

# 로봇 매니퓰레이터를 위한 시간지연추정과 내부모델개념을 결합한 강인제어기에 관한 연구

조건래<sup>†</sup>, 장평훈\*, 정제형\*\*

(2003년 6월 9일 접수, 2004년 6월 14일 심사완료)

## Robust Trajectory Control of Robot Manipulators Using Time Delay Estimation and Internal Model Concept

Geon Rae Cho, Pyung-Hun Chang and Je Hyung Jung

**Key Words :** Time Delay Control with Internal Model(TDCIM), Time Delay Control(TDC: 시간지연을 이용한 제어), Internal Model Control(IMC: 내부모델제어), Time Delay Estimation Error(TDE Error: 시간지연추정오차), Coulomb Friction(쿨롱마찰), Stick-Slip(스틱슬립)

### Abstract

In this paper, Time Delay Control(TDC) for robot manipulators is analyzed and its problems are founded. In order to remedy the problems, the enhanced controller is proposed and analyzed. The effect of friction associated with TDC is reported and its cause is presented. Through the analysis, simulation and experiment, it is shown that the friction effect causes serious degradation in control performance and that it is a result of the error of Time Delay Estimation(TDE) in TDC. In order to remedy the problems, TDC combined with Internal Model Control(IMC) concept is proposed. The proposed compensator is effective enough to handle the bad effect of friction, and is so simple and efficient as to match positive attribute of TDC. The simulation and experimental results show the effectiveness of proposed controller against the friction of the robot manipulators.

### 1. 서론

본 연구에서는 내부모델제어(Internal Model Control: IMC)의 개념을 이용하여, 시간지연을 이용한 제어(Time Delay Control: TDC)의 제어성능을 향상시키고자 한다.

TDC는 플랜트의 예측 못한 외란이나 잘 모르는 비선형 동역학을 추정하기 위해 시간지연추정(Time Delay Estimation: TDE)을 이용하는 제어기법이다. 이 제어기법은 지금까지 개발된 고등 제어 알고리즘에 비하여 단순한 구조를 지니면서도, 외란과 매개변수의 변동에 대해 탁월한 강인성을 보

인다. 로봇 매니퓰레이터에 대한 TDC의 제어성능은 여러 응용 사례를 통해 입증된 바 있다.<sup>(4,10,12)</sup>

TDC는 구조가 간단하며, 제어를 위한 계산량의 부담이 매우 적다. 또한 시간지연추정을 이용하기 때문에 플랜트에 대한 적은 정보만으로도 제어가 가능하다는 장점을 갖는다. 하지만 쿨롱/정지마찰과 같은 비선형성이 플랜트에 존재할 경우, TDC의 제어 성능이 저하되는 현상이 발생하는 것이 관찰되었다.<sup>(10,11)</sup> 특히, 쿨롱마찰력을 포함한 플랜트에서 제어 시 속도가 0 이 될 때 제어성능이 저하되는 현상이 발생하며, 정지마찰과 Stribeck 효과를 포함한 플랜트에서는 Stick-Slip현상이 발생한다. 따라서, 좋은 제어 성능을 얻기 위해서는, 이와 같은 현상을 보상할 수 있는 기법이 요구된다.

TDC의 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 연구로, 스위칭동작을 갖는 시간지연을 이용한 제어(Time Delay Control with Switching Action : TDCSA)에 대한 연구가 있었다.<sup>(10,11)</sup> TDCSA는 TDC에 슬라이

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과  
E-mail: grcho@mecha.kaist.ac.kr  
TEL: (042)869-3266 FAX: (042)869-5226

\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

딩모드제어(Sliding Mode Control: SMC)의 개념의 보상기를 추가하여 일정순간마다 불연속적인 입력을 가함으로써 제어 성능을 향상시킨 제어기이다. 하지만 TDCSA는 보상 입력의 크기를 결정하기 위해 별도의 매개변수를 튜닝할 필요가 있다는 점과, 정상상태에서의 떨림(chattering)현상이 유발될 수 있다는 점 등이 단점으로 지적될 수 있다.

본 연구에서는 TDC의 제어 성능을 향상시키기 위해 IMC의 개념을 응용하고자 한다.

IMC는 플랜트의 동역학을 추정하기 위해 플랜트의 직접적인 모델을 사용한 제어 기법으로,<sup>(5,8)</sup> 설계방법이 직관적이며, 이론적으로 완벽제어(perfect control)의 개념을 제시할 만큼 성능이 우수한 제어기로 잘 알려져 있다. IMC는 화학공정제어에 많이 응용되었으며,<sup>(5-8)</sup> computed torque control과 결합하여 로봇 매니퓰레이터에 응용된 바 있다.<sup>(9)</sup>

즉, 본 연구에서는 IMC의 우수한 제어성능을 이용하여 TDC의 제어성능을 향상시킨, 로봇 매니퓰레이터를 위한 내부모델을 갖는 시간지연을 이용한 제어(Time Delay Control with Internal Model: TDCIM)를 제안하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 1 장에서는 연구배경 및 목적에 대해서 설명하고, 2 장에서는 이론적 배경으로서 TDC의 문제점에 대한 분석과 IMC의 구조와 특성에 대해 기술하였다. 3 장에서는 TDCIM의 설계 방법과 이론적 분석 및 안정성해석에 대해 기술하고, 4 장에서 마찰 비선형 모델에 대한 TDCIM의 제어성능을 분석, 기술하였다. 5 장에서는 실험을 통해 TDCIM의 제어성능을 확인한다. 마지막으로 6 장에서는 결과를 요약 정리하고 결론을 맺는다.

2. 이론적 배경

2.1 절에서는 TDC의 문제점에 대해 설명하고, 2.2 절에서는 문제점을 해결하기 위해 도입하려고 하는 IMC에 대해 설명한다.

2.1 TDC의 문제점

본절에서는 로봇매니퓰레이터에 대한 TDC 법칙에 대해 요약, 기술하고,<sup>(4)</sup> TDC의 문제점을 시간지연추정오차와 결부하여 분석하였다.

2.1.1 TDC 법칙

일반적인 로봇 매니퓰레이터의 동역학은 다음과 같이 표현된다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\theta, \dot{\theta}) = \tau \tag{1}$$

여기서  $M(\theta)$  는 관성 행렬(inertia matrix),

$V(\theta, \dot{\theta})$  는 코리올리(Coriolis)력과 원심력,  $G(\theta)$  는 중력,  $F(\theta, \dot{\theta})$  는 마찰력이나 외란과 같이 모델링 되지 않은 힘, 그리고  $\tau$  는 입력 토크를 나타낸다.

식 (1)은  $M(\theta)$  에 기준하여 선정되는 상수 행렬  $\bar{M}$  를 도입하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{M}\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \tau \tag{2}$$

여기서 비선형 벡터  $H$  는 로봇 매니퓰레이터의 모든 비선형 항과 외란 등을 포함하며 다음과 같이 표현된다.

$$H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = (M(\theta) - \bar{M})\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\theta, \dot{\theta}) \tag{3}$$

Computed torque control 기법의 관점에 따라 토크  $\tau$  를 다음과 같이 둔다.

$$\tau = \bar{M}u + \hat{H} \tag{4}$$

$$u = \ddot{\theta}_d + K_D(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_P(\theta_d - \theta) \tag{5}$$

여기서  $\hat{H}$  는  $H$  의 추정값이며,  $K_D$  와  $K_P$  는 PD 게인 대각 행렬이다.

TDC에서는  $\hat{H}$  을 구하기 위해 시간지연추정을 이용한다. 시간지연(time delay)  $L$  이 매우 작다고 가정할 경우, 식 (2)로부터 다음과 같은 근사식이 성립한다.

$$H_{(t)} \cong \hat{H}_{(t)} = H_{(t-L)} = \tau_{(t-L)} - \bar{M}\ddot{\theta}_{(t-L)} \tag{6}$$

따라서 식 (5)와 (6)을 식 (4)에 대입하면, TDC 법칙은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = \tau_{(t-L)} - \bar{M}\ddot{\theta}_{(t-L)} + \bar{M}[\ddot{\theta}_d + K_D(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_P(\theta_d - \theta)] \tag{7}$$

만약  $\bar{M}$  를 대각 상수 행렬로 선정한다면, TDC 는 PD gain과 대각 상수 행렬  $\bar{M}$  만을 사용하는 독립된 조인트 제어기로서 Fig. 1 과 같은 형태로 쉽게 구현할 수 있다. 즉, TDC는 로봇 매니퓰레이터의 복잡한 비선형 동역학을 직접 계산하지 않고, 시간지연추정을 이용한 제어기로서, 매우 효율적이고 계산 량의 부담이 적은 장점을 가지고 있다.

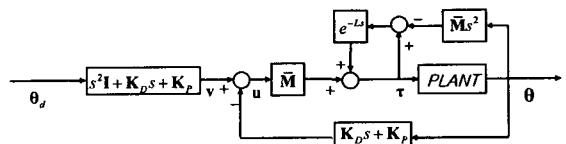


Fig. 1 TDC block diagram

2.1.2 TDC의 문제점

일반적으로 시간지연  $L$ 이 충분히 작다면 시간지연추정을 통해  $\mathbf{H}$ 를 정확히 추정할 수 있다. 하지만 실제로 시간지연  $L$ 은 무한히 작아질 수 없다. TDC를 실제 시스템에 적용할 때에는 일반적으로 샘플링 시간을 시간지연  $L$ 로 사용하게 되는데, 하드웨어적인 제약으로 인하여  $L$  값을 0에 무한히 가깝게 하는 데에는 한계가 있다. 그리고, 제한된 값을 갖는 시간지연  $L$ 로 인해 시간지연추정 오차(TDE Error)가 존재하게 된다. 식 (2), (4), (5), (6)으로부터 다음과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{u}_{(t)} - \hat{\boldsymbol{\theta}}_{(t)}) = \mathbf{H}_{(t)} - \hat{\mathbf{H}}_{(t)} = \mathbf{H}_{(t)} - \mathbf{H}_{(t-L)} \quad (8)$$

위 식의 우측 항은 시간지연추정이 갖는 오차이다. 여기서 시간지연추정 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{(t)} \triangleq \mathbf{u}_{(t)} - \hat{\boldsymbol{\theta}}_{(t)} = \bar{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{H}_{(t)} - \mathbf{H}_{(t-L)}) \quad (9)$$

TDC의 오차 동역학은 식 (5)와 (9)로부터 다음과 같이 구해지며, 시간지연추정오차로부터 영향을 받게 된다.

$$\ddot{\mathbf{e}}_{(t)} + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}}_{(t)} + \mathbf{K}_P \mathbf{e}_{(t)} = \boldsymbol{\varepsilon}_{(t)} \quad (10)$$

여기서,  $\mathbf{e} \triangleq \boldsymbol{\theta}_d - \boldsymbol{\theta}$ 이다.

일반적으로 시스템의 비선형성이나 외란과 비교하여 시간지연  $L$ 이 충분히 작다면 시간지연추정 오차는 무시할 수 있다. 하지만 플랜트에는 쿨롱/정지마찰과 같은 비선형적 특성이 존재한다. 이와 같은 빠른 동역학적 특성은 시간지연추정으로는 잘 추정되지 못하며, 따라서 추정 오차가 커지게 된다. 따라서 마찰과 같은 빠른 동역학적 특성을 포함한 시스템에 TDC를 적용할 경우, 시간지연추정 오차로 인해 큰 궤적 추종 오차(trjectory tracking error)가 생길 수 있다.

2.2 IMC의 구조 및 특성

IMC의 블록 다이어그램은 Fig. 2와 같다.<sup>(5,8)</sup> 여기서  $G$ 는 플랜트를 나타내며,  $G_m$ 은 플랜트의 모델,  $Q$ 는 IMC제어기,  $y_d$ 는 기준입력,  $y_s$ 는 기준입력과 피드백 입력(feed-back input)의 차이,  $v$ 는 제어입력,  $y$ 는 시스템의 출력,  $y_m$ 는 내부모델의 출력,  $d$ 는 외란을 각각 나타낸다.

플랜트와 병렬로 연결된 내부모델  $G_m$ 은 플랜트의 출력으로부터 제어변수의 영향을 제거하는 역할을 한다. 따라서, 플랜트와 모델의 출력의 차이는 모델링 오차와 외란에 대한 정보를 담고 있으며, 피드백을 통해 이들을 보상하는 것이다.

$Q$ 는 플랜트 모델의 역수( $G_m^{-1}$ )에 기반하여 설계되는 IMC 제어기이다.

IMC의 전체전달함수는 다음과 같이 구해진다.

$$y(s) = \frac{GQ}{1+Q(G-G_m)} y_d + \frac{1-G_m Q}{1+Q(G-G_m)} Gd \quad (11)$$

위 식으로부터 IMC의 특성을 직관적으로 알 수 있는데, 다음과 같이 세 가지로 정리될 수 있다.<sup>(5,8)</sup>

◆ 특성 1. 만일 내부모델의 모델링 오차가 없다면, 즉,  $G = G_m$ 일 경우, IMC 제어기와 플랜트가 안정하면 전체 폐회로 시스템은 안정하다.

◆ 특성 2.  $Q = G_m^{-1}$ 로 제어기를 구현할 수 있고, 전체 폐회로 시스템이 안정하다면, 플랜트의 출력은 기준입력을 완전 추종한다(perfect reference tracking).

◆ 특성 3. 만일 IMC 제어기와 내부모델의 역전달함수(inverse transfer function)가 정상상태에서의 gain이 같고( $Q(0) = G_m^{-1}(0)$ ), 전체 폐회로 시스템이 안정하다면, 모든 상수 입력과 외란에 대해 제어 오차는 점근적으로 0으로 수렴한다.

특성 2에서 알 수 있듯, 이상적인 경우 IMC는 완벽제어의 방법을 이론적으로 제시할 만큼 제어 성능이 훌륭하며, 외란 등에 강인한 제어법칙으로 잘 알려져 있다. 반면 IMC를 적용하기 위해서는 플랜트의 모델이 필요하다는 점과, 기본적으로 안정한 시스템에 적용 가능하다는 점 등은 IMC의 단점으로 지적될 수 있다.

3. 시간지연추정과 내부모델개념을 결합한 강인제어기 설계 및 해석

본 장에서는 TDC의 시간지연추정 오차를 IMC의 개념을 이용해 보상한 제어기인, 내부모델을 갖는 시간 지연을 이용한 제어(Time Delay Control with Internal Model: TDCIM)기법을 제안하고자 한다. 또한 3.2와 3.3을 통해 TDCIM의 이론적 분석과 안정성해석에 대해 기술한다.

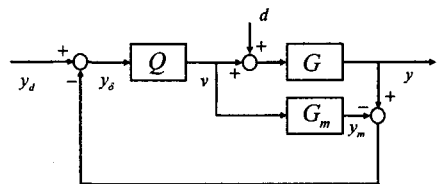


Fig. 2 IMC block diagram

3.1 TDCIM의 설계 방법

3.1.1 TDC 구조로부터 선형화된 동역학 유도

◆ 시간지연추정을 통한 플랜트의 선형화(Plant linearization)

TDC는 플랜트의 비선형 동역학을 시간지연추정을 이용해 추정한다. 그리고, 이를 통해 플랜트의 비선형 동역학을 보상하고 나면, 로봇 매니플레이터의 동역학을 선형화된 형태로 표현할 수 있다. 식 (2), (4), (6), (9)로부터 다음과 같은 선형 동역학 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\theta}_{(t)} = u_{(t)} - \bar{M}^{-1} (H_{(t)} - H_{(t-L)}) = u_{(t)} - \varepsilon_{(t)} \quad (12)$$

위 식은 로봇관절변수  $\theta$ 와 제어입력  $u$ 의 관계가  $\theta = s^{-2}Iu$ 로 선형화된 동역학식으로 표현됨을 의미한다. 여기서 시간지연추정 오차  $\varepsilon$ 은 플랜트에 작용하는 외란으로 취급할 수 있다.

◆ PD feed-back의 고려

식 (5)의 제어입력  $u$ 는 다음과 같이 기준입력(reference)에 의한 입력과, feed-back에 의한 입력으로 나누어 표현할 수 있다.

$$u = \ddot{\theta}_d + K_D \dot{\theta}_d + K_P \theta_d - K_D \dot{\theta} - K_P \theta \quad (13)$$

여기서, 표현을 간단히 하기 위해 기준입력(reference)에 의한 제어 입력을 다음과 같이 둔다.

$$v \triangleq \ddot{\theta}_d + K_D \dot{\theta}_d + K_P \theta_d \quad (14)$$

그러면, 식 (12)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{\theta} + K_D \dot{\theta} + K_P \theta = v - \varepsilon \quad (15)$$

즉, 각 관절변수  $\theta$ 에 대한 동역학이 기준입력에 의한 제어입력  $v$ 에 대한 독립된 선형 동역학 식으로 표현될 수 있음을 알 수 있다. 식 (14), (15)로부터 TDC의 블록 다이어그램을 그려보면 Fig. 3과 같이 간략화시켜 표현 할 수 있다.

결국 TDC는 로봇 매니플레이터의 비선형 동역학을 시간지연추정과 PD feed-back을 통해 선형화시킨 후, 선형화된 플랜트에 대해 feed-forward control을 하고 있는 형태로 해석할 수 있다. 하지만 선형화 과정에서 시간지연추정 오차가 생기며, 이것은 제어구조에서 외란으로서 취급할 수 있다. Fig. 3을 보면 TDC에서 시간지연추정 오차에 대해서는 open-loop이므로 보상되지 않고 플랜트의 출력에 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

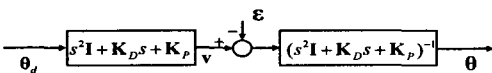


Fig. 3 TDC block diagram with linearized plant using TDE and PD feed-back

3.1.2 IMC의 적용

본 절에서는 open-loop 형태로 간략화된 TDC에 IMC를 적용함으로써 전체 시스템을 다시 폐회로 closed-loop 형태로 만들고, 이를 통해 시간지연추정 오차를 보상하고자 한다.

식 (15)로부터 플랜트의 선형화된 동역학을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G(s) = (s^2 I + K_D s + K_P)^{-1} \quad (16)$$

여기서, 식 (16)의 우측 항은 대각 요소(diagonal element)가 다음과 같이 관절마다의 독립된 동역학 식을 나타내는 대각 행렬이다.

$$\frac{\theta_i(s)}{v_i(s)} = \frac{1}{s^2 + k_{D_i} s + k_{P_i}} \quad (17)$$

여기서,  $i$ 는 관절 번호를 나타낸다. 이상의 과정으로부터 선형화된 플랜트의 동역학식이 유도되었으므로 IMC의 설계방법에 따라<sup>(5,8)</sup> 내부모델  $G_m$ 을 다음과 같이 쉽게 선정할 수 있다.

$$G_m(s) = (s^2 I + K_D s + K_P)^{-1} \quad (18)$$

위와 같이 표현된 내부모델로부터 IMC의 제어기  $Q$ 는 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$Q(s) = s^2 I + K_D s + K_P \quad (19)$$

Fig. 3을 보면 TDC에서는 이미 식 (19)와 같은 형태의 제어기를 포함하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 3에 내부모델만을 추가하여 feed-back을 걸어주면 TDCIM은 완성되며, Fig. 4와 같이 표현될 수 있다. 또한 TDCIM의 전체 블록 다이어그램은 Fig. 5와 같다. 여기서  $G$ 는 시간지연추정과 PD feed-back을 통해 선형화된 플랜트,  $G_m$ 은 내부모델,  $Q$ 는 IMC 제어기<sup>1</sup>,  $\theta_m$ 은 내부모델의 출력을 각각 나타낸다.

결국, TDCIM은 TDC에서 사용되던 기준 입력  $\theta_d$  대신, 여기에 IMC feed-back이 추가된  $\theta_s$ 가 입력되게 된다.  $\theta_s$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_s = \theta_d - \theta + \theta_m \quad (20)$$

<sup>1</sup> 설계된 제어기는 속도와 가속도값을 필요로 하는데, 이 값들이 측정 불가능한 경우, 수치미분을 이용하여 구현될 수 있다. 수치미분은 특성상 응답의 지연을 유발하여, 제어성능이 다소 저하될 수 있지만, 적용에 있어서 큰 문제점은 없다. 또한, 수치미분은 노이즈의 영향을 증폭시키기 때문에 제어기의 성능이 저하될 수 있는데, 이 경우에는 저대역통과필터(low-pass filter)를 사용하여 성능을 향상시킬 수 있다.<sup>(2,9)</sup>

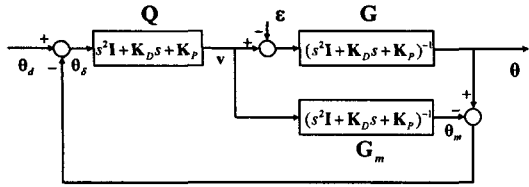


Fig. 4 Reduced block diagram of TDCIM

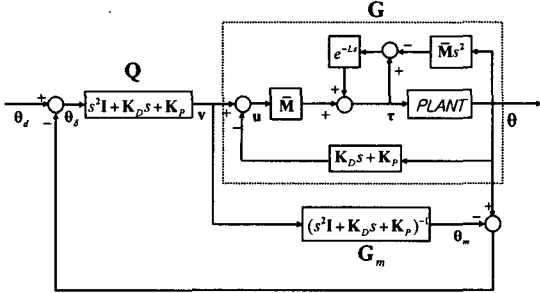


Fig. 5 Overall block diagram of TDCIM

또한, 식 (7)에 기준입력  $\theta_d$  대신  $\theta_s$ 를 적용하면 TDCIM의 제어법칙은 다음과 같이 유도된다.

$$\tau = \tau_{(t-L)} - \bar{M}\ddot{\theta}_{(t-L)} + \bar{M}[\ddot{\theta}_s + K_D(\dot{\theta}_s - \dot{\theta}) + K_P(\theta_s - \theta)] \quad (21)$$

이상과 같이 TDCIM은 TDC에 IMC feed-back만을 추가한 형태로서 간단히 설계될 수 있다.

TDCIM의 특성은 제어성능을 향상시키기 위해 별도의 매개 변수를 사용하지 않는다는 것이다. 이상의 설계과정에서 확인할 수 있듯이 TDCIM은 TDC와 마찬가지로  $\bar{M}$ ,  $K_D$ ,  $K_P$  만을 설정함으로써 설계할 수 있다.

### 3.2 이론적 고찰

#### 3.2.1 개요

본 절에서는 IMC feedback의 의미를 고찰해봄으로써, TDCIM에서 시간지연추정오차를 보상하는 원리와 제어성능이 향상되는 이유를 이론적으로 고찰해 보았다.

또한, 좀더 현실적인 해석을 위해 샘플링시간에 의한 시간지연을 고려한 시스템에 대해 고찰했다.

IMC는  $Q = G_m^{-1}$ 로 제어를 설계할 경우, 이론적으로 완벽제어가 된다.<sup>(8)</sup> 이것은 연속시간 영역(continuous time domain)에서 IMC를 적용했을 때의 결과이다. 일반적으로, 제어기는 컴퓨터를 이용해 구현하게 되는데, 이 경우 제어기는 이산시간 영역(discrete time domain)에서 구현되게 된다. 그리고, feed-back에는 샘플링 시간만큼의 시간지연이 존재하게 되며, 이것으로 인해 IMC는 완벽제어가 되지 못한다. 따라서 컴퓨터를 통해 구현된 TDCIM

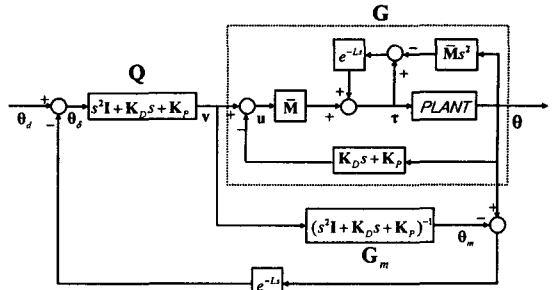


Fig. 6 Block diagram of TDCIM - include time delay in IMC feed-back

의 엄밀한 해석을 위해서는 샘플링 시간에 의한 시간지연을 고려할 필요가 있다.

샘플링 시간에 의한 시간지연을 고려한 TDCIM의 블록 다이어그램은 Fig. 6 과 같이 표현될 수 있다. 문제를 간단히 하기 위해 샘플링 시간에 의한 시간지연은 IMC feed-back에 대해서만 고려했으며, TDC의 시간지연추정에 이용되는 시간지연  $L$ 은 샘플링 시간을 이용한다는 가정하에 해석을 수행하였다.

#### 3.2.2 IMC feed-back 값의 의미 고찰

IMC feed-back에 이산구현에 의한 시간지연을 고려하였을 때, TDCIM의 입력  $v$ 는 다음과 같이 바뀌어 표현된다.

$$v_{(t)} = \ddot{\theta}_{d(t)} + K_D \dot{\theta}_{d(t)} + K_P \theta_{d(t)} - [\ddot{\theta}_{(t-L)} - \ddot{\theta}_{m(t-L)} + K_D(\dot{\theta}_{(t-L)} - \dot{\theta}_{m(t-L)}) + K_P(\theta_{(t-L)} - \theta_{m(t-L)})] \quad (22)$$

여기서, TDC의 제어입력을 다음과 같이 정의하여, TDCIM의 제어입력  $u$ 와 구분하도록 한다.

$$u_{o(t)} \triangleq \ddot{\theta}_{d(t)} + K_D \dot{\theta}_{d(t)} + K_P \theta_{d(t)} \quad (23)$$

식 (23)을 고려하면 TDCIM의 제어입력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_{(t)} = v_{(t)} - K_D \dot{\theta} - K_P \theta = u_{o(t)} - [\ddot{\theta}_{(t-L)} - \ddot{\theta}_{m(t-L)} + K_D(\dot{\theta}_{(t-L)} - \dot{\theta}_{m(t-L)}) + K_P(\theta_{(t-L)} - \theta_{m(t-L)})] \quad (24)$$

위 식의 우항에서  $u_{o(t)}$ 를 제외한 부분이 IMC feedback의 추가로 첨가된 부분인데, 이 값의 의미는 식 (15)와 (18)로부터 한 샘플링 시간 전의 플랜트의 동역학과 내부모델의 동역학의 차이를 구하면 다음과 같은 의미를 가짐을 알 수 있다.

$$\ddot{\theta}_{(t-L)} - \ddot{\theta}_{m(t-L)} + K_D(\dot{\theta}_{(t-L)} - \dot{\theta}_{m(t-L)}) + K_P(\theta_{(t-L)} - \theta_{m(t-L)}) = -\varepsilon_{(t-L)} \quad (25)$$

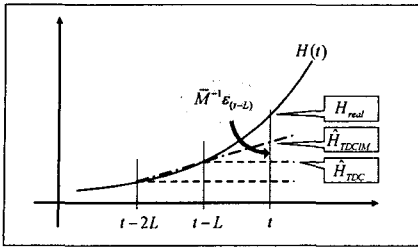


Fig. 7 Estimation of H in TDC & TDCIM

즉, 샘플링 시간에 의한 시간지연을 고려했을 경우, IMC feed-back은 한 샘플링 시간 전의 시간지연추정 오차를 의미하게 된다. 따라서 TDCIM의 제어입력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_{(t)} = u_{0(t)} + \epsilon_{(t-L)} \quad (26)$$

그리고 (21)로부터 TDCIM의 입력토크를 계산해 보면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_{(t)} = \bar{M}u_{(t)} + \hat{H}_{(t)} = \bar{M}u_{0(t)} + H_{(t-L)} + \bar{M}\epsilon_{(t-L)} \quad (27)$$

따라서 TDCIM의 입력토크는 TDC의 입력토크에 한 샘플링 시간 전의 시간지연추정 오차가 추가로 보상된 형태로 해석될 수 있다. 식 (1)과 (27)로부터 TDCIM의 오차동역학은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{(t)} + K_D \dot{\epsilon}_{(t)} + K_P \epsilon_{(t)} &= \bar{M}^{-1} (H_{(t)} - H_{(t-L)}) - \epsilon_{(t-L)} \\ &= \epsilon_{(t)} - \epsilon_{(t-L)} \end{aligned} \quad (28)$$

결론적으로, TDCIM은 H를 다음과 같이 추정한다고 생각할 수 있다.

$$\hat{H}_{TDCIM(t)} = H_{(t-L)} + \bar{M}\epsilon_{(t-L)} = 2H_{(t-L)} - H_{(t-2L)} \quad (29)$$

TDC에서는  $\hat{H}_{(t)} = H_{(t-L)}$  과 같이 시간지연추정을 이용한다. 하지만 이 경우에는 한 샘플링 시간 동안의 H의 변화량만큼 시간지연추정 오차가 발생하게 된다. TDCIM은 TDC의 시간지연추정 오차를 한 샘플링 시간 전의 값을 이용해 보상함으로써 시간지연추정의 정확성을 높이게 된다고 해석할 수 있다.

Fig. 7 은 H의 추정값을 개념적으로 도시한 그림으로써 TDCIM이 TDC에 비해 H를 더 정확히 추정함을 쉽게 이해할 수 있다.

결론적으로 이산구현을 고려한 경우, TDCIM은 시간지연추정 오차를 한 샘플링 시간 전의 값을 이용해 보상함으로써, H의 추정값의 정확성을 향상시킨 제어기라고 해석할 수 있다.

### 3.2.3 Laplace transform 을 이용한 고찰

본 절에서는 Laplace transform을 이용하여 TDCIM의 입력토크를 분석하고자 한다.

먼저 비교를 위해 TDC에 대한 경우를 살펴보도록 한다. 식 (7)을 Laplace transform시킨 후, 시간지연 L이 매우 작다고 가정하여  $e^{-Ls} \approx 1 - Ls$  근사식을 사용하면, TDC의 입력토크는 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>(16)</sup>

$$\tau(s) = \frac{\bar{M}}{Ls} (u_0(s) - \theta s^2 e^{-Ls}) \quad (30)$$

따라서, TDC는 1 차 적분형 제어기임을 확인할 수 있다.

마찬가지로, TDCIM에 대해 분석해보면, TDCIM의 입력토크  $\tau$ 는 다음과 같이 된다.

$$\tau(s) = \frac{\bar{M}}{(1 - e^{-Ls})^2} (u_0(s) - 2\theta s^2 e^{-Ls} + \theta s^2 e^{-2Ls}) \quad (31)$$

여기서  $e^{-Ls} \approx 1 - Ls$ 의 근사식을 사용하면, 위 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau(s) = \frac{\bar{M}}{L^2 s^2} (u_0(s) - 2\theta s^2 e^{-Ls} + \theta s^2 e^{-2Ls}) \quad (32)$$

이상으로부터 TDCIM은 2 중의 적분역할을 하는 부분이 존재함을 알 수 있다. 따라서 제어 오차가 존재할 경우 TDCIM의 입력토크는 TDC에 비해 매우 빠르게 증가하여, 제어 오차를 줄이는 방향으로 플랜트의 제어변수를 변화시키려 할 것임을 예상할 수 있다.

결론적으로 TDCIM은 1 차 적분 형태인 TDC에 IMC 개념을 도입해 2 차 적분 형태로 바꾼 제어기로써, 제어 오차에 대해 입력토크의 변화를 증가시켜서 성능을 향상시킨 제어기라고 해석할 수 있다.

### 3.3 TDCIM의 안정성 해석

본 절에서는 TDCIM이 이산구현을 통해 플랜트에 적용될 경우에 대해 안정성 해석을 수행하였다

TDC의 경우는 Kwon, Chang, Jung에 의해  $L_2$  공간에서의 입출력 안정성(Input-Output Stability) 방법을 이용하여 증명된 바 있다.<sup>(13)</sup> 본 연구에서는 TDC와 TDCIM 사이의 오차동역학의 차이점을 분석하고, Kwon, Chang, Jung이 제시한 방법을 이용해 TDCIM의 안정성 해석을 수행하였다. 여기서는 이 내용을 간단히 기술하도록 한다.

#### 3.3.1 TDCIM의 오차동역학 분석

표현을 간단하게 하기 위해 로봇 매니플레이터의 동역학을 다음과 같이 표기한다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (33)$$

여기서  $C(\theta, \dot{\theta}) = V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\theta, \dot{\theta})$  이다.

실제 폐회로 시스템의 동역학은 식 (2)와 (27), (29)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{u}_{0(t)} - \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{(t)}) &= \mathbf{H}_{(t)} - \hat{\mathbf{H}}_{TDCM(t)} \\ &= \mathbf{H}_{(t)} - \mathbf{H}_{(t-L)} - \bar{\mathbf{M}}\boldsymbol{\varepsilon}_{(t-L)} \end{aligned} \quad (34)$$

여기서  $\mathbf{H}$ 의 추정오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t)} \triangleq \boldsymbol{\varepsilon}_{(t)} - \boldsymbol{\varepsilon}_{(t-L)} = \mathbf{u}_{0(t)} - \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{(t)} \quad (35)$$

따라서  $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t)}$ 와  $\mathbf{e}_{(t)}$ 의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{\mathbf{e}}_{(t)} + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}}_{(t)} + \mathbf{K}_P \mathbf{e}_{(t)} = \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t)} \quad (36)$$

식 (35)에  $\mathbf{M}_{(t)}$ 를 곱하고 식 (33)을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{M}_{(t)}\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t)} = \mathbf{M}_{(t)}\mathbf{u}_{0(t)} + \mathbf{C}_{(t)} - \boldsymbol{\tau}_{(t)} \quad (37)$$

또한  $\hat{\mathbf{H}}_{TDCM}$ 을 고려하여 식 (27)을 이용하면 TDCIM의 입력토크  $\boldsymbol{\tau}$ 를 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{(t)} &= \bar{\mathbf{M}}\mathbf{u}_{0(t)} \\ &+ 2\left[ (\mathbf{M}_{(t-L)} - \bar{\mathbf{M}})\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{(t-L)} + \mathbf{C}_{(t-L)} \right] \\ &- \left[ (\mathbf{M}_{(t-2L)} - \bar{\mathbf{M}})\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{(t-2L)} + \mathbf{C}_{(t-2L)} \right] \end{aligned} \quad (38)$$

위 식을 식 (37)에 대입 후,  $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t-L)} = \mathbf{u}_{0(t-L)} - \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{(t-L)}$ ,  $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t-2L)} = \mathbf{u}_{0(t-2L)} - \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{(t-2L)}$ 을 적용하여  $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t)}$ 에 대해 재배열하여 정리하면, 다음과 같이  $\mathbf{H}$ 의 추정오차에 대한 오차동역학을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t)} &= 2(\mathbf{I} - \mathbf{M}_{(t)}^{-1}\bar{\mathbf{M}})\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t-L)} - (\mathbf{I} - \mathbf{M}_{(t)}^{-1}\bar{\mathbf{M}})\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{(t-2L)} \\ &+ \boldsymbol{\eta}_{1(t)} + (\mathbf{I} - \mathbf{M}_{(t)}^{-1}\bar{\mathbf{M}})\boldsymbol{\eta}_{2(t)} \end{aligned} \quad (39)$$

여기서  $\boldsymbol{\eta}_1$ ,  $\boldsymbol{\eta}_2$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta}_{1(t)} &= \mathbf{M}_{(t)}^{-1} \left[ 2(\mathbf{M}_{(t)} - \mathbf{M}_{(t-L)})\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{(t-L)} \right. \\ &\left. - (\mathbf{M}_{(t)} - \mathbf{M}_{(t-L)})\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{(t-2L)} + \mathbf{C}_{(t)} - 2\mathbf{C}_{(t-L)} + \mathbf{C}_{(t-2L)} \right] \end{aligned} \quad (40)$$

$$\boldsymbol{\eta}_{2(t)} = \mathbf{u}_{0(t)} - 2\mathbf{u}_{0(t-L)} + \mathbf{u}_{0(t-2L)}$$

따라서 TDCIM의 전체 폐회로 시스템의 오차동역학은 식 (36)과 식 (39)로 주어진다.

### 3.3.2 TDCIM의 안정성해석

Kwon, Chang, Jung의  $L_2$ 공간에서의 입출력 안정성(Input-Output Stability) 방법<sup>(13)</sup>을 이용하여 TDCIM의 안정성 해석을 수행하였다. 식 (39)를 TDC의 경우<sup>(2,4,13)</sup>와 비교해보면 오차동역학이 TDC의 경우,  $\mathbf{H}$ 의 추정오차에 대한 1 차식으로 표현되는 반면, TDCIM은 2 차식으로 표현되는 차이점만을 보임을 알 수 있다. 따라서 TDC를 위

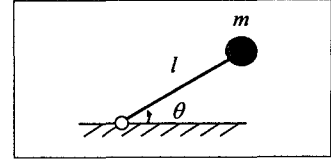


Fig. 8 One link robot manipulator

해 제안된 Kwon, Chang, Jung의 방법을 TDCIM에도 똑같이 적용할 수 있으며, 이 방법을 이용해 TDCIM의 안정성 해석을 수행하였다. 증명 과정의 서술이 너무 복잡하고 길어서 여기서는 그 결과만을 간단히 기술하도록 한다.<sup>(15)</sup>

만일,  $k_{D_i}^2 = 4k_{P_i}$ , 그리고  $k_{D_i} = k_{D_i}$ ,  $k_{P_i} = k_{P_i}$ 로 동일하게 gain을 선정한 경우, 참고 문헌 (15)의 4 장 결과를 바탕으로 안정성해석을 수행하면 아래와 같은 안정성기준을 세울 수 있다.

$$\| \mathbf{I} - \mathbf{M}^{-1}\bar{\mathbf{M}} \|_2 < \frac{1}{3 + 5.5k_D L} \quad (41)$$

만면 TDC에 대한 안정성기준은 다음과 같다.<sup>(13)</sup>

$$\| \mathbf{I} - \mathbf{M}^{-1}\bar{\mathbf{M}} \|_2 < \frac{1}{1 + 2.75k_D L} \quad (42)$$

식 (41)과 (42)의 우측항을 서로 비교해보면, TDCIM의 경우가 TDC에 비해 더 크다. 이것은 TDCIM이 TDC보다 안정한  $\bar{\mathbf{M}}$ 의 선정범위가 좁다는 것을 의미한다. 식 (41)은 TDCIM이 안정하기 위한 충분조건으로서 의미를 가진다.

## 4. 마찰에 의한 비선형성에 대한 제어성능 고찰

본 절에서는 쿨롱마찰의 영향과 정지마찰에 의해 발생하는 Stick-Slip에 대한 분석을 통해, TDC의 문제점을 검토하고, TDCIM이 TDC의 문제점을 보완할 수 있음을 확인한다.

정량적인 분석을 위해 Fig. 8과 같이  $l = 1.0(m)$ ,  $m = 1.0(kg)$ 인 1 링크 매니퓰레이터에 대해 모의 실험을 수행하고 결과를 고찰하였다. 마찰에 의한 비선형성을 고려한 이 시스템에 TDC( $\bar{\mathbf{M}} = 1.0$ )와 TDCIM( $\bar{\mathbf{M}} = 0.5$ )을 적용한 결과를 비교 분석하였다. 각 제어기에서 PD계인은  $K_D = 20$ ,  $K_P = 100$ 으로 동일하게 사용하였다.

### 4.1 쿨롱마찰에 대한 분석

일반적으로 쿨롱마찰력은 다음과 같이 모델링된다. 여기서  $\tau_{slip}$ 은 쿨롱마찰계수이다.

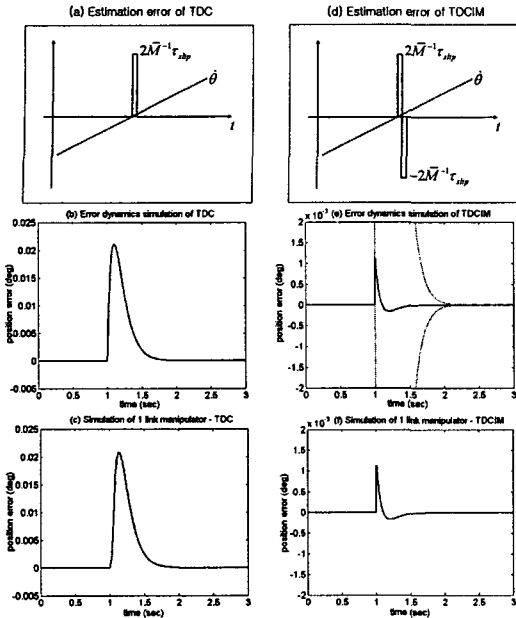


Fig. 9 Effect of Coulomb friction-TDC, TDCIM

$$F = \tau_{slip} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \quad (43)$$

제어 시스템에 나타나는 쿨롱마찰력의 영향을 오차동역학 분석과 모의 실험( $\tau_{slip} = 5Nm$ )을 통해 알아보았으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

플랜트는 속도가 0이 될 때, 쿨롱마찰력에 의해 급격한 비선형성을 띄게 된다. 따라서 TDC의 경우, (a)와 같이 시간지연추정 오차가 발생한다. 식 (10)으로부터 오차동역학을 분석해보면 (b)와 같이 제어오차가 크게 발생하게 됨을 알 수 있다.

TDCM의 특징은 IMC feed-back을 통해 시간지연추정 오차를 한 샘플링 시간 전의 값을 이용해 보상한다는 것이다. 따라서 시간지연추정 오차는 Fig. 9의 (d)와 같은 형태가 된다. 즉, 시간지연추정 오차가 발생한 순간의 바로 다음 샘플링 시간에서, 크기가 같고 방향이 반대인 입력을 가하게 되는 효과가 나타난다. 이 효과를 통해 TDC의 제어오차를 크게 감소시킬 수 있음을 (e)로부터 알 수 있다.

Fig. 9의 (c)와 (f)는 앞서 Fig. 8의 플랜트에 속도가 일정하게 증가하여 0을 지나는 기준 궤적을 주어서 모의실험한 결과로써, 오차동역학을 통한 분석이 적절함을 확인할 수 있다.

Table 1은 (c)와 (f)의 결과를 수치적으로 나타낸 표로써, 두 제어기의 제어성능의 차이를 쉽게 알 수 있다. 여기서 수렴시간은 불연속이 발생한 시점부터, 제어오차가 0.00011deg(TDCIM의 최대 오차값의 10%) 이하가 될 때까지의 시간이다.

Table 1 Max. error & Settling time in Fig. 9 (c), (f)

	ⒶTDC	ⒷTDCIM	(Ⓑ/Ⓐ)*100
Max.error (deg)	0.021	0.0011	5.2%
수렴시간 (sec)	0.89	0.38	42.7%

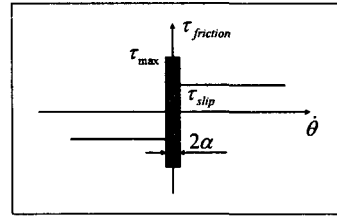


Fig. 10 Karnopp friction model

이상의 분석을 통해 쿨롱마찰과 같은 불연속적인 비선형성에 대해서, TDCIM이 시간지연추정오차의 보상을 통해 TDC의 제어성능을 월등히 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 Stick-Slip에 대한 분석

적분기가 있는 제어기를 정지마찰의 영향이 큰 시스템에 대해 적용하는 경우에 Stick-Slip현상이 발생하게 된다.<sup>(11)</sup> 여기에서 정지마찰의 영향이 큰 시스템이라 함은 동적 마찰에서 정지마찰로의 전이과정 중 속도가 감소함에 따라 마찰력이 급격히 증가하는 stibek effect가 큰 시스템을 말한다.

본 절에서는 TDC와 TDCIM의 Stick-Slip에 대한 현상을 모의 실험을 통해 분석해 보았다.

##### 4.2.1 마찰모델

Stick-Slip현상과 관련된 마찰 시스템은 여러 가지 유형으로 모델링 되어 왔다.<sup>(14,16)</sup> 본 절에서는 그 중에서 Karnopp 마찰 모델을 이용해 마찰 시스템에 대한 제어기의 성능을 분석하고자 한다.

Karnopp 마찰 모델은 다음과 같이 표현된다.<sup>(14)</sup>

$$F = \tau_{slip} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + (1 - \operatorname{abs}(\operatorname{sgn}(\dot{\theta}))) \tau_{stick}(\tau) \quad (44)$$

여기서  $\tau_{stick}$ 은 다음과 같이 정의 된다.

$$\tau_{stick}(\tau) = \begin{cases} \tau_{max} & \tau > \tau_{max} \\ \tau & -\tau_{max} \leq \tau \leq \tau_{max} \\ -\tau_{max} & \tau < -\tau_{max} \end{cases} \quad (45)$$

여기서  $\tau_{max}$ 는 최대 정지마찰력을 의미한다.

마찰 모델을 이용해 모의실험을 할 경우, 속도가 정확히 0이 되는 상황이 되기 어렵다. 따라서 Karnopp 모델에서는 Fig. 10과 같이, 속도가 0이 되는 구역(zero velocity zone:  $\pm\alpha$ )을 선정한다.<sup>(14)</sup> 즉, 속도 값이 이 구역 안에 존재할 경우, 속도를 0으로 하여 정지한 것으로 취급하는 것이다.



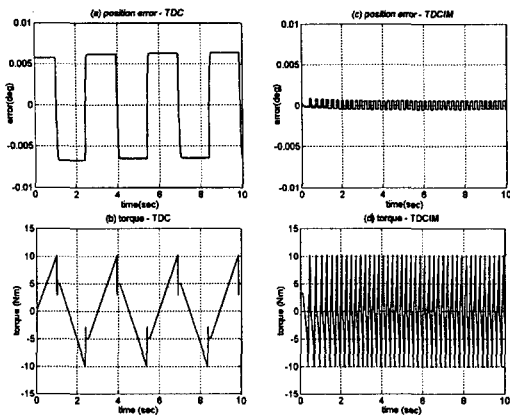


Fig. 11 Stick-Slip phenomena – TDC and TDCIM

Table 2 Amplitude of error and frequency in Fig. 11

	ⒶTDC	ⒷTDCIM	Ⓑ/Ⓐ*100
진폭 (deg)	0.0063	0.00057	9.0%
주파수 (Hz)	0.33	4.4	1343%

4.2.2 모의실험

시스템을  $\theta_e = 0$  으로 regulation control하고 있는 상황에 대해 모의 실험을 수행하였다.  $\tau_{max} = 10Nm$ ,  $\tau_{slip} = 5Nm$ ,  $\alpha = 10^{-5} rad/sec$  로 두었으며, 초기오차가 0.0057 deg 만큼 있는 상황으로 가정하였다.

모의 실험 결과를 Fig. 11 에 나타내었으며, 오차의 진폭과 진동 주파수를 Table 2 로 정리하였다.

Fig. 11 의 (a), (c)를 보면 TDC와 TDCIM의 Stick-Slip현상을 관찰할 수 있는데, TDCIM의 경우가 TDC를 적용했을 때보다 오차의 진폭이 작으며, 주파수는 높아졌음을 알 수 있다.

또한 Fig. 11 의 (b), (d)로부터 Stick 상황에서 TDCIM의 입력토크가 TDC보다 빨리 증가하게 된다는 것을 알 수 있다.

Stick-Slip 현상에 대한 고찰을 위해 Stick 상황, Stick→Slip 상황으로 구분하여 분석해 보았다.

4.2.3 Stick 상황에 대한 분석

Stick 상황에서 TDC는 제어기가 가지는 적분 효과<sup>(16)</sup> 때문에 입력토크가 시간에 따라 선형적으로 증가하게 된다. 그러나 TDCIM은 IMC feedback의 추가로 인해 제어기가 이중의 적분 효과를 띄게 되며, 이에 따라 제어입력은 시간의 제곱에 비례하여 증가한다. 따라서 TDCIM은 TDC에 비해 입력토크가 매우 빨리 증가하여 Stick 상황을 탈출하게 된다. 이것이 TDCIM의 Stick-Slip 현상의 주파수가 TDC보다 높은 이유이다.

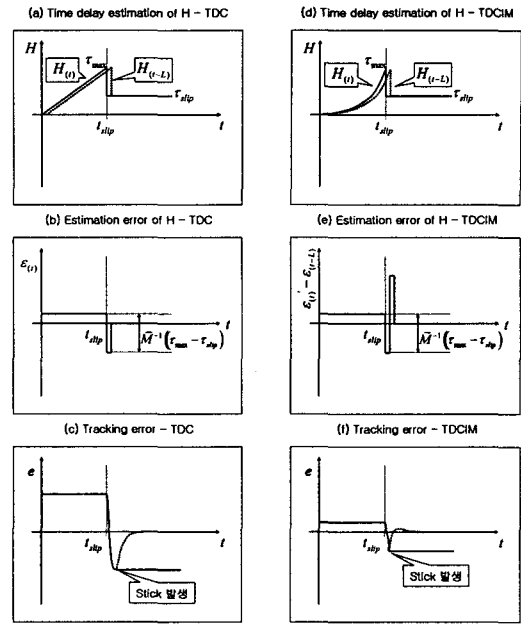


Fig. 12 Stick→Slip – TDC and TDCIM

4.2.4 Stick→Slip 상황에 대한 분석

플랜트가 Stick을 탈출하여 Slip으로 전이되는 과정에서 마찰력은 최대 정지마찰력  $\tau_{max}$  에서 운동마찰력  $\tau_{slip}$  으로 급격하게 변하게 된다. 이 과정을 Fig. 12 에 개념적으로 도시하였으며, 쿨롱마찰의 경우와 비슷하게 해석할 수 있다. 여기서  $t_{slip}$  은 Slip이 시작되는 시간을 나타낸다.

TDC의 경우 Fig. 12 의 (a)와 같이 Slip이 일어나는 순간 H는 급격하게 변하게 되며, (b)와 같이 큰 시간지연추정 오차가 발생하게 된다. 따라서 (c)와 같은 큰 제어오차가 발생하게 된다.

TDCIM의 경우 IMC feedback에 의한 시간지연추정 오차의 보상으로 인해 H의 추정 오차는 Fig. 12 의 (e)와 같은 형태가 된다. 따라서 (f)와 같이 TDC에 비해 제어오차가 작아지게 된다.

이상의 분석을 통해 Stick-Slip현상이 발생할 경우 TDCIM이 TDC에 비해 오차의 크기가 상당히 줄어드는 것을 이해할 수 있다.

5. 실험

본 장에서는 실험을 통해 TDCIM의 제어성능을 확인하고, 다른 제어기와 비교하였다. 두 가지의 플랜트에 대한 실험을 수행하였는데, 먼저, 1 자유도 리니어 모터 시스템에 대한 실험을 통해 마찰 시스템에 대한 TDCIM의 제어 성능을 확인하고, TDC, TDCSA와 비교하였다. 그리고, 2 자유도 스카

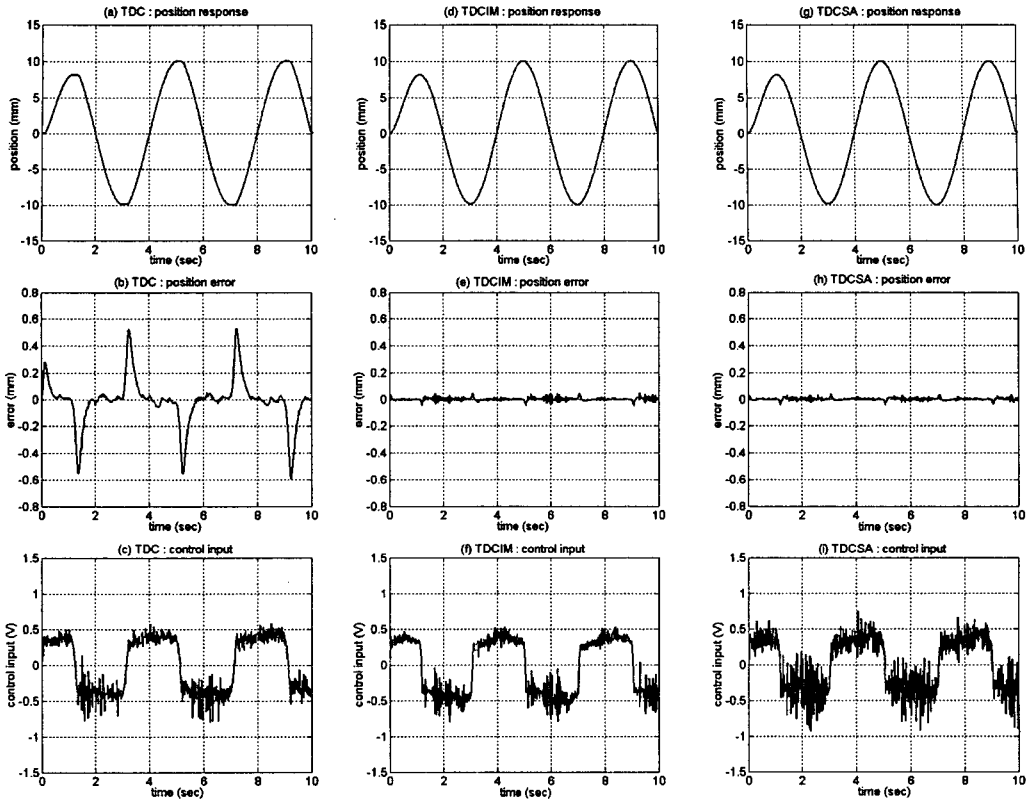


Fig. 14 Experimental Results of Linear Motor - TDC, TDCIM, TDCSA

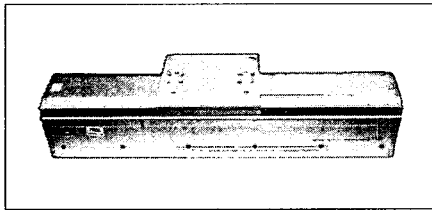


Fig. 13 Linear Motor (JTM 10)

라 로봇에 대한 실험을 통해 TDCIM이 다자유도 비선형 시스템에 대한 적용성을 확인하였다.

5.1 리니어모터를 이용한 실험

리니어 모터 시스템에 대한 실험을 통해 마찰 시스템에 대한 TDCIM의 제어성능을 확인하고, TDC, TDCSA와 비교분석하였다.

실험에 사용된 리니어 모터 시스템을 Fig. 13에 나타내었다. 이동부의 질량은 2Kg이다.

5.1.1 실험구성

각 제어기를 다음과 같이 설계하였다.

TDC, TDCIM의 경우,  $\bar{M}$ 는 오차가 최소가 되도록 튜닝(TDC:  $\bar{M} = 0.0003$ , TDCIM:  $\bar{M} = 0.0001$ )하였으며, PD gain은  $K_d = 20$ ,  $K_p = 100$ 으로 동일하게 두었다.

Table 3 Max. error in Fig. 14 (b), (e), (h)

ⒶTDC	ⒷTDCIM	ⒸTDCSA
$\pm 0.60mm$	$\pm 0.050mm$ (TDC의 8.3%)	$\pm 0.045mm$ (TDC의 7.5%)

TDCSA는 다음과 같이 적분형 슬라이딩 서피스를 이용하여 설계하였다.<sup>(11)</sup>

$$u = u_{(t-L)} - \bar{M}\ddot{x}_{(t-L)} + \bar{M}(\ddot{x}_d + K_D(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_P(x_d - x)) + K_{SA}sat(s_{SA}, \phi) \quad (46)$$

$$s_{SA} = \int_0^t [\ddot{x}_d - \ddot{x} + K_D(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_P(x_d - x)] d\xi \quad (47)$$

$\bar{M}$ 와 PD 게인은 TDC와 동일한 값을 사용하였으며, 스위칭동작 게인은 튜닝을 통해  $K_{SA} = 0.1$ ,  $\phi = 7.0$ 으로 선정했다<sup>2</sup>.

실험에 사용한 기준 궤적은 다음과 같다.

$$x_{d(t)} = 10.0(1 - e^{-\omega_d t}) \sin(\omega_d t) (mm) \quad (48)$$

<sup>2</sup> TDCSA에서 스위칭동작의 게인은 튜닝을 통해 선정하게 되는데, 본 논문의 초점은 제어성능이므로 제어오차가 최소가 되도록 게인을 튜닝했다.

여기서,  $\omega_j$  는 기준 궤적의 주파수를 나타내며,  $\omega_j = 0.25\text{Hz}$  로 두었다.

샘플링 시간은  $L = 0.002\text{sec}$  로 두었으며, 제어 입력 쪽에 Cut-off frequency가  $32\text{Hz}$  인 1차 저대역 통과필터를 사용하여 노이즈의 영향을 줄였다.

5.1.2 실험결과

실험 결과를 Fig. 14 에 나타내었다.

먼저 TDC의 경우에 대해서 살펴보면 Fig. 14 의 (a), (b)로부터 쿨롱마찰력의 영향으로 속도가 0 일 때에 큰 오차가 발생함을 쉽게 알 수 있다. 반면, Fig. 14 의 (e)를 보면, TDCIM의 경우 IMC feedback의 효과로 인해 제어 성능이 상당히 좋아졌음을 알 수 있다. 또한, (e)와 (h)로부터 TDCIM이 TDCSA와 비슷한 수준의 제어성능을 내어줄을 알 수 있다. 최대오차값을 Table 3 에 정리하였으며, TDCIM의 제어성능을 쉽게 확인할 수 있다.

TDCIM의 또 하나의 장점은 제어입력으로부터 알 수 있다. Fig. 14의 (c)와 (f)를 비교해보면 TDCIM을 적용하더라도 TDC에 비해 제어입력의 떨림이 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 IMC feed-back이 시간지연추정 오차가 발생했을 때만 작동하기 때문이다. 실험 결과를 통해 TDCIM에서 IMC feed-back의 추가로 인해 부수적으로 시스템에 나타날 수 있는 악영향이나 효과가 적다는 것을 알 수 있다. 반면 TDCSA의 경우는 Fig. 14의 (i)로부터 chattering 효과가 나타남을 알 수 있다. 물론 TDCSA의 경우도 튜닝을 통해 TDC와 비슷한 수준으로 chattering을 조절할 수 있지만, 그럴 경우 제어 성능이 저하되게 된다.

5.2 2 자유도 스카라 로봇을 이용한 실험

2 자유도 스카라 로봇 시스템을 이용하여, 다자유도 비선형 매니플레이터에 대한 TDCIM의 제어 성능을 확인하고, TDC와 비교 분석하였다. Fig. 15 는 실험에 사용된 스카라 로봇 시스템의 모습이며, 1 축 링크의 길이는 0.35m, 2 축 링크의 길이는 0.2m이다.



Fig. 15 SCARA type robot system

5.2.1 실험구성

각 제어기는 다음과 같이 설계하였다. TDC, TDCIM에서  $\bar{M} = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2)$  는 각각 튜닝을 통해 오차가 최소가 되도록 선정하였으며, PD계인은  $k_{D1} = 20, k_{P1} = 100$  으로 동일하게 두었다.

또한, Fig. 16 과 같이 스카라 로봇의 끝단이 4 초 동안  $R = 10\text{mm}$  인 원을 그리도록 하는 기준궤적을 사용하였다. 샘플링시간은  $L = 0.001\text{sec}$  이다.

5.2.2 실험결과

실험 결과를 Fig.17과 Fig. 18를 통해 나타내었다. Fig.17에서는 각 축별로 오차와 제어 입력을 나타내었으며, Fig. 18에서는 궤적추종결과를 XY도면에 나타내었다.

Fig. 17 (a), (c)로부터, TDCIM이 다자유도 시스템에서도 좋은 결과를 내 줌을 확인할 수 있다. 또한, 이 결과를 기준궤적과 비교해보면, TDC를 적용했을 때, 속도가 0인 순간 오차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이로부터 실험에 사용된 로봇이 쿨롱마찰이 큰 시스템임을 유추할 수 있다. 또한 TDCIM을 적용함으로써 오차를 상당히 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. Fig. 18를 통해서도 TDCIM의 제어 성능을 확인할 수 있다.

이상의 실험 결과로부터 TDCIM이 다자유도 시스템에도 적용될 수 있으며, TDC의 제어성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

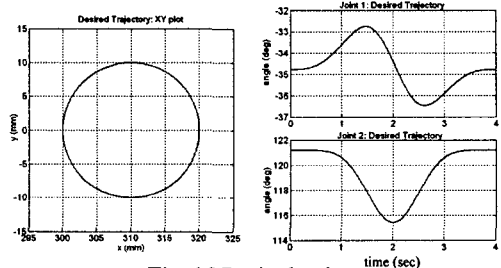


Fig. 16 Desired trajectory

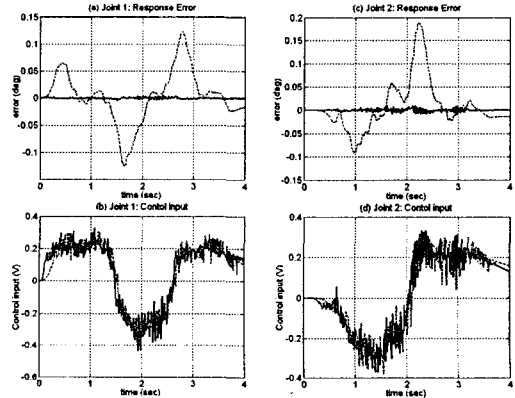


Fig. 17 Experimental results(solid:TDCIM,dashed:TDC)

Table 4 Max. error in Fig. 17 (a),(c)

	TDC	TDCIM
Joint 1	0.1257 deg	0.0049 deg
Joint 2	0.1883 deg	0.0107 deg

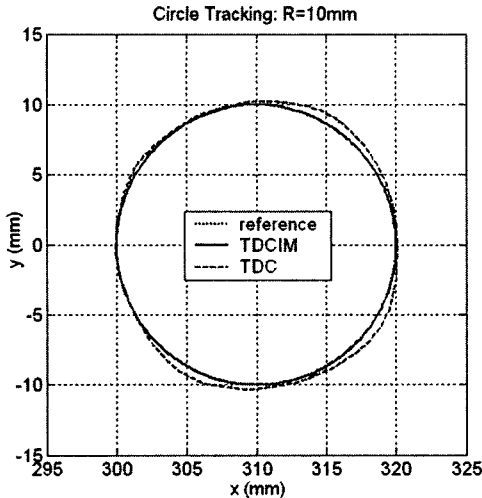


Fig. 18 Experimental results of SCARA robot: XY plot

## 6. 결론

본 연구에서는 TDC와 IMC의 개념을 결합한 강인제어기인 TDCIM을 제안하였다. TDCIM은 TDC의 시간지연추정오차를 IMC 개념을 이용하여 보상함으로써, 제어성능을 효과적으로 향상시킨 제어기이다.

시간지연추정오차는 쿨롱마찰이나 Stick-Slip 같은 마찰시스템에서 크게 발생하는데, 이런 시스템에 TDCIM을 적용한 경우에 대한 분석을 통하여 이론적으로 제어성능이 향상됨을 보였다. 또한, 리니어 모터 시스템/스카라 로봇을 이용한 실험을 통하여 TDCIM의 제어 성능을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 과학재단(KOSEF)에서 후원받아 한국과학기술원(KAIST)에서 수행하는 인간친화 복지 로봇시스템 연구센터(Human-friendly Welfare Robot System Engineering Research Center)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

(1) Youcef-Toumi K., Ito Osamu, 1990, "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics," *Trans. of ASME, J. Dyn. Sys., Meas., Contr.*, Vol. 112,

No. 1, pp. 133~142.

- (2) Youcef-Toumi K., Wu S. T., 1992, "Input/Output Linearization Using Time Delay Control," *Trans. Of ASME, J. Dyn., Sys., Meas., Contr.*, Vol. 114, pp.10~19.
- (3) Youcef-Toumi K., Reddy S., 1992, "Analysis of Linear Time Invariant System with Time Delay," *Trans. Of ASME, J. Dyn., Sys., Meas., Contr.*, Vol. 114, pp. 544~555.
- (4) Hsia T. C., Gao L. S., 1990, "Robot Manipulator Control Using Decentralized Linear Time-Invariant Time-Delayed Joint Controllers," *IEEE Int. Conference on Robotics and Automations*, pp. 2070~2075.
- (5) Garcia C. E., Morari M., 1982, "Internal Model Control. 1. A Unifying Review and Some New Results," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 21, No. 2, pp. 308~323.
- (6) Garcia C. E., Morari M., 1985, "Internal Model Control. 2. Design Procedure for Multivariable Systems," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 24, No. 2, pp. 472~484.
- (7) Garcia C. E., Morari M., 1985, "Internal Model Control. 3. Multivariable Control Law Computation and Tuning Guidelines," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 24, No. 2, pp. 484~494.
- (8) Morari M., Zafriou E., 1989, *Robust Process Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- (9) Li Q., Poo A. N. and Lim C. M., 1996, "Internal Model Structure in the Control of Robot Manipulators," *Mechatronics*, Vol. 6, No. 5, pp. 571~590.
- (10) Chang Pyung H., Park Suk H., 1998, "The Development of Anti-windup Scheme and Stick-Slip Compensator for Time Delay Control," *Proc. ACC*, Vol. 6, pp. 3629~3633.
- (11) Park Suk Ho, 2000, "Robust Controller and Observer using Synthesis of TDE and Switching Action," Ph.D. thesis, Dept. M.E., KAIST.
- (12) Lee Sung-Uk, Chang Pyung Hun, 2001, "Control of Heavy-duty Robotic Excavator Using Time Delay Control with Switching Action with Integral Sliding Surface," *IEEE Int. Conference on Robotics and Automations*, pp. 3955~3960.
- (13) Kwon Oh-Seok, Chang Pyung-Hun and Jung Je Hyung, 2002, "Stability Analysis of Time Delay Controller for General Plants," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 26, No. 6, pp.1035~1046.
- (14) Cai L., Song G., 1993, "A Smooth Robust Nonlinear Controller for Robot Manipulators with Joint Stick-Slip Friction," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Vol. 3, pp.449~454.
- (15) Cho Geon Rae, 2003, "Robust Trajectory Control of Robot Manipulators Using Time Delay Estimation and Internal Model Concept," M.S. thesis, Dept. of M.E., KAIST.
- (16) Park Suk Ho, 1995, "A Study on the Application of TDC to the System with Hard Nonlinearity (Saturation/Friction)," M.S. thesis, Dept. of M.E., KAIST.