

Roll-to-roll 시스템에서 인쇄전자 생산을 위한 댄서 시스템의 LQG 정밀 장력 제어에 대한 연구

A Study on the LQG Precision Tension Control of a Dancer System for a Production of Printed Electronics in Roll-to-roll Systems

성진우¹, 강현규¹, 신기현^{2,✉}
Jin-Woo Seong¹, Hyun-Kyoo Kang¹ and Kee-Hyun Shin^{2,✉}

¹ 건국대학교 기계설계학과 (Department of Mechanical Design, Konkuk Univ.)
² 건국대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Konkuk Univ.)
✉ Corresponding author: khshin@konkuk.ac.kr, Tel: 02-450-3072

Manuscript received: 2009.3.20 / Accepted: 2009.7.2

For mass production of printed electronics in roll-to-roll fashion, precision tension control is important to reduce register errors. Register error should be minimized within several to tens of microns for many electronic devices to be manufactured through printing technology. In order to achieve this goal, tension disturbance must be attenuated before printing process within a certain range. In this paper, a certain tension range which allows maintaining register error within 10 micron was defined with specific operating conditions. A LQG controller was proposed instead of the conventional PI controller for precision tension control using a multivariable feedback. A guideline to determine design parameters for calculating LQ gain was proposed. The proposed LQG controller was compared to both PI controller and LQ regulator with white noise by numerical simulations. Results showed that the proposed LQG controller was effective for attenuating tension disturbance with white noise.

Key Words: Printed Electronics (인쇄전자), Precision Tension Control (정밀 장력 제어), Dancer System (댄서 시스템), LQG Control (LQG 제어), Multivariable Feedback (다변수 피드백), Roll-to-roll (롤투롤)

기호설명

A : Cross section area of web (m²)

E : Young's modulus of web (GPa)

ε : Change in strain

J : Quadratic cost function

J_d: Mass moment of inertia of dancer (kg·m²)

J_{eq}: Equivalent mass moment of inertia of dancer (kg·m²)

Q, R : LQR weighting matrices

Q₀, R₀ : Kalman filter weighting matrices

T : Variation in tension (N)

V : Variation in velocity (m/s)

θ: Variation in dancer arm rotation angle (rad)

b : Friction coefficient of bearing (kg·m²/s)

l : Span length (m)

l₁: Dancer arm length from hinge to cylinder (m)

l₂: Dancer arm length from hinge to idle roll (m)

r_d: Radius of dancer idle roll (m)

τ : Time constant (s)

v : Operating velocity (m/s)

w_d : Disturbance

w_n : Noise

1. 서론

롤투롤(roll-to-roll) 장비는 제지, 인쇄, 압연 등의 연속공정 분야에 적용되어 왔다. 특히 반복적인 패턴을 인쇄할 경우, 다수의 공정을 직렬로 연결하여 연속인쇄가 가능한 특징이 있어 대량생산을 통한 제품 단가 절감이 가능하다. 따라서 롤투롤 장비는 RFID 안테나, 태양전지, OLED 와 같은 상대적으로 인쇄정밀도가 낮은 인쇄전자소자나, 유연 디스플레이(flexible display)와 같은 고정밀도 인쇄전자소자의 대량생산 기술로 주목받고 있다. 일반적인 활자 인쇄, 그래픽 인쇄와 같은 경우 인쇄오차(register error)가 ±0.1mm 수준이면 충분하다고 알려져 있으나, 전자소자 인쇄 시 수~수십µm 수준의 정밀도가 요구된다.¹ 인쇄 오차는 소재의 변형을, 즉 장력에 의해 결정된다.² 따라서 인쇄오차를 줄이기 위해서는 인쇄구간으로 유입되는 소재의 장력을 일정하게 유지해야 하며, 기존의 인쇄방법보다 정밀한 장력 제어가 요구된다. 댄서(dancer)는 장력 외란을 감쇠시키기 위한 질량-댐퍼-스프링기구의 일종으로 2 차 시스템의 동특성을 이용하여 장력 외란을 감쇠시킨다. 이 때, 장력 외란을 감쇠시키기 위한 댄서의 작동방법은 패시브(passive)³ 타입과 액티브(active)^{4,5} 타입으로 구분할 수 있다. 패시브 타입은 액츄에이터 없이 2 차 시스템의 동특성을 이용하여 개루프 상태에서 장력 외란을 감쇠시키며, 액티브 타입은 액츄에이터로 댄서기구의 변위를 직접 제어하여 장력외란을 감쇠시킨다. 실제 현장에서는 댄서에 추가적인 액츄에이터 사용이 제한되므로 인접한 구동 롤의 속도를 제어하여 댄서의 위치를 간접적으로 제어하는 방법을 통해 장력을 제어하고 있다. Ebler³ 는 댄서 및 로드셀을 이용한 장력 제어에 대한 비교와 PI 제어기를 이용한 장력 제어 및 최적 튜닝기법에 대한 연구를 수행한 바 있으며, Kang^{6,7} 은 진자(pendulum)형식의 댄서 모델링 및 안정도 해석과 고속운전에 적용하기 위한 댄서 PI 제어기 설계에 대한 연구를 수행하였다. Pagilla^{4,5} 는 액티브 댄서에 대해 PID, IMC(Internal Model-based Controller), LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어기에 대한 비교 연구를 수행한 바 있다. 그러나 상기의 연구는 그래픽 인쇄와 같은 저 정밀도의 롤투롤 시스템을 대상으로 하였으며, 적용 대상이 액티브 댄서로 한정되어 있으므로 연구 결과를 인쇄전자소자 생산에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 전자소자

인쇄를 위해 댄서를 이용한 정밀 장력 제어에 대한 연구가 필요하며, 본 연구를 통하여 전자소자 인쇄에 적용할 수 있는 정밀 장력 제어를 위한 댄서 시스템의 LQG(Linear Quadratic Gaussian) 제어 기법을 제안하였다.

2. 수학적 모델

2.1 댄서의 수학적 모델

다음의 Fig. 1 에 진자형 댄서시스템의 개략도를 나타내었다. 댄서시스템은 2 개의 구동 롤 사이에 위치한 아이들 롤이 댄서기구에 의해 회전 운동하는 구조이며, 이 때 회전각 θ 가 작을 경우 댄서의 변위는 직선으로 일어난다고 가정한다.

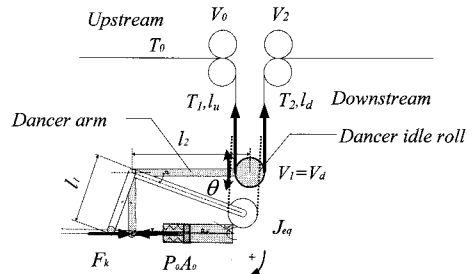


Fig. 1 Schematic of the dancer system and its primitive elements

2.1.1 댄서 상, 하류의 장력모델⁷

장력모델은 Brandenburg,² Shin^{8,9}에 의해 유도된 바 있으며 Kang⁷ 은 여기에 댄서의 변위를 추가적으로 고려하여 진자 형식의 댄서에 대한 선형 모델을 유도하였다. 아래의 선형 장력모델 식 (1), (2) 는 각각 댄서의 상류, 하류 장력모델을 나타내며, 댄서 아이들 롤 전, 후의 구동 롤 속도 차, 현재 스핀 및 이전 스핀의 장력, 댄서의 변위에 의해 현재 스핀의 장력이 결정됨을 나타낸다.

$$\dot{T}_1(t) = \frac{EA}{l_{d0}} \{-V_0(t) + V_1(t)\} + \frac{v_{00}}{l_{d0}} T_0(t) - \frac{v_{10}}{l_{d0}} T_1(t) + \frac{EA}{l_{d0}} l_2 \dot{\theta}(t) \quad (1)$$

$$\dot{T}_2(t) = \frac{EA}{l_{d0}} \{-V_1(t) + V_2(t)\} + \frac{v_{10}}{l_{d0}} T_1(t) - \frac{v_{20}}{l_{d0}} T_2(t) + \frac{EA}{l_{d0}} l_2 \dot{\theta}(t) \quad (2)$$

2.1.2 댄서 암 모델⁷

댄서 암 모델은 Fig. 2(b)와 같이 회전 축인 힌지(hinge)를 중심으로 하는 운동방정식으로부터 유

도할 수 있다. 식 (3)은 작동점 부근에서 θ 가 작다고 가정하여 선형화 하였으며, 댄서기구 및 아이들 롤 자중에 의한 모멘트는 0 으로 가정하였다. 공압 실린더의 힘이 일정하게 유지되는 조건에서 θ 를 일정하게 유지하기 위해 T_1, T_2 를 제어해야 함을 알 수 있다.

$$J_{eq}\ddot{\theta}(t) = -I_2\{T_1(t) + T_2(t)\} - \frac{24}{0.078}I_1^2\theta(t) - b\dot{\theta}(t) \quad (3)$$

2.1.3 댄서 아이들 롤 모델⁷

댄서 아이들 롤은 비구동 롤이며, 웹과 롤 사이에 미끄러짐이 없다는 가정하에 아이들 롤의 토크 방정식으로부터 선형모델 식 (4)를 유도한다.

$$J_d\dot{V}_1(t) = \{T_2(t) - T_1(t)\}r_d^2 - b_dV_1(t) \quad (4)$$

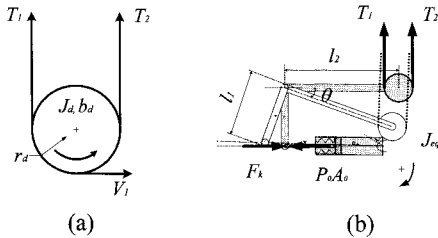


Fig. 2 (a) Free body diagram of the dancer idle roll, (b) the dancer arm

2.1.4 상태공간 모델

식 (1)~(4)는 단일 입력, 단일 출력(SISO)시스템으로, 다변수 제어에 적합하지 않은 형태이다. 따라서 다변수 제어를 위해 식 (5)와 같이 상태공간 방정식으로 나타내야 한다. 이 때 w_d, w_n 은 화이트 노이즈 성질을 나타내는 외란 및 잡음을 의미한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Gw_d \\ y &= Cx + w_n \end{aligned} \quad (5)$$

x, u, y 는 각각 상태벡터, 입력벡터, 출력벡터를 의미하며 식 (6)~(8)과 같이 정의한다.

$$x = [T_1(t) \ T_2(t) \ V_1(t) \ \theta(t) \ \dot{\theta}(t)]^T \quad (6)$$

$$u = [T_0(t) \ V_0(t) \ V_2(t)]^T \quad (7)$$

$$y = [T_1(t) \ T_2(t) \ \theta(t)]^T \quad (8)$$

식 (7)의 성분 T_0 는 언와인더에서 입력되는 주기적 또는 비 주기적 장력 외란을 포함하는 입력이다. 상태공간을 나타내는 행렬들은 식 (9)~(12)와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{v_{10}}{l_{u0}} & 0 & \frac{EA}{l_{u0}} & 0 & \frac{EA l_2}{l_{u0}} \\ \frac{v_{10}}{l_{d0}} & -\frac{v_{20}}{l_{d0}} & -\frac{EA}{l_{d0}} & 0 & \frac{EA}{l_{d0}} \\ -\frac{r_d^2}{J_d} & \frac{r_d^2}{J_d} & -\frac{b_d}{J_d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{l_2}{J_{eq}} & -\frac{l_2}{J_{eq}} & 0 & -\frac{24I_1^2}{0.078J_{eq}} & -\frac{b}{J_{eq}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{v_{00}}{l_{u0}} & \frac{EA}{l_{u0}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{EA}{l_{d0}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$G = B \quad (12)$$

식 (12)에서 외란 동역학 행렬 G 가 B 와 같은 이유는, 시스템의 주요 외란인 장력 외란이 시스템 입력 u 와 같은 특성을 갖기 때문이다. 따라서 주기적, 비 주기적 장력 외란과 화이트 노이즈 w_d 의 선형조합이 가능하다.

3. 장력 외란과 인쇄오차

Brandenburg²는 인쇄오차를 식 (13)과 같이 상류 스펜과 하류 스펜의 변형율의 함수로 유도하였다. 변형율은 후크의 법칙 식 (14)에 의해 장력으로 변환된다.

$$\tilde{Y}_{12} = \frac{\bar{V}}{s} (-\tilde{\epsilon}_{E2} + \tilde{\epsilon}_{E1}e^{-rs}) \quad (13)$$

$$T = EA\epsilon \quad (14)$$

즉, 인쇄오차를 제어하기 위해서는 장력을 제어해야 함을 알 수 있다. 인쇄전자소자를 생산하기 위한 롤투를 시스템의 운전 조건을 가정하여 장력 외란이 인쇄오차의 크기에 미치는 영향을 규명하기 위해 Table 1 의 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 1 Simulation conditions

Operating tension	50N
Operating speed	30m/min
Width of substrate	1m
Thickness of substrate	14micron
Young's modulus	4GN/m ²
Step input magnitude	15, 5, 2.5, 0.5 N
Sinusoidal input amp.	15, 5, 2.5, 0.5 N
Sinusoidal input freq.	2.01rad/s
Tension unit conversion	1N = 0.02V
θ unit conversion	1deg = 0.23V

롤투를 시스템에서의 장력 외란은 비 주기적 외란과 주기적 외란으로 구분할 수 있다. 비 주기적 장력 외란은 운전 중 발생하는 님(nip), 롤 교체를 위한 스플라이싱(splicing) 작업 등에 의해 발생하며, 순간적으로 장력이 증가하므로 계단함수로 표현된다. 주기적 장력 외란은 롤의 편심, 정렬 불량 등이 주요 원인이며 사인함수로 표현할 수 있다. Fig. 3 과 같이 T₀ 에 운전장력의 30%(15N)부터 1%(0.5N)까지 계단 입력의 크기를 줄이며 장력외란을 발생시킬 때, Table 1 의 운전조건에서 허용 인쇄오차를 10 μm로 가정하면, 장력 외란의 크기가 운전장력의 ±1% 이내로 수렴해야 한다(Fig. 4(a)). 이에 따라 주기적 장력 외란의 진폭도 ±1% 이내로 감소되어야 인쇄오차가 10 μm 이내로 수렴한다(Fig. 4(b)).

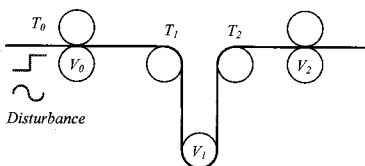
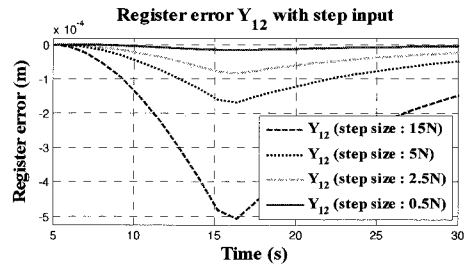
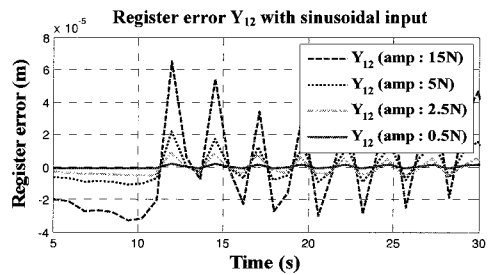


Fig. 3 Disturbance input at T₀ for testing register error and disturbance attenuation



(a) Step response



(b) Sinusoidal response

Fig. 4 Register error reduction with respect to varying input magnitude

따라서, Table 1 의 조건에서 인쇄오차를 수 μm 수준으로 유지하기 위해서는 장력 외란을 운전 장력의 ±1% 이내로 유지하도록 제어기 성능을 결정해야 한다.

4. LQG 제어기 설계

4.1 LQ regulator

LQ 제어기는 분리원칙(separation theorem)에 의해 LQR 문제와 칼만필터(Kalman filter) 설계문제로 나눌 수 있다. LQR 문제는 식 (15)의 제어입력을 생성하는 최적제어기 게인 K_r을 찾는 문제이다. 최적제어기 게인 K_r은 식 (16)의 2 차형 평가함수 J를 최소화하는 문제인데, 이 때 가중행렬 Q, R 이 설계 변수로 사용된다.

$$u(t) = -K_r x(t) \quad (15)$$

$$J = \int_0^{\infty} x^T Q x + u^T R u dt \quad (16)$$

최적제어게인 K_r은 식 (17)의 대수 리카티 방정식(algebraic Riccati equation)의 유일 해 X로부터 구할 수 있다. 이 때 Q는 식 (17)의 유일한 양반

한정 행렬, R 은 양한정 행렬이다.

$$A^T X + XA - XBR^{-1}B^T X + Q = 0 \quad (17)$$

$$K_r = R^{-1}B^T X \quad (18)$$

가중행렬 Q 는 시스템의 상태를 최소화하는 역할을 한다. Q 의 성분을 적절하게 선정할 경우 다변수 피드백(multivariable feedback)이 가능하며, 이는 단일입력, 단일출력 제어방법인 PI 제어와 성능 차이를 나타내는 부분이다(Fig 5(a), (b)). 통상의 PI 제어기는 운전장력의 ±2% 수준으로 장력 외란을 감쇠시키는 것을 목표로 하며 이를 위해 θ 만을 측정하여 피드백 하였으나, 다변수 피드백을 위해 T₁, T₂, θ 를 상태변수로 선정하고 가중행렬 Q 를 식 (19)와 같이 정의하였다. 이 때 T₁, T₂, θ 에 해당하는 성분은 각각 Q₁₁, Q₂₂, Q₄₄ 이다. 식 (3)에서 θ, θ̇, θ̈의 초기값이 0 일 때 θ 는 웹의 장력에 의해 간접적으로 변하는 변수이다. 그러나 식 (1), (2)는 장력의 변화량이 현재 스펠과 이전 스펠의 장력, 구동 롤의 선속도와 θ̇ 에 의해 결정되는 것을 의미하며, θ 변위를 작게 유지하는 것은 곧 장력의 변화를 최소화하는 것을 의미한다. 따라서 θ 에 해당하는 Q₄₄ 에 우선적으로 가장 큰 가중치를 부여한다. 다음으로 제어 목표인 T₂ 에 해당하는 Q₂₂ 성분에 그 다음으로 큰 가중치를 부여한다. 또한 T₁ 의 장력이 덴서 아이들 롤을 거쳐 T₂ 로 전달되므로 보다 정밀한 제어를 위해 T₁ 의 장력을 감쇠시킬 목적으로 Q₁₁ 에도 가중치를 부여한다. 식 (6)의 상태변수 V₁ 과 θ̇ 은 실제 시스템에서 측정하지 않는 변수이므로 0 으로 남겨둔다. 제어입력 u 를 최소화하는 가중행렬 R 은 식 (20)과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

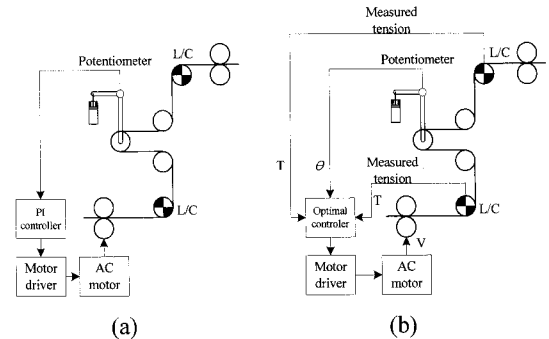


Fig. 5 (a) Single variable feedback controller with θ, (b) multivariable feedback controller with θ and tension

Fig. 6 은 LQ 제어기인 K_r 을 구하기 위한 가중행렬 Q 와 R 의 비를 변화시키며 시뮬레이션 한 결과를 나타낸다. Q 를 고정시키고 R 을 증가시킨 경우, 제어기 K_r 은 R 이 증가함에 따라 제어입력 u 를 작게 생성하며, 덴서 암의 각도 θ 가 커지는 것을 확인할 수 있다. 반대로 R 을 고정시키고 Q 를 증가시키는 경우 상태변수를 감소시키기 위해 제어입력 u 가 증가하므로 덴서 암의 각도 θ 가 작아진다. 따라서 시스템의 출력을 작게 하기 위해서는 행렬 Q 에 더 많은 가중치를 부여하면 되나, 이 경우 제어입력이 가중치 만큼 증가하므로 무조건 Q 를 크게 잡는 것은 바람직하지 않다. 본 연구에서는 장력 외란을 운전 장력의 ±1% 이내로 감쇠 하기 위해 Q:R 을 1:1 로 선정하였으며, 선정 한 비율의 타당성을 5 장에서 검증하도록 한다.

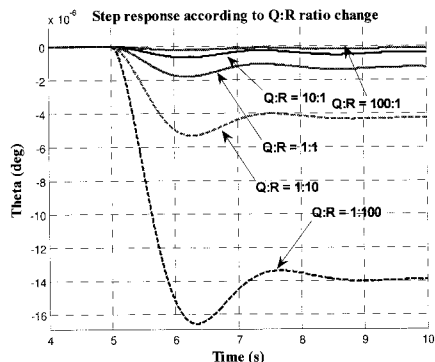
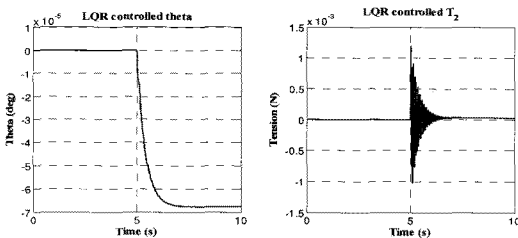


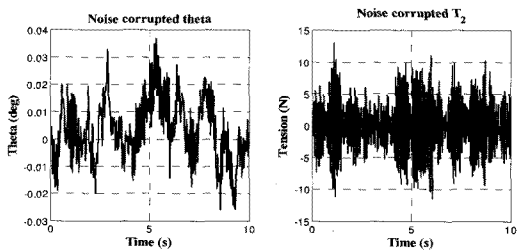
Fig. 6 Theta step response according to Q:R ratio of LQR controller

4.2 칼만필터 설계

칼만필터는 최적 상태관측기의 일종으로 화이트 노이즈가 포함된 신호에서 원래의 신호를 추정하는 기능을 한다. Fig. 7(a)는 Fig. 5(b)와 같이 θ 및 T_2 를 측정하여 LQR 제어했을 때의 응답이다. 이 때 측정 잡음은 없는 상태이다. Fig. 7(b)는 측정된 θ 및 T_2 에 $\pm 2 \times 10^{-2}V$ ($\theta: \pm 13 \times 10^{-3}rad, T_2: \pm 1N$ 에 해당) 수준의 측정 잡음이 섞여있을 때 LQR 제어기 응답이다. 측정잡음은 화이트 노이즈로 가정하였다.



(a) Step response without noise



(b) Step response with noise

Fig. 7 Step response of LQR controlled system

측정 잡음으로 인해 T_2 가 약 $\pm 10N$ 범위에서 진동하므로 원하는 제어목표를 달성할 수 없음을 확인할 수 있다. 칼만필터는 실제 시스템의 출력과 추정된 출력의 차로부터 시스템의 상태를 추정하며, 식 (21)과 같이 칼만필터 게인 K_f 를 y 의 오차에 곱한다. 필터게인 K_f 는 식 (22)로부터 얻으며, Y 는 식 (23)의 필터 대수 리카티 방정식의 양반한 정 해이다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= Ax + Bu + K_f(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{aligned} \tag{21}$$

$$K_f = Y C^T R_0^{-1} \tag{22}$$

$$AY + YA^T - YC^T R_0^{-1} CY + GQ_0 G^T = 0 \tag{23}$$

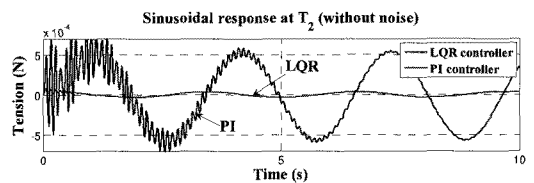
식 (22), (23)의 Q_0, R_0 는 가중치로서 필터의 성능을 결정하는 설계변수이다. 또한 Q_0, R_0 는 각각 외란행렬 G , 출력행렬 C 에 대한 가중치이다. 식 (23)에서 Q_0 를 작게 설정하기 위해 Q_0, R_0 를 단위행렬이라 가정하고 Q_0 와 R_0 의 비를 0.0001:1로 설정하였다.

5. 제어 성능 비교

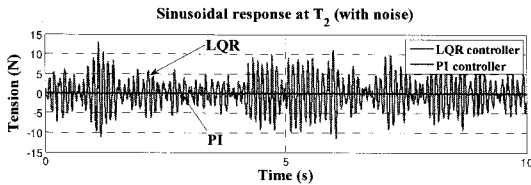
설계된 제어기의 성능을 검증하기 위해 PI 제어기와 LQR 제어기, LQG 제어기에 대해 동일한 입력에 대한 응답 성능을 비교하였다. 시험 신호로 주기적 장력 외란을 선택하였으며, 주파수 2.01rad/s, 진폭 12.5N 인 사인 입력을 장력 외란으로 T_0 에 인가하였다. 측정 잡음은 $\pm 2 \times 10^{-2}V$ 수준이다.

5.1 PI 제어기와 LQR 제어기의 비교

입력 장력 외란으로 사인 입력에 대한 T_2 응답 성능을 Fig. 8에 비교하였다. PI 제어기의 게인은 $K_p=0.180, T_n=10$ 인 조건이며 Fig. 5(a)와 같이 θ 를 측정하여 되먹임한다. LQR 제어기는 $Q_{11}=5, Q_{22}=11, Q_{44}=50, R_{11}=10, R_{22}=1, R_{33}=1000$ 으로 설정하였으며 T_1, T_2, θ 를 측정하여 LQ 게인을 거쳐 T_0, V_0, V_2 에 되먹임한다. 이 때 T_0 는 외란 입력이며, V_2 는 MSD(Master Speed Drive)이기 때문에 제어입력을 최소화하여 0에 가깝게 한다. Fig. 8(a)는 측정 잡음이 없을 때의 T_2 응답을 나타낸다. LQR 제어기의 응답은 $\pm 4 \times 10^{-5}N$ 수준으로 PI 제어기보다 작은 값으로 수렴한다. 그러나 Fig. 8(b)와 같이 측정 잡음이 포함된 상태에서 제어를 할 경우 LQR 제어기는 측정 잡음에 대해 강건성이 낮아진다. 따라서 측정 잡음이 존재하는 실제 플랜트에서 LQR 제어기만으로는 목표한 제어성능을 달성할 수 없다.



(a) T_2 response without noise

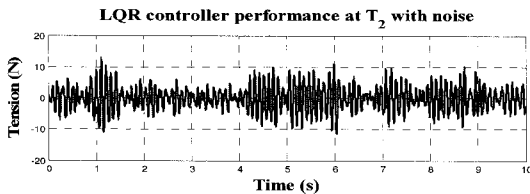


(b) T_2 response with noise

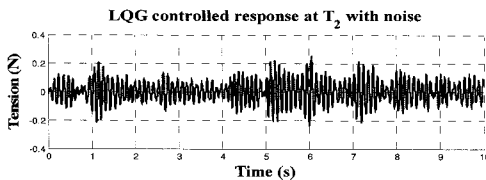
Fig. 8 Comparison of PI and LQR controller performance at T_2

5.2 LQR 제어기와 LQG 제어기의 비교

동일한 수준의 측정 잡음에 대해 LQR 제어기와 LQG 제어기의 응답성능을 Fig. 9 에 비교하였다.



(a) LQR controlled T_2 with noise



(b) LQG controlled T_2 with noise

Fig. 9 Comparison of LQR and LQG controller performance at T_2

Fig. 9(a)는 되먹임 신호에 혼입된 측정 잡음의 영향으로 출력 T_2 가 $\pm 10N$ 범위에서 진동한다. 그러나 LQG 제어기는 칼만필터에 의해 원래의 T_1 , T_2 , θ 측정 값을 추정하여 되먹임한다. 따라서 Fig. 9(b)는 측정 잡음이 존재하는 조건 하에 T_2 응답이 $\pm 0.4\%$ ($\pm 0.2N$) 이내로 수렴함을 보이고 있다.

Fig. 10 은 칼만필터로 추정한 되먹임 신호를 나타낸다. Fig. 10(a)는 측정 잡음이 없는 이상적인 경우의 되먹임 신호이며, Fig. 10(b)는 칼만필터로 측정잡음을 배제하고 추정한 되먹임 신호이다. 칼만필터로 추정한 되먹임 신호는 측정 잡음이 없는 되먹임 신호와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 되먹임 신호가 $10^{-5} \sim 10^{-6}V$ 수준으로 측정 잡음 $\pm 2 \times 10^{-2}V$ 와 비교하여 매우 작기 때문에 원래의 신호를 근사하게 추종하는 데는 한계가 있다.

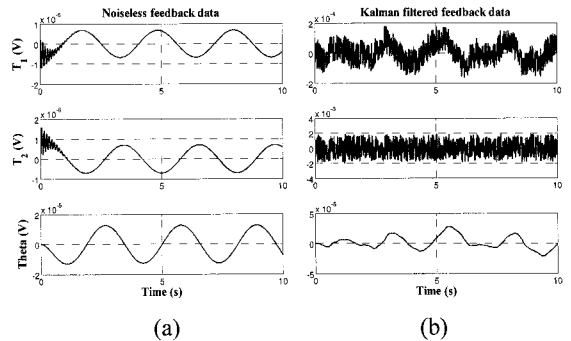


Fig. 10 Comparison of ideal LQR feedback data (a) and estimated LQG feedback data (b)

5.3 결과 고찰

PI 제어기는 단일 입력력 제어기인 반면, LQR 제어기는 다변수 입력력 제어가 가능하다. 따라서 다수의 측정 변수를 고려하여 산출한 LQ 게인으로 되먹임 제어를 했을 때, Fig. 11 과 같이 계단 입력에 대해 정착시간이 약 1/5 수준으로 감소하며 오버슈트가 16 배 감소하는 효과가 있다. 따라서 최적 제어기인 LQR 제어기가 정밀 장력 제어에 보다 효과적임을 확인할 수 있다. 그러나 LQR 제어기는 측정 잡음이 존재할 때 제어기의 강건성이 떨어지므로 측정 잡음을 배제해야 한다.

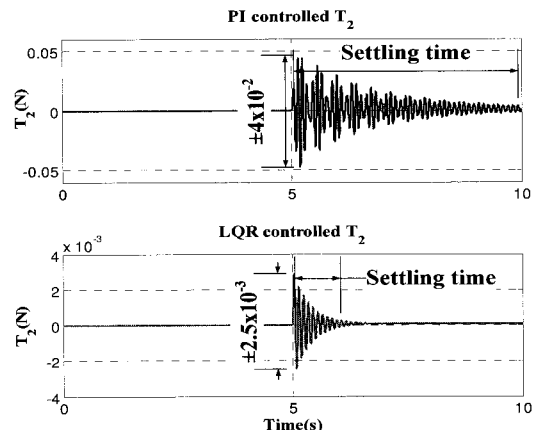


Fig. 11 Comparison of step response of PI and LQR controller

칼만필터는 저역통과 필터(low-pass filter)와는 달리 측정 잡음이 섞인 시스템의 응답과 입력으로부터 시스템의 다음 거동을 예측하는 방식으로 측정 잡음의 영향을 최소화한다. 그러나 측정 잡음

수준이 원래의 신호와 비교하여 매우 큰 경우, 시스템의 원래 신호의 추정이 어렵다. LQG 제어기 시뮬레이션에 사용된 모델은 장력 외란 T_0 에 대해 출력 T_2 가 $10^{-3} \sim 10^{-6}V$ 수준으로 작은 값이기 때문에 $10^{-3}V$ 수준인 측정 잡음의 영향에 민감하다. 실제 시스템에 적용 시, 전위차계 및 로드셀과 연결된 저역통과 필터를 거친 데이터를 이용하면 시뮬레이션과 동등하거나 그 이상의 결과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

6. 결론

본 연구에서는 댄서가 장착된 롤투롤 시스템에 서 전자소자 인쇄를 위한 장력 제어기법으로 LQG 제어기를 이용한 다변수 되먹임 기법을 제안하였다. 제안된 LQG 제어기는 Table 1의 조건 하에서 $10 \mu m$ 수준의 정밀 레지스터 제어가 가능하도록 설계되었으며 시뮬레이션을 통해 제어목표를 만족하는 것을 확인하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1) 통상의 PI 제어기는 운전장력의 $\pm 2\%$ 수준으로 장력 외란을 감쇠시키는 것을 목표로 하지만, 전자소자 인쇄를 위해서는 보다 정밀한 수준의 장력 제어가 필요하며, 장력의 크기와 인쇄오차 크기 사이의 관계를 이용하여 설계사양을 도출해야 한다. 따라서 레지스터 모델과 Table 1의 조건을 이용하여 T_0 에 운전 장력의 30%(15N)부터 1%(0.5N)까지 입력의 크기를 줄이며 확인한 결과, $\pm 1\%$ 수준의 장력 제어가 요구됨을 확인하였다.

2) 정밀한 장력제어를 위해 다변수 되먹임 LQR 제어기를 설계하고 PI 제어기와 비교하였다. 이 때 LQ 계인을 계산하기 위한 설계변수 Q와 R의 선정기준을 제시하였다. 선정된 Q와 R 행렬을 이용하는 LQR 제어기는 측정 잡음이 없는 조건에서 PI 제어기와 비교하여 약 1/5의 정착시간 감소, 오버슈트 16 배 감소하며 정상상태 응답성능이 향상되었으나, $\pm 2 \times 10^{-2}V$ 수준의 측정잡음이 혼입될 경우 강건성이 떨어진다.

3) 혼입된 잡음을 배제하기 위하여 칼만필터를 설계하였다. 이 때 설계변수인 Q_0 와 R_0 의 비는 0.0001:1이다. 설계된 칼만필터는 원래의 신호를 추종하는 경향이 있으나 되먹임 신호에 비해 측정 잡음이 크므로 원래의 신호를 추정하지는 못한다. 칼만필터와 LQR 제어기를 연결하여 LQG 제어기를 구현하였으며, LQG 제어기는 Table 1의 조건에

서 $\pm 2 \times 10^{-2}V$ 의 측정잡음이 존재할 때 T_2 응답이 $\pm 0.2N$ ($\pm 0.4\%$)로 수렴한다. 따라서 제안된 LQG 제어기는 제어 목표를 만족하므로 전자소자 인쇄를 위한 롤투롤 시스템에 활용될 수 있다.

후 기

본 논문은 2009년도 정부(교육 과학 기술부)의 지원으로 “국제 과학 기술 협력 재단의 지원 (K20701040600 - 09A0404 - 05410)” 및 “서울시 산학연 협력 사업(10848)”의 지원 하에 수행되었습니다.

참고문헌

1. Mildner, W., “OE-A The international network for the organic and printed electronics industry,” 1st Int. Conference on R2R Printed Electronics 2008, Vol. 1, pp. 49-67, 2008.
2. Brandenburg, G., “New mathematical models for web tension and register error,” Proc. of 3rd Int. IFAC Conf. Instrumentation and Automation in the Paper, Rubber and Plastics Industries (PRP 3), Vol. 1, pp. 411-438, 1976.
3. Ebler, N. A., Arnason, R., Michaelis, G. and D'Sa, N., “Tension Control: Dancer Rolls or Load Cells,” IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 29, No. 4, pp. 727-739, 1993.
4. Pagilla, P. R., Dwivedula, R. V., Zhu, Y. and Perera, L. P., “Periodic Tension Disturbance Attenuation in Web Process Lines using Active Dancers,” Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 125, No. 3, pp. 361-371, 2003.
5. Pagilla, P. R., Perera, L. P. and Dwivedula, R. V., “The Role of Active Dancers in Tension Control of Webs,” Proc. of the 6th International Conference on Web Handling, Vol. 1, pp. 227-242, 2001.
6. Kang, H. K., Shin, K. H. and Kim, S. C., “Modeling and Analysis of a Pendulum Dancer in Industrial Converting Machines,” Trans. of the KSME(A), Vol. 33, No. 5, pp. 482-488, 2009.
7. Kang, H. K. and Shin, K. H., “Matching Design of a Tension Controller with Pendulum Dancer in Roll-to-roll Systems,” Journal of the KSPE, Vol. 26, No. 6, pp. 81-89, 2009.
8. Shin, K. H., “Tension Control,” Tappi Press, pp. 35-

- 42, 2000.
9. Shin, K. H., "Distributed Control of Tension in Multi-Span Web Transport Systems," Ph. D. Thesis of Automatic Control, Oklahoma State University, pp. 18-90, 1991.
 10. Skogestad, S. and Postlethwaite, I., "Multivariable feedback control analysis and design," John Wiley & Sons, pp. 344-349, 2005.
 11. Grewal, M. S. and Andrews, A. P., "Kalman Filtering Theory and Practice using MATLAB 2nd Edition," Wiley Interscience, pp. 114-125, 2001.