롤투롤 인쇄전자용 폭방향 제어 기법

Lateral Control Methods for Roll-to-roll Printed Electronics

호 탐 탄, 신 현 훈, 이 상 윤*
(Thanhtam Ho, Hyeunhun Shin, and Sangyoon Lee)

Abstract: This paper presents the evaluation of PID and fuzzy control logic for the lateral position control of a moving web in roll-to-roll (R2R) printed electronics. In addition, we report the implementation of computer simulation software that enables us to develop the control logic in a graphic user interface and to test the controller performance in 3D dynamic environment. A mathematical model of the web dynamics is described first to explain the lateral motion of a moving web. Based on the model, PID and fuzzy controllers are designed, and embedded in the simulation software. Under the simulation conditions for fabricating RFID antenna by R2R printing, the results indicate that the fuzzy controller shows a better performance and can be more suitable for R2R multi-layer printed electronics.

Keywords: lateral control, roll-to-roll (R2R) process, printed electronics, PID control, fuzzy control

I. 서론

롤투롤(roll-to-roll 또는 R2R) 공정은 롤 형태로 감겨 있는 소재가 풀림롤에서 풀려 나와서 인쇄, 코팅, 건조 등의 공정을 거친 후, 감김롤에 감기는 과정을 연속적으로 처리하는 공정이다. 롤투롤 방식을 이용한 인쇄공정은 기존의 종이, 섬유, 필름의 가공 및 포장산업에서 경제적이고 편리한 공정으로 널리 이용되어 왔다.

최근 기계, 전자 기술의 발전과 함께 롤투롤 공정은 RFID 안테나, e-paper, 디스플레이 등을 인쇄방식으로 제조하는 인쇄전자 분야까지 폭넓게 응용되고 있다[1,2]. 이는 기존의 전자소자 생산 방식에 비해서 생산 공정의 단순화와 공정비용의 절감을 기대할 수 있는 혁신적인 기술이라고 할 수 있다. 인쇄전자 기술은 그림 1과 같이 전통적인 인쇄기술과 마이크로 전자기술의 결합을 통한 새로운 생산기술로 설명될 수 있다. 인쇄전자의 주요 시장으로 예측되는 RFID는 전도성 잉크의 상용화로 인해 금속배선의 인쇄가 가능해 졌고, 시장 요구에 가장 적절히 대응할 수 있는 기술로 인정받고 있다.

기존의 일반 잉크를 소재 위에 인쇄하는 방식은 소재 위에 작은 크기의 잉크 액적을 증착시키는 것으로 가시적인 범위 내에서 인쇄된 제품의 외관 품질을 평가를 해왔다. 그러나 전자소자를 롤투롤 방식으로 생산할 경우, 소재에 전도성 잉크를 미세하고 균일한 패턴으로 인쇄할 때, 장력의 불균형, 진동 등에 의해 소재의 폭방향 변위가 발생할 수 있다. 이 결과 소자 내에서 미세한 갈라짐이나 단락된 부분이 발생되어 전기적 특성이 저하될 수 있고, 이는 제품의 불량으로 이어지게 된다. 따라서 롤투롤 공정을 전자소자, 특히 다층 전자소자의 생산에 적용하기 위해선 소재의 폭방향 변위를 정밀하게 제어하는 기술이 필수적으로 요구된다.

일반적으로 롤투롤 공정 중에 발생되는 폭방향 변위를 방지하기 위하여 폭방향 변위 제어장치를 사용한다. 폭방향 변위 제어 장치는 이송 중인 소재의 폭방향 위치가 일정한 위치를 이탈하게 될 경우 센서를 통해 벗어난 거리를 감지하여 폭방향 변위를 제어함으로써 소재가 항상 일정한 위치로 이송될 수 있도록 한다. 대표적인 폭방향 변위 제어 장치는 가이드(guide) 시스템으로서 1-2개의 롤과 롤을 구동하기 위한 모터, 센서, 그리고 제어기로 구성된다.

소재의 폭방향 제어에 대한 연구로, 권순오 등은 웹 이송 시스템의 주요 운전변수인 웹의 장력 및 운전속도에 따라 변하는 폭 방향 위치 변위에 대한 연구를 수행하였고, 장력 변화의 영향을 고려한 폭 방향 위치 제어 방법을 제안하였다[3,4]. 또한 Seshadri 등은 하드웨어 면에서 개선을 도모하였고, 이에 방향성을 가진 민감한 광섬유와 웹의 끝에서 일어나는 빛의 산란 현상을 이용하는 센서를 개발하였다[5].

본 논문에서는 소재의 폭방향 제어를 위한 PID와 퍼지 제어 기법을 소개한다. 광범위하게 사용되는 PID 제어의 결점을 보완하기 위한 방법으로 퍼지제어 로직을 개발하였고, 이를 자체 개발한 시뮬레이션 소프트웨어를 통하여 검증하였다. 이는 특히 RFID 안테나를 롤투롤 인쇄 방식으로 생산하기 위한 시스템에 적용하기 위한 것으로서, 기타 전자소자의 롤투롤 인쇄 방식 생산에도 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

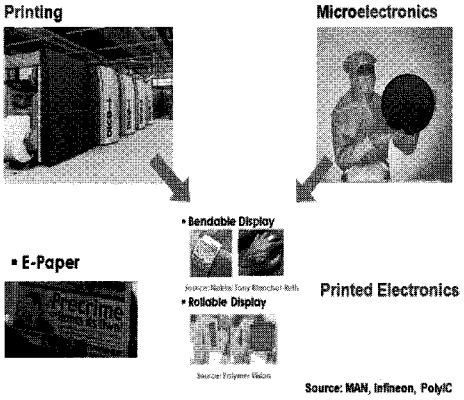


그림 1. 인쇄전자 기술.
Fig. 1. Printed electronics technology.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2009. 5. 15., 채택확정: 2009. 6. 15.
호탐탄, 신현훈, 이상윤: 건국대학교 기계설계학과
(thanhtam.h@gmail.com/shinhh28@konkuk.ac.kr/slee@konkuk.ac.kr)
※ 이 논문은 서울시 산학연 협력사업(10848)의 지원과 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원(No. K20701040600-09A0404-05410)을 받아 수행된 연구임.

II. 시스템의 수학적 모델

폭방향 위치 제어 기법의 개발을 위해서 우선 소재의 이송과 가이드 시스템의 수학적 모델을 소개한다. 이 모델은 Shelton의 1차 모델 [6]에 기초한 것으로 소재의 동역학 방정식을 상대적으로 단순하게 1차 미분방정식의 형태로 유도한 것이다. 그리고 가이드 시스템의 모델 개발을 위해서, 두 개의 평행한 롤의 각도를 변화시켜서 소재의 폭방향 변위를 제어하는 변위형 가이드를 선정하였다. 변위형 가이드는 소재의 폭이 좁고 유연하며 가이드 시스템의 설치공간이 제한될 경우에 적합하다.

Shelton의 1차 모델은 소재가 진입 시 롤러에 수직하게 정렬되어 있다는 정적 스티어링(steering)의 가정을 바탕으로 유도된 모델이다. 이 모델은 소재의 질량과 강성을 무시한 이상적 모델이지만, 큰 장력, 낮은 전단 탄성계수, 짧은 스팬(span), 과도한 소재의 굴곡이 있는 경우가 아니라면, 소재의 폭방향 거동을 해석하는데 널리 사용될 수 있다.

입력 에러가 있을 때, 소재의 이상화된 거동을 그림 2에 도시하였다. 롤러와 웹 사이에 미끄러짐이 없다고 가정하면, 이송중인 소재 끝단의 폭방향 속도는 하류(downstream) 롤러의 각도가 θ_r 이고, x축에 대한 소재의 각도가 θ_L 일 때, 두 각의 차이에 비례한다. 따라서 소재의 폭방향 변위는 식 (1)과 같고, 이 식에서 l은 두 롤러 사이의 거리이다.

$$\Delta y = l(\theta_L - \theta_r) \tag{1}$$

하류 롤러에서 소재의 폭방향 속도는 다음 식과 같이 1차 미분방정식의 형태로 얻을 수 있다. 이 때 V는 라인의 속도이고, z는 롤러의 축방향 변위이다.

$$\frac{dy}{dt} = V(\theta_L - \theta_r) + \frac{dz}{dt} \tag{2}$$

특히 그림 3과 같이 두 개의 롤러가 평행하고 고정되어 있는 경우, 식 (2)의 마지막 항이 0이 되므로, 라플라스 변환을 통해 아래의 식을 얻을 수 있다. 이 모델이 IV, V절에 기술되어 있는 폭방향 제어 기법 개발에 사용되었다.

$$sY_L(s) = -\frac{V}{L}Y_L(s) + \frac{V}{L}Y_0(s) \tag{3}$$

이 식에서 시정수를 $\tau = L/V$ 로 설정하면 다음의 식을 얻는다.

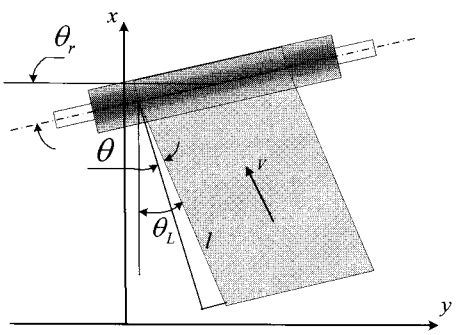


그림 2. 이상적인 조건 하에서 소재의 거동 모델.
Fig. 2. Behavior of an idealized web.

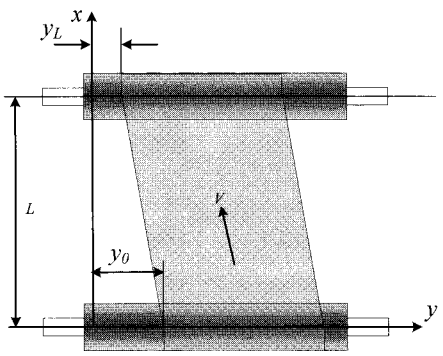


그림 3. 고정된 평행 가이드의 모델.
Fig. 3. Model of fixed parallel guides.

$$\frac{Y_L(s)}{Y_0(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{4}$$

III. 시뮬레이션 소프트웨어

이 절에선 소재의 폭방향 제어 시뮬레이션을 위해서 자체 개발한 소프트웨어 LACOSIM(LAteral motion and COntrol SIMulation)을 소개한다. Matlab, ADAMS, Recurdyn 등 기존 상용 소프트웨어의 경우, 여러 가지 장점을 보유하고 있지만, 동적 시뮬레이션의 시각화나 계산의 복잡성 등의 문제점을 갖고 있고, 롤투롤 시스템의 시뮬레이션 모델이 제공되지 않는 단점이 있어 자체 소프트웨어의 개발을 시도하였다.

LACOSIM은 C++ 언어와 그래픽스 라이브러리인 OpenGL을 이용하여 개발되었다. 이 소프트웨어의 첫번째 특징은, 롤투롤 시스템에서 이송중인 소재와 가이드 시스템의 동적인 시뮬레이션이 가능하다는 것이다. 그리고 PID와 퍼지 등 제어 기법이 탑재될 수 있고, 제어기의 작동 및 결과를 그래픽 인터페이스를 통해서 확인할 수 있다. 또한 LACOSIM 자체가 실제 가이드 시스템의 제어 소프트웨어로 사용될 수 있다.

LACOSIM 소프트웨어의 사용자 인터페이스는 그림 4에 나타난 것과 같이 세 가지 윈도우, 즉 Main view, Graph, Control bars/dialogue 윈도우로 구성되어 있다. 우측 상단의 Main view 윈도우에서 변위형 가이드 시스템의 3차원 모델을 확인할 수 있다. 그리고 시뮬레이션 결과는 좌측의 Graph 윈

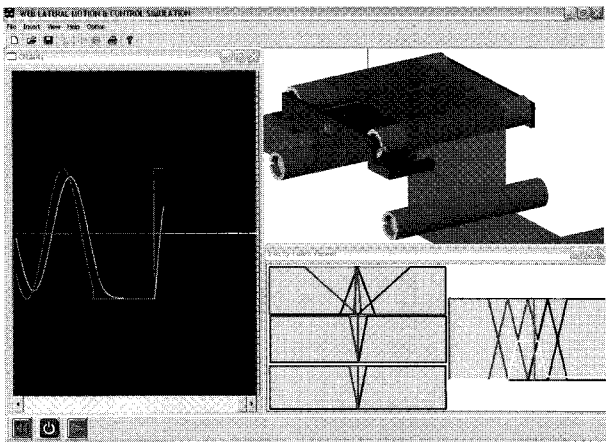


그림 4. LACOSIM의 사용자 인터페이스.
Fig. 4. User interface of LACOSIM.

도우에 나타나고, 우측 하단의 control bars/dialogue 윈도우에서 가이드 시스템과 소재의 속성 값, 제어기 게인(gain) 등을 조절할 수 있다.

LACOSIM에서 모든 상미분방정식은 4차 Runge-Kutta 수치해석방법(RK4) [7,8]을 이용해서 풀이하였다. 상미분방정식의 풀이 결과는 제어기의 출력과 결합되어 가이드와 소재의 3차원 그래프로 표시 된다. 즉 소재의 가이드의 움직임이 Main view 윈도우에 나타나고, 센서의 출력값이 Graph 윈도우에서 도표로 표시된다.

IV. PID 제어

롤투롤 공정에서 소재의 이송 시 발생하는 폭방향 변위의 제어를 위해서 먼저 PID 제어 모델을 적용하였다. 이 때 사용한 변위형 가이드 시스템의 모델은 그림 5와 같다[4]. 그림에서 두 개의 변위형 가이드인 DG1과 DG2가 사용되고 있는데, DG1은 사인 또는 스텝 형태의 폭방향 입력 에러를 발생시키기 위한 것이고, DG2가 발생된 에러를 제어하기 위한 가이드이다. 실제 롤투롤 인쇄전자 라인에선 소재에 전자소자의 패턴을 인쇄하는 공정 직전에 가이드 시스템을 설치하는 것이 가장 바람직하다.

그림 5의 모델에서 세 개의 센서가 라인의 S, T, O 점에 설치되어 있다. 이 센서는 소재의 끝을 감지하기 위한 것으로서 흔히 적외선센서가 사용된다. S점에 설치된 센서는 DG1 가이드에 의해서 발생된 에러의 크기를 측정하기 위한 것이고, T점의 센서는 DG2에서 제어가 시작되기 전의 에러 크기를 측정한다. 그리고 마지막 O점에 설치된 센서가 제어 후의 에러값을 측정하며, 이 값이 제어기로 피드백 된다.

PID 제어기의 블록선도는 그림 6과 같다. DG1 가이드에 의해서 폭방향 변위가 발생되고, 이는 S점 센서에 의해서 측정된다. 이 변위는 이어지는 네 개의 스팬을 거쳐서 DG2의 하류 롤러에 전달된다. 이 때 각 스팬의 수학적 모델은 II절에서 기술된 고정된 평행 가이드 모델을 사용하였다.

LACOSIM 소프트웨어를 이용하여 설계된 PID 제어기의 성능을 시험하였다. 이 때 소재의 폭방향 입력 에러는 사인 함수와 스텝 함수를 사용하였고, 기타 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

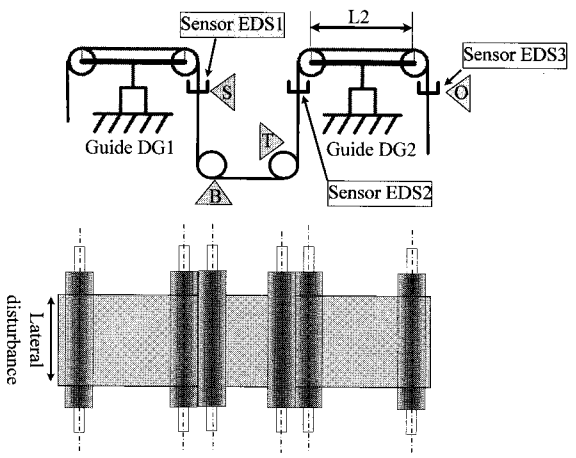


그림 5. 변위형 가이드 시스템의 모델.
Fig. 5. Model of displacement guide system.

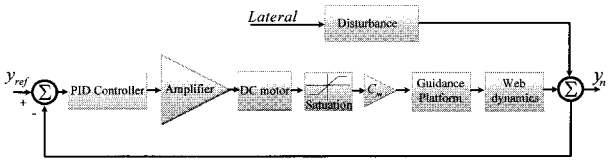


그림 6. PID 제어 시스템의 블록선도.
Fig. 6. Block diagram of PID control.

표 1. 시뮬레이션 조건.
Table 1. Simulation conditions.

Parameter	Value
Length span on guide	0.380 m
Distance from roller to center point	0.380 m
Operating tension	3 kg
Web line speed	0.5 m/s
Web material	PET
Frequency of sine lateral disturbance source	0.1 Hz
Amplitude of sine lateral disturbance source	0.01 m
P gain of PID controller	98
I gain of PID controller	21
D gain of PID controller	15

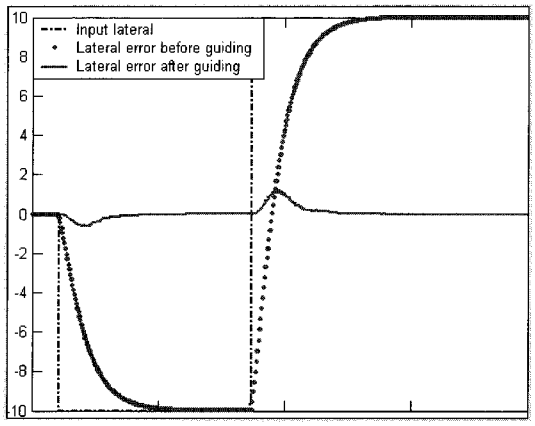


그림 7. 스텝 입력 에러의 경우 PID 제어 결과.
Fig. 7. PID control result to step input error.

이 조건은 실제 변위형 가이드인 Symat 50 (Fife)에 기초한 것이고, PET 소재와 분당 30 m의 라인 속도는 롤투롤 그라비어 인쇄 방식으로 전자소자를 생산할 경우를 고려한 것이다. 또한 10 mm의 에러 진폭은 저속의 라인이라는 것을 감안할 때, 상당히 크게 설정된 값이라고 할 수 있다.

PID 제어의 시뮬레이션 결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 이 때 P, I, D 게인은 표 1과 같다. 그림 7은 입력 에러가 스텝 함수 형태이고, 그림 8은 사인 함수 형태인 경우로서, 두 경우 모두 진폭은 10 mm로 동일하다. 그림에서 청색, 녹색, 적색 곡선은 각각 그림 5 모델의 S, T, O 점에서 센서의 출력값에 대응된다.

그림 7로부터 스텝 입력 에러의 경우, 설계된 PID 제어기가 소재의 최대 폭방향 변위를 약 1.1 mm 내에서 제어할 수 있음을 알 수 있다. 또한 사인 입력 에러의 경우, 그림 8로부터 최대 0.8 mm 내에서 폭방향 변위를 제어할 수 있음을 알 수 있다.

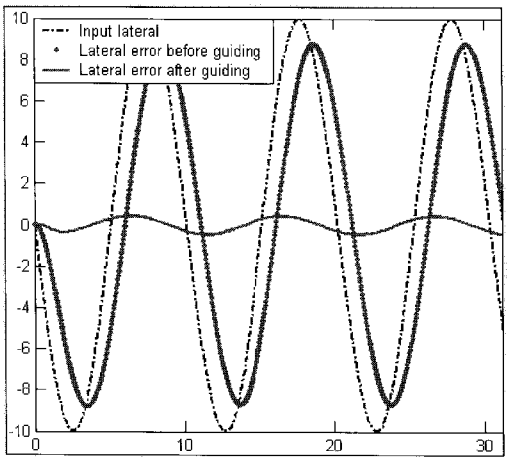


그림 8. 사인 입력 에러의 경우 PID 제어 결과.
Fig. 8. PID control result to sine input error.

PID 제어기의 경우, 대상 전자소자의 폭방향 제어 정밀도가 1 mm 정도일 때 적용이 가능할 것으로 보이나, 과도 에러가 큰 점이 가장 큰 문제라고 할 수 있다. 이는 제어기로 피드백 되는 신호 자체에 이미 포함되어 있는 에러 때문에 피할 수 없는 문제가 되는데, 입력 에러의 주파수와 진폭이 더 커진다면 PID 제어기는 시스템의 요구 조건을 충족하지 못할 수 있다.

V. 퍼지 제어

PID 제어기의 단점을 보완하기 위한 방법으로 퍼지 제어 기법을 도입하였다. 이 때 입력과 출력 사이의 관계를 정의하는 퍼지 추론(inference)으로 Mamdani 방식 [9]을 적용하였다. 퍼지 제어의 블록선도는 그림 9와 같다. 이는 그림 6의 PID 제어 선도와 유사하나, 점선 상자로 표시되어 있는 퍼지 제어기가 입력공간과 출력공간 사이의 관계를 지정하고 있다.

폭방향 제어를 위하여 설계된 퍼지 시스템의 입력은 에러(e), 에러율 ($\dot{e}$), 에러합 (Σe)의 세 가지 입력변수로 구성되고 각 입력변수는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$e(k) = y_{ref}(k) - y_n(k) \tag{5}$$

$$\dot{e}(k) = e(k) - e(k-1) \tag{6}$$

$$\Sigma e(k) = \Sigma e(k-1) + e(k) \tag{7}$$

식 (5)에서 $y_{ref}(k)$ 는 하류 스팬에서 원하는 폭방향 위치이고 $y_n(k)$ 는 실제 센서에서 측정된 값이다. 그리고 입력변수 e에 대해 그림 10(a)와 같이 네 가지 퍼지변수를 정의하였다: So Negative (SoNeg), Normal, Small, So Positive (SoPos). 또한

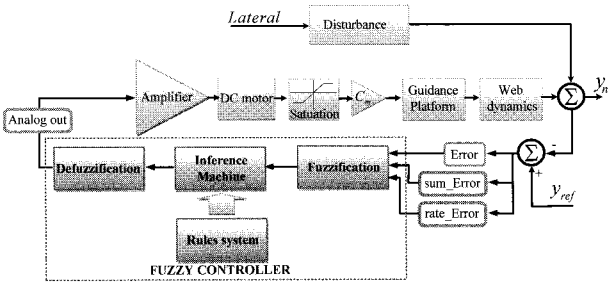


그림 9. LACOSIM의 퍼지 제어 모델.
Fig. 9. Fuzzy control model of LACOSIM.

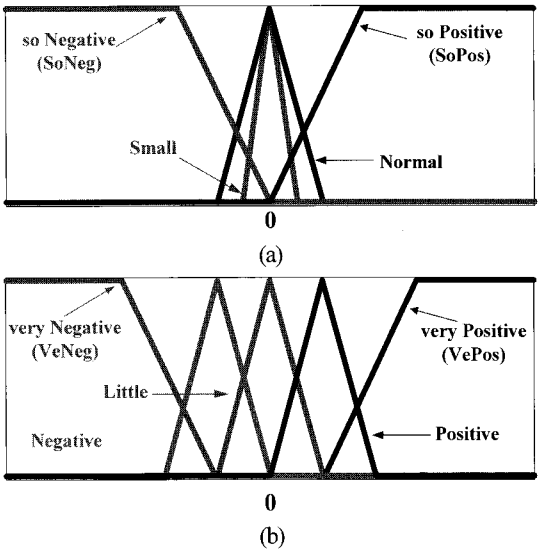


그림 10. (a) 에러 변수의 소속함수 (b) 출력 변수의 소속함수.
Fig. 10. (a) Membership functions of Error variable (b) Membership functions of analog_out linguistic variable.

에러율과 에러합의 경우, 보조 입력변수이므로 두 가지 퍼지변수를 정의하였다: Negative (Neg), Positive (Pos). 모든 퍼지변수의 형태는 그림 10과 같이 삼각형 또는 사다리꼴 형태가 되도록 설계하였다.

출력변수인 analog output (analog_out)은 가이드 시스템의 모터에 적용되는 전압이 되고, 이에 대한 퍼지변수를 그림 10(b)와 같이 다섯 가지로 정의하였다: Very Negative (VeNeg), Negative (Neg), Little, Positive (Pos), very Positive (VePos). 그리고 입력의 경우와 마찬가지로 출력의 퍼지변수들의 형태도 삼각형 또는 사다리꼴로 정하였다. 이것은 이후 비퍼지화의 계산 과정을 매우 단순하게 할 수 있는 장점이 있다.

표 2에 기술된 것과 같이 LACOSIM의 퍼지 규칙을 일반

표 2. 퍼지 규칙 시스템.
Table 2. Fuzzy rule system.

Rule No.	Antecedent	Consequent
1	IF Error IS so negative	THEN analog output SHOULD BE very positive
2	IF Error IS so positive	THEN analog output SHOULD BE very negative
3	IF Error IS normal AND rate of Error is negative	THEN analog output SHOULD BE positive
4	IF Error IS normal AND rate of Error is positive	THEN analog output SHOULD BE negative
5	IF Error IS small AND sum of Error is negative	THEN analog output SHOULD BE positive
6	IF Error IS small AND sum of Error is positive	THEN analog output SHOULD BE negative
7	IF Error IS small	THEN analog output SHOULD BE little

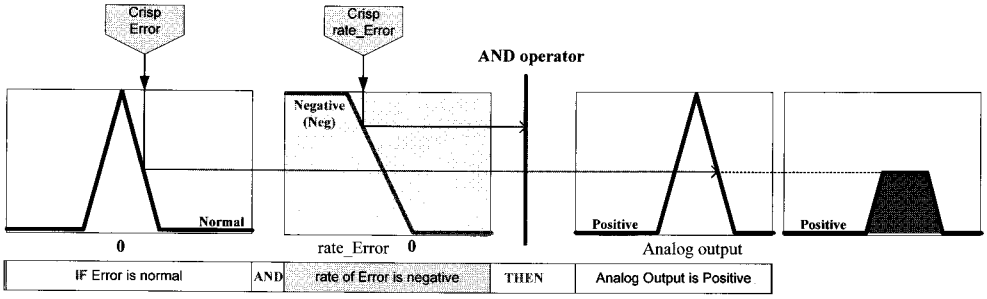


그림 11. 퍼지 규칙 시스템의 적용 예.
Fig. 11. Example of the application of fuzzy rule system.

적인 PID 제어기의 규칙과 유사하게 설정하였다. 전체 일곱 가지 규칙 중 1, 2, 7번 규칙은 비례제어와 유사성이 있고, 3, 4번 규칙은 미분제어, 그리고 5, 6번 규칙은 적분제어와 관련이 있다.

퍼지 제어에서 함의(implification) 과정은 전제부(antecedent)의 평가 결과를 결론부(consequent)의 소속함수에 적용하는 것이다. 이 때 가장 흔한 방법은 결론부 소속함수를 전제부가 참인 수준에서 잘라내는 것이다. 그림 11에서 표 2의 퍼지 규칙 중 세 번째 경우의 예를 볼 수 있다. 이 그림에서 명확한(crisp) 입력값으로부터 함의 결과를 얻는 과정이 나타나 있다.

비퍼지화는 명확한 출력 값을 얻는 과정으로서 전체 2차원 영역의 중심을 계산하는 과정을 필요로 한다. 이것은 입력 값이 연속적으로 변화할 때 출력 값도 연속적으로 변화하는 장점이 있다. 특히 제안된 퍼지제어 기법의 경우, 전체 2차원 영역을 여러 개의 사각형 또는 사다리꼴 영역으로 분할할 수 있으므로 중심의 계산 과정이 매우 단순하여지는 이점이 있다. 만일 n개의 소영역이 있다면 중심, 즉 명확한 출력 값을 식 (8)과 같이 계산할 수 있다. 그림 12에 이 과정을 도시하였다.

$$x_{COG} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i} \tag{8}$$

IV절의 PID 제어와 같은 조건 하에서 LACOSIM을 이용해서 퍼지 제어기의 성능을 시험하였다. 즉 분당 30 m의 라인 속도와 10 mm의 에러 진폭 조건을 적용하였고, 시뮬레이션 결과는 그림 13, 14와 같다. PID 제어 결과와 비교할 때, 퍼지 제어의 최대 에러가 10배 이상 감소했음을 알 수 있다. 즉

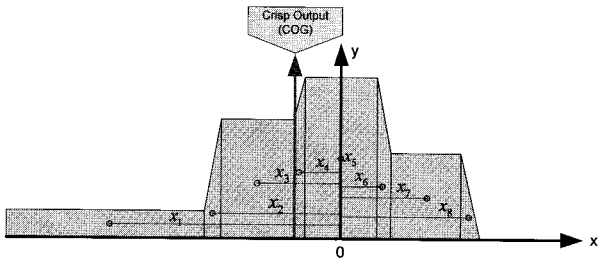


그림 12. LACOSIM의 디퍼지화 절차.
Fig. 12. Defuzzification process in LACOSIM.

최대 에러의 크기 0.1 mm 이하로 감소했으므로 상당한 정밀도를 요구하는 인쇄전자 분야에도 적용이 가능할 수 있을 것으로 평가된다.

전반적으로 PID 제어와 비교할 때, 퍼지제어의 첫째 장점은 수학적 개념이 매우 단순하므로 임베디드 시스템에 더 적합하다는 것이다. 그리고 어떤 종류의 입력과 출력 조건에도 적합한 퍼지 시스템의 개발이 가능하고, 한 시스템에 적용된 퍼지 제어기를 다른 시스템에 적용 시 수정이 필요한 정도가 적다는 장점이 있다.

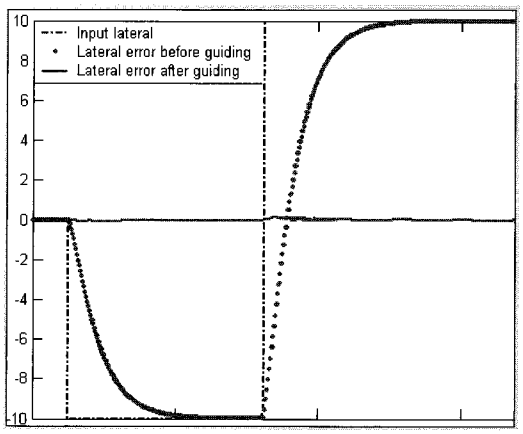


그림 13. 스텝 입력 에러의 경우 퍼지 제어 결과.
Fig. 13. Fuzzy control result to step input error.

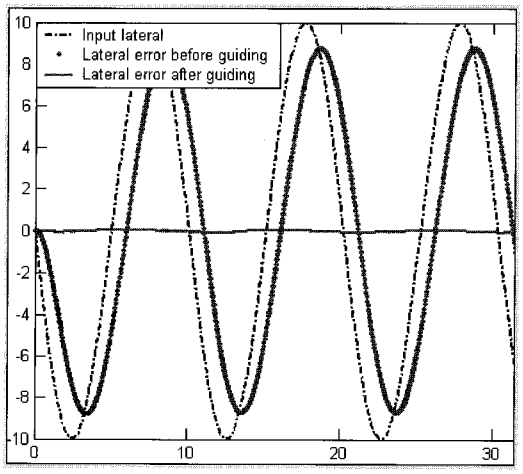


그림 14 사인 입력 에러의 경우 퍼지 제어 결과.
Fig. 14. Fuzzy control result to sine input error.

VI. 결론

롤투롤 인쇄전자 기술의 성공을 위해서 필수적인 소재의 폭방향 위치제어를 위한 PID와 퍼지 제어 기법을 소개하였다. 두 제어 기법의 비교를 통해서 널리 사용되고 있는 PID 제어 기법의 결점을 보완하기 위하여 퍼지 제어 기법이 적용될 수 있음을 확인하였다. 또한 제어 기법의 개발 및 제어기의 성능을 3차원의 동적인 환경에서 시험할 수 있는 소프트웨어 LACOSIM에 대하여 기술하였다.

롤투롤 인쇄공정을 통하여 RFID 안테나를 제작하는 공정 중에 변위형 가이드 시스템을 이용하여 소재의 폭방향 위치를 제어하는 것을 LACOSIM에서 시뮬레이션 하였다. 이 시뮬레이션에서 PID와 퍼지 제어기를 적용한 결과, 에러의 크기 면에서 퍼지 제어기의 성능이 우월함을 확인 할 수 있었다. 퍼지 제어기의 경우 에러의 크기를 0.1 mm 이내로 제어할 수 있으므로, 단층 인쇄가 필요한 RFID 안테나 뿐만 아니라 더 높은 폭방향 위치 정밀도를 요구하는 다층 전자소자의 롤투롤 생산에도 적용이 가능할 것으로 평가된다.

다양한 전자소자의 저비용 대량생산이 요구되는 시점에서, 롤투롤 인쇄전자 기술은 획기적인 해결 방안이 될 수 있다. 하지만 이 기술이 현실적으로 성공적인 방법이 되려면 다양한 제어 기술의 개발이 필요하고, 이러한 점에서 제안된 폭방향 위치 제어 기법과 시뮬레이션 소프트웨어가 유용하다고 할 수 있다.

참고문헌

[1] H. Kopola, "Technological challenge and state-of-the art in R2R printed electronics," *Proceedings of 1st International Conference on R2R Printed Electronics*, pp. 31-48, 2008.

[2] 윤성철, 임종선, 이창진, "인쇄전자소자: 고해상도 인쇄공정기술의 현황 및 전망," 고분자과학과 기술, 제18권 제3호, pp. 238-245, 2007. 6.

[3] 권순오, 사행거동 및 제어에 미치는 장력의 영향에 대한 연구, 건국대학교 박사학위 논문, 2005.

[4] K. H. Shin, S. O. Kwon, and S. H. Song, "Feedforward control of the lateral position of a moving web using system identification," *IEEE Transactions of Industry Application*, vol. 40, no. 6, pp. 1637-1643, 2004.

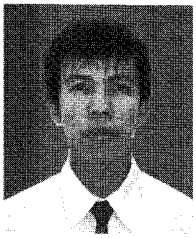
[5] A. Seshadri and P. R. Pagilla, "Design and development of a new edge sensor for web guiding," *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 698-706, 2007.

[6] J. J. Shelton and K. N. Reid, "Lateral dynamics of an idealized moving web," *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control,* vol. 93, pp. 187-192, 1971.

[7] R. L. Johnston, *Numerical Methods: A Software Approach*, John Wiley, 1982.

[8] S. Salleh, A. Y. Zomaya, S. Olariu, and B. Sanugi, *Numerical Simulations and Case Studies Using Visual C++*, John Wiley, 2005.

[9] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1974.

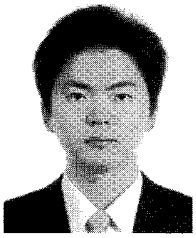


호 탐 탄

2005년 호치민대학교 메카트로닉스학과(공학사). 2008년 건국대학교 기계설계학과(공학석사). 2008년~현재 건국대학교 기계설계학과(공학박사 과정). 관심분야는 생체모방 로봇, 롤투롤 시스템의 폭방향 변위제어, 컴퓨터 시뮬레이션.

이 상 윤

1993년 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1996년 KAIST 자동화 및 설계공학과(공학석사). 2002년 Johns Hopkins University 기계공학과(공학박사). 2003년~현재 건국대학교 기계설계학과 교수.관심분야는 로봇공학 및 자동화, 생체공학.



신 현 훈

2007년 건국대학교 기계공학부(공학사). 2009년 건국대학교 기계설계학과(공학석사). 관심분야는 롤투롤 시스템의 폭방향 변위 제어, 가이드 시스템, 기구설계.