

# DSP를 이용한 비선형 타이밍벨트 구동시스템의 QLQG/LTR 제어

한성익\*, 방두열\*\*

## QLQG/LTR Control of the Nonlinear Timing-Belt Driving System Using DSP

Seong-Ik Han\*, Du-Yeol Pang\*\*

### Abstract .

In this paper, the QLQG/LTR control method is applied for the position control of the nonlinear timing belt driving system. Parameters of the plant are identified by genetic algorithm and nonlinear elements, such as Coulomb friction and dead-zone, are quasi-linearized by RIDF method. Comparing with the LQG/LTR control, the QLQG/LTR has similar structures of the LQG/LTR, but this method can consider nonlinear effects in designing the controller. Thus, the QLQG/LTR control system is robust to hard nonlinearities such as Coulomb friction, dead-zone, etc. For a given hard nonlinear system, through experiments, it is shown that the tracking performance of the QLQG/LTR control system can be very improved than the LQG/LTR control system.

**Key Words :** Timing-belt driving system (타이밍벨트 구동시스템), Genetic algorithm (유전알고리즘), Dead-zone (사역대), Coulomb friction (쿨롱마찰), QLQG/LTR, DSP system (DSP 시스템)

## 1. 서론

서보 메커니즘에서 직선이송이나 축간의 동력전달 시 자주 사용되는 타이밍 벨트(timing-belt)는 윤활이 필요 없으며 치형이 맞물려 있기 때문에 미끄럼이 없이 회전의 동기를 취할 수 있다. 그리고 기어전동에 비해 정속성이 높으며 가벼운 하중으로 축간의 중심거리가 큰 경우 빠르

게 동력을 전달하는 특성을 가지므로 로봇이나 역진자 시스템, 모형 크레인장치 같은 실험장치나 자동화 장치에 많이 사용된다. 그런데 축간거리가 길어지고 축 사이에 이동 부하가 있는 경우 동력전달의 확실성과 이동부하에 의한 벨트의 처침을 방지하기 위하여 안내대(guide)를 부착해야 하는 경우가 발생한다. 이러한 경우 안내대면과 이송 부하와의 접합면 사이의 쿨롱마찰, 회전부의 쿨롱마찰, 그

\* 순천제일대학 기계전기제어과(hansng@suncheon.ac.kr)

\*\* 순천제일대학 기계전기제어과

리고 작은 위치를 이송하는 경우 타이밍 벨트와 풀리 사이의 전달 지연으로 인한 사역대(dead-zone) 같은 비선형 특성이 발생할 수 있다.

이러한 경우 정상오차가 발생하거나 큰 오버슈트가 발생하여 정확한 위치 이송이 어려워지고 정밀한 위치제어가 곤란하게 되어 연결된 장치의 제어를 위한 소기의 목적을 달성하는데 어려움이 발생하게 된다. 따라서 비선형을 고려한 제어방법이 필요하게 된다. 쿨롱마찰이나 사역대는 불연속 시간특성을 갖는 비선형 요소로서 하드 비선형(hard nonlinearity)라고 부르며 Taylor급수전개에 의한 선형근사가 불가능하므로 일반적으로 기술함수법(descrbing function method)<sup>(1)</sup>를 이용하여 준선형화(quasi-linearization)를 시도하여 제어를 설계한다.

이러한 하드 비선형을 갖는 시스템에 대한 비선형 제어기 설계방법으로서 Taylor와 Strobel<sup>(2)</sup>이 비선형 PID 제어방법을 연구하였고 Beaman<sup>(3)</sup>이 QLQG(quasi linear quadratic Gaussian) 제어방법을 연구하였다. 그러나 이러한 방법들은 비선형 제어기 설계 시 제어시스템의 성능과 안정성 보장에 문제점이 있고 다변수 시스템에 대한 적용하기가 어려운 점이 있어서 Kim<sup>(4)</sup>이 QLQG/LTR(quasi linear quadratic Gaussian with loop transfer recovery) 제어방법을 연구하여 선형제어의 조직적인 방법을 비선형 시스템에 응용할 수 있으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 여러 시스템에 대해 타당한 성능을 보여주었다<sup>(5)(6)</sup>. 그리고 유압시스템의 마찰에 대해 비례제어를 이용하여 위치제어를 시도한 연구<sup>(7)</sup>가 있으나 아직까지 QLQG/LTR 제어방법을 실험적으로 비선형 시스템에 적용하여 타당성을 검증한 경우가 없었다.

따라서 본 연구에서는 쿨롱마찰과 사역대가 동시에 존재하는 타이밍벨트 구동 비선형 이송시스템에 대해 통해 QLQG/LTR 제어방법을 적용하여 DSP시스템을 이용한 실시간 실험을 통해 정확한 위치제어가 이루어짐을 보이고자 한다.

## 2. 시스템 모델링

### 2.1 타이밍벨트 구동시스템 특성

시스템 모델링을 실현하기 위한 타이밍벨트 구동시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 cart는 하부의 중심부에서 타이밍벨트와 결합되고 하부 좌우에서 미끄럼 안내대(sliding guide)를 따라 이동할 수 있으며 한쪽의 풀리는 DC 모터축과 연결되

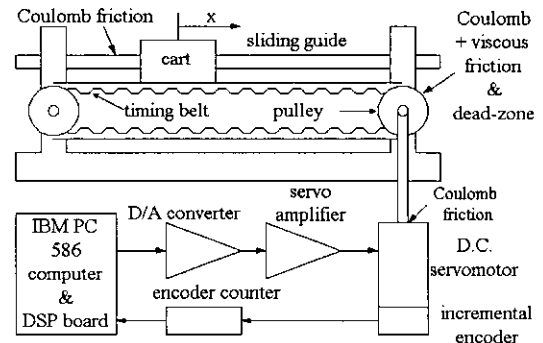


Fig. 1 A schematic diagram of the timing-belt driving system

어 있다. 모터는 LG사의 FMD-E10EA DC 서보모터이며 모터에는 1000 pulse/rev의 분해능을 갖는 증가형(incremental type) 회전식 엔코더가 부착되어 있으며 LG사의 서보 드라이버 FDD-102PD와 연결되어 있다. DSP 시스템은 dSPACE<sup>(7)</sup>사의 TMS320C 칩이 내장된 DS1102 보드와 인터페이스 요소로 구성되어 있다. 모터의 회전운동과 cart의 직선운동이 결합된 시스템의 운동방정식은 직선운동으로 등가시키면 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$M_{eq}\ddot{x}(t) + C_{eq}\dot{x}(t) + F_{feq} \operatorname{sgn}(\dot{x}) = Dz \cdot F_{eq}(t) \quad (1)$$

여기서  $x(t)$ 는 cart의 변위,  $M_{eq}$ 는 전체 시스템의 등가 질량,  $C_{eq}$ 는 등가 점성마찰(viscous friction)계수,  $F_{feq}$ 는 등가 Coulomb 마찰 토크,  $Dz$ 는 사역대,  $F_{eq}(t)$ 는 등가구동력을 각각 나타낸다. 시스템의 미지의 파라미터들을 알아내기 위하여 모터의 전기적 동역학을 무시하고 구동기의 증폭 계인을 선형으로 단순화하여 비례 위치제어시스템을 구성하면 다음과 같다.

$$M_{eq}\ddot{x}(t) = -C_{eq}\dot{x}(t) - F_{feq} \operatorname{sgn}(\dot{x}) = Dz \cdot \frac{K_{amp}}{r_p} \cdot K_p(x_r - x) \quad (2)$$

여기서  $K_{amp}$ 는 증폭기 계인,  $r_p$ 는 풀리의 반지름,  $K_p$ 는 비례제어기의 계인,  $x_r$ 는 기준입력을 각각 나타낸다. 이러한 모델에 대해 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실험값의 오차가 최소화되도록 유전 알고리즘(genetic algorithm)<sup>(8)</sup>을 이용하여 off-line으로 시스템 파라미터를 식별하였다. Fig. 2에 사용된 유전알고리즘의 간단한 flow chart가 제시 되어있다. 여기서 세대 수는 20, 집단 수는 16, 교차확

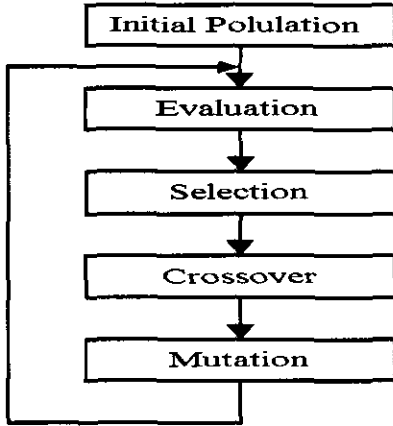


Fig. 2 Flow chart for a simple genetic algorithm

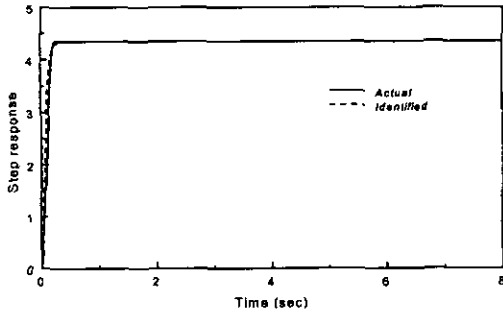


Fig. 3 The step response for actual and identified models

률은 0.7, 돌연변이 확률은 0.4로 선정하였다. 여러 가지 기준입력에 대해 반복하여 시스템 식별을 시도하여 평균 값을 취하였으며 Fig. 3에 5cm 계단입력에 대해 실험한 실제 모델과 식별된 모델의 응답 결과가 제시되어 있다.

더 정확한 파라미터 식별을 위한 우수한 방법들이 있으나 유전 알고리즘을 이용하면 간단하게 파라미터 식별을 어느 정도 신뢰성 있게 수행할 수 있다. 그리고 Table 1에는 시스템의 각 부분의 규격과 식별한 파라미터 값들이 제시되어 있다. 이렇게 식별된 파라미터들을 식(1)에 대입하고 랜덤입력 기술함수법<sup>(1)</sup>(random input describing function method, RIDF)을 이용하여 비선형요소들에 대해 준선형화를 시도하면 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{C_{eq} + N_f}{M_{eq}} \end{bmatrix} \begin{cases} x_1(t) \\ x_2(t) \end{cases} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{amp}}{M_{eq}} N_{dz} \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1 \ 0] \begin{cases} x_1(t) \\ x_2(t) \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $[x_1(t), x_2(t)] = [x(t), \dot{x}(t)]$ ,  $N_f$  와  $N_{dz}$  은 쿨롱마찰과 사역대에 대한 기술함수계인이고  $\sigma_{x2}$  와,  $N_f = \frac{F_{feq} \sqrt{2/\pi}}{\sigma_{x2}}$ ,  $N_{dz} = 1 - erf\left(\frac{\delta}{\sigma_u}\right)$  로 표현되며  $\sigma_u$  는 각각 상태변수  $x_2$  와 입력변수  $u(t)$  의 표준편차(standard deviation)이고  $\delta$  는 사역대의 크기를 나타낸다.

Table 1 System specifications and identified values of parameters

Name	Specification	Identified values
guide length	100 (cm)	
distance between pulley	92 (cm)	
guide diameter	2 (cm)	
$r_p$	2.83 (cm)	
pitch of pulley	17.78 (cm/rev)	
$M_{eq}$		0.0037676 (kef · sec <sup>2</sup> /cm)
$C_{eq}$		0.24853 (kef · sec/cm)
$F_{feq}$		0.42714(kef)
(length of dead-zone)		0.25117
$K_{amp}$		1.5714 (kef · cm/V)

### 3. QLQG/LTR 제어이론

일반적인 비선형 시스템은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = f[x(t)] + Bu(t) + \Gamma w(t) \quad (4)$$

여기서  $x(t)$ 는  $(n \times 1)$ 플랜트 상태벡터,  $f[x(t)]$ 는 벡터,  $u(t)$ 는  $(n \times 1)$ 제어입력벡터,  $w(t)$ 는  $(p \times 1)$ 외란 입

력벡터,  $\Gamma$ 는  $(n \times 1)$ 외란입력행렬이다. 이러한 비선형 시스템은 RIDF 기법을 이용하면 다음과 같은 통계학적 준선형(quasi-linear) 시스템으로 표현된다.

$$\dot{x}(t) = N(\sigma_x)x(t) + Bu(t) + \Gamma w(t) \quad (5)$$

여기서  $N(\sigma_x)$ 는  $(n \times n)$ 플랜트 행렬이고  $\sigma_x$ 는 플랜트 상태변수의 표준편차이다. 출력방정식은

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (6)$$

이고 제어입력은

$$u = -Gz(t) \quad (7)$$

이다. 여기서  $v(t)$ 는 측정잡음벡터이고  $G$ 는 제어게인행렬이고  $z(t)$ 는  $(n \times 1)$ 제어기 상태벡터이다. 모델기준 제어기는

$$\dot{z}(t) = N(\sigma_x)z + Bu(t) + H[y(t) - Cz(t) - r(t)] \quad (8)$$

이며  $\sigma_x$ 는 제어기 상태변수의 표준편차,  $H$ 는 필터게인행렬,  $r(t)$ 는  $(m \times 1)$ 명령입력벡터를 나타낸다.

### 3.1 목표필터루프 설계

루프형성을 위해 가상적인 랜덤 프로세스 외란과 측정잡음을 가정하면 준선형화 시스템에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$y(t) = Cx(t) + \theta(t) \quad (9)$$

여기서  $\xi(t)$ ,  $\theta(t)$ 는 각각 다음을 만족하는 가상적인 랜덤 외란입력, 측정잡음이다:

$$E[\xi(t)] = 0, E[\xi(t)\xi^T(t)] = I, E[\theta(t)\theta^T(t)] = \mu I.$$

여기서 행렬  $L$  과  $\mu$ 는 설계변수이며 필터게인 행렬은

$$H = \frac{1}{\mu} PC^T \quad (10)$$

로 주어지고  $P$ 는 다음의 FARE (filter algebraic Riccati

equality)식의 해이다.

$$NP + PN^T + LL^T - \frac{1}{\mu} PC^T CP = 0 \quad (11)$$

### 3.2 저가 QLQR문제를 이용한 LTR

저가제어를 이용한 QLQR과정에서 비선형 특성으로 인한 설계문제가 해결되어 선형 LQG/LTR제어와 유사하게 제어를 설계할 수 있음을 보이기로 한다.

가격함수는

$$J = \frac{1}{2} E[x^T Qx + \rho u^T u] \quad (12)$$

이고 여기서  $Q$ 는 상태가중함수,  $\rho$ 는 제어가중 파라미터이다. 제어게인행렬  $G$ 는

$$G = \frac{1}{\rho} BS \quad (13)$$

로 주어지며  $S$ 는 다음의 수정된 CARE(control algebraic Riccati equality)식의 해이다.

$$N^T S + SN + C^T C - SBB^T S + \Psi(S, N, X) = 0 \quad (14)$$

여기서  $X$ 는 다음의 Lyapunov식을 만족하는 상태공분산행렬(state covariance matrix)이다.

$$(N - BG)X + X(N - BG)^T + \Gamma W \Gamma^T = 0 \quad (15)$$

여기서  $W$ 는 외란 공분산행렬이며 식(14)의 비선형 보정항  $\Psi(\cdot)$ 는 다음과 같다.

$$\Psi_{ij}(S, N, X) = 2tr \left( S \frac{\partial N}{\partial X_{ij}} X \right)$$

식(14)에 플랜트 비선형으로 인해 나타나는 수치적으로 매우 풀기 어려운 비선형 보정항이 존재한다. 그런데 비선형 보정항의 크기의 차수는 다음과 같이 정의되는 LTR 지수와 같다<sup>(5)</sup>.

$$\alpha = \|N\| \cdot \left( \frac{\rho}{\|BB^T\| \cdot \|C^T C\|} \right)^{1/2} \quad (16)$$

이 때  $\rho \rightarrow 0$ 이면  $\alpha \rightarrow 0$ 이고 따라서  $\Psi \rightarrow 0$ 가 되

므로 저가제어를 이용하면 비선형 보정항이 무시되어 통계학적 특성을 제외하고는 선형 LQG/LTR 제어방법과 유사하게 제어기를 설계할 수 있다. 비선형 요소에 대한 기술합수 계인의 표준편차는 미리 알 수 없으므로 먼저 일정한 값을 가정하고 다음의 폐루프 시스템에 대한 Lyapunov 방정식을 풀어서 정확한 값을 추정한다.

$$N_c X_c + X_c N_c + \Gamma_c W_c \Gamma_c^T = 0 \quad (17)$$

여기서

$$N_c = \begin{bmatrix} N & -BG \\ HC & N - BG - HC \end{bmatrix}, X_c = \begin{bmatrix} X & Y \\ Y & Z \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_c = \begin{bmatrix} 0 & \Gamma & 0 \\ H & 0 & H \end{bmatrix}, W_c = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & W & 0 \\ 0 & 0 & V \end{bmatrix},$$

$$X = E[x(t)x(t)^T], Y = E[z(t)\tilde{x}(t)^T], Z = E[z(t)z(t)^T],$$

$$R = E[r(t)r(t)^T], W = E[w(t)w(t)^T], V = E[v(t)v(t)^T],$$

$$\tilde{x}(t) = x(t) - z(t).$$

QLQG/LTR 제어방법의 자세한 설계절차는 참고문헌 (5), (6)을 참고하고 생략하기로 한다.

### 4. 실험 및 검토

타이밍벨트 구동 위치제어시스템의 개략도는 Fig. 1에 이미 나타나 있다. Fig. 4는 구동시스템의 사진이다. 설계된 제어알고리즘을 Matlab의 Simulink<sup>(11)</sup>를 이용하여 구현하였고 DSP 시스템을 이용하여 실시간 실험을 수행하였다. 먼저 LQG/LTR 제어시스템의 성능과 비교하기 위하여 LQG/LTR 제어시스템을 설계하였다. 설계변수인  $\mu$  와  $\rho$  값은 각각 0.025,  $10^4$ 로 정했으며 행렬  $L$ 은 플랜트가 적분요소를 포함하고 있으므로 적분요소가 플랜트에 있는 경우에 대한 루프형성방법<sup>(10)</sup>을 이용하여  $L = [1 \ 0]^T$ 로 선정하였다. 설계된 필터게인 행렬  $H$ 와 제어게인 행렬  $G$ 는 각각  $H = [6.3256 \ 0]^T, G = [100 \ 0.57701]^T$ 로 선정되었다. 설계된 제어기를 Mathwork사의 Simulink를 이용하여 LQG/LTR 제어기를 구현한 후 실제 플랜트에 대해 1,2,3,5cm의 작은 계단명령입력과 10cm, 30cm, 50cm의 비교적 큰 계단명령입력에 대해 실험을 수행한 정규화된 (normalized) 출력들이 Fig. 5, Fig. 6에 제시되어 있다.

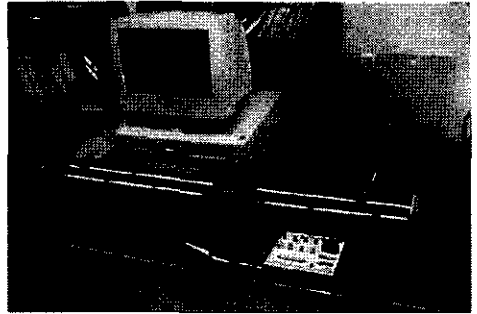


Fig. 4 Photograph of the timing-belt driving system

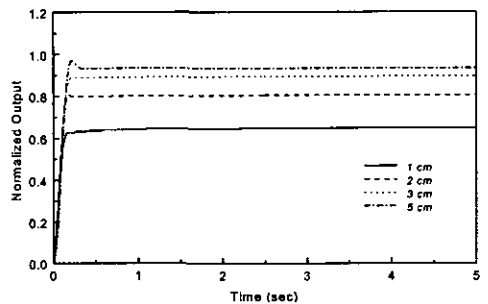


Fig. 5 Normalized outputs for step command inputs of LQG/LTR control system :  $r = 1\text{cm}, 2\text{cm}, 3\text{cm}, 5\text{cm}$  (experiment)

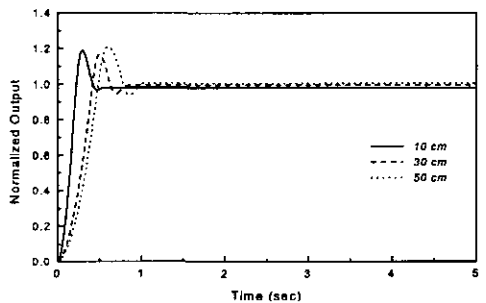


Fig. 6 Normalized outputs for step command inputs of LQG/LTR control system :  $r = 10\text{cm}, 30\text{cm}, 50\text{cm}$  (experiment)

Fig. 5를 살펴보면 작은 계단 명령입력에 대한 cart의 위치 추종성능이 좋지 않게 나타나고 있다. 그리고 명령입력의 크기가 작음에 비례하여 정상응답성능이 더욱 나빠져 있고 있음을 알 수 있다. 이것은 명령입력이 작을수록 구동력이 작으므로 상대적으로 쿨롱마찰력과 사역대의 영향

이 크게 나타나고 있기 때문이다. 그리고 Fig. 6에서도 30cm이상의 계단 명령입력부터 어느 정도 정상응답성능을 회복하고 있다. 즉, 명령입력이 크면 이에 따른 구동력도 커지므로 쿨롱마찰과 사역대의 영향이 거의 적어지기 때문이다. 다만 과도상태의 오버슈트가 큰 것은 타이밍벨트의 탄성력에 의한 효과 때문인데 현 단계에서 이러한 탄성효과까지 고려하는 설계는 수행하지 않기로 하였다. 따라서 선형 LQG/LTR 제어방법으로는 시스템의 비선형 효과에 대한 강인성을 보장할 수 없음을 알 수 있다. 다음에 제안한 QLQG/LTR 제어시스템을 설계하여 실험을 수행하였다. 먼저 가정한 입력강도  $R$ 의 각 작동점에 대해 계산된 통계학적 특성은 Table 2에 나타난다.

Table 2 DF gains and standard deviations of the controller states at all operating points

$R$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$
$N_z$	0.059	0.039	0.011	0.003	0.001
$N_{dz}$	0.9991	0.9993	0.9996	0.9997	0.9999
$\sigma_{z2}$	5.8169	8.6967	30.266	98.731	315.32
$\sigma_u$	331.31	386.19	666.83	1176.8	2087.8

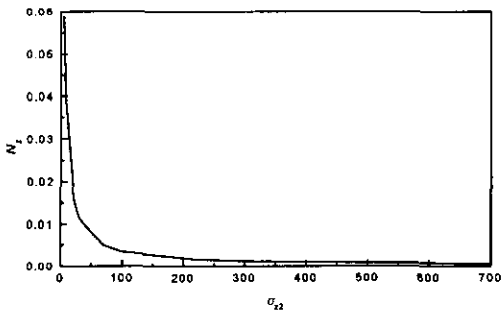


Fig. 7 The relation of the describing function gain and The standard deviation of the Coulomb friction

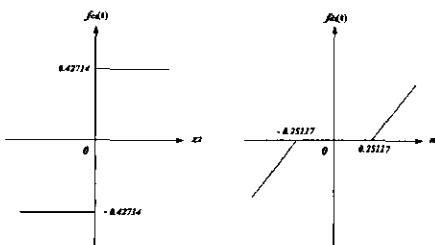


Fig. 8 Nonlinear functions of the Coulomb friction and dead-zone implemented in the controller

Table 2의 결과 중에서 쿨롱마찰에 대해 제어기에 구현할 기술함수체인  $N_z$ 와 제어기 상태변수의 표준편차  $\sigma_{z2}$ 의 관계는 Fig. 7에 나타나 있다. 또한 제어기에 구현할 비선형 쿨롱 마찰함수  $f_{cz}(t)$ 는 Fig. 7의 결과에서 역기술함수법(inverse random input describing function method)<sup>(12)</sup>을 이용하여 구하였고 사역대 비선형함수  $f_{dz}(t)$ 도 마찬가지로 역기술함수법에 의해 제어기에 구현하였으며 Fig. 8에 각 비선형 함수가 제시되어 있다.

일반적으로 QLQG/LTR 제어기 설계 시 시스템 비선형 특성에 의해 입력강도  $R$ 값의 변화에 따라 제어기인행렬  $G$ 와 필터계인 행렬  $H$ 에도 자주 입력의 표준편차의 변화에 대응하는 비선형 특성이 나타난다. 그러나 본 시스템에서는 표준편차의 변화에 거의 영향을 받지 않고 일정한 선형값으로 유지하고 있다. 이 때 선정된 필터계인 행렬  $H$ 와 제어기인행렬  $G$ 는 LQG/LTR 제어기의 경우와 거의 유사하다. Fig. 9는 설계된 QLQG/LTR 제어기의 블록선도이다. 설계된 QLQG/LTR 제어기를 이용하여 타이밍벨트 구동시스템의 위치제어에 대하여 실험을 수행하였는데 쿨롱마찰의 존재는 비교적 쉽게 파악할 수 있으나 사역대의 존재는 잘 알 수 없는 경우가 많으므로 사역대를 고려하지 않은 경우에 대한 영향을 알아보기 위해 플랜트의 사역대를 무시하고 설계한 QLQG/LTR 제어기를 이용하여 실험을 먼저 수행하였다. 이러한 경우에 대한 결과가 Fig. 10, Fig. 11에 계단명령입력에 대한 정규화된 출력이 제시되어 있다. Fig. 10의 결과에서 플랜트의 쿨롱마찰 비선형만을 고려하면 선형LQG/LTR 제어시스템의 경우인 Fig. 5보다는 정상응답성능이 더 나아지고 있으나 여전히 정상응답성능이 좋지 않다. Fig. 11을 살펴보면 30cm, 50cm 명령입력에 대해서는 어느 정도 정상응답성능이 회복되고 있으나 10cm 명령입력에 대한 성능은 여전히 좋지 않다.

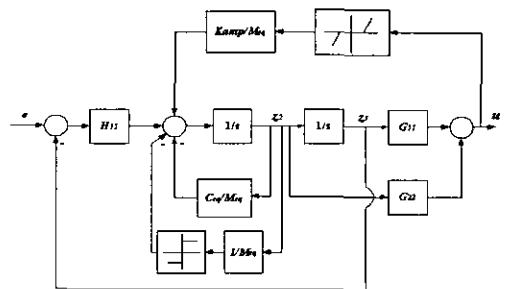


Fig. 9 Block diagram of the QLQG/LTR controller

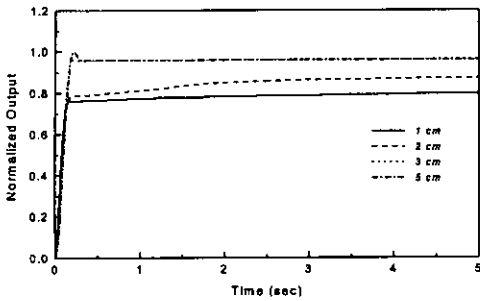


Fig. 10 Normalized outputs for step command inputs of QLQG/LTR control system :  $r = 1\text{ cm}, 2\text{ cm}, 3\text{ cm}, 5\text{ cm}$ , (experiment without dead-zone)

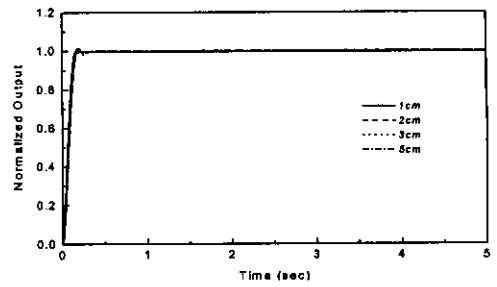


Fig. 12 Normalized outputs for step command inputs of QLQG/LTR control system :  $r = 1\text{ cm}, 2\text{ cm}, 3\text{ cm}, 5\text{ cm}$  (experiment with dead-zone)

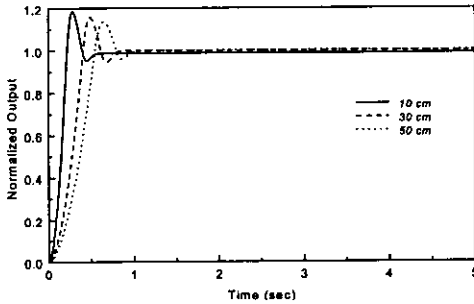


Fig. 11 Normalized outputs for step command inputs of QLQG/LTR control system :  $r = 10\text{ cm}, 30\text{ cm}, 50\text{ cm}$  (experiment without dead-zone)

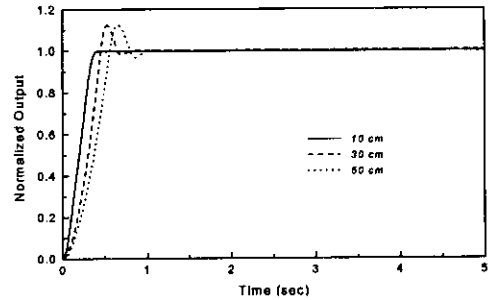


Fig. 13 Normalized outputs for step command inputs of QLQG/LTR control system :  $r = 10\text{ cm}, 30\text{ cm}, 50\text{ cm}$  (experiment with dead-zone)

그래서 더 나은 성능개선을 위해 사역대를 고려하여 설계한 QLQG/LTR 제어시스템의 실험 결과는 Fig. 12와 Fig. 13에 제시되어 있다. Fig. 12, Fig. 13의 실험결과를 살펴보면 LQG/LTR 제어시스템과 사역대를 무시하여 설계한 QLQG/LTR I의 경우처럼 작은 위치이동의 경우에 정상상태오차가 커지는 문제는 없음을 알 수 있다. 또한 타이밍벨트 구동시스템에 사역대가 존재한다는 가정이 타당했음을 알 수 있으며 쿨롱마찰뿐만 아니라 사역대를 포함하여 제어를 설계한 결과 좋은 출력성능이 나타남을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 지금까지 설계한 각 제어기의 성능을 정량적으로 나타내기 위하여 LQG/LTR 제어기와 쿨롱마찰만을 고려한 QLQG/LTR 제어기 (QLQG/LTR I), 쿨롱마찰과 사역대를 동시에 고려한 경우 (QLQG/LTR II)의 각 계단응답에 대한 정상오차성능을 Table 3에 요약하였다. 다만 이송길이가 큰 경우에 속도제어가 잘 되지 않음으로 인해 타이밍벨트의 탄성효과가 발

Table 3 The steady state errors of each controller for step responses

계단입력 (cm)	계단응답의 정상상태오차 (절대치%)		
	LQG/LTR	QLQG/LTR I	QLQG/LTR II
1	34	20	0.1
2	20	13	0.05
3	11	4.5	0
5	8	4.8	0
10	2	2	0
30	1	0	0
50	0	0	0

생하여 원하는 위치로 이동 후에 오버슈트가 약간 발생하는 문제점이 있음을 알 수 있다.

Table 3의 결과를 살펴보면 사역대와 쿨롱마찰을 동시에 고려한 QLQG/LTR II 제어기가 가장 만족스러운 정상응답성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 사역대 비선형이 쿨롱마찰 비선형보다 정상응답에 미치는 영향이

더 크게 나타나고 있다. 그래서 타이밍 벨트를 이용한 위치제어 시 사역대 효과를 고려해야 함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

타이밍 벨트에 의해 안내대를 따라 cart를 이송시키는 시스템을 구성하고 유전 알고리즘을 이용하여 플랜트의 파라미터를 식별하였으며 안내대와 벨트 구동부에서 복합적으로 발생하는 클롱마찰과 사역대 비선형을 고려할 수 있는 QLQG/LTR 제어시스템을 설계하고 실험을 수행하였다. QLQG/LTR 제어방법은 비선형 문제에 대한 다변수 비선형 제어기 설계방법으로서 이미 연구되었으나 현재까지 실험적 타당성을 입증한 적이 없었고 컴퓨터 시뮬레이션만을 통해 타당성을 보여왔다. 본 연구에서는 이러한 QLQG/LTR 제어방법을 이용하여 처음으로 실험적으로 검증하여 QLQG/LTR 제어방법이 여러 가지 비선형이 복합적으로 존재하는 플랜트의 위치제어에 효과가 있음을 보였다. 특히 로봇이나 역진자 시스템 같은 고속이송 시스템에서 자주 사용되는 타이밍벨트 구동 시 나타날 수 있는 클롱마찰이나 사역대 비선형 문제에 대한 제어방법을 제시하였다.

그러나 stick-slip과 Stribeck효과가 존재하는 비선형 마찰<sup>(3)</sup>에 대해서는 현재로서는 기술함수 모델을 구축하기가 어려우므로 QLQG/LTR 제어방법의 적용은 제한된다. 추후 이러한 형태의 비선형 마찰문제만이 아니라 타이밍 벨트의 탄성효과를 고려하고 이송하중의 변화에 강인한 제어방법에 대한 연구가 필요하겠다.

### 참 고 문 헌

- (1) Gelb A, and Vander Velde, W. E., Multiple Input Describing Function and Nonlinear System Design, McGraw-Hill, 1968.
- (2) Taylor, J. H, Strobel, K. L., "Nonlinear Compensator Synthesis via Sinusoidal input Describing Function", Proc. ACC, pp. 1242~1247, 1985.
- (3) Beaman, J. J., "Non-linear Quadratic Gaussian Control", Int. J. of Control, Vol. 39, No. 2, pp. 343~361, 1984.
- (4) Kim, J. S., "QLQG/LTR Control for Hard Non-linear Multivariable Systems", Proc. Instn. Mech. Engrs., J. of Sys. And Cont. Eng., Vol. 208, pp.

- 177~187, 1994.
- (5) Kim, J. S., "Nonlinear Position Servo Design Using the QLQG/LTR Method", KSME, J., Vol, 3, No. 2, pp. 86~94, 1989.
- (6) 김종식, 한성익, "수중운동체를 위한 QLQG/LTR 심도제어시스템 설계", 한국정밀공학회지, 제10권, 제4호, pp. 118~127, 1993.
- (7) 이명호, "유압 비례 위치제어 시스템의 마찰력 보상기 설계", 한국공작기계학회지, Vol. 7, No. 4, pp. 130~135, 1998.
- (8) dSPACE Inc., Control Desk Experiment Guide, dSPACE GmbH, 1999.
- (9) Goldberg, D., Genetic Algorithms in Search Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
- (10) 김종식, 선형제어시스템 공학, 청문각, 1993.
- (11) Mathworks Inc., Simulink User's Guide, Mathwork, 1997.
- (12) Suzuki, A., and Hedrick, C.V., "Nonlinear Controller Design by An Inverse Random Input Describing Function Method", Proc. ACC, pp. 1236~1241, 1985.
- (13) Canudas de Wit, C., Olsson, H., Astrom, K. J., and Lischinsky, P., "A New Model for Control of Systems with Friction", IEEE, Trans., A. C., Vol. 40, No. 3, pp. 419~425, 1995.