

◆특집◆ 응용역학 CAE 엔지니어링

통합 시뮬레이션을 이용한  
매체 이송속도 제어 시스템 개발

김시은\*, 박주한\*, 임성수\*\*, 이순걸\*\*\*

Development of a Media Feeding Speed Control System  
Using a Co-Simulation Tool

Si-Eun Kim\*, J. H. Park\*, Sungsoo Rhim\*\* and Soon-Geul Lee\*\*\*

**Key Words** : Media Transport System(매체 이송 시스템), Feeding Speed Control(이송 속도 제어), Learning Controller(학습제어기), Co-Simulation(통합-시뮬레이션), Slippage(미끄러짐)

1. 서론

디지털 프린터, 자동현금출납기(ATM), 복사기, 팩스 등의 기기에서 가장 주요한 부품 중 하나는 매체 이송 장치(media transportation system, MTS)이다. 매체이송 장치는 한 쌍 또는 여러 쌍의 구동 롤러를 이용하여 종이, 지폐, 필름 등의 매체를 기기의 주처리부(인쇄부, 인식 및 계수부 등)로 이송하는 역할을 수행하며 기기 전체의 성능을 좌우한다. 매체이송부를 포함하는 다양한 기기의 총체적 성능(처리 속도, 처리 정밀도) 유지를 위해서 매체 이송부는 매체이송 속도를 매우 균일하고 일정하게, 반복적으로 유지할 수 있어야 한다. 최근 들어, 매체 이송 장치를 포함하는 다양한 기기의 운용 속도 및 정밀도에 대한 기대치가 높아지고, 이에 따라 매체이송부의 이송 속도 제어성능, 반복성 등의 개선이 필수적으로 요구되고 있다.

MTS 에서 이송성능의 저하를 야기하는 다양한 원인 중에서 본 논문은 이송 롤러와 매체의 미끄러짐 현상에 중점을 두고, 미끄러짐에 의해 불균일해지는 매체의 이송속도를 제어하기 위한 제어 알고리즘을 개발하고자 한다. 이송 시 미끄러짐은 이송 롤러와 매체 사이의 마찰계수, 롤러에 의해 매체에 가해지는 수직 항력, 이송롤러의 회전 속도, 이송 롤러의 편심회전 등에 의해 영향을 받는다. 이러한 인자들은 매우 비선형적인 특성을 보이며, 이러한 인자들을 고려한 기기설계 또는 제어기 설계 작업을 해석적으로 수행하기는 매우 어렵다.

매체 이송장치와 같이 복잡한 시스템을 위한 제어기를 설계하는 엔지니어에게 있어서, 제어 대상 시스템에 대한 정밀한 수학적 모델의 부재는 효과적인 제어기 설계를 어렵게 만드는 근본적인 문제가 될 수 있으며, 이러한 해석적 모델링의 문제를 해결하기 위해서 제어시스템 설계자는 실험적 방법<sup>1,2</sup> 또는 수치해석 도구를 이용한 방법<sup>3,4</sup>을 종종 채택하게 된다.

제어 시스템을 설계하거나 평가하기 위해 일반적으로 사용되는 제어시스템 설계/평가용 수치해석 도구를 이용하여 매체 이송장치와 같이 복잡하고 비선형성이 높은 다물체 동역학 시스템을 충

\* 경희대학교 산학협력기술연구원, FunctionBay, Inc..

\*\* 경희대학교 산학협력기술연구원 (기계공학과)

Tel. (031) 201-3248

Email ssrhim@khu.ac.kr

\*\*\* 경희대학교 산학협력기술연구원 (기계공학과)

분히 현실적인 모델링에는 어려움이 많다. 그러나, 이러한 근사모델링의 문제는 다물체 동역학 해석 전용 프로그램(예를 들면, ADAMS, RecurDyn, DADS 등)에서는 상대적으로 쉽게 해결될 수 있으며, 매우 현실적인 동역학 모델을 생성해 낼 수 있다.

다물체 해석동역학 프로그램을 이용해서 생성된 수치해석 모델과 제어시스템 설계 및 평가용 프로그램의 결합은 흔히 통합시뮬레이션(co-simulation)이라고 불리며, 이러한 시뮬레이션 환경은 제어시스템 설계 엔지니어가 두 가지 software의 장점을 활용하여 보다 효과적인 제어를 설계할 수 있도록 도와준다.

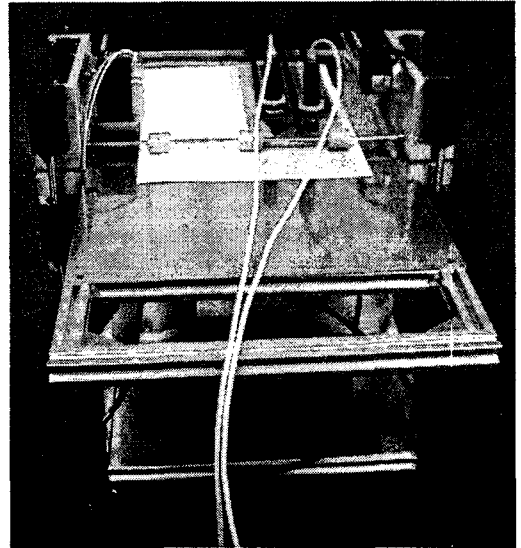
본 논문에서는 통합 시뮬레이션 도구를 이용하여 Fig. 1 에 보인 것과 같은 매체 이송 장치의 매체 이송 속도 제어를 위해 반복학습 제어를 설계하고, 제어시스템의 유효성을 통합시뮬레이션 환경에서 다물체 동역학 프로그램을 이용하여 생성된 매체이송 장치 모델<sup>5</sup>에 대해 검증하고자 한다.

반복 학습 제어기는, 매체이송 시스템과 같이 반복되는 공정을 갖는 동적 시스템에서 발생하는 반복적 오차를 학습을 통해 제거해 나가는 제어 방법으로, 반복 오차를 줄이는데 매우 효과적인 방법이다.<sup>6,8</sup>

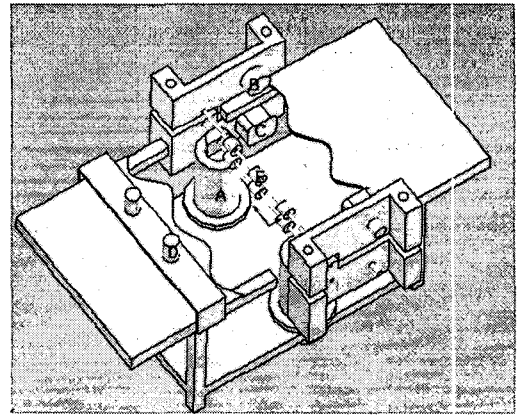
## 2. 시스템 구성

보다 현실적인 제어 문제를 생성하기 위하여 본 연구는 Fig. 1 에 보인 것과 같은 실제 매체 이송 장치를 연구 대상으로 한다. Fig. 1 (a)는 실제 장치의 사진이고, Fig. 1 (b)는 장치 구성을 3 차원 개략도로 보여주고 있다.

장치의 이송부는 종이를 이송하기 위한 한 쌍의 롤러와 롤러를 구동하는 구동 축으로 되어 있다. 한 쌍의 롤러 축 중 위의 롤러축이 구동축이고, 아래 축이 종동축이다. 이송 롤러들은 마찰계수 증가를 위해 urethane 으로 코팅이 되어 있다. 롤러와 종이 사이에 발생하는 수직항력은 종동 축의 상하 위치를 조절할 수 있는 원통형 지지 기구(A)에 의해 원하는 값으로 조절이 가능하도록 되어 있다. 수직항력의 크기는 종동축 높이 조절기구 내에 설치된 로드셀에 의해 계측된다.



(a)



(b)

Fig. 1 Media transport system test-bed: (a) picture of test-bed, (b) schematic diagram of test-bed

구동축과 종동축의 회전 속도는 각각의 축에 설치되어 있는 엔코더(B,C)에 의해 측정되고, 종이의 이송속도는 두 개의 비접촉 광학 센서(D)에 의해 측정된다.

본 연구에서 사용된 이송 매체로는 고급 백색 용지를 사용하였다. 일반적으로 종이의 질은 단위 면적당 질량값(W)으로 나타내는데, 본 연구에서 사용된 종이는 W 값이 80g/m<sup>2</sup> (double A class)이다. 종이의 특성을 나타내는 또 다른 지수로는 종이의

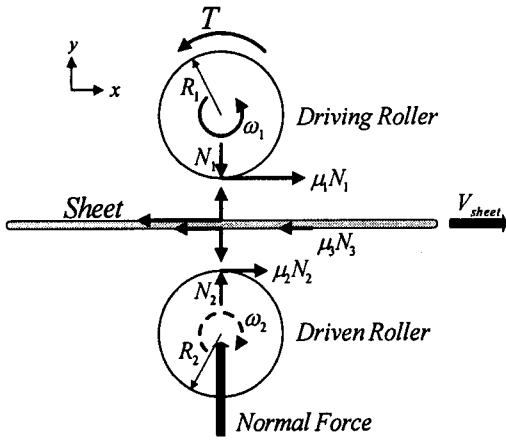


Fig. 2 Free-body diagram of MTS feeding part including paper sheet

휨 특성치( $EI$ ,  $Nm^2$ )이며, 이 값은  $W$  값과 아래의 식에 나타낸 관계를 갖는다.<sup>1</sup>

$$EI_v = 2.27 \times 10^{-10} W^{2.93}$$

$$EI_H = 1.92 \times 10^{-10} W^{2.93}$$

하첨자  $V$  는 종방향을  $H$  는 횡방향을 가리킨다. 종이의 두께는  $0.1mm$  이고, 크기는  $210mm \times 294mm$  이다.

### 3. 시스템 모델링

Fig. 1 에서 보인 매체 이송 장치의 매체이송부의 free-body diagram 을 그림 2 에 나타내었다. 이 모델에는 세 개의 접촉면이 있다. 첫째는 구동 롤러와 종이 사이, 둘째는 종기와 가이드 락, 끝으로 종동 롤러와 종이 사이의 접촉면이다. 각 접촉면에서의 운동은 아래의 세 방정식으로 표현될 수 있다.

$$I_{G1}\alpha_1 + F_{k1}R_1 = T \quad (1)$$

$$F_{k1} - F_{k2} - F_{k3} = ma_{sheet,x} \quad (2)$$

$$-I_{G2}\alpha_2 = F_{k2}R_2 \quad (3)$$

여기서,

$\mu_1$  : 종기와 구동 롤러 사이의 동마찰계수,  
 $\mu_2$  : 종기와 종동 롤러 사이의 동마찰계수,  
 $\mu_3$  : 종기와 가이드 락사이의 동마찰계수,  
 $N_1, N_2, N_3$  : 구동 롤러와 종이, 종동 롤러와 종이, 가이드 락과 종이 사이에 작용하는 수직항력

$v_{sheet}$  : 종이 이송 속도,

$T$  : 구동 롤러의 구동 토크,

$R_1, R_2$  : 구동 롤러, 종동 롤러의 반경

$\omega_1, \omega_2$  : 구동 롤러, 종동 롤러의 회전 속도

$\alpha_1, \alpha_2$  : 구동 롤러, 종동 롤러의 회전 가속도

$I_{G1}, I_{G2}$  : 구동롤러, 종동 롤러의 회전 관성,

$M_1, M_2$  : 구동롤러, 종동 롤러의 질량,

$a_{sheet,x}$  : 종이의 선형 가속도,

$m$  : 종이의 질량

$$F_{k1} = \mu_1 N_1 \operatorname{sgn}(R_1 \omega_1 - v_{sheet}),$$

$$F_{k2} = \mu_2 N_2 \operatorname{sgn}(R_2 \omega_2 + v_{sheet}),$$

$$F_{k3} = \mu_3 N_3, \text{ 가이드 락으로 부터의 마찰력}$$

을 각각 나타낸다.

방정식 (1)과 (3)은 방정식 (4)와 (5)로 변환될 수 있다.

$$F_{k1} = \frac{T - I_{G1}\alpha_1}{R_1} = \frac{T}{R_1} - \frac{I_{G1}\alpha_1}{R_1} \quad (4)$$

$$F_{k2} = -\frac{I_{G2}\alpha_2}{R_2} \quad (5)$$

방정식 (4) 와 (5)를 (2) 에 대입함으로써, 방정식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\frac{T}{R_1} - \frac{I_{G1}\alpha_1}{R_1} - \frac{I_{G2}\alpha_2}{R_2} - F_{k3} = ma_{sheet,x} \quad (6)$$

방정식 (6)은 종이의 선형 이송 거동과 마찰력, 구동 롤러의 구동특성과의 관계를 나타낸다.

이러한 동역학 모델은 RecruDyn MTT 도구를 이용하여 Fig. 3 과 같이 다물체동역학 모델로 생성되었다. 이 다물체 동역학 모델은 3 가지 접촉면을 포함하며, 종이 모델을 포함한다. 무한자유도를

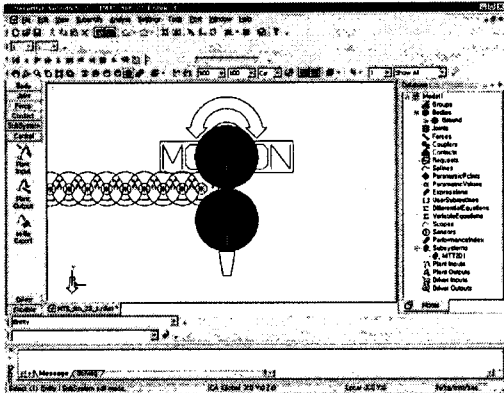


Fig. 3 Two dimensional model of MTS developed using RecurDyn MTT

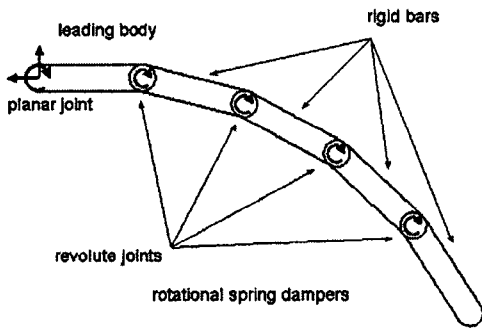


Fig. 4 Multi-body modeling of a paper

갖는 유연체인 종이는 Fig. 4 에 보이는 바와 같이 회전 스프링과 회전 감쇠를 갖는 revolute 관절들로 연결된 여러 개의 작은 강체 링크의 결합으로 모델링되었다. 이러한 종이 모델의 유효성은 다양한 연구를 통해 증명되었다.<sup>3,4</sup>

본 연구에서 사용된 종이의 동역학 모델은 50 개의 강체 링크로 구성되어 있다. 모델리에 사용된 종이의 Young's modulus 값은 2250 Nm<sup>2</sup>이다. 매체와 롤러 사이의 마찰계수는<sup>5</sup>에서 실험적으로 구한 값을 사용하였다.

#### 4. 제어시스템

본 연구에서는 반복학습제어기가 반복된 공정에서 발생하는 반복적 제어 오차를 제거하는 매우 효과적인 점을 고려하여, 반복적으로 종이를 이송

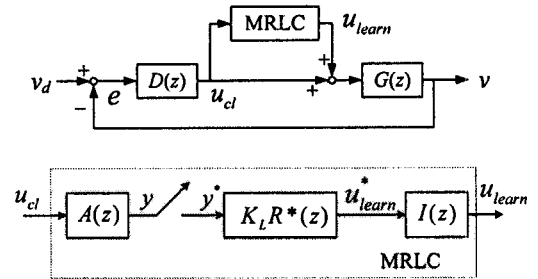


Fig. 5 Block-diagram of actual control system implemented

하는 이송 장치에서 종이 이송 속도를 제어하기 위해 반복학습제어기를 사용하였다. 특히, 반복학습제어기 중에서도 개선된 안전성을 갖는 다중속도 반복학습 제어기 (multi-rate repetitive learning controller: MRLC)를 사용하였는데, 제어 시스템의 나머지 부분보다 느린 샘플링 속도로 작동하도록 설계되었다.<sup>7,8</sup>

Fig. 5 는 본 연구에서 구현된 제어시스템의 블록선도를 보여준다. 여기서,  $v_d$  는 종이이송 속도 기준값이고,  $v$  는 종이이송속도를 나타낸다. 또한  $D(z)$  는 전형적인 Proportional-Derivative 제어기를 나타내고  $G(z)$  는 매체이송장치를 나타낸다.

Fig. 5 의 아래 그림은 MRLC 내부를 보다 자세히 나타내는데, MRLC 로 들어오거나 MRLC 로부터 나가는 신호들은 각각 down-sampling, up-sampling 되어야만 한다. 그림에서  $A(z)$  는 선형 가중 평균 필터,  $I(z)$  는 선형보간(up-sampling)필터,  $\cdot$  는 down-sampling 을 의미한다.

$R^*(z)$  는 다음과 같이 주어진 'N-단계 지연 양의 피드백 루프(positive feedback loop)'이다.

$$R^*(z) = \frac{1}{z^N - 1} \quad (7)$$

여기서 정수  $N$  은 목표 기준 입력  $v_d$  의 주기와 같은  $NmT$  의 값과 동일하다. (예를 들어, 제적 주기가 1sec,  $T = 0.001\text{sec}$ ,  $m = 5$  라면,  $N = 200$  이 된다.) 식 (7)은  $R^*(z) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{c_i}{z - a_i}$  로 표현되기도 한다. 여기서  $c_i$  는 미결정계수이고,  $a_i = \exp(\frac{2\pi j}{N} i)$  는 극점들의 위치이다.  $a_0$  는 기본 주파수(fundamental

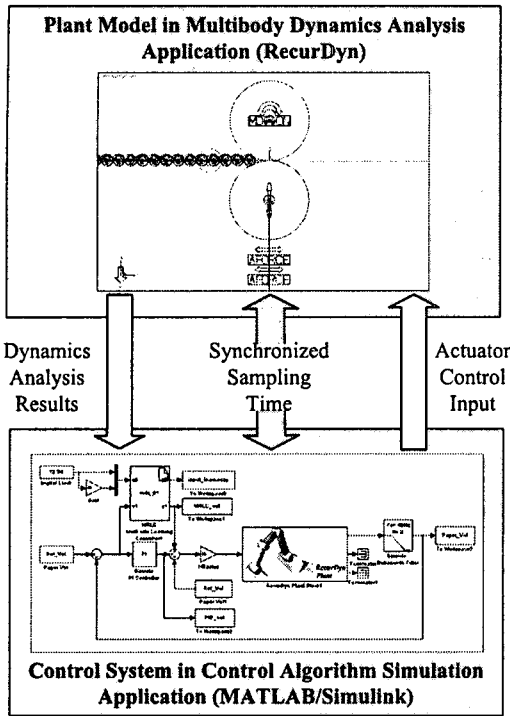


Fig. 6 Control system established in a co-simulation environment

frequency)이고, 기본 주파수의  $N-1$  개 정수곱은 조화 주파수(harmonic frequency)이다.

Fig. 5로부터 필터된 이송속도 오차  $y$  에 대한 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y(z) &= A(z)D(z)\{V_d(z) - V(z)\} \\
 &= A(z)D(z)\{1 - G_c(z)D(z)\}V_d(z) \\
 &\quad - K_L A(z)D(z)G_c(z)I(z)R^*(z)Y^*(z)
 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $G_c(z) = G(z)/\{1 + G(z)D(z)\}$ , 이다. 식 (8)의 양쪽 항을 down-sampling 하여 단순화하면

$$V_d^*(z) = \frac{(z^N - 1)H_d^*(z)}{z^N - 1 + K_L H^*(z)} \quad (9)$$

이다. 여기서,

$$H(z) = A(z)D(z)G_c(z)I(z)$$

$$H_d(z) = A(z)D(z)I(z)/\{1 + G_p(z)D(z)\}$$

이다. 결론적으로, 폐회로 루프의 전달함수는 아래와 같다.

$$\frac{V(z)}{V_d(z)} = G_c(z) \left\{ D(z) + \frac{R^*(z)H_d^*(z)}{1 + R^*(z)H^*(z)} \right\} \quad (10)$$

기본 주파수  $a_0$  와 조화주파수  $a_i$  ( $i=1,2,\dots,N-1$ )에서

$$\{Y^*(z)\}_{z=a_i} = \{(A(z)D(z)E(z))^*\}_{z=a_i} = 0 \quad (11)$$

임을 알 수 있으며, 만약  $D(z)$  가 충분히 크게 선택되어 진다면,  $\{E(z)\}_{z=a_i} \approx 0$  이 된다. 즉,  $v$  는  $v_d$  를 오차 없이 추종하게 된다.

## 5. 시뮬레이션

제어시스템의 평가를 위해 MATLAB/Simulink 를 이용하여 다중속도반복학습제어기와 PD 제어기를 이산 제어 시스템형태로 구현하였고, 종이를 포함하는 매체이송 장치는 RecurDyn MTT 를 이용하여 다물체동역학 모델로 구현하였다. Fig. 6 에 보이는 바와 같이, RecurDyn 에서 구현된 매체이송 장치 모델과 MATLAB/Simulink 에서 구현된 제어 시스템은 서로 동기화된 샘플링 타임을 갖고, 상호간에 동역학 해석 정보와 제어입력값을 공유하며 수치해석 작업이 진행된다. 즉, RecurDyn 에 의해 계산된 종이의 이송 속도는 MATLAB 에 전달되어 속도 제어 오차를 줄이기 위해 필요한 구동롤러 제어 입력값이 계산되며, MATLAB 에서 계산된 구동롤러 제어 입력값은 RecurDyn 에 전달되어 제어값에 따른 시스템의 동적 응답이 계산된다.

두 가지 해석프로그램의 장점을 결합한 이러한 통합시뮬레이션 환경에서는 복잡한 동역학적 특성을 갖는 매체이송장치의 동역학 해석과 제어 시스템 설계 및 평가를 매우 효과적으로 진행할 수 있다.

본 연구에서 사용된 다중속도반복학습제어기의 샘플링 속도는 200 Hz 이며, PD 제어기의 샘플

링 속도는 1kHz 로 하였다. MRLC 의 down-sampling ratio 를 그러므로 5 이다. 목표 종이이송 속도는 70mm/s 이며, 미끄러짐 현상을 일으키는 주된 요인으로 종동 롤러의 편심현상을 포함하였다. 종동 롤러의 편심 회전에 의해 종지와 이송롤러 사이의 수직항력이 주기적으로 변화하게 되고, 이에 따라 종지를 이송하는데 필요한 배출력이 주기적으로 변화하게 된다. 이에 따라 균일한 구동롤러의 회전에도 불구하고, 종지의 이송속도가 주기적으로 변화하게 된다.

Fig. 7 은 PD 제어기만 사용하였을 경우에 계산된 종이 이송속도이다. 그림에서 종동롤러의 편심 회전에 따른 마찰력의 주기적 변화에 의한 정현파 형태의 속도 변화 영향이 두드러지게 나타난다.

PD 제어기와 더불어 MRLC 제어기를 사용하였을 경우, MRLC 제어기는 PD 제어기에서 출력되는 제어입력 값으로부터 이송속도 제어 오차를 줄이기위해 필요한 구동모터 제어 입력 값( $u_{learn}$ )을 학습하게 되고, 학습된 제어 입력 값은 두 번째 사이클 (두 번째 종이 이송)이 시작되면, PD 페루프 제어 값( $u_{cl}$ )에 더해져서 구동롤러 제어 입력 값으로 사용되게 된다. 두 번째 사이클에서의 속도제어 오차 역시 MRLC 에 의해 관찰되고 제어 오차를 더욱 줄일 수 있는 제어 입력값을 학습하는데 사용된다. Fig. 8 (a)는 사이클 증가에 따른 이송속도 제어 오차의 감소를 나타내며, Fig. 8 (b)는 MRLC 에 의해 점진적으로 학습되어져 간 구동모터 제어 입력값을 보여준다.

제어오차를 줄이는데 필요한 feedforward 구동모터 제어 입력 값( $u_{learn}$ )이 MRLC 에 점점 개선되어감에 따라, 주기성을 갖는 제어오차는 점점 줄어들게 되어, 궁극적으로 잡음 레벨의 오차만이 남게된다. 제어 오차의 감소는 궁극적으로 PD 제어기의 역할을 축소하게 되어, Fig. 9 에 보이는 것과 같이 PD 제어 출력 값이 점점 더 작아져서, 비 반복적 오차에 대한 응답만을 포함하게 된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 매체이송 장치에서 매체이송속도를 제어하기 위한 속도제어기가 개발되었으며, 제어기의 성능을 통합시뮬레이션 환경에서 검증하였다.

종지이송의 반복성을 고려하여 다중반복학습

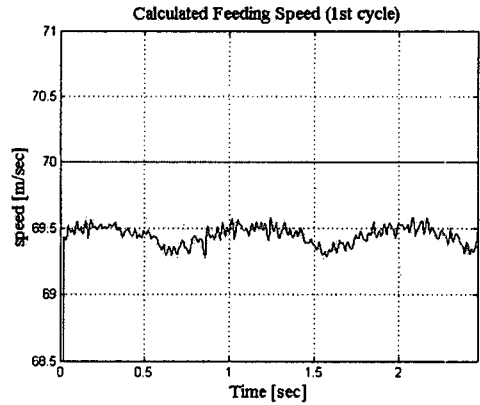


Fig. 7 Paper feeding speed error when only a PD controller is used (one cycle)

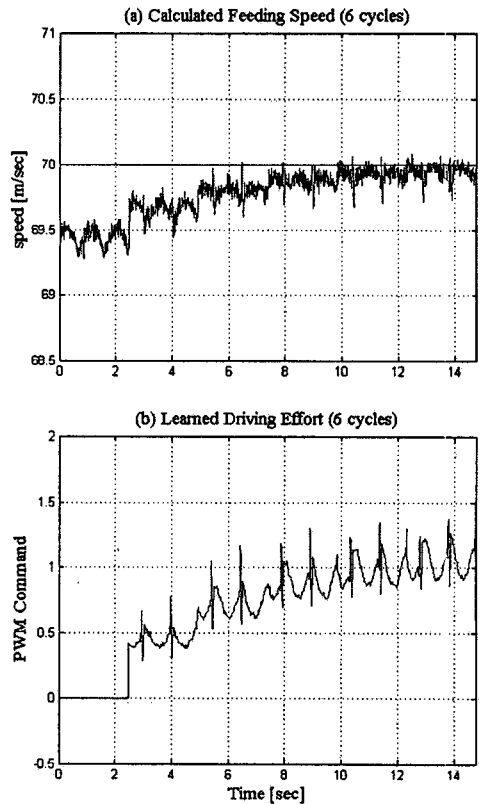


Fig. 8 Paper feeding speed error when MRLC is used in conjunction with a PD controller (six cycle duration): feeding speed error transition (top), learned feedforward effort for the driving roller (bottom)

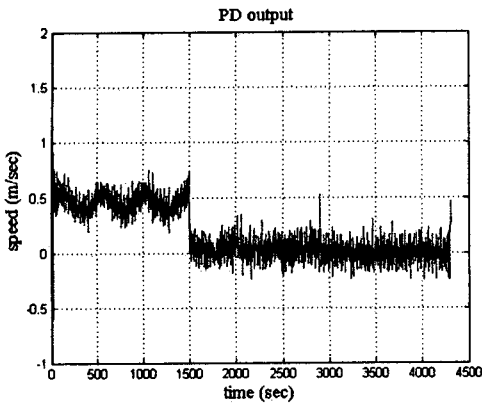


Fig. 9 Transition of PD controller output (three cycle duration)

제어기(MRLC)를 이용하여, 반복적으로 나타나는 미끄러짐에 의한 이송속도 오차를 감소하였다. MRLC 제어기의 유효성은 다물체동역학 해석프로그램과 제어시스템 설계/평가 프로그램의 통합된 시뮬레이션 환경에서, 종이를 포함한 매체이송시스템과 MRLC 시스템을 모델링하여 검증하였다.

### 후기

본 논문은 교육부 2 단계 BK21 연구과제인 “고속·고정밀 매체 이송 및 인쇄를 위한 메카트로닉스 시스템”과제로 수행되었다.

### 참고문헌

1. Okuna, K., Nishigaito, T. and Shina, Y, “Analysis of Paper Deformation Considering Guide Friction,” J. of JSME, Vol. 60, No. 575, pp. 75-80, 1994.
2. Nishigaito, T., Okuna, K. and Ishii, H., “A Method for Analyzing Paper Behaviour to Prevent Slippage of Transferred Image in Laser Printer,” J. of JSME, Vol. 60, No. 557, pp. 272-278, 1994.
3. Cho, H. and Choi, J., “2D MTT Development Specification,” Technical Report, FunctionBay Inc. Korea, 2001.
4. Diehl, T., “Two Dimensional and Three Dimensional Analysis of Nonlinear Nip Mechanics with

Hyperelastic Material Formulation,” Ph.D. Thesis, University of Rochester, 1995.

5. Ryu, J. K., “Simulation and Experimental Methods for Media Transport System: Part II, Effect of Normal Force on Slippage of Paper,” J. of Mech. Sci. and Tech., Vol. 19, No. 1, pp. 403-410, 2005.
6. Arimoto, S., “Mathematical theory of learning with applications to robot control,” K.S. Narendra, Ed., Adaptive and Learning Systems, Plenum Press, New York, pp. 379-388, 1990.
7. Moore, K. L., “Iterative Learning Control for Deterministic Systems,” London, Springer-Verlag, 1993.
8. Sadegh, N., “Synthesis, Stability Analysis, and Experimental Implementation of a multirate Repetitive Learning Controller,” ASME J. of Dyn. Sys. Meas. and Contrl., Vol. 124, No. 3, pp. 668-674, 2002.