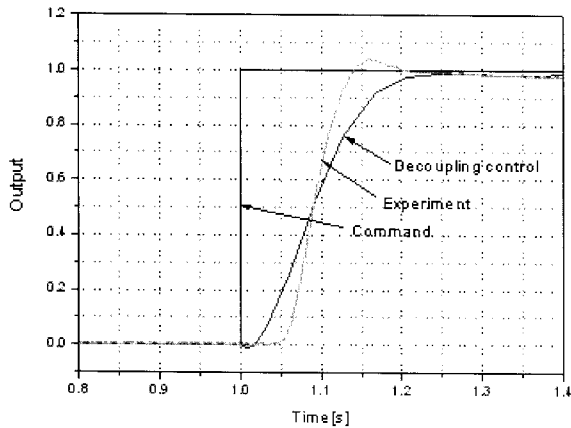


Fig. 7 Left cylinder response characteristics

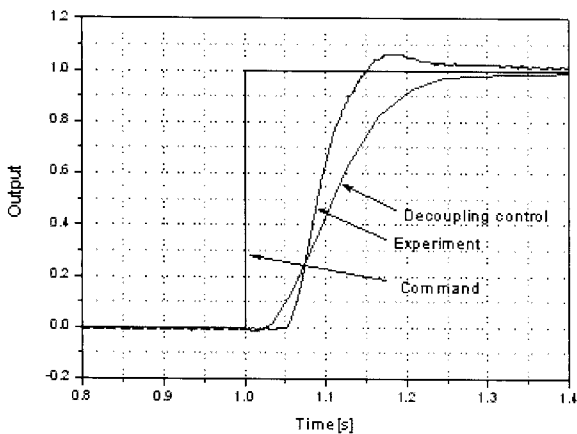


Fig. 8 Right cylinder response characteristics

Table 4 Control factors for decoupling control

Controller	d_{11}	d_{12}	d_{21}	d_{22}
PID factors	5, 5, 0.1	10, 20, 0.1	10, 20, 0.1	5, 5, 0.1

Table 5 Response results comparison between experiment and simulation

	Left		Right	
	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation
T_s	0.26	0.22	0.32	0.27
T_r	0.09	0.13	0.09	0.14
Overshoot	○	×	○	×

5. 결 론

현재 산업분야에서 크게 주목받고 있는 RFID나 스마트센서를 만들기 위하여 초정밀 인쇄기술이 요구되고 있다. 그 중에서 주목받는 연구대상이 롤투롤(Roll-to-Roll) 인쇄방식이다. 이 롤투롤 인쇄방식은 마이크로 단위의 패턴을 프린트하기 위해서 적절한 인쇄압력이 요구된다. 그 이유는 패턴의 간격이 큰 것에 사용되는 압력으로 작은 패턴에 사용하면 패턴과 패턴에 잉크가 번지는 경우가 발생하거나 또는 작은 패턴에 사용하던 압력으로 큰 패턴에 사용하면 임프레션 롤에서 블랭킷 롤로 잉크가 완전히 전사되지 못하여 인쇄성능이 떨어지는 경우가 발생하기 때문이다. 이 논문은 그러한 요구조건을 수용하기 위하여 롤투롤 인쇄방식에서 가장 중요한 인쇄 압력제어에 대한 연구 결과이다. 그 중에서도 제어대상 시스템은 롤의 양단에 실린더가 붙어있는 형태이므로 롤에 의해서 실린더 서로간의 압력간섭이 외란으로 작용하기 때문에 이 논문은 이러한 외란 제거를 위하여 디커플링 제어 기법을 사용하였으며, 시뮬레이션 결과와 시험결과를 비교 및 검토하여 디커플링 제어 기법의 우수성을 확인하였다.

결론적으로 디커플링 제어를 사용하여 실제 실험에 적용하면 롤투롤 인쇄방식에서 필요한 인쇄압력제어에 큰 성과가 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. M. Pudas and S. Leppavuori, 2004, "Uravure offset printing of polymer inks for conductors", Progress in Organic Coatings, Vol. 49, pp. 324~335.
2. T. Makela and R. Korhonen, 2003, "Roll-to-Roll method for producing polyaniline pattern on paper", Synthetic Metals, Vol. 135, pp. 41~42.
3. J. L. Shearer and B. T. Kulakowski, 1990, "Dynamic modeling and control of engineering systems", Macmillan Publishing Company and Collier Macmillan Publishers.
4. B. Shahian and M. Hassul, 1993, "Control system design using matlab", Prentice-Hall international Inc.,.
5. J. G. Bollinger and N. A. Duffie, 1988, "Computer Control of Machines and Processes", ADDISON-WESLEY PUBLIS-HING COMPANY, pp. 155~162.