

컴플라이언스 에뮬레이터 시스템의 구현 및 제어

신영균*, 박찬원*, 김희국**

*강원대학교 전기공학과 **고려대학교 제어계측공학과

Implementation and Control of Compliance Emulator System

Young-Kyun Shin*, Chan-Won Park*, Whee-Kuk Kim**

*Kangwon National University **Korea University

Abstracts - This paper presents a new concept to implement and to control of tactile reproduction simulator by implementation of compliance emulator system. Compliance emulator system is a kind of levitation system using magnetic force. In the compliance emulator system, a floated plate moves vertically. When an external force is applied to the plate, the system produces a controlled reaction force by using 6 electromagnet. For the control, a LVDT displacement sensor and PD control method is used.

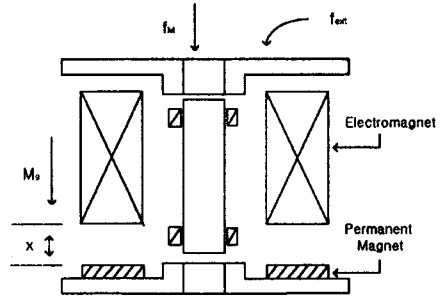


그림1. 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템

1. 서론

물체의 촉감을 가상적으로 재현시킬 수 있는 시뮬레이터 시스템의 개발은 인간의 촉각에 관한 감성 실험을 대체, 제품의 설계 및 개발시간을 단축시킴으로써 고부가가치의 감성을 고려한 제품을 생산할 수 있다. 그러나, 현재 기술로서 전기적, 화학적, 기계적 성질등과 같은 다양한 물체의 촉감과 관련된 특성을 동시에 재현하는 것은 많은 어려움이 있으며 심도 깊은 연구가 선행되어야 할 것이다. 그러므로, 본 연구에서는 특히, 기계적 성질중의 하나인 콤플라이언스 특성을 재현할 수 있는 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템을 제시하고 이를 구현하였다. 제시된 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템은 영구자석과 전자석의 반발, 흡입력을 사용하는 구조로 되어 있으며 마찰력의 최소화화를 위하여 부공 시스템의 형상을 갖도록 설계되었다. 위치센서로는 LVDT 센서를 사용하였고 영구자석과 전자석의 비선형력을 측정하여 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템을 제어하는 데 활용하였다. 본 논문에서는 이러한 구현된 시스템의 설계, 구동원리, 입출력 인터페이스 및 구동소프트웨어, 제어 그리고 시스템의 작동실험 및 콤플라이언스 특성의 재현성에 관한 결과를 제시하였다.

2. 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템 모델링

그림1은 본 연구에서 제안한 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 개략도이다. 영구자석과 전자석 사이에서 발생하는 자력은

$$f_M \approx f_M(x, i) \tag{1}$$

와 같이 전류와 변위의 근사화된 함수로 가정한다. 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 유동판에 관한 동역학식은 다음과 같이 표현된다.

$$M\ddot{x} + b\dot{x} = f_{ext} + f_M(x, i) + Mg \tag{2}$$

위 식에서 M 은 영구자석과 유동판의 질량, b 는 유동판과 고정판 사이에 있는 슬리브 베어링의 점성 마찰계수, f_{ext} 는 유동판에 가해진 외력, f_M 는 코일이 감겨진 철심에서 발생하는 자석력, 그리고 Mg 는 영구자석과 유동판의 중량을 나타낸다. 이밖에 stiction등이나 비선형 마찰력등이 존재하지만 이들은 모두 외란으로 처리하여 식(2)에 포함하지 않았다. 만일, 식(2)에서 가해진 외력이 없다고 한다면 정상상태(steady state, 즉, $f_{ext}=0$, 이고 $\dot{x} = \ddot{x} = 0$ 의 equilibrium 상태)에서 요구되는 전자력은 다음과 같다.

$$f_{Me}(x_e, i_e) = -Mg \tag{3}$$

식(3)을 통해 F_{Me} 는 x_e 와 i_e 의 함수임을 알 수 있다. 식(2)를 정상상태에 대해 Taylor's series로 전개한 후, 이를 선형화하면 식(4)와 같이 되며

$$f_{ext} + f_{Me}(x, i) + Mg + k_M \Delta x + k_i \Delta i \approx 0 \tag{4}$$

결국, 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$f_{ext} \approx -k_M \Delta x - k_i \Delta i \tag{5}$$

식(5)에서 $k_M = \frac{\partial f_M}{\partial x} |_{x_e, i_e}$, $k_i = \frac{\partial f_M}{\partial i} |_{x_e, i_e}$ 로 정의되며 이 값들은 실험을 통해 구할 수 있다. 특히, k_M 은 전자석 또는 영구자석으로부터 형성되는 스프링 계수를 의미한다. 또한 $\Delta i (= i - i_e)$ 는 전자석으로의 추가 입력 전류, $\Delta x (= x - x_e)$ 는 평형위치로부터의 변위를 나타낸다. 한편, C_d (또는 $\frac{1}{k_d}$)는 유동판에서의 원하는 콤플라이언스(desired compliance), f_{ext} 는 유동판에 가해진

힘, 그리고 Δx_d 는 f_{ext} 로 인하여 유발되는 평형위치 x_e 로부터의 변위를 나타낸다고 할 때, 유동판이 원하는 콤파라이언스를 갖기 위해서는 다음의 관계식을 만족하여야 한다.

$$f_{ext} = \frac{\Delta x_d}{C_d} \quad (6)$$

그러므로, 코일에 가해지는 입력전류로서 다음과 같이 결정되는 입력전류를 사용한다고 하자.

$$\Delta i = -k_p \Delta x - k_v \dot{\Delta x} \quad (7)$$

여기서 k_p 와 k_v 는 PD제어의 계수를 의미한다. 이 식을 식(4)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$M\ddot{x} + b\dot{x} \approx f_{ext} - k_M \Delta x - k_i(k_p \Delta x + k_v \dot{\Delta x}) \quad (8)$$

정상상태에서의 변위 Δx_{ss} (ss: steady state)는

$$\Delta x_{ss} = \frac{f_{ext}}{k_M + k_i k_p} \quad (9)$$

의 값을 갖는다. 식(6)과 식(9)로부터 식(7)에서의 위치 이득 k_p 는

$$k_p = \frac{k_d - k_M}{k_i} \quad (10)$$

으로 결정되며 이 값에 의해 원하는 강성이 재현된다. 마찬가지로, 식(7)에서의 k_v 값을 적절하게 선정함으로써 유동판의 damping ratio를 조절할 수 있다. 실제 시스템의 경우, 유동부 상판의 변위 Δx 는 위치센서(LVDT sensor)를 이용하여 측정될 수 있으며 Δx 는 사용된 위치센서로부터 측정된 위치신호를 수치적으로 미분하여 사용할 수 있다.

3. 실험

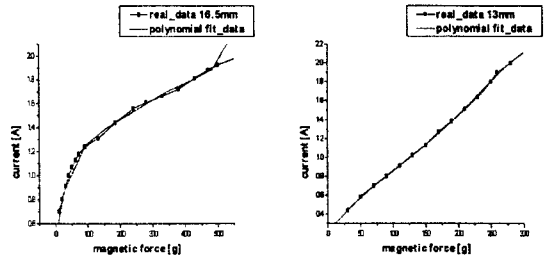
3.1 비선형 자력 데이터 측정 실험

비선형적인 전자력의 효과적인 측정과 이를 시스템에 적용할 수 있는 제어 알고리즘의 필요성에 따라 변위 x 를 고정시킨 상태에서 콤파라이언스 에뮬레이터 시스템의 인가전류를 증가시켜, 이에 따라 발생하는 전자력의 변화를 시스템 하단에 설치한 전자저울에 의해 하중의 변화값으로 측정하는 다수의 반복된 실험을 하였다. 이때 임의의 x 값은 유동부의 상판이 갖는 최대 오프셋폭(16.5mm)내에서 6개의 레벨 (단위:mm)로 설정하였다.

- 16.5, 14, 13, 12, 11, 10 의 레벨로 설정
- 16.5mm일 때(전자력이 최대) 측정용시작
- 10mm일 때(전자력이 최소) 까지 측정

3.2 보간(Interpolation)실험

실험3.1에서 구한 데이터를 통해 가장 근사화된 다항식(Approximated Polynomial)을 구하였다. 변위 레벨에 따라 모두 6개의 다항식을 얻었으며, 이를 통해 각 레벨 사이의 변위값에 해당하는 전류와 전자력을 구할 수 있다. 그림2에서는 다수의 반복을 거친후 평균치를 구한 실제 실험데이터와 비교하였다. 비교적 전자력이 선형적으로 나타나는 13mm의 경우 두 개의 그래프가 거의 일치하나 16.5mm경우는 다소 오차가 발생되는 것을 볼 수 있다.



(a) $x = 16.5mm$ 일 때 (b) $x = 13mm$ 일 때

그림2. 실험데이터와 근사화된 데이터 비교

4. 구동 프로그램

그림3은 선행된 두 실험과 모델링의 결과, 그리고 PD제어 알고리즘에 근거하여 작성한 프로그램의 개략적 흐름도이다. 프로그램의 시작과 끝부분에서 인가되는 전압에 사인함수를 곱하여 인가전류가 지수적으로 증가, 감소하

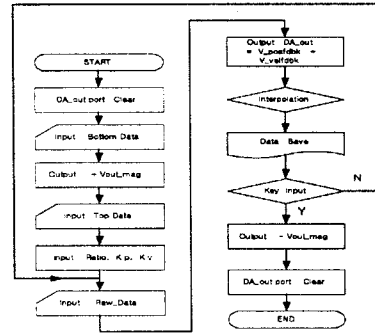


그림3. 구동 프로그램 흐름도

게 하였으며 LVDT센서로 x 변위 측정시 21개의 데이터를 입력받아, 그중 11번째 데이터를 선택하는 루틴을 적용함으로써 White Noise성의 노이즈를 상당부분 제거할 수 있었다. 또한, 프로그램 중간에 ratio, K_p , K_v 값의 입력과 x 변위의 피드백을 통해 정상상태를 유지시켜주는 루틴을 적용하였다.

5. 하드웨어 구현 및 동작원리

그림4는 본 연구에서 구현한 하드웨어의 개략적 구성도이다. 구동 프로그램상에서 인가된 전압은 PCL-816

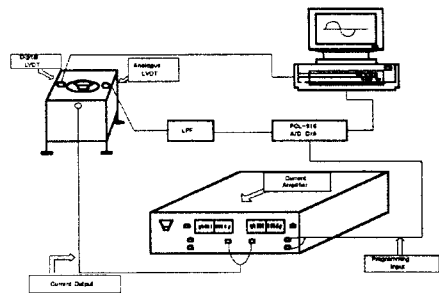


그림4. 실험장치 개략도

DAQcard를 거쳐 Current Amplifier에서 6개의 전자석에 동일한 크기의 전류를 공급한다. 이로 인해 유동부상판의 위치가 조절되고 LVDT센서로 위치변화를 측정, LPF를 거쳐 PC에 피드백되는 PD제어를 통해 원하는 평형위치를 유지함으로써 콤플라이언스를 재현하는 페루프 구조를 갖는다.

6. 콤플라이언스 구현결과 및 분석

구현된 콤플라이언스의 결과를 그림5에 나타내었다.

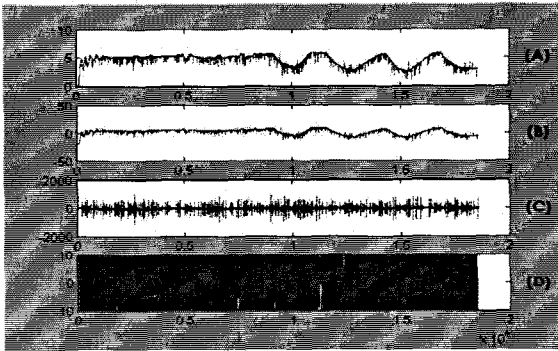


그림5a. 노이즈가 많은 경우
(예 : $K_p=5, K_v=500$ 입력)

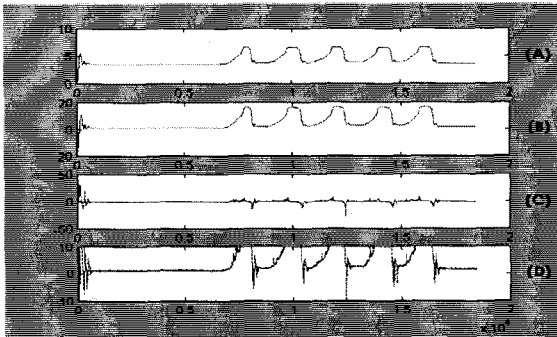


그림5b. $K_p = 5, K_v = 300$ 의 경우

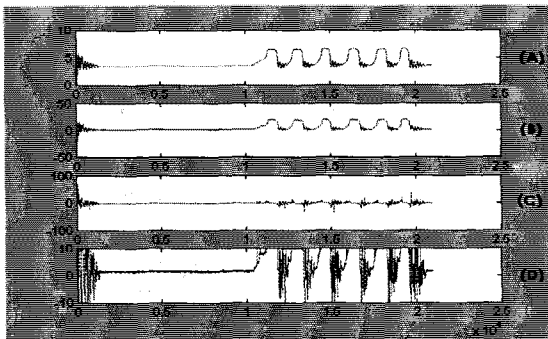


그림5c. $K_p = 6, K_v = 300$ 의 경우

그림5. 콤플라이언스 구현결과

⇒ (A)변위 (B)위치성분 (C)속도성분
(D)steady state force 또는 reaction force

그림5a는 변위 x 의 측정시 21개의 데이터를 받아 그중

11번째의 값을 채택하는 루틴을 취하지 않고, ratio를 선형성이 비교적 좋지않은 0.8정도로 입력했을때의 플롯인데 노이즈가 무척 심한 것을 알 수 있다. 그림5b는 ratio를 가장 선형성이 좋은 0.5정도로 입력하고 11번째의 변위 x 값을 채택하는 루틴을 적용함으로써 적절한 콤플라이언스가 구현됨을 확인할 수 있다. 그림5c는 스프링 역할을 하는 K_p 값이 damper 역할을 하는 K_v 값에 비해 상대적으로 커서 그림5b에 비해 오버슈트가 크고 초기에 진동이 다소 발생함을 알 수 있다.

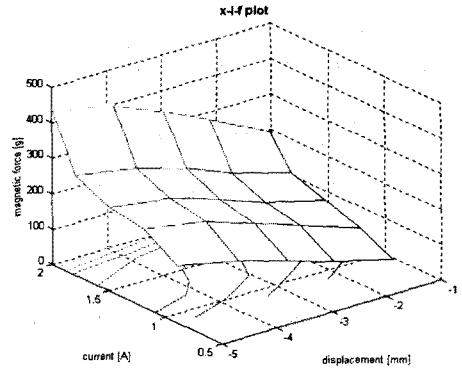


그림6. $x-i-f$ 3차원 플롯

그림6은 선행되었던 과정들을 통해 구한 콤플라이언스의 중요한 3가지 파라미터인 변위, 전류, 전자력을 3차원으로 구성한 것이다. 플롯내에서 2가지의 파라미터로 구성되는 임의의 평면을 잡으면 나머지 하나가 결정됨을 알 수 있다.

7. 결론

기존의 방식과는 전혀 다른 새로운 개념의 콤플라이언스 특성을 구현할 수 있는 시스템을 제안, 설계하였으며 관련된 인터페이스와 구동 소프트웨어를 작성하였다. 이러한 실제 시스템의 구현을 통해 촉각 제시 시뮬레이터의 구현에 필요한 핵심적인 방안을 제시, 확인하였다.

상대적으로 제한된 폭의 콤플라이언스를 구현하였으나 시스템의 성능개선을 통해 궁극적인 목적인 실제 산업분야에 적용, 감성을 고려한 고부가가치의 제품설계 및 생산이 가능하리라 판단된다.

(참고문헌)

- [1] Takashi Onuki, et. al, "Calculation of electromagnetic forces in magnetic levitation system by 3-D magnetic field analysis," Electromagnetic Forces and Applications(T. Tani and T. Takagi (eds.)), Elsevier Science Publishers B. V., 1992.
- [2] Robert J. Stone, "Advanced human-system interfaces for telerobotics using virtual reality and telepresence technologies," ICAR'91, pp. 168-173, 1991.
- [3] 김희국의 2인, "촉각 측정 및 질감 제시 시뮬레이터의 개발에 관한 연구," 한국표준과학원 '96 특정연구개발사업 위탁 연구보고서, 1996.
- [4] R. Andrew Russel, "Robot Tactile Sensing", published by Prentice Hall, 1990.