

고성능 선형전동기 위치제어 시스템에 대한 최소차원 부하관측기의 실제적 구현 및 이를 이용한 실시간 관성추정기의 구현

論文

56-4-13

A Study on The Actual Application of the Least Order Load Observer and Effective Online Inertia Identification Algorithm for High Performance Linear Motor Positioning System

金峻奭[†]
(JooahnSheok Kim)

Abstract - As well known when the linear machine is operated between two points repeatedly under positioning control, there are various positioning error at the moment of zero speed owing to the non-linear disturbance like as unpredictable friction force. To remove this positioning error, a simple least order disturbance observer is introduced and is actually implemented in this study. Due to this simple algorithm, the over-all machine system can be modified to simple arbitrary given one-mass load without any disturbance. So, the total construction process for positioning control system is much easier than old one. Moreover, to generate a proper effective position profile with the limited actual machine force, a very powerful on-line mass identification algorithm using the load force estimator is presented. In the proposed mass identification algorithm, the exact load mass can be calculated during only one moving stage under a normally generated position profile. All presented algorithm is verified with experimental result with commercial linear servo machine system.

Key Words : least order disturbance observer, Load mass identification algorithm, linear machine positioning system

1. 서 론

근래들어 반도체와 LCD(Liquid Crystal Display)/PDP(Plasma Display Panel) 산업의 발달과 더불어 초정밀 이송공정에 대한 수요가 급증하고 있으며 이에 따라 1um이하의 고정밀도를 갖는 선형전동기 및 고성능 제어장치에 대한 산업적 요구가 매우 높아지고 있다. 선형전동기는 널리 알려진 바와 같이 매우 높은 정밀도와 빠른 운전특성을 장점으로 하고 있으나 선형 운동을 하는 운전특성으로 인하여 회전형 기기에서는 크게 문제되지 않는 제어상의 몇 가지의 문제가 발생한다.

가장 문제가 되는 것은 선형동작에 필수적인 선형 가이드(Linear Guide)를 부착함으로써 회전형 기기에 비하여 매우 큰 마찰력이 발생한다는 것이다. 회전형 기기에 주로 사용되는 볼 베어링과는 달리 선형가이드에서는 고속운전을 위하여 원통형 베어링이 사용된다. 또한, 선형 운동 방향 뿐만 아니라 이의 직각 방향으로도 매우 많은 힘이 베어링에 전달되는 특성이 있기 때문에 선형전동기에서는 상대적으로 큰 마찰력이 작용한다. 이러한 마찰력은 통상적으로 기계계제어측면에서 외란(Disturbance)으로 작용되며 특히 이송체의 속도가 영(0)이 되는 부분에서 매우 큰 비선형성을 갖게 된다. 그림 1에는 일반적으로 사용되는 마찰력에 대한 모델이 도시되어 있다. 그림에서와 같이 마찰력은 크게 쿨롱마찰

력(Coulomb Friction: F_Q)과 점착력(Viscous Friction: $F_B = f(\omega)$)으로 구성되어 있다. 쿨롱마찰력은 정지마찰력이라고도 불리우며 속도의 0을 기준으로 반대 값을 갖고 속도의 크기에는 무관한 일정한 값을 갖는다고 알려져 있다. 반면 점착력은 통상 속도의 함수로 알려져 있으며 속도에 대한 1

차 혹은 n차 함수값으로 주어진다. 문제는 이러한 마찰력이 무시할 수 없을 정도로 클 뿐만 아니라 온도 및 습기와 같은 제어계의 주위 환경에 따라 상당히 크게 변동한다는 것이다. 이로 인하여 위치 혹은 속도제어계 상에서 매우 큰 비선형적 외란이 발생하며 제어의 성능을 감소시키는 요인이다. 일반적으로 제어의 선형성을 보장하고 성능을 개선시키기 위해서 부하관측기[1]-[4]를 도입하여 제어에 응용하는 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 최소차원 부하관측기(Least Order Load Force Observer)[3][4]를 사용하여 선형전동기의 제어 성능을 크게 올릴 수 있는 방안에 대하여 기술한다. 전차원 관측기를 비롯한 다른 알고리즘에 비해 최소차원 부하관측기는 간단하면서도 강력한 기능을 발휘함에도 불구하고 실제적 응용에 관한 사항이 비교적 널리 알려지지 않았으며 실용적 적용 사례를 찾아보기 어렵다. 본 연구에서는 전차원 관측기의 구성적 특징에 대해 자세히 기술하고 그 적용 사례를 예시한다.

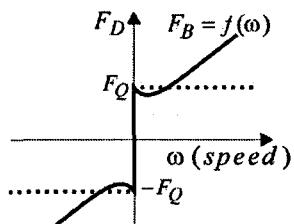


그림 1 마찰력 모델
Fig. 1 Friction Model.

[†] 교신저자, 正會員 : 인천大學 전기공학부 副教授 · 工博

E-mail : jskim@incheon.ac.kr

接受日字 : 2007年 1月 25日

最終完了 : 2007年 3月 7日

기계계의 부하(외란) 관측기를 응용할 때의 큰 문제점은

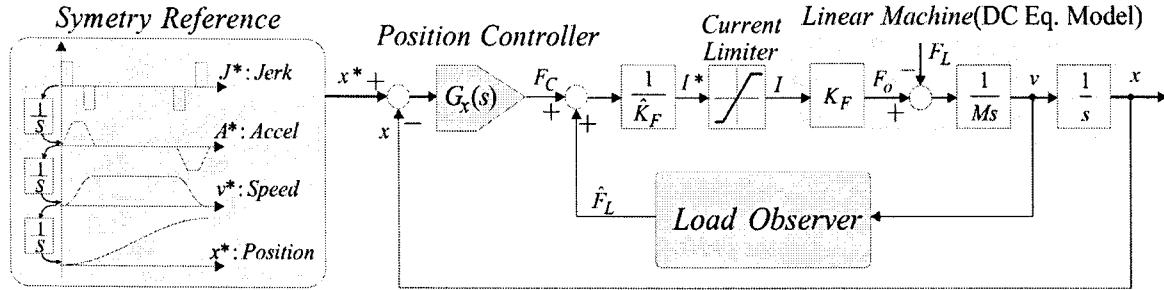


그림 2 부하관측기를 포함한 선형전동기 위치제어 시스템 개요도.

Fig. 2 Block diagram of the linear machine positioning system with the load observer.

부하관측기가 전동기의 제정수, 특히 관성에 대한 정보에 매우 민감하다는 것이다. 관성(무게)은 제어부의 이득 설정 및 이동 패턴 발생에 매우 중요한 값으로 작용하고, 부하관측기에서는 필수 불가결한 정수이며 선형전동기에서는 이동부의 무게가 관성의 역할을하게 된다. 로보틱스를 제외한 대부분의 회전형 기기 응용분야에서는 관성이 변동하는 경우가 매우 드문 일이지만, 선형 이송장치의 경우 퍼이송물의 유무 및 무게에 따라 관성이 변동하는 경우가 빈번하게 발생한다. 과거 로보틱스 분야를 중심으로 이러한 관성정보를 추정하기 위한 일련의 연구[5]~[9]가 진행되어 왔으나 대부분 매우 복잡한 연산을 필요로 하거나 동작 초기에만 활용 가능한 문제로 인하여 실시간으로 운전되는 선형제어시스템에는 실용적으로 적용하기 어려운 문제가 있다.

본 연구에서는 도입된 최소차원 부하관측기의 관성의 변동에 대한 동작 특성을 이용하여 선형전동기 제어시스템에 실시간으로 적용할 수 있는 관성 추정 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 부하를 추정하기 위하여 도입한 최소차원 부하관측기의 해석에 그 기반을 두고 있다. 최소차원 부하관측기는 1계 적분 방정식으로만 구성되므로 여타 관측기에 비하여 매우 간단하게 구성할 수 있고 실용적으로 쉽게 적용할 수 있다. 그러나, 여타 관측 시스템과 동일하게 관성(무게) 정보에 대한 의존도가 매우 크다는 문제가 있다. 본 연구에서는 관성을 잘못 알고 있는 경우에 대한 관측기의 동작 분석을 기초로 하여 관성 추정 알고리즘을 개발하였다. 부하관측기가 제어에 결합되어 있는 경우, 위치제어기의 입장에서는 외부 기계 시스템이 부하가 전혀 없이 제어기가 알고 있는 관성만을 갖는 단일 시스템으로 보이게 된다. 이를 이용하면 정상적인 위치제어가 수행되는 과정에서 가속시와 감속시의 부하관측기 동작 해석을 통하여 간단하게 이동부의 관성(무게)을 추정할 수 있다.

디지털 시뮬레이션 및 상용 선형전동기를 이용한 실험을 통하여 최소차원 부하관측기의 성능과 관성 추정 능력을 입증하였다.

2. 시스템 모델링 및 구성

그림 2에 선형전동기 위치제어 시스템의 개요도가 도시되어 있다. 공작 기계류 및 반도체 공정용 이송장치에 적용되는 모든 위치제어 시스템은 퍼이송체에 인가되는 충격을 최소화 하기 위하여 전동기의 가속도 및 속도의 제한값을 고려하여 미리 프로그램된 S-커브 형태의 위치 명령 프로파일을 사용한다. 위치 프로파일을 발생시키는 일반적인 방식은 그

림 2의 좌측에 도시된 바와 같이 가속도의 미분값에 해당하는 충격량(Jerk)을 일정하게 유지시키고 이의 연속된 적분형태로 위치 명령 패턴을 발생시키는 방법이다. 이때 가속율과 감속율을 동일하게 유지시키는 경우 패턴의 대칭 형태를 이용하여 쉽게 위치명령을 발생시킬 수 있다. 위치제어기는 비례제어기로만 구성된 위치제어 루프를 사용하여 위치-속도-전류제어기가 직렬로 연결된 구조가 일반적이지만, 이 경우 높은 동특성을 얻기가 어렵다. 본 연구에서는 고성능 선형전동기 제어 시스템을 구축하기 위하여 속도제어부를 생략하고 위치제어기 출력을 직접 전류제어부에 연결하여 사용하는 방식을 적용하였다[10]. 사용된 위치제어기는 PID형태에 상태회환 방법을 혼용하여 구성되어 있으며 위치제어 시스템의 전체 동특성이 200[rad/s]의 밴드 폭을 갖도록 이득을 설정하였다. 전류제어부 및 전동기의 전기계통은 전류제어기의 제어 동특성이 충분히 크다는 가정을 하고 그림 2에서 생략하였다. 본 시스템의 전류제어부 제어 밴드폭이 3000[rad/sec] 이므로 위의 가정을 충분히 만족한다. 부하관측기에서 관측된 부하토크는 위치제어기의 출력과 합쳐져서 전동기에 인가되는 최종 출력 토크를 형성하며 이때 전류제어기의 입력에 해당하는 전류 명령을 발생하기 위하여 힘상수(\hat{K}_F)가 사용된다. 전동기의 전류는 전동기 자체의 최대 허용전류 혹은 전력을 공급하기 위한 인버터 전력단에서 사용되는 전력용 반도체 소자의 최대 정격전류 등에 의한 허용 상한값이 존재하며 이를 그림에서 전류제한기(Current Limiter)로 모델링한다. 만일 위치명령 패턴이 적절한 최대 가속도의 제한하에서 결정된다면 전류 제한 현상이 발생하지 않는다. 이러한 가정하에 이후 논의에서는 전류제한기를 생략한다.

전동기는 DC등가 회로 및 기계 방정식을 이용하여 모델링하였다. 전동기에 입력된 전류는 실제 전동기 힘상수 K_F 에 의해 힘(N)으로 변환되며 영구자석을 사용하는 일반적인 선형전동기에서는 거의 일정한 힘상수를 갖는다. 본 연구에서는 힘상수를 정확하게 알고 있다고 가정하여 $\hat{K}_F = K_F$ 의 값을 사용한다. 이후 4장에서 이의 변동에 대한 논의를 기술한다. 그림에서 F_C 는 위치제어기의 출력을 의미하며 F_O 는 전동기에 인가되는 실제 출력, \hat{F}_L 은 부하관측기에서 관측된 부하를 의미한다. 모든 변수의 단위는 N(Newton)을 사용한다.

전동기의 기계계는 다음 방정식을 사용하여 모델링하였다.

$$F_O = M \frac{dv}{dt} + F_L \quad (1)$$

F_O 는 전동기에 인가되는 출력(힘[N])이며, M은 전동기의

전체 관성(무게[Kg]), v 는 이동부의 속도([m/s]), F_L 은 마찰력을 포함한 모든 부하([N])를 의미한다. 팔호안의 단위는 선형전동기를 MKS 단위계로 표시한 것이다. 경우에 따라 마찰력이 속도에 비례한다고 가정하고 이를 Bv 로 표시하여 수식(1)의 우측에 삽입하는 경우도 있다. 그러나, 특히 선형전동기의 경우, 부하 마찰력이 속도의 1차 함수로만 주어지지 않는 경우가 대부분이므로 본 연구에서는 부하 F_L 을 다음 수식(2)과 같이 속도에 관한 함수로 가정한다.

$$F_L = \begin{cases} +F_Q + (B_1|v| + B_2|v|^2) & \text{if } v > 0 \\ -F_Q - (B_1|v| + B_2|v|^2) & \text{if } v < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$F_Q : Coulomb Friction (F_Q > 0)$

3. 부하관측기

3.1 마찰력의 영향

전술한 바와 같이 선형전동기를 사용하는 제어시스템에서는 비선형적인 마찰력이 외란으로서 크게 작용하기 때문에 제어의 선형성을 보장하기 위해서는 이러한 외란 요소를 추정 혹은 관측하여 보정해줄 필요가 있다. 특히, 널리 알려진 바와 같이, 전동기의 속도가 0인 부근에서는 쿠롱마찰력(정지마찰력)이 속도의 방향에 따라 상당히 큰 값으로 변동하기 때문에 이를 적절히 보상하지 않을 경우 제어 성능에 크게 감소할 수 있다. 다음 그림 3에는 부하 관측기를 사용하지 않고 XY스테이지(XY Stage)에서 원의 궤적으로 운전을 시킨 경우 X축 선형전동기의 운전 상태를 실측한 파형이 도시되어 있다. 사용된 선형전동기의 제원 및 운전 조건은 실험부분에 기재되어 있다. 그림 3(c)의 파형은 선형전동기 이동부의 속도를 표시하고 있으며 속도가 0이 되는 부분에서 속도에 외곡 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 (d)는 그림 (c)의 파형 부분 중 점선 부분을 확대한 파형이다. 이와 같이 위치제어기 자체의 제어 동특성이 비교적 높은 편임에도 불구하고 마찰력 부하에 의한 제어의 왜곡 현상이 발생하며, 이 현상은 위치 혹은 속도 제어기의 구조 변경 및 이득 조절만으로 제거하기가 매우 어렵다. 이러한 문제를 비교적 쉽게 해결하는 방법이 부하 관측기를 통한 부하 궤적 제어 기법을 도입하는 것이다.

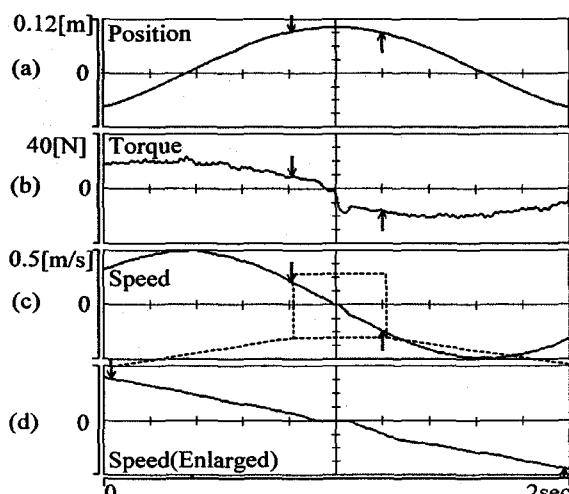


그림 3 부하관측기가 없는 경우의 선형전동기 운전 파형.
Fig. 3 Operation waveform without load observer.

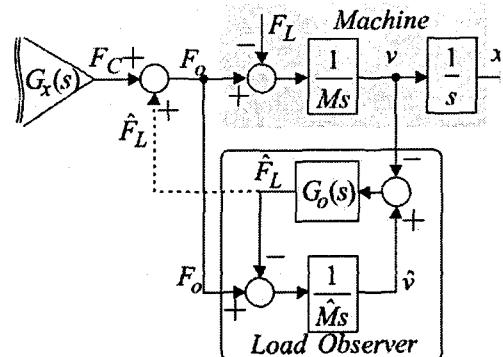


그림 4 최소차원 부하관측기

Fig. 4 The least order observer.

3.2 최소차원 부하관측기[3,4]

그림 4에는 본 연구에서 사용한 최소차원 부하 관측기의 구성도가 도시되어 있다. 관측기의 구성은 일반적인 관측기 구성을 따라 다음과 같이 구성한다[3].

$$\hat{F}_L = G_o(s)(\hat{v} - v) \begin{cases} v = \frac{1}{M_s}(F_O - F_L) \\ \hat{v} = \frac{1}{\hat{M}_s}(F_O - \hat{F}_L) \end{cases} \quad (3)$$

식(3)에서 \hat{F}_L 은 관측된 전부하(Total Load Force), \hat{v} 은 관측된 속도, \hat{M}_s 는 제어기에서 알고 있는 전동기의 관성(무게)를 의미하며, 이에 따른 관측기의 블록선도가 그림 4에 도시되어 있다. 이때, 관측기의 구성은 오차에 대한 함수 $G_o(s)$ 에 따라 약간씩 바뀌게 된다. 가장 단순한 형태는 $G_o(s) = K_O$ 의 형태로 상수값 K_O 를 사용하는 경우이며 이 때 F_L 에 대한 \hat{F}_L 의 전달 함수는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \hat{F}_L &= K_O(\hat{v} - v) \\ &= K_O \left\{ \frac{1}{\hat{M}_s}(F_O - \hat{F}_L) - \frac{1}{M_s}(F_O - F_L) \right\} \\ \therefore \hat{F}_L &= \frac{K_O}{\hat{M}_s + K_O} \left\{ (1 - \frac{\hat{M}}{M})F_O + \frac{\hat{M}}{M}F_L \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

따라서, 전동기의 관성(이동부 무게)을 정확하게 알고 있다고 가정하면 ($\hat{M} \equiv M$) 관측된 부하의 크기는 다음과 같이 실제 부하에 대한 1차 저역통과 필터의 형태로 표시된다.

$$\hat{F}_L = \frac{K_O}{\hat{M}_s + K_O} F_L \quad (5)$$

따라서, 1차저역통과 필터의 컷-오프(cut-off) 주파수에 해당하는 K_O/\hat{M} 의 값이 충분히 크다면 실시간으로 매우 정확한 부하를 관측할 수 있다.

또한, $G_o(s)$ 자체를 1차 저역통과 필터 형태로 구성하는 방법도 있으며 이 경우 다음과 같이 관측된 부하가 실제 부하의 2차 저역통과 필터 형태로 표시된다.

$$\begin{aligned} G_o(s) &\equiv \frac{\hat{M}w_n^2}{s + 2\zeta w_n} \\ \hat{F}_L &= \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \left\{ (1 - \frac{\hat{M}}{M})F_O + \frac{\hat{M}}{M}F_L \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

이때, 2차 저역통과 필터의 컷-오프 주파수는 알려진 바와 같이 $\omega_c = \omega_n \left\{ (1 - 2\zeta^2) + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2} \right\}^{1/2}$ 으로 주어진다.

실제적으로 모든 부하 관측기는 거의 대부분 필터 형태를 취하고 있으며 전차원 관측기[1]의 경우에도 위와 같이 함수 형태로 풀어 보면 다음과 같은 3차 저역통과 필터의 형태를 갖게 된다.

$$\hat{F}_L = \frac{K_3}{s^3 + K_1 s^2 + K_2 s + K_3} \left\{ \left(1 - \frac{\hat{M}}{M}\right) F_O + \frac{\hat{M}}{M} F_L \right\} \quad (7)$$

따라서 어떠한 형태의 관측기를 사용하는가에 관계없이 관측된 부하의 값이 $\left(1 - \frac{\hat{M}}{M}\right) F_O + \frac{\hat{M}}{M} F_L$ 에 대한 필터 형태로 나타나며 전동기의 관성(무게)을 정확하게 알고 있지 않은 경우 모두 동일한 형태의 오차를 수반하게 된다. 그러므로 부하를 관측하기 위하여 복잡한 전차원 관측기를 사용할 필요가 거의 없으며 최소차원 관측기로도 전차원 관측기와 동일한 성능의 부하관측이 가능하다. 본 연구에서는 모든 제어기에 손쉽게 설치하기 위하여 $G_O(s) = K_O$ 의 값을 사용하는 최소차원 관측기를 사용하였다.

3.3 관측된 부하의 계환제어

관측된 부하의 크기 \hat{F}_L 을 제어에 반영하기 위하여 그림 4에서 점선으로 표시한 부분과 같이 \hat{F}_L 을 위치제어기의 출력에 계환하도록 제어 구조를 바꾸게 되면 $F_O = F_C + \hat{F}_L$ 가 되므로 전체 제어기의 구조를 다음 그림 5와 같이 표시할 수 있다. 이 경우 제어기 출력 F_C 와 실제 부하 F_L 을 입력으로 하여 관측된 부하에 대한 전달함수를 구해보면 다음과 같이 표시된다.

$$\hat{F}_L = K_O(\hat{v} - v) \quad (8)$$

$$\hat{F}_L = K_O \left\{ \frac{1}{\hat{M}} F_C - \frac{1}{M} (F_C + \hat{F}_L + F_L) \right\}$$

$$\therefore \hat{F}_L = \frac{K_O}{Ms + K_O} \left\{ \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1 \right) F_C + F_L \right\}$$

위 식(8)은 식(4)와 약간 다른 형태를 취하는 것으로 보이지만 실제로는 $F_O = F_C + \hat{F}_L$ 를 이용하여 식(4)를 다시 전개하여 식(8)을 얻을 수 있으므로 식(4)와 식(8)은 동일한 수식이다. 위 식(8)에서 이동자 무게를 정확히 알고 있는 경

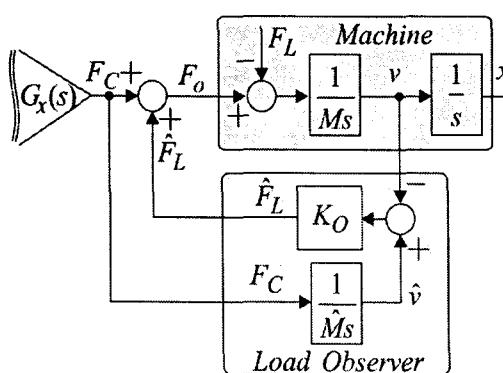


그림 5 관측된 부하의 계환 제어.

Fig. 5 Feedback control with observed load.

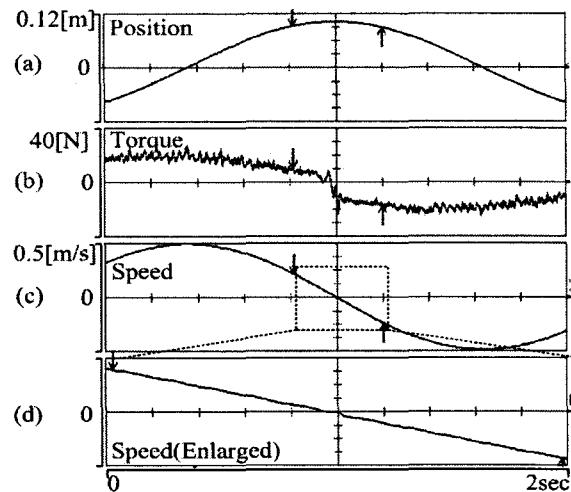


그림 6 부하관측기가 있는 경우의 선형전동기 운전 파형.
Fig. 6 Operation waveform with load observer.

우에는 실제 부하에 1차 저역 필터를 인가한 형태로 부하가 관측됨을 알 수 있으며 1차 저역필터의 컷-오프 주파수에 해당하는 K_O/M 의 값이 충분히 큰 경우에는 매우 정확한 부하관측이 가능함을 알 수 있다. 그림 6에는 위 그림 5와 같은 형태의 부하 계환 제어를 사용하여 그림 3의 실험과 동일한 동작을 시킨 경우의 파형이 도시되어 있다. K_O 의 값으로 1000을 사용하고 전동기 이동자의 무게가 2.1kg 이므로 부하관측기의 컷-오프 주파수는 대략 500[rad/s]의 값을 갖는다. 실험에서 이동자의 무게는 정확히 알고 있다고 가정하였다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 속도가 영(0.)부분에서의 외곡 현상이 부하 계환 제어를 하지 않은 그림 3의 결과에 비하여 현저하게 줄어들었음을 확인할 수 있다.

3.4 제어 시스템의 근사 모델

식(8)에서 이동자의 무게를 정확하게 알고 있지 못한 경우 1차 저역통과필터의 컷-오프 주파수를 정확히 예측하기는 매우 어렵다. 그러나, 대부분의 경우에는 이동자 무게의 대략적인 범위를 알고 있다고 가정할 수 있으므로 충분한 크기의 제어기 이득 K_O 를 설정할 수 있다. 예를 들어 현재 사용하는 전동기의 이동자 무게가 1~10kg 인 경우에 K_O 를

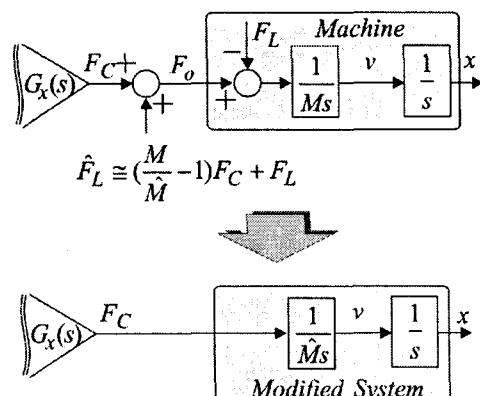


그림 7 간략화된 위치제어 시스템.

Fig. 7 Simplified Model of the machine.

1000의 값을 사용하면 필터의 컷-오프 주파수가 1000~100[rad/s]의 범위를 갖게 되며 위치제어기의 실제 동작 주파수가 수Hz 범위를 넘지 않는 경우에는 식(8)의 저역통과 필터를 생략하고 해석해도 제어 상에 큰 문제가 발생하지 않는다. 1차 저역통과필터의 컷-오프 주파수가 충분히 크다는 가정을 하면 다음과 같이 관측된 부하를 표시할 수 있다.

$$\hat{F}_L \cong \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1\right)F_C + F_L \quad \text{if } \frac{K_O}{M} \gg 1 \quad (9)$$

위 수식(9)가 성립한다고 가정하면 부하관측기에 대한 근사모델로서 식(9)를 사용할 수 있으며 이 경우 전동기의 기계 방정식을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{Ms} \{F_C + \hat{F}_L - F_L\} \\ &\Leftarrow \hat{F}_L \cong \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1\right)F_C + F_L \\ &\cong \frac{1}{Ms} \left\{F_C + \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1\right)F_C + F_L - F_L\right\} \\ &\cong \frac{1}{Ms} \left\{\frac{M}{\hat{M}} F_C\right\} \\ &\cong \frac{1}{Ms} F_C \end{aligned} \quad (10)$$

위 식(10)에서 볼 수 있는 바와 같이 관측된 부하를 계환하여 제어기를 구성하며 전동기의 속도는 일체의 외란이 배제된 형태로 오로지 위치제어기(혹은 속도제어기)의 출력 F_C 에 관한 1차 합수로 주어지는 것을 알 수 있다. 만일 위치제어기가 정확하게 동작하여 가속 및 감속이 같은 비율로 이루어진다면 가감속에 필요한 F_C 역시 크기는 같고 부호가 다른 형태로 나타남을 의미 한다. 이는 매우 중요한 의미를 갖으며 이 현상이 후에 기술되는 관성추정기의 기본 모티브가 된다. 식(10)이 반영된 간략화된 제어구조를 그림 7에 도시하였다.

물론, 실제 전동기에 인가되는 출력 F_O 는 $F_O = (M/\hat{M})F_C + F_L$ 의 형태를 갖게 되므로 전동기에 인가되는 실제 출력 자체가 바뀌는 것은 아니다. 그러나, 위치제어기만의 관점에서 본다면 외부 시스템이 실제 부하무게 M 대신 제어기가 알고 있는 부하무게 \hat{M} 을 갖는 기계 시스템으로 보이게 되므로, 알 수 없는 외란에 따른 제어의 비선형성이 완전히 사라지는 효과를 얻을 수 있다. 또한, 위치제어기(혹은 속도제어기)의 제어 이득을 설정할 때 이득을 정확히 계산하기 위해서는 필수적으로 관성(무게)에 대한 정보를 사용하게 되며, 이때에도 실제 관성에 대한 정보 대신 부하 관측기에 사용된 관성(무게)정보를 그대로 사용하여 이득을 계산하여 원하는 제어성능을 얻을 수 있다. 그러므로 부하 관측기의 출력을 제어출력에 계환하는 것만으로도 실제 관성 정보 없이 제어 시스템을 올바로 구성할 수 있다.

다만, 이 경우에도 문제가 될 수 있는 것은 실제 부하 F_L 및 실제 무게 M 에 대하여 요구되는 출력은 바뀌지 않기 때문에 제어에 필요한 실제 출력 F_O 가 어느 정도의 범위 값을 갖는지를 정확하게 예측할 수 없다는 것이다. 예를 들어 외란 부하가 전혀 없다고 가정하고 제어기가 알고 있는 이동부의 무게가 1kg이라고 했을 때 이를 1G(G: 중력가속도=9.8

m/s^2)의 가속도로 가속하는 경우에는 9.8N의 출력이 필요한 것으로 계산된다. 그러나, 이때 실제 이동부의 무게가 10kg이라면 1G의 가속도를 유지하기 위해서는 98N의 출력이 필요하게 된다. 이 경우에는 1G로 가속하는 구간에서 그 차이에 해당하는 88.2N(98-9.8)을 부하관측기가 모두 감당하는 상황이 발생하고 경우에 따라서는 인버터 전력단에서 전류 용량의 제한이 발생하여 제어가 원활하게 이루어지지 못하는 문제가 일어 날 수 있다. 반대로 실제 이동자 무게가 1kg이고 제어기에서 무게를 10kg으로 잘못 알고 있는 경우에도 10G로 가속할 수 있는 데도 불구하고 1G의 가속을만을 사용하는 제어의 비효율성 문제가 발생할 수 있다. 또한 이득을 설정할 때 이동자 무게에 대한 정보가 제어기의 대역폭에 1차적으로 비례하는 경우가 대부분이므로 이동자 무게를 실제보다 크게 알고 있는 경우에는 필요 이상으로 제어기의 이득이 커져서 제어의 안정성을 저해하는 경우도 발생할 수 있다. 따라서, 제어의 선형성 및 공정의 최적 효율을 보장하고 필요 충분한 이득을 정확하게 계산하기 위해서는 실제 이동자의 무게를 비교적 정확하게 알 필요가 있다.

3.5 최소차원 부하관측기의 구현

최소차원 관측기는 그 구조가 매우 간단하므로 실제 제어기에서 쉽게 구현할 수 있다. 그림 5에서와 같이 실제 구현시 필요한 요소는 오직 적분기 한 개와 실제 속도에 대한 정보 뿐이다. 적분기는 단순한 1차 오일러 적분방식을 사용하여도 매우 잘 동작한다. 다만 실제의 정확한 속도를 취득하는 방법상에서 문제가 있을 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션상에서는 잡음 및 검출 오차가 거의 없기 때문에 전동기의 속도를 얻는 것에 아무런 문제가 없으나, 엔코더를 사용하는 실제 구동 시스템에서는 속도를 얻기 위하여 주로 M/T방법과 같은 평균 속도의 값을 사용하게 된다. 이때 검출된 속도 정보에는 실제 속도에 대한 위상지연이 발생하게 되며, 이를 관측기에 사용할 경우 높은 동특성으로 운전되는 시스템에서는 큰 관측 오차가 발생할 수 있다. 본 연구에서 여러 가지 방식의 속도 검출 알고리즘을 비교하여 본 결과, 다음 식과 같이 엔코더로부터 얻은 위치정보를 직접 미분하여 2차 저역필터로 여과한 속도 정보를 사용하는 것이 가장 양호하다는 결론을 얻었다.

$$v(\text{속도}) = \frac{\omega_n^2 s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} x(\text{위치}) \quad (11)$$

이때 2차 저역 통과 필터의 자연감쇄주파수(ω_n)은 3000 rad/s 이상으로 가급적 크게 하고 감쇄율(ζ)은 0.3~0.4의 값을 사용하여 위상지연이 가능하면 작게 하도록 한다.

4. 관성 추정 알고리즘

4.1 관성 추정기의 문제점 및 가정

서론에서 잠깐 언급한 바와 같이 식(1)과 같이 기계계 방정식이 이동부의 무게 및 부하의 합수로 주어지는 경우에 ($F_O = M \frac{dv}{dt} + F_L$), 이동부의 무게 및 부하가 독립적인 변수로 작용한다고 가정하면 정상적인 제어가 수행되는 온-라인 과정에서 두 개의 변수를 동시에 추정하는 것이 불가능하다. 최소한 두 변수중 하나에 대한 정보를 알고 있는 경우에만

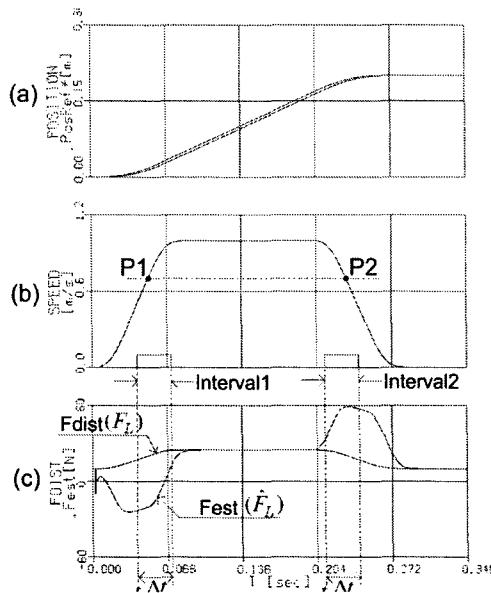


그림 8 관성추정기 동작시의 각부 파형.

(무게(관성)을 잘못 알고 있는 경우)

- (a) 위치명령 및 실제 위치, (b) 전동기 속도, (c) 부하 및 추정된 부하.

Fig. 8 Simulation waveform of the load observer.

나머지 하나를 추정 할 수 있을 뿐이다. 특히 관성을 추정하고자 하는 경우에는 나머지 하나의 변수인 부하를 매우 정확히 알고 있거나 부하의 동특성에 어느 정도의 제한을 두는 경우에만 가능하다.

본 연구에서도 여타 연구와 마찬 가지로 관성을 추정하기 위하여 부하의 동특성을 한정한 경우에 대하여 연구를 진행하였으며 부하가 식(2)와 같이 속도의 함수로만 주어진다는 가정을 하였다. 이 가정 하에서는 속도가 같은 경우에는 동일한 부하가 작용한다고 가정할 수 있다. 물론, 마찰력 부하, 특히 쿨롱마찰력의 경우 전동기 주변의 온도 및 습기 등과 같은 환경적 요인에 따라 많이 변할 수 있으나 1초 이내의 짧은 시간동안 이루어지는 관성추정 동작 상황을 감안하면 쿨롱마찰력이 추정기간 동안에 거의 일정하다고 가정할 수 있다. 또한, 공간 자속의 변형에 따른 출력(토크) 리플이 외란으로 작용할 수 있으나 본 연구에서는 특정 주기로 나타나는 리플의 값이 거의 일정하다고 가정하고 후에 설명하는 구간 적분 기법을 도입하여 동일 속도에서는 동일한 부하가 작용한다는 가정이 계속 유효하도록 알고리즘을 구성하였다.

4.2 제안된 관성 추정기

제안되는 관성 추정기는 미리 계산된 위치 궤적에 따라 이송동작을 반복하는 선형 전동기의 제어 특성을 최대한 활용하여 설계되었다. 그림 8과 같이 가감속이 대칭이 되도록 구성된 위치 패턴에 따라 위치제어기가 동작하는 경우에는 가속시와 감속시에 서로 동일한 속도 구간이 반드시 나타난다. 이때에는 위에서 기술한 바와 같이 동일한 부하가 작용한다고 가정할 수 있다. 따라서, 한번의 정상적인 이송동작 자체를 하나의 테스트 신호와 같이 사용하는 것이 가능하다.

그림 8에 1m/s의 최대 속도로 0.2m의 위치제어를 수행하는 과정이 도시되어 있다. 그림에서와 같이 가속율과 감속율

을 동일하게 설정하였으며 그림 8(b)에서와 같이 가속시의 P1점과 감속시의 P2 지점에서 같은 속도가 나타나고 이때 실제 부하는 같은 값을 갖는다고 가정할 수 있다. 이때 위치제어기 및 부하관측기가 올바로 동작하고 있다면 P1 및 P2에서의 관측된 부하는 다음 식(12),(13)과 같이 표시될 수 있다. 작은 첨자 (p1) 및 (p2)는 각 지점에서의 해당값을 의미한다. 예로써 $\hat{F}_{L(P1)}$ 은 P1점에서의 부하를 의미한다.

$$\text{at } P1, \hat{F}_{L(P1)} \cong \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1\right) F_{C(P1)} + F_{L(P1)} \quad (12)$$

$$\text{at } P2, \hat{F}_{L(P2)} \cong \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1\right) F_{C(P2)} + F_{L(P2)} \quad (13)$$

또한, 속도가 같을 경우 부하가 같다는 가정에 따라 다음이 성립한다.

$$F_{L(P1)} = F_{L(P2)} \quad (14)$$

이때, 속도의 가속율 및 감속율이 동일하게 적용되고 있다면 식(10)에 따라 다음 관계가 성립한다.

$$\text{at } P1, F_{C(P1)} = \hat{M} sv_{(P1)} \quad (15)$$

$$\text{at } P2, F_{C(P2)} = \hat{M} sv_{(P2)}$$

$$\therefore F_{C(P1)} = -F_{C(P2)}, \text{ if } sv_{(P1)} = sv_{(P2)}$$

그러므로 식(13)과 식(12)의 차이로부터 다음 수식을 얻을 수 있다.

$$(\hat{F}_{L(P2)} - \hat{F}_{L(P1)}) \cong \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1\right)(F_{C(P2)} - F_{C(P1)}) \quad (16)$$

$$\therefore \frac{\hat{M}}{M} = \frac{\hat{F}_{L(P2)} - \hat{F}_{L(P1)}}{F_{C(P2)} - F_{C(P1)}} + 1$$

따라서, 정상적인 위치제어를 수행하면서 가속시와 감속시에 속도가 같은 지점을 임의로 골라서 각 지점의 추정된 부하와 제어기 출력을 식(16)을 적용하면 매우 정확한 관성(무게)을 계산에 의해 구할 수 있다. 이와 같은 방법을 실제 위치제어 시스템에 적용하면 1회의 정상적인 이송동작이 완료되는 시점에서 외란 부하의 유무에 무관하게 매우 정확한 관성을 연산해 낼 수 있으므로 다음 이송동작에서는 이를 이용하여 적절한 이득 선정 및 효율적인 위치 궤적 생성이 가능하다. 또한 기본적인 위치 제어의 동특성에 무관하게 알고리즘이 동작하므로 모든 이송동작에 연속적으로 관성을 추정하고 이를 적용 할 수 있다.

한편, 실제 실험 상황에서는 잡음 혹은 미지의 외란 등에 의한 영향이 부하 관측기에 나타나기 때문에 식(16)만으로는 정확한 관성을 추정하기가 매우 어려울 수 있다. 후반부의 실험 결과 부분에서 확인할 수 있는 바와 같이 추정된 부하의 경우 관측기의 이득이 높은 경우에는 1차 저역통과 필터가 작용하고 있음에도 불구하고 불규칙적인 잡음성분이 매우 많이 나타난다. 이러한 잡음성분은 대부분 증가형 엔코더를 사용하여 실제 속도를 얻는 과정에서 삽입되는 잡음성분과 전동기의 공간 자속 왜곡으로 인한 출력(토크)리플 성분 등으로 추측된다. 이때 관측기 이득 K_O 를 작게 하여 부하관측기의 컷-오프 주파수를 낮추면 잡음성분을 대부분 제거할 수 있으나 이득이 너무 작을 경우 필터의 작용으로 인하여 관측된 부하의 값에 지연 효과가 크게 발생하여 원활한 관성 추정이 어렵게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 속도가 같

은 특정 구간동안 관측된 부하 및 위치제어기 출력을 적분하는 방법을 도입하였다. 그림 8(b)에 도시된 바와 같이 P1, P2 지점과 같이 한지점에서 관측된 부하를 사용하는 대신, 가속시와 감속시의 속도범위가 동일한 구간1, 구간2 동안의 적분값을 사용한다. 이때 수식은 다음과 같이 표시된다.

$$\int_{i1}^{\hat{F}_L dt} \cong \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1 \right) \int_{i1}^{F_C dt} + \int_{i1}^{F_L dt} \quad (17)$$

$$\int_{i2}^{\hat{F}_L dt} \cong \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1 \right) \int_{i2}^{F_C dt} + \int_{i2}^{F_L dt}$$

$$\int_{i1}^{F_L dt} = \int_{i2}^{F_L dt}$$

$$\therefore \frac{M}{\hat{M}} = \frac{\int_{i2}^{\hat{F}_L dt} - \int_{i1}^{\hat{F}_L dt}}{\int_{i2}^{F_C dt} - \int_{i1}^{F_C dt}} + 1$$

적분기호에서 i1, i2는 각각 구간1, 구간2를 의미한다. 식 (16)대신 식(17)을 이용하면 대부분의 백색 잡음(white noise)성분이 상쇄되는 효과를 얻을 수 있으므로 더욱 정확한 관성 추정이 가능하다.

4.3 힘상수의 변동에 대한 영향

제어기의 출력과 실제 전동기의 입력 사이에는 전동기의 전류를 매개로 전력전달이 이루어지므로 그림 2에서 볼수 있는 바와 같이 제어시스템을 구성하는 과정에서 전동기의 힘(포스)상수 K_T 를 사용하게 된다. 제어기에서 사용하는 토크상수 \hat{K}_T 와 K_T 사이에 차이가 있는 경우에는 추정된 부하가 다음과 같이 표시된다. 단 수식에서 β 는 힘상수의 비, K_T/\hat{K}_T 를 의미한다.

$$\hat{F}_L = \frac{K_O}{Ms + \beta K_O} \left\{ \left(\frac{M}{\hat{M}} - \beta \right) F_C + F_L \right\} \quad (18)$$

$$\Leftarrow \text{if } \frac{\beta K_O}{M} \gg 1$$

$$\cong \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1 \right) F_C + \frac{1}{\beta} F_L$$

따라서, 힘상수의 비 β 가 1이 아닌 경우에도 관성(무게)을 정확하게 알고 있지 않은 경우와 유사하게 관측된 부하가 왜곡되는 현상이 나타난다. 한편, 전동기 속도와 제어기 출력 사이의 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$v = \frac{1}{Ms} \{ \beta(F_C + \hat{F}_L) - F_L \} \quad (19)$$

$$\cong \frac{1}{Ms} \left\{ \beta \left(F_C + \left(\frac{M}{\hat{M}} - 1 \right) F_C + \frac{1}{\beta} F_L \right) - F_L \right\}$$

$$\cong \frac{1}{\hat{M}s} F_C$$

그러므로, 힘상수의 비가 1이 아닌 경우도 식(10)의 경우와 완전히 동일하게 전동기 실제속도가 제어기 출력에 대한 일차 함수로 나타나며 제어의 관점에서는 전혀 영향을 미치지 않는다. 그러나, 관성비가 1이 아닐 때의 문제점과 마찬가지로 출력이 제한 되거나 최적화된 제어 패턴을 구현하지 못하는 문제점이 발생할 수 있다. 또한, 식(16) 혹은 식(17)과 동일한 형태로 관성을 추정할 경우 M/\hat{M} 을 계산하는 것이 아니라 $M/(\beta\hat{M})$ 을 계산하여 부정확한 무게정보를 추정

하는 문제가 발생한다.

대부분의 선형전동기에서는 영구자석을 사용하기 있으므로 힘상수가 공장 출고 당시의 값에서 거의 변동하지 않는 것으로 알려져 있으나, 간혹 동작 온도 등에 의한 감자 현상으로 인하여 그 값이 변동되는 경우가 있을 수 있다. 본 연구에서 관성 추정의 문제를 간단히 하기 위해 힘상수를 정확히 알고 있다고 가정였으며 이의 변동에 대한 연구는 차후 과제로 남겨둔다.

5. 실험 결과 및 분석

제안된 관성추정기의 성능을 확인하기위해서 TI계열의 TMS320C3x DSP(40MHz)로 구성된 서보드라이버와 상용 선형전동기를 사용한 실험 설비를 구성하였다. 모든 제어알고리즘은 디지털화되어 있으며 PWM을 포함한 전류 제어주기는 50us로 구성되어 20kHz의 스위칭 주파수를 갖도록 설계되었으며 PI로 구성된 전류제어기는 3000rad/s의 주파수 제어폭(band width)을 갖는다. 위치명령 패턴 발생기 및 위치제어기, 부하관측기, 관성추정기를 포함한 전체 제어기의 제어 주기는 500us이며 위치제어기는 상태 케환형 PID로 구성되어 있으며 주파수 제어폭은 200rad/s로 설정하였다. 표 1에는 제어에 사용된 선형 전동기의 제원이 표시되어 있다.

그림 10에는 제어기에 실제 이동자 무게와 같은 2.1kg의 이동자 무게 정보를 사용하여 제어를 수행한 경우에 대한 제어상의 주요 파형이 도시되어 있다. 위치 명령의 궤적은 대칭 프로파일 생성 방법에 의해 충격량(jerk)을 1500. m/s^3 , 최대 가속도를 $9.8m/s^2$, 최대 속도 $1.m/s$ 의 조건 하에서 0.2m 이송 동작 지령을 주었다. 최소차원 관측기의 이득 K_O 는 1000.을 사용하였다. 그림 10(b)에는 위치제어기의 출력이 도시되어 있다. 이동자 무게가 2.1kg이므로 $9.8 m/s^2$ 의 가속도를 발생시키기 위해 약 20N($=9.8 \times 2.1$)의 출

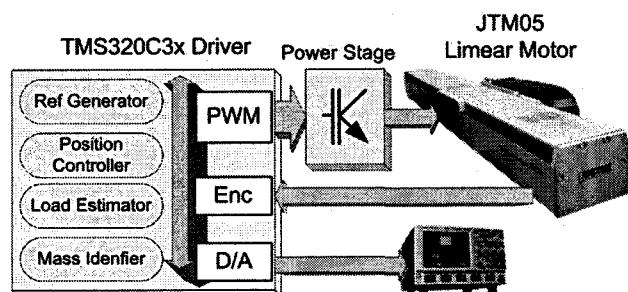


그림 9 실험 장비 구성

Fig. 9 Experimental system configuration.

표 1 선형전동기의 제원

Table 1 Parameter of the linear machine.

파라메터	값	의미
R_S	2.7 Ω	Stator R. (DC eq.)
L_m	0.7 mH	Stator L. (DC eq.)
K_T	12 N/A	Force Const. (DC eq.)
M	2.1 kg	Total Mover Mass
v_{max}	3.0 m	최대속도
Scaler	1 um	Linear Scaler resolution

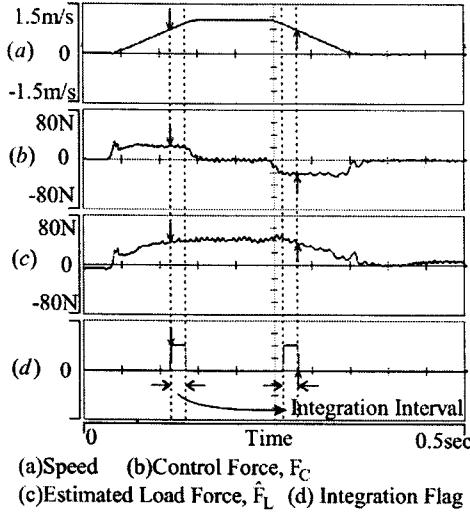
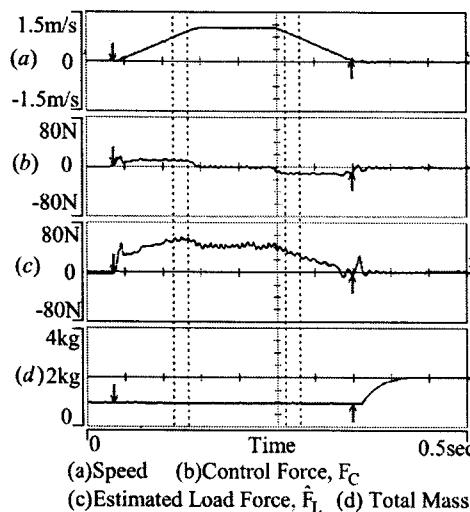


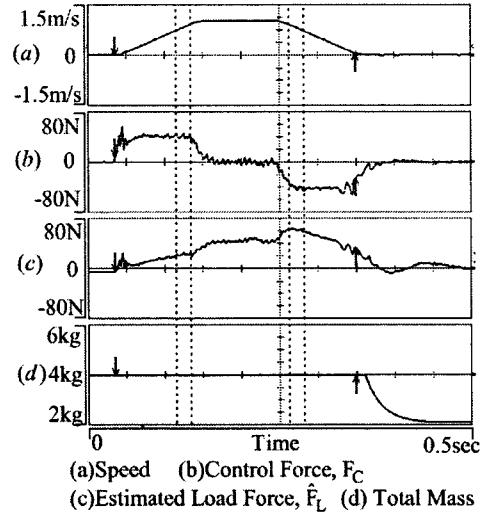
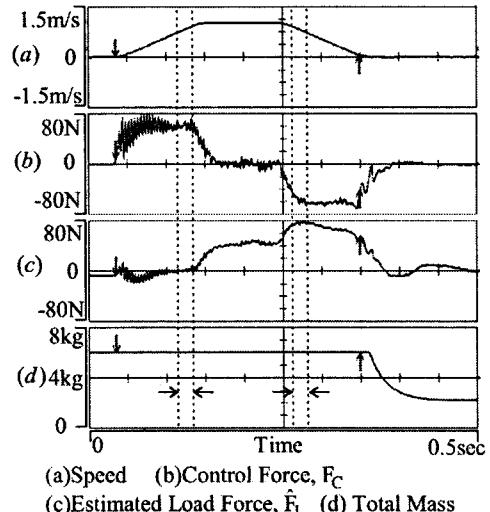
그림 10 부하관측기 동작 특성.

Fig. 10 Waveform or the load observer.

그림 11 $\hat{M}=1\text{kg}$ 인 경우의 관성추정 특성.Fig. 11 Experimental waveform at $\hat{M}=1\text{kg}$.

력이 나오고 있음을 볼수 있으며 그림 10(c)에 도시된 관측된 부하와 합쳐져서 실제 전동기의 힘(토크)으로 작용하고, 그림 10(a)와 같이 속도가 $9.8m/s^2$ 의 가속도로 가속되고 있음을 볼 수 있다. 그림 10(d)에는 관성(무게) 추정을 위한 적분구간임을 표시하는 플래그를 도시하였다. 적분 구간을 정하는 방법은 여러 가지 있을 수 있으나 영(0)속도 부근에서의 비선형적 마찰 부하특성을 피하기 위해 가능하면 높은 속도 구간에서 적분하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 0.7m/s 이상의 속도구간에서 적분을 하였다. 그림에서 수직 점선은 적분 구간을 표시하기위해 과형에 설명을 붙이는 과정에서 의도적으로 기입된 것이다.

그림 11에는 이동부의 무게를 1kg 으로 잘못 알고 있는 경우에 대한 관성 추정 결과가 도시되어 있다. 동작 조건은 부하 무게에 대한 정보를 제외하고 모두 그림 10의 경우와 동일하다. 그림 11(b)에서 $9.8m/s^2$ 의 가속도를 맞추기 위해 위치제어기의 출력이 거의 $9.8\text{N}(=1\times 9.8)$ 으로 유지되고 있음

그림 12 $\hat{M}=4\text{kg}$ 인 경우의 관성추정 특성.Fig. 12 Experimental waveform at $\hat{M}=4\text{kg}$.그림 13 $\hat{M}=6\text{kg}$ 인 경우의 관성추정 특성.Fig. 13 Experimental waveform at $\hat{M}=6\text{kg}$.

을 볼 수 있으며 실제 가속에 필요한 힘은 부하관측기에서 제공하고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 전동기에 인가되는 최종 출력은 그림 10의 경우와 거의 동일한 형태를 갖게 된다. 그림 11(d)에는 추정된 관성이 도시되어 있다. 관성에 대한 실제 계산은 1회 이송동작이 끝난 후에 곧바로 이루어지지만 관성정보를 스텝 형태로 바꿀 경우 이 정보를 사용하는 위치제어기에 이득이 급격하게 바뀌게 되어 제어가 불안정해지는 경향이 있다. 이러한 현상을 제거하기 위하여 추정된 관성 정보를 바로 제어에 반영하지 않고 약 7Hz 의 대역폭을 갖는 1차 저역통과 필터를 거쳐서 점진적으로 제어에 사용하도록 구성하였다. 이에 따라, 제어에 사용되는 관성이 그림 11(d)와 같이 변하게 되며 실제 최종 관성으로 추정된 값은 2.07kg 이다. 약 1.5% 의 오차가 발생하지만 제어에 큰 지장이 없을 정도로 매우 정확한 값을 추정하고 있음을 알 수 있다.

그림 12에는 $\hat{M}=4\text{kg}$ 인 경우에 대한 실험 과형이 도시되

어 있다. 이때에는 실제 관성이 2.15kg 으로 추정되었으며 정상값과의 오차가 2.5%에 불과하다. 그림 13에는 $\hat{M}=6\text{kg}$ 인 경우에 대한 실험 과형이 도시되어 있다. 이 경우에도 추정된 무게가 2.3kg 으로 매우 양호한 값을 얻을 수 있다. 그러나 $\hat{M}=6\text{kg}$ 을 사용하여 정상값의 3배에 해당하는 관성 정보를 사용하기 때문에 실제적인 제어기의 제어 밴드폭이 정상값인 200rad/s 보다 3배 큰 600rad/s 의 값을 갖게 된다. 이 경우에는 제어 이득이 필요 이상으로 매우 크게 작용하기 때문에 제어기 출력 F_C 가 다른 과형에 비해 매우 심하게 흔들리는 것을 볼 수 있다. 그림 7과 같이 간략화된 모델이 적용되면 이론적으로는 실제값보다 수십배 큰 무게 정보를 사용하여도 제어에 아무런 영향이 없어야 한다. 그러나, 실제로는 제어기의 이득이 필요 이상으로 크게 될 경우 그림 13에서와 같이 제어 자체가 불안정하게 되는 경우가 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 외란 추정에 있어서 연산 효율이 매우 좋고 간단하게 구현할 수 있는 최소차원 부하 관측기의 실제적인 응용에 대하여 기술하였으며 이를 이용한 관성추정 알고리즘을 제시하였다. 외란 관측기를 제어에 폐환하면 제어 모델 자체가 주어진 무게(관성)로 구성된 1차 시스템으로 간략화됨을 보였고, 무게정보를 정확하게 알고 있지 못한 경우에도 동일한 정보를 사용하는 위치(혹은 속도)제어기의 작용으로 인하여 전체 제어 시스템이 원하는 동특성을 갖게 되어 매우 쉽게 제어기를 구성할 수 있음을 보였다. 또한 효율적인 위치 제어계 구성을 위하여 외란 관측기를 이용한 관성 추정 알고리즘을 제시하였으며 실제 실험 결과를 통하여 알고리즘의 우수성을 입증하였다. 선형 전동기를 기준으로 제어 시스템의 모델링 및 제어 알고리즘을 구성하였으나 단일 관성을 갖는 모든 형태의 전동기에도 제시된 알고리즘을 쉽게 적용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 인천대학교 공모과제의 지원을 받아 연구되어진 것임을 알려드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Robert D.Lorenz, "High-Resolution Velocity Estimation for All-Digital AC Servo Drives", IEEE Trans.IA, vol.27, no.4, Aug. 1991
- [2] C.T.Johnson And R.D.Lorenz, "Experimental Identification of Friction and Its Compensation in

Precise, Position Controlled Mechanisms", IEEE TRAN. ON I.A., VOL. 28, NO. 6, 1992

- [3] T.Yamada, M.Mori, Y.Yoshida and M.Date,"A Method for Improving Speed Control Characteristics At Very Low Speed Region by The Least Order Disturbance Observer"(in Japanese), IEEJ-D Vol 114 No. 4, 1994
- [4] K.Kubo, M.Watanabe, F.Kozawa, and K.Kawasaki,"Disturbance Torque Compensated Speed Observer For Digital Servo Drives", IECON'90, pp.1182-1187, 1990
- [5] B.Friedland and Y.J Park, "On Adaptive Friction Compensation", IEEE Trans on Automatic Control, Vol 37, No.10 pp 1609-1612, 1992
- [6] S.J.Hong, H.W.Kim, and S.K.Sul,"A novel inertia identification method for speed control of electric machine",IEEE IECON,pp.1234-1239,1994
- [7] K.B. LEE,J.H. SONG,I. choy, and J.Y.Yoo,"An inertia identification using ROELO for low speed control of electrix machine,IEEE APEC,pp.1502-1055, 2003
- [8] S.J.Kim, S.Y.Kim, And I.J. Ha,"An Efficient Identification Method for Friction in Single-DOF Motion Control Systems", IEEE TRAN. ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 12, NO. 4, JULY, 2004
- [9] K.B. Lee, J.Y. Yoo, J.H. Song and I.Choy, "Improvement of low speed operation of electric machine with an inertia identification using ROELO" IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 151, No. 1, January 2004
- [10] 김준석, "이득 설계가 간단한 선형전동기 구동용 고성능 통합 PID 위치제어기 구현" Tran. KIEE Vol.51B, No.4 Apr. 2002

저 자 소 개



김 준 석 (金峻奭)

1995년 8월 서울대학교 공과대학 박사학위 수료
1996년 9월 인천대학교 교원 임용
관심분야 : 전력전자, 산업용 인버터 구성 및 응용, 전동시스템.