

2 관성 공진계에 대한 반복 학습 제어의 응용에 관한 연구

Study on Application of Iterative Learning Control to 2-Mass Resonant System

이 학 성*, 문 승 빈, 홍 성 경
(Hak-Sung Lee, Seungbin Moon, and Sung-Kyung Hong)

Abstract : A 2-mass resonant system is one that has a flexible coupling between a load and a driving motor. Due to this flexibility, the system often suffers vibration especially when the motor is controlled for higher speed command. In order to suppress such a vibration, an iterative learning control is applied to the 2-mass resonant system in this paper. The motor speed is controlled according to the relation with the load speed. The desired speed trajectories are derived under the condition for no vibration. The simulation result suggests that the proposed method effectively suppresses the vibration even when there exist model uncertainties.

Keywords : iterative learning control, 2-mass system, vibration suppression

I. 서론

산업용 로봇, 수치제어 공작기계(NC Machine)등과 같이 고 성능의 모션 제어 응용에 있어서, 빠르고 정확한 속도 및 위치제어 특성은 매우 중요하다. 이와 같은 시스템은 통상 실제 운동을 위한 힘을 발생시키는 전동기, 발생된 힘에 의해 움직이는 부하, 그리고 이 전동기와 부하사이에 동력을 전달하는 동력 전달 요소(Power Transmission Element) 등으로 구성된다. 이러한 동력 전달 요소로는 기어, 축, 감속기 등을 들 수 있다. 한편 전동기와 부하가 강성이 작은 동력 전달 요소로 연결된 경우 전동기의 관성과 부하의 관성에 의해 이 동력 전달 요소에는 비틀림 현상이 발생하며 이와 같이 구성된 기계계를 2관성 공진계(2-Mass Resonant System)라고 한다[1-3]. 2관성 공진계에 대해 보통 널리 이용되어지고 있는 PI 속도 제어를 사용하여 응답이 빠른 속도제어를 하려고 제어이득을 크게 하면 공진에 의해 비틀림 진동이 일어나는 경우가 많다. 이 진동은 통상 장시간의 잔류 시간을 가지고 있어 정착 시간(Settling Time)을 증대 시키거나 정밀도를 떨어뜨려 해당 시스템의 성능을 떨어트리는 경우가 일반적이다. 따라서 해당 시스템의 생산성 향상을 도모하기 위해 이러한 2관성 공진계를 갖는 전동기의 속도 또는 위치제어에 있어서 고 정밀/고속응답이 절실히 요구되고 있다.

이와 같은 2관성 공진계의 비틀림 진동을 억제하기 위하여, 외란 관측기(Disturbance Observer)를 이용하는 방법[1], LQG제어를 이용하는 방법[2] H_{∞} 필터를 이용한 제어 방법[3] 등이 연구되어지고 있다. 이러한 연구 들은 기본적으로 관측기(Observer)로 측정 불가능한 변수를 관측하여 이를 PI 제어 혹은 상태 궤환(State Feedback)하는 방식으로 구성되어 있다. 한편 일반적으로 관측기는 제어 대상 시스템에 대한 정확한 모델을 필요하고 또 관측기의 관측 성능이 우수하기

위해서는 모델에 사용되는 계수에 대한 정밀한 수치가 요구된다. 2관성 공진계에 있어 관측기 모델에 사용되는 계수들은 축의 비틀림 상수 또는 부하의 관성 계수 등을 들 수 있다. 그러나 이와 같은 계수는 구하기가 어렵고 특히 부하의 관성 계수는 로봇의 부하 및 로봇 팔의 Kinematics 등에 의해 달라지므로 정확한 수치를 추정하는데 어려움이 있다. 이로 인해, 관측기에서는 다소 부정확한 계수를 사용할 수밖에 없고 이로 따라 적절한 진동 억제가 이루어지지 않을 수 있다.

한편, 반복 학습 제어(Iterative Learning Control) 기법은 제어 대상 시스템에 대한 모델이 다소 부정확하더라도 매우 정밀한 제어 성능을 가지고 있는 것으로 알려져 있다[4-6]. 본 논문에서는 이와 같은 반복 학습 제어기의 특성을 이용하여 2관성 공진계의 진동 억제에 적용하고자 한다. 제안된 방식은 먼저 2관성 공진계의 진동이 발생하지 않는 목표 각속도 궤적에 대한 조건을 도출하고 이에 따라 목표 각속도 궤적을 생성한다. 마지막으로, 이 목표 각속도 궤적에 대해 반복 학습 제어를 적용하는 방식으로 구성되어 있다. 반복 학습 제어는 주어진 목표 궤적에 완벽한 추종 성능을 보장하므로 제시된 기법은 부정확한 모델 계수를 포함하는 2 관성 공진계에 대해서도 효과적으로 진동 억제가 가능하다. 또한 목표 각속도 궤적을 진동이 발생하지 않는 조건에 따라 적절히 조절함에 따라 고속의 속도제어도 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1절의 서론에 이어 2절에서는 2관성 공진계에 대한 특성을 기술한다. 3장에서는 반복 학습 제어 기법을 2관성 공진계 직접 적용하기 위한 방법에 대해 논의한다. 4절에서는 모의 실험을 통해 제시된 방법의 우수성을 밝히고 5절의 결론으로 본 논문을 맺도록 한다.

II. 2관성 공진계

그림1은 전동기와 부하가 강성이 작은 동력 전달 요소에 의해 연결된 2관성 공진계의 모델을 나타낸다. 그림 1에서, J_1 과 J_2 는 각각 전동기와 부하의 관성 모멘트를 나타내고, K_{12} 는 동력 전달 요소의 비틀림 상수를 나타낸다. 이때,

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 8. 4., 채택확정 : 2003. 9. 22.

이학성 : 세종대학교 전자공학과 (hslee@sejong.ac.kr)

문승빈 : 세종대학교 컴퓨터 공학과 (sbmoon@sejong.ac.kr)

홍성경 : 세종대학교 항공우주공학과 (skhong@sejong.ac.kr)

※ 본 논문은 산업자원부 부품소재기술개발 사업의 지원을 받았음.

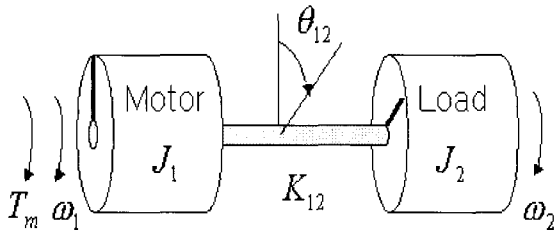


그림 1. 2관성 공진계.
Fig. 1. 2-mass Resonant System.

전동기가 발생시킨 토크를 T_m 이라 하고 이 토크에 의한 전동기와 부하의 각속도를 각각 ω_1 과 ω_2 라 하고 그림 1의 2관성 공진계에 대해 상태 방정식을 구하면 (1)과 같다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -K_{12}/J_1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & K_{12}/J_2 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1/J_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

여기서, 제어 입력 $u = T_m$ 이고, 상태 변수 $x = [\omega_1 \ \theta_{12} \ \omega_2]^T$ 를 나타내며 θ_{12} 는 전동기와 부하사이의 각 변위($\theta_1 - \theta_2$)이다.

(1)의 2관성 공진계에 대한 모션 제어시, 제어 대상이 되는 변수는 부하측의 각속도이나, 일반적으로 이것을 측정하기에는 어려움이 많기 때문에 전동기의 각속도를 측정하여 사용한다. 이와 같이 전동기의 각속도만을 이용하여 제어를 하는 경우, 전동기의 관성과 부하의 관성으로 발생하는 동력 전달 요소의 비틀림이 고려되지 않으므로, 부하측에 진동이 유발되기 쉽다. 특히 고속의 속도 제어가 필요한 경우 전동기에 대해 급격한 가속이 요구되고 이로 인해 전동기와 부하 사이의 비틀림이 커지게 되어 제어 성능을 떨어뜨리는 것이 일반적이다.

III. 2관성 공진계의 모션제어를 위한 반복 학습 제어 기법

본 절에서는 앞 절에서 소개된 2관성 공진계에 대해 반복 학습제어 기법을 적용하는 문제에 대해 논의 한다. 반복 학습 제어는, 어떤 주어진 작업이 반복적으로 이루어 질 때, 이전 반복의 오차 정보를 활용하여 다음 반복에서의 제어 성능을 개선하는 방식으로 구성되어 있다[4,5,6]. 이때, 이전 반복의 오차 정보를 어떻게 활용하는가에 따라 반복 학습제어기의 구조가 달라지며, 본 논문에서는 다음 식과 같은 PD-type 학습 제어 기법을 고려한다.

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma(\dot{e}_k(t) + R e_k(t)) \quad (2)$$

여기서 첨자 k 는 반복 횟수를 나타내고, $e(t)$ 는 목표 출력 궤적($y_d(t)$)과 실제 출력 궤적($y(t)$)간의 오차를 나타낸다.

이 PD-type 학습 제어기의 성질에 대해 논의하기 위해 다음과 같은 선형 시스템을 고려하자.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad y = Cx \quad (3)$$

여기서 u 과 y 는 각각 제어 입력과 출력을 나타내며, x 는 시스템의 상태를 나타낸다. 만약 (2)의 학습 제어 기법이 (3)의 시스템에 적용되었을 경우, 학습 제어 기법의 성능을 보장하는 수렴 조건은 다음과 같다[5,6].

$$\|I - \Gamma CB\| < 1 \quad (4)$$

따라서 (2)의 학습 제어 기법이 적용되기 위해서는 설계 변수인 Γ 가 (4)를 만족하도록 설계되어야 한다. 만약 (1)의 2관성 공진계의 출력 변수가 전동기의 각속도라 하면 ($y = [1 \ 0 \ 0]x$), (2)의 학습 제어기를 설계하기 위해 필요한 정보는 전동기의 관성 모멘트(J_1)뿐이고 게다가 설계 변수 Γ 는 (4)와 같은 부등식 형태의 수렴 조건을 만족시키면 되므로 모델이 다소 부정확한 2관성 공진계에 대해서도 (2)의 학습 제어 기법의 적용이 가능하다.

한편, 일반적으로 모션 제어 응용에서 궁극적인 제어 대상이 되는 변수는 전동기의 각속도가 아니라 부하의 각속도이다. 그러나 부하의 각속도 양은 측정이 불가능한 경우가 일반적이다. 따라서 반복 학습 제어를 이용하여 2관성 공진계를 효과적으로 제어하기 위해서는 측정이 불가능한 변수인 부하의 각속도에 대해 학습 제어 기법을 적용하는 문제가 해결되어야 한다. 또한, (2)의 학습 제어 기법은 제어 대상 시스템의 출력이 미리 정해진 목표 출력 궤적을 추종하는 문제에 적용 가능하다. 그러나 통상 2관성 공진계의 모션 제어의 경우 각속도 지령에 대한 Set Point Tracking 문제로 주어지는 경우가 일반적이다. 따라서 반복 학습 제어 법칙을 적용하기 위해서는 주어진 Set Point Tracking 문제를 적절한 경로 추종 문제로 변환시킬 필요가 있다. 따라서 반복 학습 제어기법을 2관성계의 부하측 모션제어에 응용하기 위해서는 (i) ‘부하측 각속도에 대한 학습 제어 적용’과 (ii) ‘주어진 Set Point간의 목표 각속도 궤적 설정’ 등의 문제가 해결되어야 한다. 본 절에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방안을 소개한다.

3.1 부하측 각속도에 대한 학습 제어 적용

앞서 언급한 바와 같이 2-관성 공진계의 모션 제어에서 궁극적인 제어 대상 변수는 부하의 각속도(ω_2)이나, 일반적으로 이것의 측정은 불가능한 경우가 많다. 한편 학습 제어 기법을 적용하기 위해서는 제어 대상 변수의 측정이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 이와 같이 부하의 각속도(ω_2)의 검출이 불가능하므로 검출이 용이한 전동기의 각속도(ω_1)를 이용하여 학습 제어 기법을 적용하고자 한다. 이를 위해 먼저 부하의 각속도와 모터의 각속도간의 관계를 도출한다. (1)에 의하면, 다음을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \omega_2 = K_{12} / J_2 \theta_{12} \quad (5)$$

위 식을 미분하고 정리하면 다음을 얻는다.

$$\omega_1 = \omega_2 + \frac{J_2}{K_{12}} \frac{d^2}{dt^2} \omega_2 \quad (6)$$

(6)은 부하의 각속도와 전동기의 각속도간의 관계를 나타

내는 식으로 이 식을 이용하면 전동기의 각속도만으로도 부하의 각속도를 원하는 속도 궤적으로 유지 시키는 것이 가능하다. 만약 부하의 각속도에 대한 원하는 속도 궤적을 $\omega_2^d(t)$ 라 하면 (6)에 의해 전동기측의 원하는 속도 궤적을 $\omega_1^d(t)$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$\omega_1^d(t) = \omega_2^d(t) + \frac{J_2}{K_{12}} \frac{d^2}{dt^2} \omega_2^d(t) \quad (7)$$

따라서 전동기의 각속도를 (7)에 정의된 궤적을 추종하도록 하면 검출이 어려운 부하측의 각속도가 주어진 궤적 $\omega_2^d(t)$ 를 추종하도록 하는 것이 가능하다

3.2 Set Point간의 목표 각속도 궤적 생성

통상의 모션제어에서의 제어 목적은 출력 변수를 목표치에 도달하게 하는 set point tracking 문제로 주어지는 것이 일반적이다. 한편 이를 학습 제어를 통해 접근하기 위해서는 주어진 시간 간격에서의 목표 출력 궤적이 필요한데 이 출력 궤적은 set point간에 적절한 경로를 생성하는 것으로 구성되어 질 수 있다. 본 절에서는 2관성 공진계의 진동이 발생하지 않는 목표 각속도 궤적 생성에 필요한 경계치 조건에 대해 고려한다. 이를 위해 부하측 각속도가 $\omega_2(t_1) = a$ 에서 $\omega_2(t_2) = b$ 로 변경하는 상황을 고려하자. 이 set point를 정상 상태로 간주하면 시간 t_1, t_2 에서 상태 변수 $x = [\omega_1 \ \theta_{12} \ \omega_2]^T$ 은 다음의 값을 갖는다.

$$\begin{aligned} \omega_1(t_1) &= \omega_2(t_1) = a \quad \theta_{12}(t_1) = 0 \\ \omega_1(t_2) &= \omega_2(t_2) = b \quad \theta_{12}(t_2) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

(8)의 조건을 (1)에 적용하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_2(t_1) &= K_{12} / J_2 \theta_{12}(t_1) = 0 \\ \frac{d}{dt} \omega_2(t_2) &= K_{12} / J_2 \theta_{12}(t_2) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

또, (9)을 미분하고 (8)를 대입하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} \omega_2(t_1) &= K_{12} / J_2 (\omega_1(t_1) - \omega_2(t_1)) = 0 \\ \frac{d^2}{dt^2} \omega_2(t_2) &= K_{12} / J_2 (\omega_1(t_2) - \omega_2(t_2)) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 시간 t_1, t_2 에서 진동이 발생하지 않는 목표 각속도 궤적은 위의 (8)-(10)을 만족하도록 설정되어야 한다. 예를 들어 $\omega_2^d(t)$ 를 부하의 각속도에 대한 목표 속도 궤적이라 하면 다음식을 만족하도록 설정되어야 한다.

$$\begin{aligned} \omega_2^d(t_1) &= a \quad \frac{d}{dt} \omega_2^d(t_1) = \frac{d^2}{dt^2} \omega_2^d(t_1) = 0 \\ \omega_2^d(t_2) &= b \quad \frac{d}{dt} \omega_2^d(t_2) = \frac{d^2}{dt^2} \omega_2^d(t_2) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

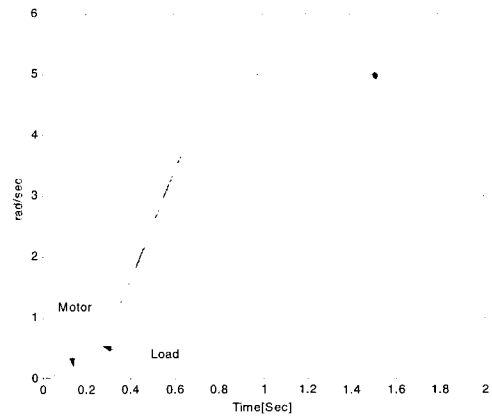


그림 2. 부하 및 전동기에 대한 목표 속도 궤적.
Fig. 2. Desired Angular Velocity Trajectories for Load and Motor.

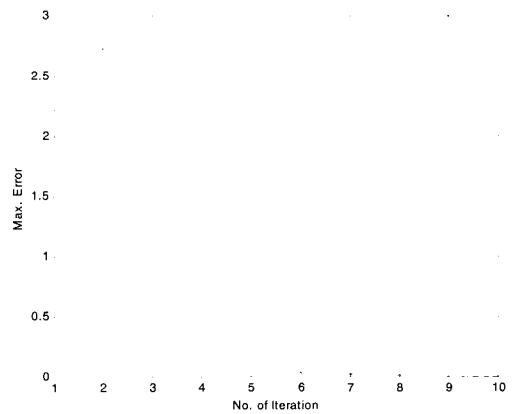


그림 3. 부하의 각속도오차.
Fig. 3. Angular Velocity Error of Load.

IV. 모의 실험

본 논문에서 제안한 기법의 유효성을 검증하기 위해 [1]에서 제시된 2관성 진동계에 적용하였다. 시뮬레이션에 사용된 2관성 공진계에 대한 계수는 다음과 같다.

- 전동기의 관성 모멘트 $J_1 = 0.016 \text{ [kg m}^2\text{]}$
- 부하의 관성 모멘트 $J_2 = 0.004 \text{ [kg m}^2\text{]}$
- 비틀림 상수 $K_{12} = 1.2938 \text{ [Nm/rad]}$

4.1 반복 학습 제어 기법의 적용

이 2 관성 공진계의 부하의 각속도를 0[rad/sec]에서 5[rad/sec]이 되도록 하되 settling time이 1초 이내가 되게 하도록 하고자 한다. 이 조건과 (11)을 고려하여 부하의 각속도에 대한 목표 속도 궤적을 다음과 같이 정의하였다.

$$\omega_2^d(t) = \begin{cases} 50t^3 - 75t^4 + 30t^5 & \text{if } 0 \leq t \leq 1 \\ 5 & \text{if } 1 \leq t \leq 2 \end{cases} \quad (12)$$

(7)을 이용하여 (12)에 정의된 부하의 속도궤적에 대응하는 전동기의 속도 궤적은 다음과 같다.

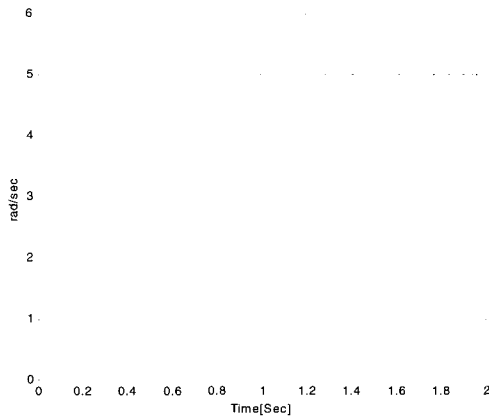


그림 4. 목표 부하 각속도와 학습 완료후의 부하의 각속도.
Fig. 4. Desired Angular Velocity for Load and Controlled Angular Velocity of Load.

$$\omega_1^d(t) = \begin{cases} 0.9t + 2.8t^2 + 51.9t^3 & \text{if } 0 \leq t \leq 1 \\ -75t^4 + 30t^5 & \text{if } 1 \leq t \leq 2 \end{cases} \quad (13)$$

그림 2는 부하측 및 전동기측에 대한 목표 속도 궤적을 보여주고 있다. 이 속도 궤적에 (2)의 학습제어기를 이용하였고, 수렴 조건 등을 고려하여 $\Gamma = 0.0112$, $R = -2.0$ 으로 선정하였다. 그림 3은 시행 횟수에 대한 부하의 속도 오차를 보여주고 있다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 제안된 학습 제어 방식이 효과적으로 주어진 2 관성 공진계 적용되어짐을 알 수 있다. 그림 4는 부하에 대한 원하는 속도 궤적과 학습이 완료된 후의 부하의 속도 궤적을 보여주고 있다. 진동이 없이 원활한 속도제어가 이루어 지고 있음을 알 수 있다.

4.2 모델링 오차에 대한 제어 성능 비교

2 관성 공진계의 궁극적인 제어 대상이 되는 부하측 속도는 학습 제어로 직접 적용하기가 힘들고 또한 측정 또한 어렵다. 본 논문에서는 부하의 각속도와 전동기의 각속도간의 관계를 이용하여 직접 부하측 속도를 제어하는 대신 전동기측 속도를 제어하여 간접적으로 부하측 속도를 제어하였다. 즉 (7)을 이용하여 부하의 원하는 각속도 궤적에 해당하는 전동기의 각속도 궤적을 구하여 학습 제어에 사용하고 있다. 따라서 (7)에서 사용되는 부하의 관성 모멘트(J_2)와 동력 전달 요소의 비틀림 상수(K_{12}) 등의 값이 정확하게 추정되지 못하면 주어진 궤적에 어긋나는 각속도 궤적을 추종할 가능성이 있다. 그러나 2 관성 공진계와 같은 모션제어에서의 경우 각속도 지령에 대한 Set Point Tracking 문제로 주어지는 경우가 일반적으로 속도 궤적과 조금 다르게 추종되더라도 주어진 Set Point를 진동 없이 추종하는 것이 중요하다. 모델링 오차에 대한 제어 성능을 살펴보기 위해 (7)를 다음과 같이 모델 오차를 포함하고 있는 식으로 변경한다.

$$\omega_1^d(t) = \omega_2^d(t) + (1+l) \frac{J_2}{K_{12}} \frac{d^2}{dt^2} \omega_2^d(t) \quad (14)$$

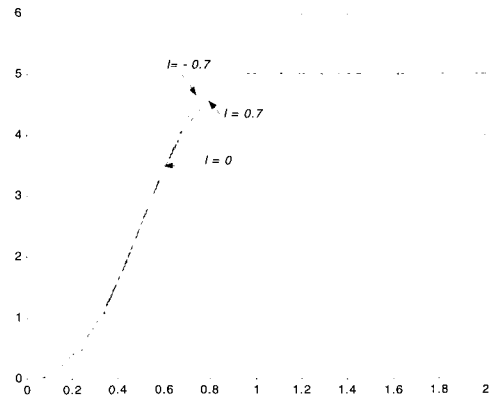


그림 5. 모델링 오차에 의한 부하의 각속도.
Fig. 5. Angular Velocities of Load for the Modeling Errors.

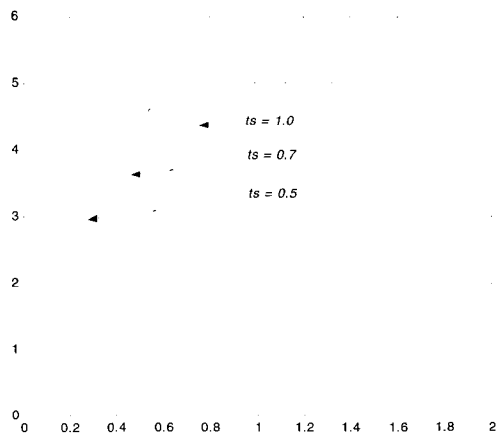


그림 6. 여러 속도 궤적에 의한 부하의 각속도.
Fig. 6. Angular Velocities of Load for the Various Desired Angular Velocity Profiles.

(14)에서 l 은 모델 오차를 나타내는 변수로 $l = 0$ 이면 오차가 없는 상태를 나타낸다. 비교를 위해 $l = 0$, $l = -0.7$, $l = 0.7$ 로 하여 원하는 부하 각속도에 대한 전동기 각속도 궤적을 산출 하였고, 이를 반복 학습 제어에 적용하였다. 그림 5는 이 세가지 경우에 대한 부하의 각속도 궤적을 보여준다. 그림 5에서 알 수 있듯이 모델링 오차에 의해 추종되는 궤적에 다소 변경이 있었지만 세가지 경우 모두 목표 값이 5 [rad/sec]에 진동 없이 효과적으로 제어가 됨을 알 수 있다.

4.3 고속 속도 제어 성능

본 논문에 제안된 방식에서는 원하는 각속도 궤적을 변경함으로써 고속의 속도 제어 성능을 얻을 수 있다. 부하의 각속도가 0[rad/sec]에서 5[rad/sec]이 되도록 하되 settling time이 a 초 이내가 되게 하도록 하는 부하의 각속도 궤적을 다음과 같다.

$$\omega_2^d(t) = \begin{cases} 50\left(\frac{t}{a}\right)^3 - 75\left(\frac{t}{a}\right)^4 + 30\left(\frac{t}{a}\right)^5 & \text{if } 0 \leq t \leq a \\ 5 & \text{if } a \leq t \leq 2 \end{cases} \quad (15)$$

위의 식을 이용하여 settling time이 0.5초, 0.7초 1초가 되도록 부하의 각속도 궤적을 산출하고 이에 대해 제안된 반복 학습 제어 기법을 적용하였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 원하는 각속도 궤적을 조절함에 따라 진동 없이 고속의 속도 제어가 됨을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 2관성 공진계의 진동 억제를 위해 반복 학습 제어 기법을 적용하는 새로운 진동 억제 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 주어진 2관성계에 대해 진동이 발생하지 않는 목표 각속도 궤적을 생성하고 이 목표 궤적에 대해 반복 학습 제어를 적용하는 방식으로 구성되어 있다. 한편 제어 대상이 되는 부하의 각속도는 반복 학습 제어로 직접 적용하기가 힘들고 또한 측정 또한 어렵다. 본 논문에서는 부하의 각속도와 전동기의 각속도간의 관계를 도출하고 이를 이용하여 직접 부하의 각속도를 제어하는 대신 전동기의 각속도를 제어하여 간접적으로 부하의 각속도를 제어하였다. 반복 학습 제어는 제어 대상 시스템의 모델이 다소 부정확하더라도 완벽한 추종 성능을 보인다. 따라서 제안된 방법은 모델이 다소 부정확하더라도 진동 없이 정확하게 2관성 공진계의 부하 속도를 제어하는 것이 가능하다. [1]의 2관성 공진 시스템을 대상으로 적용한 결과 응답 속도도 빠르면서 진동이 억제되는 것을 볼 수 있다. 또한 제안된 방법은 목표 각속도 궤적을 조절함에 따라 고속의 속도제어가 가능한 장점도 있다.

한편, 반복 학습 제어기는 그 구조상 feedforward방식인 까닭에 외란 등이 발생될 경우에는 성능이 저하되는 문제가 있다.

또한 학습이 완료되기 전의 제어 입력으로 인해 대상 시스템에 좋지 못한 영향이 발생할 수도 있다. 이는 feedback 구조를 갖고 있는 기존의 제어 기법에 비해 제안된 방식이 갖는 한계이다. 본 논문에서는 고려되지 않았으나, 본 논문에서 제안된 방식과 기존의 진동 억제 제어 기법을 혼용하여 사용하는 것이 이와 같은 문제를 극복하기 위한 방법으로 적절하리라고 예상되며 이는 추후 과제에서 해결하고자 한다.

참고문헌

- [1] K. Sugiura and Y. Hori, "Vibration suppression in 2- and 3-mass system based on the feedback of imperfect derivative of the estimated torsional torque," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 1, February 1996, pp. 56-64.
- [2] J. K. Ji and S. K. Sul, "Kalman filter and LQ based speed controller for torsional vibration suppression in a 2-mass motor drive system," *IEEE Transactions on Industry Electronics*, vol. 42, no. 6, December 1995, pp. 564-571.
- [3] J. S. Kim, S. U. Kim and Y. S. Kim. "The vibration suppression control of the two-mass resonant system using the H_{∞} filter", *Trans. KIEE*, vol. 47, no. 4 1998.
- [4] S. Arimoto, S. Kawamura, and F. Miyazaki, "Bettering operation of robots by learning," *Journal of Robotics System*, vol. 1, no. 2, pp. 123-140, 1984.
- [5] H. S. Lee and Z. Bien, "Study on robustness of iterative learning control with non-zero initial error," *International Journal of Control*, vol. 64, pp. 345-359, Mar. 1996.
- [6] H. S. Lee and Z. Bien, "Design issues on robustness and convergence of a iterative learning controller," in *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 8, no. 2, pp. 95-106, 2002.



이 학 성

1967년 4월 22일 생. 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과졸업(학사). 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과졸업(공학 석사). 1996년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과졸업(공학 박사). 1996년~1998년 LG 종합 기술원.

1998년 ~ 2000년 LG 이노텍. 현재 세종대학교 전자공학과 조교수. 관심분야는 학습 제어, 지능제어, 로봇 제어.



문 승 빈

1985년 명지대학교 전자공학과 졸업(학사), 1988년 University of Michigan, EECS 졸업(석사), 1993년 Purdue University, EE 졸업 (박사), 1993년 - 1999년 삼성전자, 현재 세종대학교, 컴퓨터 공학과 조교수, 관심 분야 실시간 임베디드 시스템,

로보틱스, 컴퓨터 비전.



홍 성 경

1987년 연세대 기계공학과 졸업(학사). 1989년 동 대학원 졸업(석사). 1998년 Texas A&M Univ. 기계공학과 졸업 (박사). 1989년~2000년 국방과학연구소 선임연구원. 현재 세종대학교 기계항공우주공학부 조교수. 관심분야는 지능제어, 유도항법제어 및 관성센서응용.

세종대학교 기계항공우주공학부 조교수. 관심분야는 지능제어, 유도항법제어 및 관성센서응용.