운동용 힘 발생기를 위한 리니어 모터의 전류제어

Linear Motor Current Control for a Force Generator

이세한[1]*
Se-Han Lee

〈Abstract〉

This research dealt with a two-degree-of-freedom controller which was used for 2-dimensional force generator based on an linear motor. The gain margin of the controller may be reduced when the time constant is near to the sampling time of a discrete controller. In case of low gain controller, it cannot satisfy the control performance. A two-degree-of-freedom controller based on PI-control was proposed. It can manage performance and stability respectively. It also had a kind of a feed-forward control. This scheme can not only lessen gain of conventional PI controller in order to stability but also obtain high tracking performance.

Keywords : Current control, Two-degree-of-freedom, Linear motor

[1*]정회원, 교신저자, 경남대학교 기계공학부 교수, 工博
E-mail : leesehan@kyungnam.ac.kr

[1*]Corresponding Author, Prof., School of Mechanical Engineering, Kyungnam University, Ph. D.

1. 서 론

소득 수준이 증가함에 따라서 사람들의 생활패턴이 변화하게 되는데, 그 중의 한 가지로 운동부족을 들 수 있다. 이러한 운동부족을 만회하게 위해서 사람들은 의도적으로 기구를 사용한 운동을 하게 된다. 이 때, 간편하면서 운동의 강도를 조절할 수 있는 장치를 필요하게 된다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 사용자와 운동기구 사이에 작용하는 힘이 제어될 필요가 있다.

이러한 목적으로 사용자의 힘을 정량화하기 위해서 2축 리니어 모터로 구성된 운동장치가 개발되었다5). 개발된 운동장치는 사용자가 장치를 움직이는 경향에 따라서 장치의 관성량, 감쇠량, 그리고 강성량을 변화시키는 기능을 갖고 있다. 로봇제어분야에서도 그 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다2).

기계적인 임피던스는 물체가 동작하고 있을 때, 그 동작에 관련된, 변위, 속도, 가속의 변화에 따른 힘 발생 관계에 해당된다. 각각의 움직임에 해당되는 힘은 모터에서 발생되어야 한다. 이 때, 모터가 발생시켜야 하는 힘은 그 모터에 입력되는 전류에 비례하게 되므로 힘 발생은 곧 전류제어에 해당되게 된다.

사용자가 리니어 모터에 대해 구사하는 움직임을 파악하기 위해서 모터에 부착된 선형 엔코더가 사용되었다. 즉, 모터에 부착된 기본적인 센서만으로 추가적인 하드웨어 없이 모터의 강성, 감쇠, 관성을 조절할 수 있게 되었다.

2. 기계 임피던스 구현

기계의 직선운동은 모터의 회전운동으로부터 다양한 장치로 얻을 수 있지만 리니어 모터의 경우 곧바로 직선운동이 얻어진다. 본 연구에서는 리니어 모터를 이용하여 Fig. 1과 같은 2자유도 움직임이 가능한 장치가 구성되었다. 그림에 의하면 사용자가 장치의 레버를 잡고 그 장치를 움직이면 그 장치의 변위, 속도, 가속도가 검출되고 그 결과에 상응하여 모터의 전류를 공급하여 기계적인 임피던스인 강성, 감쇠, 관성이 얻어진다.

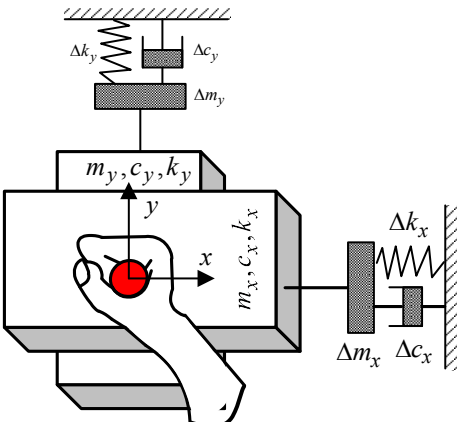

Fig. 1. Concept of the mechanical impedance

이러한 과정을 통해서 사용자의 운동효과를 향상시킬 수 있다.

2.1 기계 임피던스

본 연구에서 취급하고 있는 기계 임피던스는 원래의 관성, 감쇠, 강성 값을 물리적으로 변화시키지 않으면서 모터에서 적절한 힘을 발생시켜서 그 값들이 변화한 것처럼 효과를 발생시킨다. 이 장치는 x축 및 y축 방향의 2자유도 움직임이 가능하지만 설명의 편의를 위해서 1자유도에 대해서만 설명하기로 한다.

정지상태 모터 가동부의 질량이 m인 모터의 레버에 사용자가 F 만큼의 힘을 작용하면 그 가

동부는 $a_0 = F/m$의 가속도로 움직이게 된다. 아래와 같이 가동부의 질량이 m 보다 Δm만큼 추가된

$$M = m + \Delta m \tag{1}$$

이 필요하다고 가정하면 사용자는 동일한 힘 F에 대하여 $a = F/(m+\Delta m), (< a_0)$의 가속도를 감지해야 한다. 이 상황을 구현하기 위해서 모터에 전류를 공급하여 F 의 방향에 반대되는 방향으로 $F_1 = (\Delta m)a$의 힘을 발생시키면 사용자는 새로운 관성 M 에 해당되는 가속도 a 를 감지할 것이다. 모터가 발생시키는 힘 F_m은 다음과 같이 힘 상수 K_T 와 전류 i의 곱으로 표현된다.

$$F_m = K_T i \tag{2}$$

새로운 관성 M 이 되려면 모터에 추가적으로 다음과 같은 전류가 공급되어야 한다.

$$i_m = -\frac{\Delta m}{K_T} a \tag{3}$$

동일하게 감쇠 $C = c + \Delta c$, 강성 $K = k + \Delta k$도 쉽게 발생될 수 있다. 이 때, c 와 k 는 장치 원래의 감쇠 및 강성에 해당되고 Δc 와 Δk는 추가되는 감쇠와 강성의 분량이 된다. 필요한 해당 전류는 다음과 같다.

$$i_c = -\frac{\Delta c}{K_T} v \tag{4}$$

$$i_k = -\frac{\Delta k}{K_T} x \tag{5}$$

이 때, 위 식에서 필요한 가속도 a, 속도 v, 변위 x의 값은 검출되어야 한다. 이 값들은 모터에 부착된 엔코더에 의해서 얻어지게 된다.

2.2 복합 기계 임피던스

실제 상황에서는 관성, 감쇠, 강성 등이 복합적으로 존재하게 된다. 그러므로 앞에서 언급한 관성, 감쇠, 강성 등은 복합적으로 구현되어야 한다. 모터에 연결된 레버에 사용자가 힘을 작용하여 움직임을 발생시킬 경우, 사용자는 각각의 반력을 복합적으로 느끼게 된다. 이 복합적인 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_{total} &= F_{\in ertia} + F_{damp} + F_{stiff} \\ &= Ma + Cv + Kx \end{aligned} \tag{6}$$

위 식으로부터 각각의 반력은 가속도, 속도, 변위에 비례하는 형태로 반력의 합계가 구해진다.

운동장치는 계산된 가속도, 속도, 변위에 비례하는 전류성분을 모두 합산하여 모터에 작용해야 한다. 이 때, 필요한 전류는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} i_{total} &= i_M + i_C + i_K = -\frac{\Delta m}{K_T} a - \frac{\Delta c}{K_T} v - \frac{\Delta k}{K_T} x \\ &= -(\Delta m\, a + \Delta c v + \Delta k x)/K_T \end{aligned} \tag{7}$$

2.3 실험장치

다음의 Fig. 2에 실험장치를 나타내었다. 실험장치는 2개의 모터, 드라이브, 제어기 TMS320C32, PC로 구성되어 있다.

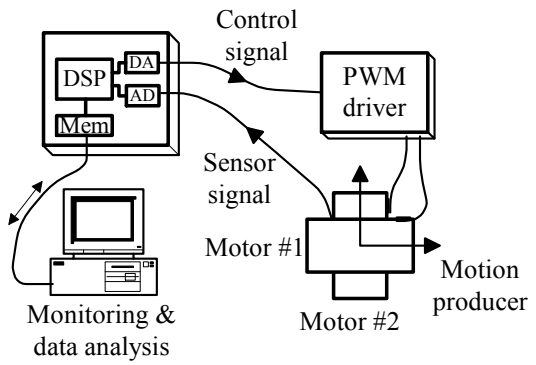

Fig. 2. Schematic of experimental setup.

3. 모터의 전류제어

기계 임피던스를 발생시키는데 필요한 발생력은 식 (2)와 같이 모터에 공급되는 전류에 비례하게 된다. 대부분의 모터 드라이브는 모터에 흐르는 전류를 검출하고 그 전류제어용 전압을 출력하는 형태를 갖고 있다. 일반적으로 모터의 입력전압 u 와 모터에 입력되는 전류 i 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$u - K_E v = L\frac{di}{dt} + Ri \tag{8}$$

이 때, L 과 R 은 모터권선의 인덕턴스와 저항, K_E 는 역기전력 상수를 나타낸다. 직류모터의 경우 발생되는 역기전력은 속도에 비례하며, 이 전압의 방향은 모터에 입력되는 전압과 반대가 된다. 사용자가 입력한 힘과 모터에서 발생되는 힘의 합력에 의해서 장치가 움직이기 때문에 변위, 속도, 가속도 등은 모터 자체의 발생력뿐만 아니라 사용자가 작용한 힘에 의해서 결정된다. 그러므로 식(8)의 좌변은 항상 변하게 된다. 모터 입력전압 u 의 조절을 통해서 원하는 전류 i 를 얻기 위해서는 외란에 해당되는 역기전력의 영향을 최소화 하여야 한다. 모터의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_p(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{Ls + R} \tag{9}$$

다음의 Fig. 3은 모터 $G_p(s)$제어를 위한 블록선도를 나타낸다. $G_{c1}(s)$와 $G_{c2}(s)$는 제어기#1, 제어기#2를 나타내고 K_{PWM} 은 드라이브의 비례상수, $G_d(s)$는 AD변환에 따른 시간지연, $R(s)$와 $Y(s)$는 전류명령과 전류출력을 나타낸다.

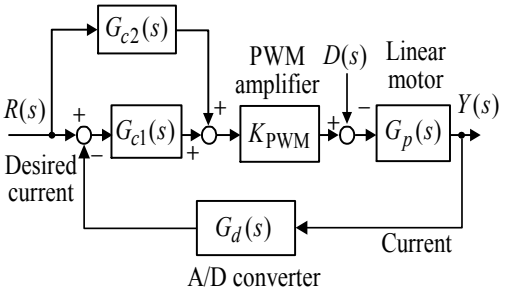

Fig. 3. Block diagram of 2-DOF current controller.

3.1 시스템의 시간지연 특성

모터 드라이브 회로는 입력전압을 받아서 모터의 힘 제어에 필요한 전류를 출력한다. 이 때, DSP를 이용하여 제어기 G_{c1}을 구성하므로 아날로그 전류값은 AD변환을 통해서 디지털 신호로 변환되어야 한다. 이 때, 전류값을 샘플링 한 후에 제어입력을 계산하는데, 이 때, 샘플링 주기 T 만큼의 시간지연이 발생된다.

모터의 전류제어의 경우, 모터 G_p의 출력은 변위나 속도와 같은 기계적 변수가 아니라 전기적 변수인 전류가 된다. 여기에서 모터의 시정수는

기계적인 시정수 τ_m이 아니라 매우 짧은 전기적인 시정수 τ_e에 영향을 받게 된다. 위치 혹은 속도제어에서는 거의 문제가 되지 않았던 AD변환의 시간지연이 전류제어에서는 문제가 될 수 있다.

본 연구에서 사용된 샘플링 주기는 $400\mu s$이며, 모터의 시정수는 $1{,}250\mu s$ 정도로 약 3배 정도 차이가 있다. 샘플링 주기를 제어대상 시정수의 1/10으로 선택3)하는 관례가 있다. 모터의 시정수를 변경하는 것은 현실적으로 어려우므로 샘플링 주기를 줄여야 한다. 그렇지만 장치에서 필요한 엔코더 측정을 위해서는 샘플링 주기를 감소시키는 것은 바람직하지 않다. 그러므로 제어기법 향상을 통해서 성능을 개선하는 것이 바람직하다.

제어대상을 나타내는 식 (9)는 1차 시스템에 해당되므로 위상지연은 최대 -90^0에 달하게 되어 이득여유는 이론상 무한대1)가 되어 이득조정에 제한이 없게 된다. 그렇지만 AD변환에 따른 샘플링 주기 T 만큼의 시간지연을 고려하면 식 (9)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{Ls+R} e^{-Ts} \approx \frac{1}{Ls+R} \frac{1-Ts/2}{1+Ts/2} \quad (10)$$

여기에서 시간 지연한 e^{-Ts}를 PADE[6] 근사식으로 표현하였다.

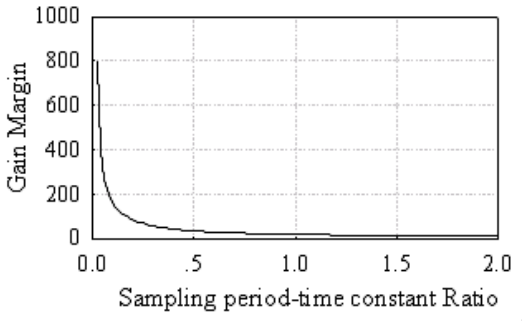

Fig. 4. Gain margin with respect to the ration of sampling period to time constant.

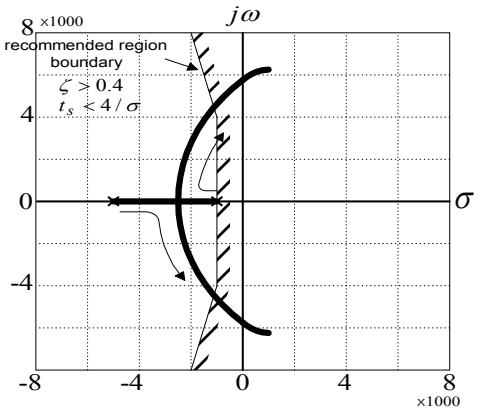

Fig. 5. Root-locus plot of the system with time-delay.

Fig. 4는 모터의 시정수를 기준하여 샘플링 주기 T 를 증감시킬 때, 식 (10)으로 표시되는 시스템의 이득여유를 나타낸 그림이다. 샘플링 주기 T 가 시정수에 비해서 작아질수록 이득여유가 커지는 것을 알 수 있다. 현재, $T/\tau_e = 0.33$ 정도이므로 약 50의 이득여유를 갖는다. 이 값은 충분해 보이지만 시스템에 포함되는 잡음 등이 첨가되지 않는 이론적인 수치이며 실제 상황에서는 그 여유는 더욱 제한되게 된다. 다음의 Fig. 5는 본 연구의 근궤적을 나타낸다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 안정된 1차 시스템이라도 시간지연이 존재하게 되면 특성방정식의 근궤적은 이득의 증가에 따라서 우반면으로 이동하게 된다. 안정적인 동작을 위해서 근궤적의 값은 좌반면7) 조건뿐만 아니라 Fig. 5에 표시된 추천 영역으로 더욱 제한되게 되므로 이득여유는 더욱 더 작아진다.

제어시스템에서 목표추종 성능의 향상과 피드백 시스템의 안정성은 서로 상반되게 된다. 전류추종 성능을 향상시키기 위해서 제어기의 이득을 상향조정 하였을 경우 발진이 발생하여 안정성은 저하되고, 발진을 방지하고 안정성을 향상시키기 위해

서 이득을 하향 조정할 경우 전류추종 성능이 저하되게 된다.

3.2 2자유도 제어기

앞에서 언급한 문제점을 해소하기 위하여 기존에 제어기 G_{c1}에 추가하여 피드포워드4) 제어기 G_{c2}를 도입하였다. 외란을 무시한 경우 Fig. 3에 나타난 폐루프 시스템의 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{K_{PWM}(G_{c1}+G_{c2}G_p)}{1+K_{PWM}G_pG_d} \tag{11}$$

이 식에서 알 수 있듯이 시스템의 극점을 결정하는 특성방정식에서 G_{c1}만 존재하며, 과도상태에 영향을 주는 영점을 결정하는 분자에는 G_{c2}항이 추가되어 있다. 따라서 영점과 극점의 배치에 있어서 일반적인 단일 제어기 G_{c1}만 사용했을 때보다 설계 자유도가 증가하게 된다.

본 연구에서는 외란의 영향을 제거하기 위하여 주어진 이득제한 조건 하에서 G_{c1}제어기의 최적 계수를 산출하며, 과도상태의 개선을 위해서 G_{c2} 제어기의 최적의 계수를 산출한다.

3.3 각 제어기 구조 및 파라미터 결정

제어대상에 부착된 엔코더 신호를 이용하여 가속도와 속도는 변위를 수치차분하여 얻어지는데, 구조적으로 양자화 오차 등 잡음의 혼입으로 산출결과는 잡음을 포함하고 있다. 사용자의 동작은 비교적 저주파이며, 잡음은 비교적 고주파임을 이용하여 각각에 저역필터를 사용하여 잡음을 억제하였다. 그러므로 내부에서 또 한 번의 차분동작은 성능개선의 이점보다 잡음에 의한 손실이 예상되고 실험결과 제어 시스템이 발진하면서 불안정해지므로 제외하였다. 외란 $D(s)$와 출력 $Y(s)$의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{Y(s)}{D(s)}=\frac{G_p}{1+K_{PWM}G_{c1}G_pG_d} \tag{12}$$

기준입력 $R(s)$와 오차 $E(s)=R(s)-Y(s)$의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{E(s)}{R(s)}=\frac{1-K_{PWM}G_{c2}G_p}{1+K_{PWM}G_{c1}G_pG_d}+\frac{K_{PWM}G_{c1}G_p(G_d-1)}{1+K_{PWM}G_{c1}G_pG_d} \tag{13}$$

식 (12)는 외란이 출력에 미치는 영향을 나타내고 있다. 식 (12)의 크기를 가변할 수 있는 요소는 G_{c1}의 크기뿐이다. 그렇지만 G_{c1}의 비례이득 크기는 시간지연에 따라서 제약이 있으므로 외란으로 지정된 식 (6)에서 K_Ev 항에서 속도성분이 저주파임을 이용하여 저주파에서 높은 이득을 갖는 제어기 G_{c1}의 적분기항이 그 외란을 흡수한다. 비례이득의 최대값의 한계는 다음과 같이 시간지연에 의한 최대이득 여유값이 해당된다.

$$|G_{c1}(s)|\le GM \tag{14}$$

여기에서 GM은 시간지연에 의한 이득여유 감소로 Fig. 4와 Fig. 5의 조건으로 결정될 수 있다. G_{c1}의 크기를 결정할 때, 안정성에 미치는 영향이 큰 비례항의 계수 크기로 결정된다. 식 (13)은 추가한 $G_{c2}(s)$의 형태를 결정하는 조건이 된다. 식 (13) 우변의 두 번째 항의 G_d-1은 입력과

지연된 입력의 차이를 나타내는데, 입력은 사용자의 운동을 나타내므로 대부분 10Hz 미만의 주파수를 갖고, $G_d - 1$은 10Hz 입력에 대하여 약 2.5%의 최대값을 가지므로 0 으로 근사할 수 있다. 식 (13)은 다음과 같이 근사화 된다.

$$\frac{E(s)}{R(s)} \approx \frac{1 - K_{PWM} G_{c2} G_p}{1 + K_{PWM} G_{c1} G_p G_d} \tag{15}$$

다음과 같이 $G_{c2}(s)$는 식(15)의 분자를 0 으로 지정하여 계산될 수 있으며, 대상 전달함수의 역함수에 해당된다.

$$G_{c2} = \frac{1}{K_{PWM} G_p} \tag{16}$$

만일, $G_{c2}(s)$가 존재하지 않는다면 $R(s)$와 $E(s)$의 전달함수는 다음과 같이 구성된다.

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + K_{PWM} G_{c1} G_p G_d} \tag{17}$$

제어기 G_{c1}의 특성에 따라서 정상상태에서 오차 $E(s)$는 0 값을 가질 수 있다. 그렇지만 식 (15)에서 알 수 있듯이 분자가 0 이 되게 적절한 G_{c2}를 선택하여 추가하면 항상 오차 $E(s)$가 0 이 되는 것이 가능하다. 그러나 실제 대상 전달함수의 분모의 차수가 분자의 차수보다 크거나 같은 경우가 대부분이며, 본 연구의 경우 분모의 차수가 크므로 해당 역함수는 얻어지지 않는다.

본 연구의 경우 $K_{PWM} G_p$가 식 (9)에서 알 수 있듯이 1차 시스템이고 시정수 값이 장치를 지배하는 기계적 시성수보다 작은 조건을 이용하여 $L \approx 0$으로 가정하여 제어대상 역함수를 다음과 같이 근사화 한다.

$$G_{c2} = \frac{1}{K_{PWM} G_p} \approx \frac{R}{K_{PWM}} \tag{18}$$

4. 결과

종래의 일반적인 제어기를 사용했을 때, 시스템에 구조적으로 존재하는 샘플링 주기에 해당하는 시간지연이 제어대상의 시정수에 근접함에 따라 제어기 이득조정에 제한사항으로 발생하였다. 다음의 Fig. 7은 제한된 이득에 해당되는 전류추종 성능을 나타내고 있다.

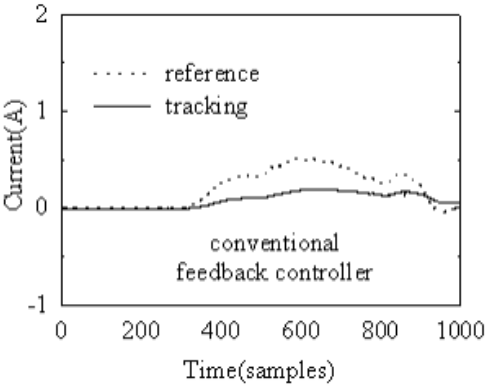

Fig. 7. Current tracking response with respect to conventional feedback control.

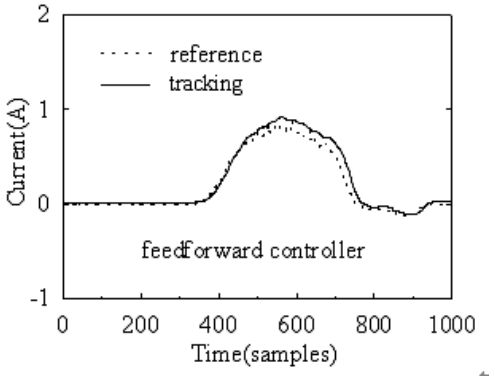

Fig. 8. Current tracking response with additional feedforward control.

개선된 전류추종 성능을 얻기 위하여 제어기의 이득을 상향 조정할 경우 발진이 발생한다. 본 연구에서는 식 (18)에서 얻어진 피드포워드 제어기 G_{c2}와 식 (16)에서 제시한 조건 하에서 제어 시스템의 실제 계수와 공칭값의 차이, 잡음의 영향을 고려하여 G_{c1}의 크기를 이득여유 최대값의 50%로 지정한 결과, Fig. 8에 표시한 바와 같이 개선된 결과를 얻었다.

본 연구에서 그 결과를 이용하여 구성한 피드포워드 제어기를 사용하여 장치에 적용하여 검출되는 가속도, 속도, 변위에 해당되는 관성, 감쇠, 강성량을 적용하여 얻어진 전류를 전류 제어기기 추종하는 모습을 Fig. 9, 10, 11에 제시하였다.

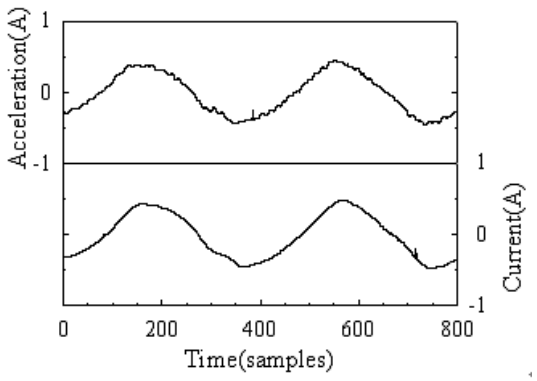

Fig. 9. Mechanical inertia impedance.

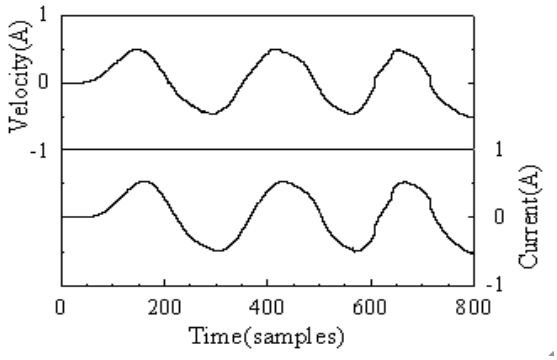

Fig. 10. Mechanical damping impedance.

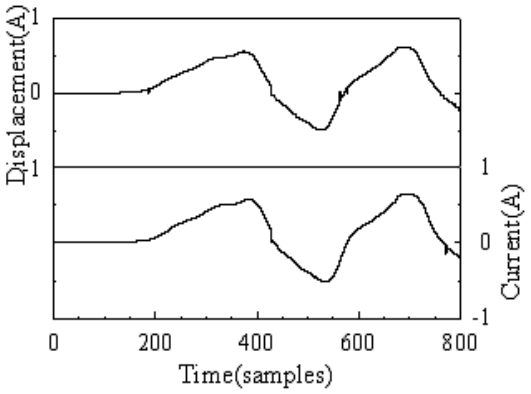

Fig. 11. Mechanical stiffness impedance.

5. 결론

본 연구에서 기계적인 제어대상이 대상이 될 때, DSP를 이용한 제어기 샘플링 주기에 해당되는 시간지연이 무시될 수 없는 경우에, 샘플링 주기의 지연값이 제어대상의 시정수에 근접하여 이득조절에 제한이 발생되는 환경에서 안정성과 추종성의 구현을 분리해서 추구할 수 있는 2자유도 제어기를 적용하고 개선된 제어성능을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1) Benjamin C. Kuo, Automatic Control Systems 7the ed., Prentice Hall, pp.775-777, (1995)
2) Mark W. Spong, M. Vidyasagar, Robot Dynamics and Control, Wiley, pp.252-254, (1989)
3) Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, Computer Controlled Systems, Prentice Hall, pp.187, (1987)
4) Masaki S., Shu Y., Jun S., Kouki M., "The Basic Characteristic of Two-Degree-of-Freedom PID Controller using a Simple Design Method for Linear Servo Motor Drives," Advanced Motion Control proceeding, pp.59-64, (1997).
5) 신동윤, 송재복, 김용일, “운동감의 정량화를 위한 감성 공학적 기법 개발,” 대한인간공학회 추계학술대회 논문집, pp.359-365, (1997)
6) Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamics Systems, Addison Wesley, pp.183, (1985)
7) Ogata Katsuhiko, Modern Control Engineering, Prentice Hall, pp.252, (1970)

(접수:2014.12.22, 수정:2015.01.16, 개제확정:2015.01.23)