

잉크젯 프린터 용지 이송 장치의 정밀 위치 제어를 위한 이중 PID 제어기의 설계

A Dual PID Controller for High-Accuracy Positioning of Ink Jet Printer Media Advance System

조 영 완*
(Young Wan Cho)

Abstract : The ink jet printer media advance system is required to be exactly driven to the target position via tracking the reference velocity profile to obtain the high quality print image. A single gain PID controller is not sufficient to fulfill the control objectives, the exact velocity tracking and the accurate positioning, at the same time. A dual PID controller and its switching strategy are presented in this paper to achieve the control objectives. The media advance system is controlled by two separate PID controllers, one of which is for velocity control, and the other is for position control. A PID controller controls the velocity of the media advance system until it reaches the predetermined switching position. When the media advance system passes the predetermined position, the controller is switched to the other PID controller which is more profitable for exact positioning. The switching position is determined by the estimated stop distance. The simulation and experimental results are presented to show the validity and effectiveness of the proposed controller.

Keywords : dual PID control, media advance system, positioning

I. 서론

잉크젯 프린터(Inkjet Printer)는 그 화상을 인쇄함에 있어 헤드 폭의 제한으로 페이지 인쇄법이 아닌 라인 인쇄법을 채택할 수 밖에 없는 기술적 제한을 가지고 있어 한 라인을 인쇄한 후 다음 라인을 인쇄하기 위해 용지의 이송을 필요로 한다. 인쇄 용지의 이송은 용지 이송 롤러와 압착 롤러의 밀착 및 용지 이송 롤러의 회전에 의해 이루어지는데 용지 이송 롤러의 회전량은 인쇄 용지의 이송량과 밀접한 관련을 갖게 된다. 정해진 이송량에 비해 용지의 이송량이 적으면 화상과 화상 사이의 흑선이 형성되고, 정해진 이송량에 비해 용지의 이송량이 많으면 화상과 화상 사이의 백선이 형성되므로 정해진 양의 롤러의 회전은 잉크젯 프린터의 화상 품질에 절대적 영향을 미친다[1,2,3]. 또한 잉크젯 프린터는 정밀한 위치 제어와 함께 용지의 이송에 있어 그 동작 속도가 소음 유발과 밀접한 관련이 있어 이송 중의 속도 제어의 필요성이 동시에 요구된다.

이러한 용지 이송 장치의 동적 구동원으로서 종전에는 주로 스텝 모터를 사용하였기 때문에 속도와 위치의 동시 제어에 대한 요구에서 자유로웠다[4]. 그러나 스텝 모터는 DC 모터에 비해 구동 소음이 심하고 고속 운전시 토크 특성의 제한으로 속도 제한이 따른다는 단점이 있어 최근 저소음, 고속을 추구하는 고급 프린터 기종은 이송 장치의 구동원으로서 DC 모터를 채용하는 경향이 있다. DC 모터의 제어를 위해 종래에는 주로 단순 PID 제어기를 사용하여 왔으나[7,8] 이는 속도와 위치 제어 품질을 동시에 만족시키기 어렵다는 한계

를 지니고 있다. 이를 해결하기 노력으로 적응성 및 강인성을 갖는 제어기의 적용이 시도되고 있으나[9,10,11,12] 잉크젯 프린터의 인쇄 해상도가 증가함에 따라 더욱 정밀한 위치 제어가 요구되고 용지 이송 장치에서 발생하는 여러 가지 비선형적 요소로 인하여 기존에 적용되었던 제어 알고리즘으로는 원하는 정밀도의 속도 및 위치 제어가 힘들어지게 되었다.

본 논문에서는 속도 및 위치 제어 요구를 동시에 만족하고 향상된 위치 제어 정밀도를 얻기 위하여 두 개의 PID 제어기를 속도 및 위치 제어용으로 설계하고 이를 전환하는 방법을 제안한다. 용지 이송 롤러를 구동하는 전구간을 속도를 추종하는 이송모드와 정지 위치를 제어하는 정지모드로 구분하여 이송모드에서는 속도 제어에 적합한 PID 제어기를 사용하여 정해진 시간에서 제어하고 정지모드에서는 위치 제어를 위해 설계된 PID 제어기를 정해진 위치에서 제어한다. 위치 제어용 제어기는 정밀도를 향상시키기 위하여 정지 위치를 몇 단계로 나누고 정해진 위치에서는 속도를 보상하여 예측거리를 구동할 수 있도록 속도에 따른 가변 게인을 사용한다. 속도 제어에서 위치 제어로의 제어기 전환 시점은 이송 롤러의 위치에 의해 결정되는데 전환시 롤러의 이송 명령 속도를 바탕으로 정지할 때까지 제어에 의한 구동 거리를 예측함으로써 미리 정해진다. 본 논문에서 제안하는 제어 방법은 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 효용성을 검증한다.

II. 시스템 모델링

1. 잉크젯 프린터 용지 이송 장치

본 논문에서 제어하고자 하는 대상 시스템이 되는 잉크젯 프린터의 용지 이송 장치는 그림 1과 같이 구성되어 있다. 용지는 용지 이송롤러와 압착롤러 사이에서 압착력에 의한 마찰력과 롤러의 회전에 의해 이송되는데 용지 이송의 직접

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 7. 29., 채택확정 : 2004. 2. 9.

조영완 : 서경대학교 컴퓨터공학과(ywcho@skuniv.ac.kr)

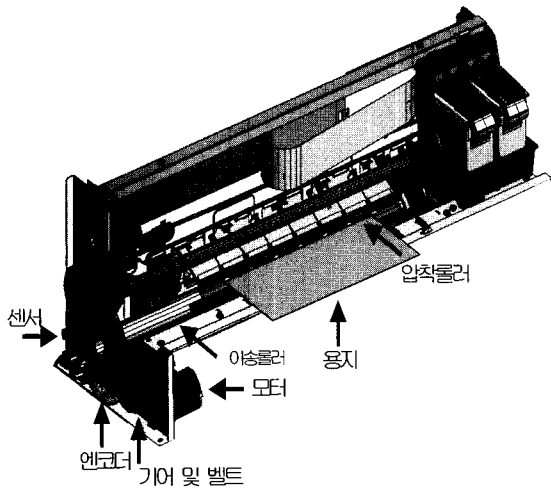


그림 1. 용지 이송 장치의 구성.
Fig. 1. Media Advance System.

적인 구동원은 이송용 롤러이며 용지 이송롤러는 벨트와 기어를 통해 모터로부터 전달 받은 동력원에 의해 구동된다. 이송롤러의 한 쪽 면에 부착된 엔코더와 센서를 통해 측정된 롤러의 회전 속도 및 위치는 PWM 방식으로 구동되는 DC 모터에 의해 제어된다.

모터에 전압이 인가되면 모터 권선의 저항과 인덕턴스에 따라 전류가 야기되며 이 전류에 비례하는 토크가 모터 축에서 발생하여 모터 회전자를 회전시키며 기어와 벨트를 통해 용지 이송 롤러에 동력이 전달되어 용지를 이송하게 된다. 이를 수학적으로 기술하면 모터에 인가되는 전압으로부터 야기되는 전류는 (1)로 표현된다.

$$V_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + K_e \omega_m \quad (1)$$

여기서, V_a 와 i_a 는 각각 전기자 전압, 전류를 나타내고 R_a 와 L_a 는 전기자의 저항과 인덕턴스를 나타내며 ω_m 은 모터 축의 각속도, K_e 는 역기전력 상수를 나타낸다. 전기자에 야기된 전류에 비례하는 토크에 의해 발생하는 회전자의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$K_t \cdot i_a = J_m \dot{\omega}_m + B_m \omega_m + \tau_1 + f_m \quad (2)$$

여기서, K_t 는 토크 상수, J_m 은 모터의 회전 관성, B_m 은 모터의 점성 마찰 계수, f_m 은 모터 마찰 부하를 나타내며 τ_1 은 부하를 구동하기 위한 모터 축에서의 구동 토크를 나타낸다.

모터 축에서의 구동 토크와 용지 이송 롤러 축에서의 구동 토크, 회전각 및 회전각속도는 모터 축과 이송롤러 사이의 감속 기어에 의해 다음 (3)과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{\theta_r}{\theta_m} = \frac{r_m}{r_r} = \frac{\omega_r}{\omega_m} = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{1}{G} = G_r \quad (3)$$

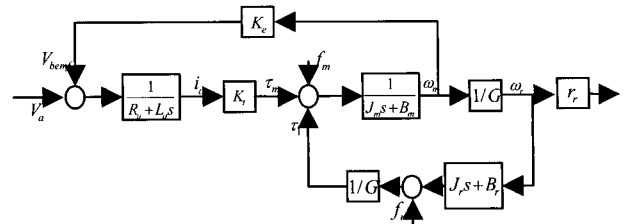


그림 2. 용지 이송 장치의 블록 다이어그램.
Fig. 2. Block diagram of media advance system.

또한 이송 롤러 축으로 전달된 토크에 의해 발생하는 롤러의 운동 방정식은 다음 (4)와 같이 나타낸다.

$$\tau_2 = J_r \dot{\omega}_r + B_r \omega_r + f_r \quad (4)$$

여기서, τ_2 는 이송 롤러 축에서의 부하 구동 토크, ω_r 은 롤러의 회전각속도를 나타내며 J_r , B_r , f_r 은 각각 롤러의 회전 관성, 점성 마찰 계수, 마찰 부하를 의미한다. (2), (3), (4)로부터 모터 축에 발생된 토크로부터 이송 장치를 포함한 부하를 구동할 때의 운동 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_t \cdot i_a = J \dot{\omega}_m + B \omega_m + f_L \quad (5)$$

여기서, $J = J_m + G_r^2 J_r$ 이고 $B = B_m + G_r^2 B_r$ 이며 $f_L = f_m + G_r f_r$ 이다. 모터에 인가되는 전압으로부터 용지 이송 롤러의 선속도까지의 운동방정식을 블록 다이어그램으로 나타내면 그림 2와 같다.

III. 이중 PID 제어기

1. 제어기 구조

일반적으로 모터의 회전량을 제어하는 방법은 크게 속도 정보의 궤환(Feedback)과 속도 제어를 통한 간접적인 위치 제어와 위치 정보의 궤환을 통한 위치의 직접적 제어 두 가지로 나뉜다. 위치의 직접적인 제어는 제어 기법상 정지 부근에서 부하의 마찰 변동이나 모터의 특성 변화 등 고려하기 어려운 비선형적인 요소에 의해 정상 상태 에러가 발생하기 쉬우므로 종료 위치에 도달할 때까지의 속도 프로파일을 만들고 이를 추종함으로써 간접적으로 원하는 위치에 도달하게 하는 위치 제어 방법이 많이 사용된다. 즉 시작 지점으로부터 목표 지점으로 모터를 회전시키기 위해서 그림 3에서와 같이 목표지점으로 회전할 때까지 모터가 추종해야 할 속도를 시간 및 위치에 따라 생성하면서 모터가 이를 추종하여 원하는 목표 위치에 도달하게 한다. 이 때 모터는 정지하기 전에 정지 위치의 정밀도를 높이기 위하여 저속으로 감속한 후 정지하게 되는데 저속으로 감속하고 난 후 정지하기 시작할 때까지를 이송 모드라 하고 정지 시작부터 정지할 때까지를 정지 모드라 한다. 이처럼 모터는 원하는 지점으로 회전하기 위해 가속, 정속, 감속을 거치게 되는데 각 구간에서 동일한 계인의 PID 제어기를 사용하는 경우 이송 모드에서 최적으로 설계되었던 PID 제어 계인이 정지 모드에서는 속도와 위치 추종 성능을 저하하게 한다. 이는 정지 모드 이전의

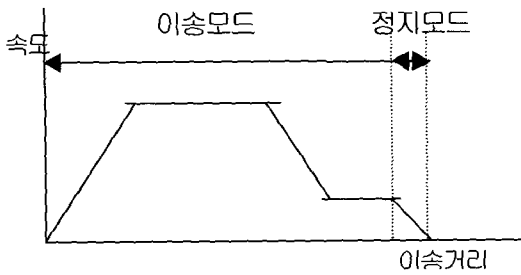


그림 3. 기준 속도 프로파일과 제어모드.

Fig. 3. Reference Velocity Profile and Control Mode.

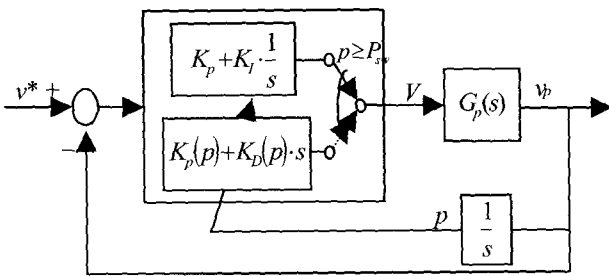


그림 4. 이중 PID 제어기의 구조.

Fig. 4. Structure of Dual PID Controller.

이송 모드에서 속도의 정상 상태 오차를 없애기 위해 필요한 적분 계인이 정지 모드에서 빠른 시간에 줄지 않아 감속 속도를 추종하는데 지연이 생기게 하기 때문이다. 따라서 정지 모드에서는 이송 모드에서 적용하였던 PID 계인과 다른, 즉, 이송 모드에서의 적분 계인의 영향을 줄이고 댐핑 효과가 있는 미분 계인이 적용된 PID 제어기를 사용함으로써 효과적인 제어를 수행할 수 있다.

그림 4는 이와 같이 속도 제어기를 미리 정해진 위치에서 위치 제어기로 전환하고 위치 제어 모드에서는 위치에 따라 속도 오차를 보상하는 계인을 가지는 구조의 이중 PID 제어기를 나타내고 있다. 일반적인 디지털 제어의 경우 정해진 일정 시간 간격마다 제어를 수행하므로 원하는 속도 프로파일의 형성 또한 일정 시간 간격마다 수행된다. 제어 시간 간격은 프로세서의 성능, 제어 알고리즘의 계산에 필요한 프로세서 타임 등 여러 요소에 의해 결정되며 가능한 한 짧은 시간 간격이 바람직하다. 그러나 프로세서는 시스템 관리, 데이터 송/수신, 다른 모터의 제어 등에 필요한 시간을 할애하여야 하므로 하나의 모터 제어에 할애할 수 있는 시간은 한계가 있다.

그림 5에서 보는 것처럼 제어 주기가 T_s 라고 했을 때 원하는 속도 프로파일 생성 장치는 현재 모터 또는 롤러의 위치를 감시하다가 원하는 정지 위치 P_s 로부터 정지에 필요로 하는 거리 D_s 이전의 위치 P_{sw} ($P_s - D_s$)에 도달하면 다음 제어 주기에 정지하고자 하는 속도 프로파일을 생성하게 된다.

기존의 제어 방식에서는 한 제어 주기 사이에는 어떠한 프로파일 명령치의 변화도 있을 수 없으므로 한 제어 주기 사이에 명령 속도를 바꾸어야 할 위치 P_{sw} 에 도달하게 되어도 다음 제어 주기까지 기다렸다 기준 속도를 변경 적용할 수

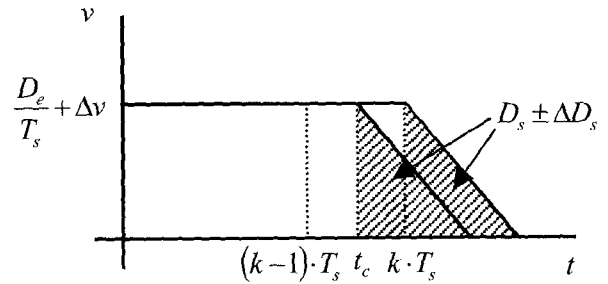


그림 5. 제어 주기, 감속 시점과 정지거리.

Fig. 5. Fixed time and Variable time interval control and stop distance.

수 밖에 없다. 따라서 이 시간 사이에 회전량이 있으므로 이 양만큼 정지 위치 에러가 커지게 된다. 즉 그림 5에서 시간 $(k-1)T_s$ 와 $k \cdot T_s$ 사이에서 모터 또는 롤러가 속도 변경(감속) 위치 P_{sw} 에 도달하였다 하더라도 다음 제어 주기 시간 $k \cdot T_s$ 에서 기준 속도가 변경되고 실제 모터 또는 부하는 이를 추종하므로 정지 거리에서 그만큼의 지연이 발생하게 된다. 모터 또는 부하가 정지하는데 필요한 거리를 D_s 라 하고 이의 변동을 ΔD_s 라고 했을 때 제어 주기 사이의 지연 ($D_s/T_s + \Delta v$ 의 속도로 구동했을 때 $D_s + \Delta v \cdot T_s$)을 포함하여 정지 오차 e_s 는 범위 $-\Delta D_s \leq e_s \leq \Delta D_s + (D_s + \Delta v \cdot T_s)$ 에 있게 된다. 다시 말해서, 이산 시간 제어이므로 제어 주기 사이 ($(k-1)T_s$ 와 일반적으로 $k \cdot T_s$ 사이의 시간) 동안의 진행으로 인해 정지 오차는 불확실성이 그만큼 커지게 된다.

따라서, 본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 롤러의 회전 위치가 P_{sw} 에 도달하였을 때 인터럽트 방식을 이용하여 변경된 명령 속도를 생성하게 하고 제어기의 PID 계인을 위치 제어에 적합한 값으로 변경하여 제어 입력을 생성하도록 하게 한다. 본 논문에서 제안된 위치 참조 가변 PID 제어기를 사용함으로써 정해진 시간 간격으로 제어하는 경우 발생할 수 있는 지연을 없앨 수 있고 구조 변환된 제어기는 에러 누적량을 사용하지 않으므로 정지 속도 추종시의 에러 누적량의 감소 지연으로 인한 제어 응답의 지연 현상을 막아, 최종적으로는 정지 거리의 불확실한 변동량을 줄임으로써 모터 또는 부하가 정지 할 때 정지 위치의 오차가 줄어들게 된다.

2. 제어기 설계

(1) 이송 모드와 정지 모드에서의 PID 계인 설계

모터 인가 전압에 대한 이송 롤러의 선속도의 전달 함수는 그림 2의 블럭 다이어그램으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_p(s) = \frac{V_p(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t \cdot G_r \cdot r}{J_s + B + \frac{K_t K_e}{R_a}} \quad (6)$$

속도 추종을 위한 제어기로 PI 제어기를 사용하면 속도 명령 v^* 에 대한 롤러 선속도 v_p 는 다음 (7)와 같이 얻어진다.

$$\frac{V_p(s)}{V^*(s)} = \frac{\frac{K_I G_r r \cdot K_p \cdot s + \frac{K_I G_r r}{R_a} K_I}{R_a}}{Js^2 + \left(\frac{K_t K_e}{R_a} + B + \frac{K_t G_r r \cdot K_p}{R_a} \right) s + \frac{K_t G_r r}{R_a} K_I} \quad (7)$$

여기서, K_p 와 K_I 를 다음 식이 만족하도록 설계하면

$$\frac{K_t K_e}{R_a} + B \ll \frac{K_t G_r r \cdot K_p}{R_a} \quad (8)$$

(7)의 전달함수는 다음 (9)와 같이 근사화된 2차 시스템으로 표현된다.

$$\frac{V_p(s)}{V^*(s)} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

여기서, $\frac{K_t G_r r}{R_a J} K_p = 2\xi\omega_n$, $\frac{K_t G_r r}{R_a J} K_I = \omega_n^2$ 이며

적당한 감쇄상수 ξ 와 고유주파수 ω_n 를 선택함으로써 제어 계인 K_p 와 K_I 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_p = \frac{2\xi\omega_n}{K}, \quad K_I = \frac{\omega_n^2}{K}$$

여기서, $K = \frac{K_t G_r r}{R_a J}$ 이다.

마찬가지로 정지 모드에서 PD 제어를 사용하면 속도 명령 v^* 에 대한 롤러 선속도 v_p 는 (10)과 같은 전달 함수로 표현할 수 있으며

$$\frac{V_p(s)}{V^*(s)} = \frac{\frac{L_a B + R_a J + r G_r K_t K_D}{L_a J} s + \frac{R_a B + K_e K_t + r G_r K_t K_p}{L_a J}}{s^2 + \frac{L_a B + R_a J + r G_r K_t K_D}{L_a J} s + \frac{R_a B + K_e K_t + r G_r K_t K_p}{L_a J}} \quad (10)$$

여기서 K_p 와 K_I 를 다음 두 식이 만족하도록 설계하면

$$r G_r K_t K_D \gg L_a B + R_a J \quad (11)$$

$$r G_r K_t K_p \gg R_a B + K_e K_t \quad (12)$$

(10) 또한 (9)와 같은 형태의 2차 함수로 표현되어 정지 모드에서 원하는 특성을 갖도록 하는 PD 계인을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_p = \frac{\omega_n^2}{r G_r K_t}, \quad K_D = \frac{2\xi\omega_n}{r G_r K_t}$$

(2) 정지 모드에서의 계인과 제어기 스위칭 위치

그림 2의 블럭 다이어그램으로 나타난 이송 장치에서 모터 인가 전압에 대한 이송 롤러의 선속도 응답은 근사적으로 다음과 같은 미분 방정식으로 나타낼 수 있다

$$V_a(t) = \frac{1}{K_t \cdot G_r \cdot r} \left\{ R_a J \frac{d}{dt} v_p + (R_a B + K_t K_e) v_p + G_r \cdot r \cdot R_a \cdot f_L \right\} \quad (13)$$

정지 모드에서 속도 추종을 위한 제어기로 PD 제어기를 사용하면 모터에 인가되는 전압은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} V_a(t) &= K_p(v^* - v_p) + K_D \frac{d}{dt}(v^* - v_p) \\ &= -K_p v_p(t) - K_D \frac{d}{dt} v_p(t) \end{aligned} \quad (14)$$

제어 입력 (14)를 (13)에 대입하면 제어 시스템에서의 이송 롤러 선속도 응답은 다음과 같은 미분 방정식으로 기술된다.

$$(G_r K_t K_D + R_a J) \frac{d}{dt} v(t) + (G_r K_t K_p + R_a B + K_t K_e) v(t) + G_r \cdot r \cdot R_a \cdot f_L \cdot u(t) = 0 \quad (15)$$

제어 계인 K_p 와 K_D 를 다음 식이 만족하도록 설계하면

$$G_r \cdot r \cdot K_t \cdot K_D \gg R_a \cdot J \quad (16)$$

$$G_r \cdot r \cdot K_t \cdot K_p \gg R_a \cdot B + K_t \cdot K_e \quad (17)$$

(15)는 다음과 같이 근사화된다.

$$\frac{d}{dt} v_p(t) + \frac{K_p}{K_D} v_p(t) + \frac{R_a \cdot f_L}{K_t \cdot K_D} u(t) = 0 \quad (18)$$

(18)을 풀면 이송 롤러의 선속도와 위치를 다음 (19)와 (20)와 같이 예측할 수 있다.

$$v(t) = v(t_0) e^{-\frac{K_p t}{K_D}} - \frac{R_a f_L}{K_t K_p} \left(1 - e^{-\frac{K_p t}{K_D}} \right) \quad (19)$$

$$p(t) = p(t_0) + \frac{K_D}{K_p} \left(v(t_0) + \frac{R_a f_L}{K_t K_p} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{K_p t}{K_D}} \right) \quad (20)$$

여기서, t_0 는 PID 제어기의 계인이 스위칭하는 순간을 나타내고 t 는 t_0 이후의 경과 시간을 나타낸다. 정지모드에서의 제어 계인 K_p 와 K_D 는 조건 (16)과 (17)을 만족시키고 시정수 $T = K_D / K_p$ 의 값이 가능한 한 작게 되도록 선정함으로써 설계할 수 있다.

또한, 스케줄링 PID 제어기의 제어 계인을 스위칭하는 위치는 (20)을 이용하여 구할 수 있다. 제어기 구조 전환 후 $5 \cdot T$ 후에 정지 위치에 도달시키고자 한다면 (20)으로부터

$$p^* = p \left(t = 5 \cdot \frac{K_D}{K_p} \right) \approx p(t_0) + \frac{K_D}{K_p} \left(v(t_0) + \frac{R_a f_L}{K_t K_p} \right)$$

이므로 결국 제어기의 스위칭 위치는

$$p(t_0) = p^* - \frac{K_D}{K_p} \left(v(t_0) + \frac{R_a f_L}{K_t K_p} \right)$$

이다.

IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

1. 시뮬레이션

2장에서 기술된 잉크젯 프린터 용지 이송 시스템에 대해 3장에서 설계된 위치 참조 게인 스케줄링 PID 제어기의 제어 성능을 확인하기 위하여 Matlab의 Simulink를 이용하여 시뮬레이션 모델을 수립 후 제어 성능을 시뮬레이션 하였다. 신뢰할 수 있는 시뮬레이션 결과를 얻기 위하여 시뮬레이션 모델에는 용지 이송 롤러에서의 마찰력의 변동, 모터의 코킹 토크 변동 등 모델의 각종 비선형 항목들을 반영하였으며 기준 속도 발생기, PWM 인가 방식 등 H/W, S/W적으로 실제 구현되는 방식을 모델링하여 반영하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 플랜트 모델의 파라미터를 나타낸다.

표 1. 시뮬레이션 모델 파라미터.

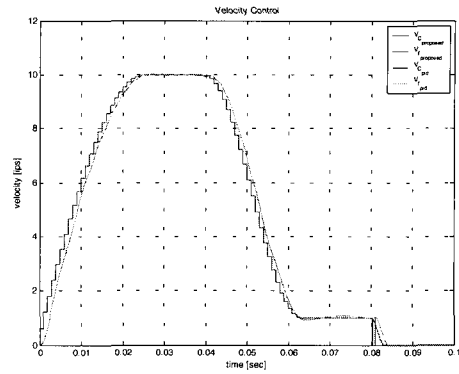
Table 1. Simulated model parameters.

Model Parameter	Value	Model Parameter	Value
Armature Resistance R_a	20 [Ohm]	Feed Roll Radius r	22/2 [mm]
Armature Inductance L_a	8.4 [mH]	Gear Ratio G_r	1/11.59
Motor Inertia J_m	5.2e-7 [Kgm ²]	Feed Roll Inertia J_r	55.25-7 [Kgm ²]
Motor Damping Constant B_m	6.5e-6 [Nm/(rad/s)]	Feed Roll Damping B_r	3.7e-3 [Kg/s]
Torque Constant K_t	27.273 [mNm/A]	Frictional Torque f_r	63.745 [mNm]
Back EMF Constant K_e	27.273 [mV/(rad/s)]		

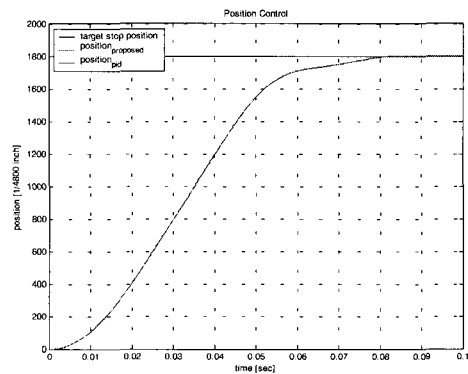
용지 이송 시스템의 속도 및 위치 제어 시뮬레이션은 1800/4800 inch의 목표 거리를 10 ips (inch/second)의 속도로 이동하는 경우에 대하여 실시하였으며 제안하는 제어기의 결과를 기존의 단일 PID 제어기에 의한 결과와 비교하였다. 그림 6(a)는 속도 추종성을 보여주고 있으며 그림 6(b)는 위치 제어 성능을 보여주고 있다. 속도 및 위치 추종성은 두 경우 이송모드에서는 차이가 없으나 정지모드에서 제어 특성의 차이를 보이고 있다. 그림 6의 (c)와 (d)는 정지 위치 근방에서의 결과를 나타내고 있는데 단일 PID 제어기에 의한 속도 추종이 정지 모드에서 적분 게인으로 인한 오버슈트와 지연 현상을 보이고 있는데 반해 제안하는 이중 PID 제어기는 빠른 추종성을 보이고 있다. 또한, 그림 6(d)는 제안하는 제어기가 단일 PID 제어에 의한 지연으로 발생하는 정지 위치 에러를 개선할 수 있음을 보여주고 있다.

2. 실험 결과

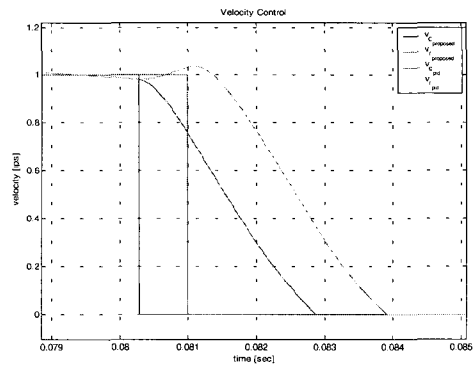
잉크젯 프린터 용지 이송 장치의 속도 및 위치 제어를 위한 제어 시스템은 그림 7과 같이 구성되어 있다. 이송 롤러의 회전 속도 및 위치 정보는 롤러에 부착된 엔코더 및 센서의 펄스 출력으로부터 얻을 수 있고 이를 매 정해진 시간 또는 정해진 위치에서 생성되는 기준 속도와 비교하여 제어 입력이 되는 모터 인가 전압을 계산하고 이를 PWM(Pulse Width



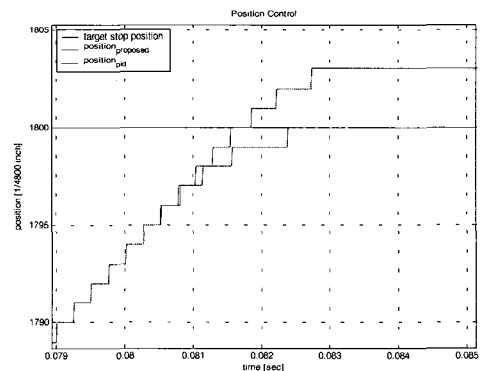
(a) 기준 속도 추종성



(b) 이송 롤러의 위치 변화



(c) 정지 모드에서의 속도 변화



(d) 정지 모드에서의 위치 변화

그림 6. 10 ips 속도로 이송할 때의 시뮬레이션 결과. Fig. 6. The simulation results of 10 ips feeding.

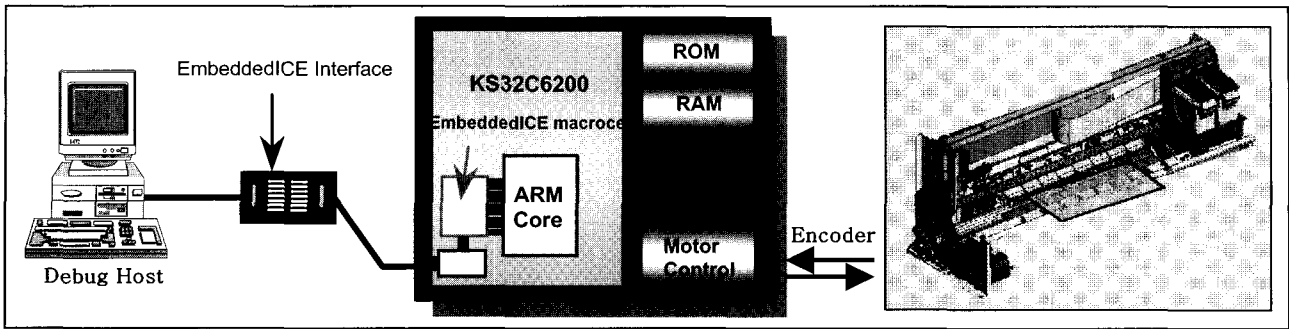
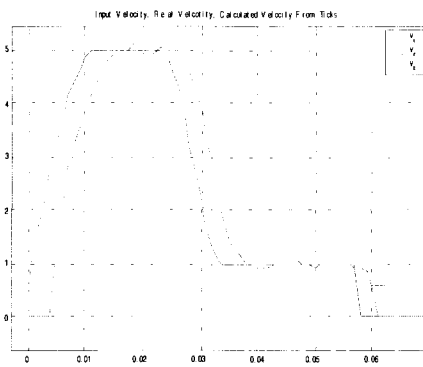
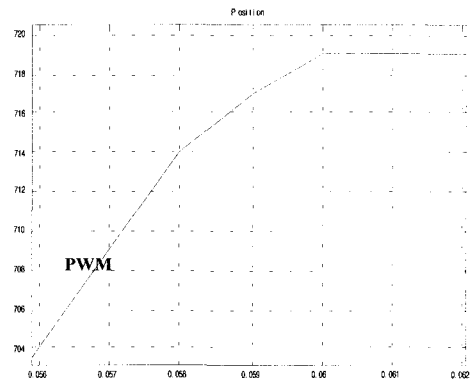


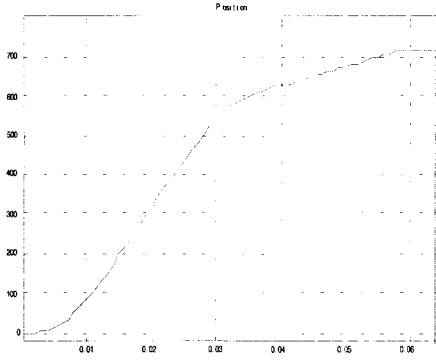
그림 7. 제어 시스템의 구성.
Fig. 7. Construction of the control system.



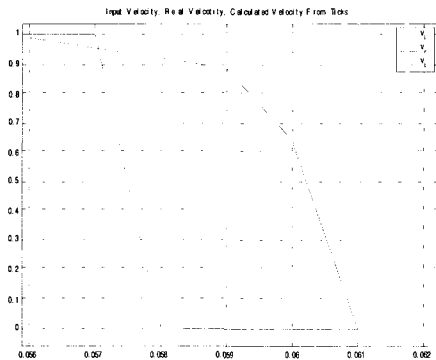
(a) 기준 속도 추종성



(d) 정지 모드에서의 위치 변화



(b) 이송 롤러의 위치 변화

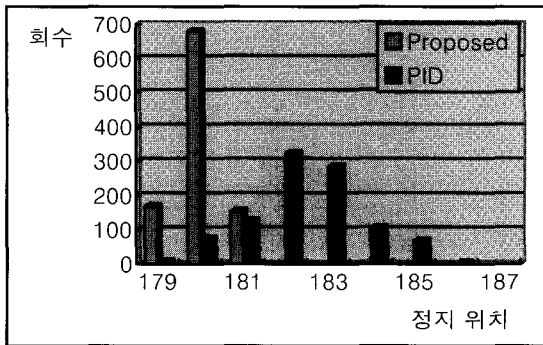


(c) 정지 모드에서의 속도 변화

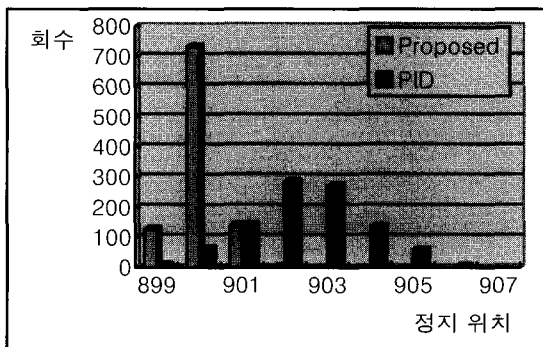
그림 8. 5 ips 속도로 이송할 때의 실험 결과.
Fig. 8. Experiment results when 5 ips feeding.

Modulation) 방식으로 모터 드라이버를 통해 모터에 인가함으로써 모터를 구동한다. 속도 및 위치 정보를 제공하는 펄스 신호의 처리와 기준 속도 생성 및 제어 신호 생성을 위한 프로세서는 ARM core를 채택한 KS32C6200 프로세서를 사용하였으며 Imbedded ICE 인터페이스를 통하여 개발 환경을 구축하였다. 속도 추종성에 대한 실험은 5 ips(inch/sec)의 속도로 이동하는 경우에 대해 실시하였으며 이 때 이동 거리는 900/4800"(inch)이다. 그림 8은 5 ips 속도로 용지를 이송할 때 속도와 위치 변화를 나타내는 것으로 시뮬레이션 결과에 비해 다소 지연 시간이 길고 정지 모드 이전의 저속에서 속도 변동이 큰 것으로 나타났다. 이는 이송 롤러에 작용하는 마찰 토크와 모터의 토크 변동이 시뮬레이션에 반영한 값보다 크기 때문으로 보여진다.

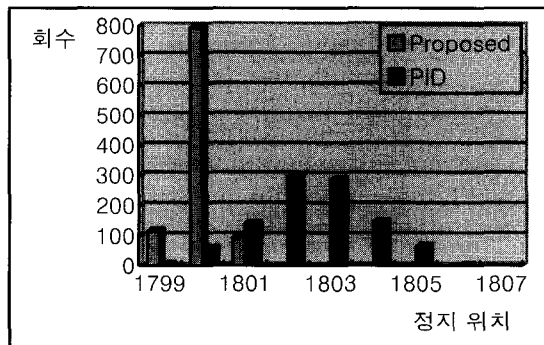
이송 롤러의 정지 정밀도에 대한 실험은 2 ips 속도로 180/4800" 이동하는 경우, 6 ips 속도로 900/4800" 이동하는 경우, 10 ips 속도로 1800/4800" 이동하는 경우에 대해 각각 1000 번의 반복 이송을 제안하는 이중 PID 제어기와 단일 PID 제어기를 사용하여 각각 실시하여 목표 정지 위치 대비 실제 정지 위치를 실험하여 그 결과를 비교하였다. 그림 9는 이의 결과를 나타내고 있는데 기존의 단일 PID 제어기에 의한 정지 위치는 목표 거리 대비 2/4800"~3/4800" 정도의 지연 거리를 가지고 정지 위치의 분포 또한 넓은데 비해 제안하는



(a) 위치별 정지 회수 -2 ips의 경우



(b) 위치별 정지 회수 -6 ips의 경우



(c) 위치별 정지 회수 -10 ips의 경우

그림 9. 반복 이송 실험의 경우 정지 위치.

Fig. 9. Stop positions of repeated feeding test.

이중 PID 제어기에 의한 정지 위치는 대부분 목표 위치에서 제어되고 오차를 가지는 경우 최대치가 $\pm 1/4800''$ 이내에 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 이중 PID 제어기 및 이의 스위칭 기술을 제안하여 잉크젯 프린터의 용지 이송 시스템의 정밀 위치 제어에 적용하였다. 정해진 시간 간격마다 동일한 계인을 적용하는 기존의 제어기가 가질 수 있는 정지 모드에서의 속도 추종과 위치 제어 성능의 저하를 해결하기 위하여 회전 위치가 기준 위치에 도달하였을 때 인터럽트 방식을 이용하여 변경된 기준 속도를 생성하게 하고 제어기의 PID 계인을 정지

모드에서 적합하게 설계된 값으로 변경하여 제어 입력을 생성하도록 하는 제어 방법을 제안하여 용지 이송 장치의 위치 제어에 적용하였다.

본 논문에서 제안된 이중 PID 제어기를 사용함으로써 정해진 시간 간격으로 제어하는 경우 발생할 수 있는 지연을 없앨 수 있고 구조 변환된 제어기는 에러 누적량을 사용하지 않으므로 정지 속도 추종시의 에러 누적량의 감소 지연으로 인한 제어 응답의 지연 현상을 막아, 최종적으로는 정지 거리의 불확실한 변동량을 줄임으로써 모터 또는 부하가 정지할 때 정지 위치의 오차를 줄일 수 있다.

제안된 이중 PID 제어기는 시뮬레이션과 실험을 통하여 제어 성능을 확인하였으며 기존의 단일 계인의 PID 제어를 일정 주기에 수행하는 제어 방법에 비해 위치 제어 성능이 향상된 것을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

- [1] H. P. Le, "Progress and trends in ink-jet printing technology", *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 42, n o.1, pp.49-62, 1998.
- [2] Ross N. Mills, "Ink jet printing: past, present and future," *IS&T: Recent Progress in Ink Jet Technologies*, Ed. Rezanka and Eschbach, Sringsfield, VA: IS&T, 1996, pp. 12-15.
- [3] J. C. Griggs, M. Murphy, and Y. Pan, "Banding characterization for inkjet printing," *PICS 2000: Image Processing, Image Quality, Image Capture, Systems Conference*, pp. 84-88, March 2000.
- [4] H. Y. Lin, S. C. Hsieh and M. C. Lu, "Optimal speed profile design of stepping motors for an inkjet printer," *IS&T: Recent Progress in Ink Jet Technologies*, Ed. Rezanka and Eschbach, Sringsfield, VA: IS&T, 1996, pp. 20-22.
- [5] C.-T. Chen, "The Influence of Feeding Accuracy of Gear Train on Printing Quality for Printers," *IS&T's NIP 15: International Conference on Digital Printing Technologies*, pp. 52-55, Oct. 1999.
- [6] P. Roberts, "A mathematical model for inkjet printer characterization," *Eighth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications*, pp. 134-139, Nov., 2000.
- [7] C. Cheng, C. Chen, "A PID approach to suppressing stick-slip in the positioning of transmission mechanisms," *Control Engineering Practice*, vol. 6, Iss. 4, pp. 471-479, 1998.
- [8] A. V. Deshpande, M. Kamasak, K. L. Thoon, etc., "Design and implementation of a DSP based inkjet printer motion control system for dynamic print mode control," *Proceedings of the IS&T' NIP 17: International Conference on Digital Printing Technologies*, pp. 34-42, Oct. 2001.
- [9] C. L. Chen, G. T.-C. Chiu, "Periodic disturbance rejection using two DOF repetitive control for a motor/gear transmission system," *15th IFAC World Congress on Automatic Control*, July, 2002.
- [10] C. Y. Chen, C. C. Cheng and G. T.-C. Chiu, "Predictive and time delay control of transmission mechatronics," *Proceedings of the 1998 American Control Conference*, pp. 3286-3290, June, 1998.
- [11] C. Y. Chen, C. C. Cheng, and G. T.-C. Chiu, "Adaptive robust control of media advance systems for thermal inkjet printers,"

Mechatronics, vol. 10, Issue. 1-2, pp. 111-126, 2000.

- [12] C.Y. Chen, G. T.-C. Chiu, and C. C. Cheng, "Design and Control Integration – Application to Inkjet Media Advance System," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 1998.
- [13] W. J. Rugh, "Analytical Framework for Gain-Scheduling," *IEEE Control Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 79-84, 1991.
- [14] D. J. Leith, W. E. Leithead, "Survey of Gain Scheduling Analysis & Design," *International Journal of Control*, vol. 73, no. 11, pp. 1001-1025, 2000.
- [15] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall International Inc., 1997.
- [16] K. J. Astrom, and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Addison-Wesley, 1989.

조영완

1968년 10월 10일생. 1991년 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1993년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사). 1999년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학 박사). 2000-2003년 삼성전자에서 책임 연구원으로 제어기 설계 및 개발 담당.

2003년-현재 서경대학교 컴퓨터공학과 전임강사. 주관심 분야는 퍼지 제어 이론 및 응용, 지능 및 학습 시스템, 적응 제어 및 로버스트 제어, 로봇틱스 등임.