

컴플라이언스 에뮬레이터 시스템의 개발

Development of Compliance Emulator System

박 찬 원* 신 영 균**
Park, Chan-Won Shin, Young-kyun

Abstract

If the tactile sense is introduced to engineering and industries, it may provide more realistic virtual tactile sensing to human and it is possible to develop product that satisfy various consumer's taste. This paper presents a compliance emulator system as a new concept of tactile reproduction simulator which uses magnetic levitation in order to minimize friction and emulates compliance only along the vertical direction. Compliance is one of the important mechanical properties of the object related to tactile sensing of the human. The implemented system equipped with an analog LVDT sensor for a position sensor and employs a PD control with gravity compensation to emulate the specified compliance. To compensate the limited range of the system, the method of attaching the spring with various magnitude of stiffness to the system is adopted and its preliminary test is performed to confirm the validity of the method.

Keywords : compliance, tactile reproduction simulator, magnetic levitation

1. 서 론

인간의 감성은 시각, 미각, 청각, 촉각, 후각으로 구성되는 오감과 관련이 있으며 이중에서 특히 촉각에 대한 측정이나 이를 객관화하는 방법은 매우 어려운 문제로 알려져 있고, 관련기술 역시 초보단계에 있다.

만일, 촉각감성을 객관적으로 측정할 수 있는 기술의 개발과 이를 가상적으로 재현시킬 수 있는 시뮬레이터의 개발이 성공적으로 이루어진다면 인간의 촉각에 의한 감성실험을 대체할 수 있으며 제품의 설계 및 개발시간을 단축시킬 수 있어 여러 산업분야에 다양한 소비자의 취향을 충족시킬 수 있는 고부가가치 제품의 생산이 가능해진다.

촉감에 관계된 대부분의 연구는 인간의 촉감매카

니즘을 규명하거나 이를 개발하는 것이 주류를 이루고 있다[1-6]. 최근에는 촉감 시뮬레이터 그리고 평가시스템의 개발에 관한 연구가 새로이 진행되고 있다[7].

물체의 촉감과 관련하여 기계적, 기하학적, 전기적, 열관련등의 다양한 성질들이 존재하는 것으로 알려져 있다.[8] 특히, 표면생성, 경도, 플라이언스, 레질리언스, 콤플라이언스, 마찰등은 인간의 촉감과 직접적으로 관련된 기계적 성질들을 나타낸다. 플라이언스는 일정한 크기의 외력을 물체에 가한 후 시간이 지남에 따라 지속적으로 변형이 발생하는 정도를 나타낸다. 레질리언스는 물체에 외력을 가하여 변형을 일으킨 후, 가해진 외력을 제거한 후 물체가 원래의 형상을 회복하는 정도를 나타낸다. 콤플라이언스는 물체에 외력이 가해졌을 때 얼마나 변형이 발생하는가에 대한 정도를 나타낸다: $C = \Delta x / f$, 여기서 C , Δx , 그리고 f 는 각각 물체의 콤플라이언스, 변형길이, 가해진 외력을 나타낸다.

특히, 콤플라이언스는 인간의 촉감에 관계된 매우 중요한 기계적 성질로서 물체의 콤플라이언스가 효

* 강원대학교 전기공학과 교수

** 강원대학교 대학원 전기공학과 석사

과적으로 재현되는 경우 사람에게 보다 현실적인 물체의 가상촉감을 제공할 수 있을 것이다. 그러나, 다른 기계적 성질들과 마찬가지로 가상물체의 다양한 크기의 콤플라이언스 특성을 재현하는 것은 쉽지 않다. 더구나, 사람의 손가락 끝부분에 가해진 힘을 감지할 수 있는 문턱값은 대략 0.5 - 10g 정도이므로 이러한 감지범위를 감안한 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템이 구현되어야 한다. 그러나, 현재까지, 이러한 분야에 관한 연구는 활발하지 않다.

로봇분야에서는 로봇과 물체의 직접적인 접촉을 수반하는 작업을 수행하는 방안으로서 다양한 강성 제어기법이 제안되었다.[9] 그러나, 이러한 강성 제어기법의 주요한 목적중의 하나는 로봇과 물체와의 접촉으로 발생하는 접촉력을 감소시키는 것으로서 본 연구에서 구현하려는 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템과는 다르다.

본 논문은 다음과 같이 구성하였다. 먼저, 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 설계와 영구자석과 전자석사이의 자력 모델링에 관하여 기술하고, 시스템의 하드웨어에 관하여 기술한다. 또한, 시스템의 자력에 대한 측정을 통하여 선형화된 자력 모델의 타당성을 확인한 후, 시스템의 성능실험에 관한 제반사항을 기술한다. 그리고 시스템의 향후 개선사항과 함께 결론을 맺는다.

2. 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 설계

콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 목적은 사람이 물체와 접촉시 느끼는 임의의 콤플라이언스 특성을 재현할 수 있도록 가능한 넓은 범위의 콤플라이언스 특성을 재현하는 것이다. 따라서 시스템의 설계시 유동부의 관성과 마찰효과를 최소화하여 우수한 콤플라이언스 재현 특성을 현실감 있게 재현하는 것이 중요하다.

또한, 시스템 설계시 고려해야 할 주요사항은 첫째, 최대 진동 주파수와 진동폭의 크기를 극대화시키며 둘째, 마찰을 최소화 하는 것이다. 이 두가지 사항들은 시스템의 동적특성과 관련이 있다.

구동방식으로 공압식이나 전기식 액츄에이터 시스템이 고려될 수 있다. 공압시스템은 콤플라이언스가 공압의 함수로 표현되므로 공압을 제어함으로써 콤플라이언스를 조절할 수 있다. 그러나, 공압 실린더 내에 존재하는 큰 정지마찰력으로 인해 실제 원하는 제품의 정확한 콤플라이언스를 재현하기 어렵다. 이에 반해 부공을 이용하는 전기식의 경우 마찰을 무

시할 수 있으므로, 본 연구에서는 이러한 자력 부공을 이용한 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템을 구현하였다.

Fig. 1은 구현된 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 개략도이다. 그림에서와 같이 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템은 크게 유동부와 고정부의 두 부분으로 나뉘어진다. 고정부는, 원형의 기저판에 코일이 감긴 여섯 개의 스폴코어가 방사방향으로 60°씩의 간격을 가지도록 대칭으로 고정되어 있다. 유동부는

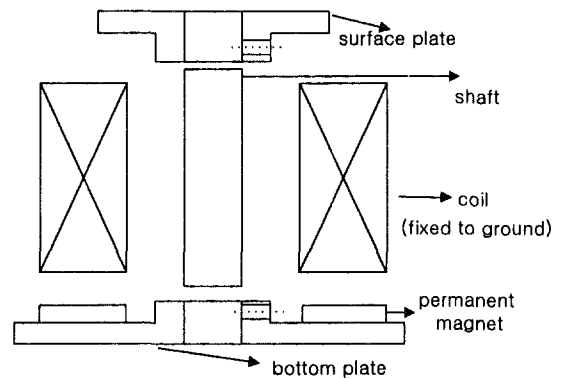


Fig. 1. Schematics of Compliance Emulator System

사람이 접촉하는 표면판, 여섯 개의 영구자석이 고정되어 있는 기저판, 그리고 이들 두 판을 연결하는 축으로 구성되어 있으며 여섯 개의 영구자석은 각각 기저판에 고정된 전자석 코어와 마주보도록 정렬되어 있다. 유동부의 운동을 수직방향으로 구속하고 유동축과의 마찰을 축소하기 위해 두 개의 마찰이 없는 탄소 슬리브 베어링을 사용하였으며, 영구자석을 제외한 유동부의 모든 부분은 자화방지를 위해 위하여 비자성물질인 알루미늄으로 만들어졌다.

시스템의 유동부는 기저판에 고정된 여섯 개의 전자석에 각각 동일한 크기의 전류를 가함으로써 발생하는 자력에 의해 제어되는데, 시스템의 설계시 유동부의 관성과 마찰력의 최소화, 제한된 콤플라이언스 재현특성을 확장하기 위한 스프링의 장착위치 등이 고려되었다. 위치 센서로는 위치변위를 측정하여 피드백신호를 제공하기 위해 아날로그 LVDT 센서를 사용하였으며 시스템의 제어 알고리즘으로서는 PD 제어 방식을 적용하였다.

3. 영구자석과 전자석사이의 전자력 모델링

영구자석과 전자석사이의 간섭이 무시할 수 있다는 가정하에 Fig. 2에 보인 공간극사이에 임의의 위치에서의 자력은 다음과 같이 모델링된다.[10,11]

$$F_m = \beta \left(\frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x + L_p)^2} \right) I \quad (1)$$

여기서 β 는

$$\beta = \frac{\mu\pi B_p a_e^2 a_p^2 n L_e}{8\mu_0 \sqrt{L_e^2 + a_e^2}} \quad (2)$$

와 같이 표현되며 시스템의 형상에 의존하는 고정설계인자를 나타낸다. 그리고 μ_0 와 μ 는 각각 진공과 공기의 투자율(permeability)을 나타낸다. a_e 와 L_e 는 각각 전자석 코일의 반경과 길이를 그리고 a_p 와 B_p 는 영구자석의 반경과 영구자석의 표면자석밀도를 나타낸다. 단위길이당 코일의 권수를 나타내는 n 은 다음과 같이 얻어지는데 여기서 N 은 코일의 권수를 나타낸다.

$$n = \frac{N}{L_e} \quad (3)$$

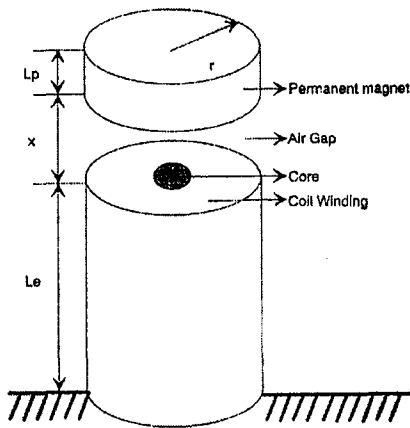


Fig. 2. System of Permanent and Electric magnets

대부분의 전자석이나 영구자석을 활용하는 실제 시스템의 경우, 영구자석과 전자석의 형상과 재질이 균일하지 않으며 코일이 코아에 감기게 되어 코일의

반경이 변화하기 때문에 정확한 설계인자를 구하는 것이 어려우며 이상적인 시스템의 관계식을 바로 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 정확한 자력을 구하기 위해서는 유한요소법(FEM)이나 경계요소법(BEM)과 같은 컴퓨터를 이용한 수치적인 방법이 활용되어야 한다.[11]. 이러한 관점에서 실시간 작업이 요구되는 실제 시스템의 해석에 있어 식 (1)의 적용은 적합하지 않다.

식 (1)로부터 영구자석과 전자석사이의 자력은 코일에 가해진 전류와 두 자석간의 거리의 함수로 표현됨을 알 수 있으며 다음과 같이 간략하게 표기될 수 있다:

$$f_M = f_M(x, i) \quad (4)$$

그리고 영구자석과 마주보고 있는 전자석의 끝 단면의 위치를 기준점으로 설정할 때(즉, $x=0$), 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 동역학식은 다음과 같이 표현된다:

$$M\ddot{x} + b\dot{x} = f_{ext} + f_M(x, i) + Mg \quad (5)$$

여기서 M 과 Mg 는 각각 유동부의 질량과 중량을 나타낸다. 그리고 b , f_{ext} , 그리고 f_M 는 유동부와 고정부 사이에 있는 슬리브 베어링의 점성마찰계수, 유동부에 가해진 외력, 영구자석과 전자석 사이의 자력을 나타낸다. 이밖에 stiction 이나 비선형 마찰력 등이 존재하지만 이들은 모두 외란으로 처리하여 포함하지 않았다. 만일, 유동부에 가해진 외력이 없다고 한다면 평형상태에서 요구되는 전자력의 크기는 다음과 같이 표현된다.

$$f_{Me}(x_e, i_e) = -Mg \quad (6)$$

여기서 아래첨자 “ e ”는 평형위치를 나타낸다.

식 (6)을 통하여 자력 f_{Me} 는 x_e 와 i_e 의 함수임을 알 수 있다. 식 (5)를 평형상태에 대하여 테일러 시리즈로 전개하면 식 (7)이 되며 (HOT = high-order term) 이를 선형화 하면

$$M\dot{x} + b\dot{x} = f_{ext} + f_{Me}(x, i) + Mg + k_M \Delta x + k_i \Delta i + HOT \quad (7)$$

$$f_{ext} + f_{Me}(x, i) + Mg + k_M \Delta x + k_i \Delta i \approx 0 \quad (8)$$

식 (8)과 같이 되며 결국 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$f_{ext} \approx -k_M \Delta x - k_i \Delta i \quad (9)$$

한편, 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 경우 유동부의 운동이 매우 적은 변위로 제한되기 때문에 작업점을 중심으로 식 (1)의 선형모델이 사용될 수 있다. 또한, 평형점(x_e, i_e)을 중심으로한 식 (5)의 선형식에서 자력은 위치와 전류의 함수이므로, 아래와 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$M \ddot{\Delta x} + b \dot{\Delta x} \approx f_{ext} - k_M \Delta x - k_i \Delta i \quad (10)$$

여기서

$$\Delta x = x - x_e \quad (11)$$

$$\Delta i = i - i_e \quad (12)$$

$$k_M = \left. \frac{\partial f_M}{\partial x} \right|_{x_e, i_e} \quad (13)$$

$$k_i = \left. \frac{\partial f_M}{\partial i} \right|_{x_e, i_e} \quad (14)$$

그리고 Δi 와 Δx 는 평형상태에서 추가로 요구되는 전류와 변형위치를 나타낸다. 이러한 시스템의 평형 작용점은 식 (10)의 선형식의 오차가 최소화되도록 선정되어야 한다. 그리고 k_M 과 k_i 는 각각 위치변위에 대한 자력의 편미분을 나타내며 이들 두 값은 시스템으로부터 바로 측정될 수 있는 인자들 값이다. 특히, k_M 은 영구자석과 전자력사이에 발생하는 강성을 의미한다.

요구되는 콤플라이언스의 크기를 C_d 라하고 유동부의 표면에 가해진 외력을 f_{ext} , 그리고 주어진 콤플라이언스에 상응하는 위치변위를 Δx_d 라 하자. 이때, 유동부의 표면판이 주어진 콤플라이언스를 재현하기 위해서는 다음의 관계식을 만족해야 한다.

$$f_{ext} = \frac{\Delta x_d}{C_d} \quad (15)$$

편의상, 다음부터는 콤플라이언스 대신 콤플라이언스의 역수로 정의되는 강성으로 표기한다($k_d = \frac{1}{C_d}$).

다음의 PD제어입력전류가 전자석 코일에 가해졌다고 하자,

$$\Delta i = -k_v \dot{\Delta x} - k_p \Delta x \quad (16)$$

식 (16)을 식 (10)에 대입하면

$$M \ddot{\Delta x} + (b + k_i k_v) \dot{\Delta x} + (k_M + k_i k_p) \Delta x = f_{ext} \quad (17)$$

정상상태에서 $\Delta \dot{x} \rightarrow 0$, 그리고 $\Delta \ddot{x} \rightarrow 0$ 이므로, 정상상태의 변위 Δx_{ss} 는 아래와 같이 얻어진다.

$$\Delta x_{ss} = \frac{f_{ext}}{k_M + k_i k_p} \quad (18)$$

식 (16)에 있어서 위치게인 k_p 는 다음과 같이 결정될 때,

$$k_p = \frac{k_d - k_M}{k_i} \quad (19)$$

재현하고자 하는 강성은 식 (15)에 다음의 관계식 ($\Delta x_{ss} = \Delta x_d$)을 대입함으로써

$$k_d = k_M + k_i k_p \quad (20)$$

와 같이 얻어진다. 식 (16)에 있어 속도게인(k_v)의 값은 재현하고자 하는 콤플라이언스 이외의 효과가 사람에게 느껴지지 않도록 하면서 시스템의 안정도를 증가시키기 위한 댐핑 효과를 나타내도록 가능한 최소한의 크기의 값으로 적절하게 선정될 수 있다. 또한 실제 시스템의 경우, 유동판의 변위 Δx 는 위치센서(LVDT sensor)를 이용하여 측정될 수 있으며 Δx 는 사용된 위치센서로부터 측정된 위치신호를 수치적으로 미분하여 사용할 수 있다.

4. 하드웨어 구현 및 동작원리

Fig. 3은 구현된 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 실제사진이며, Fig. 4는 전체 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 인터페이스 개략도이다. 이 시스템은 PC 586에 Advantech사의 각각 16비트의 분해능을 가지는, 두 개의 D/A 채널과 한 개의 A/D 채널이 내장된 PCL-816 DAQ 카드가 설치되어 있다. PC의 구동 프로그램 상에서 DAQ 카드의 D/A 채널

을 통하여 출력되는 제어 신호는 Kepco사의 바이폴라 전류증폭기에 의해 증폭된다.

증폭된 전류는 여섯 개의 코일이 감긴 스펀에 각각 동일한 크기로 인가되며, 프로그램 상에서 입력된 각 파라미터 값들과의 상호작용으로 유동부 표면판의 위치를 지면에 대하여 수직으로 조절, 평형위치 x_e 를 유지함으로써 임의의 콤플라이언스를 구현한다. 한편, 유동부의 상판을 손으로 눌러 외력 f_{ext} 를 가했을 때에는 위치변위 Δx 의 변화가 LVDT센서로 측정되고, 이 신호가 LPF를 거쳐 PC로 피드백되는 PD 제어기법을 통해 원하는 평형위치 x_e 를 유지시켜 줄 수 있도록 출력을 내보내 줌으로써 지속적으로 일정한 콤플라이언스를 구현시켜주는 폐루프 구조를 갖는다.

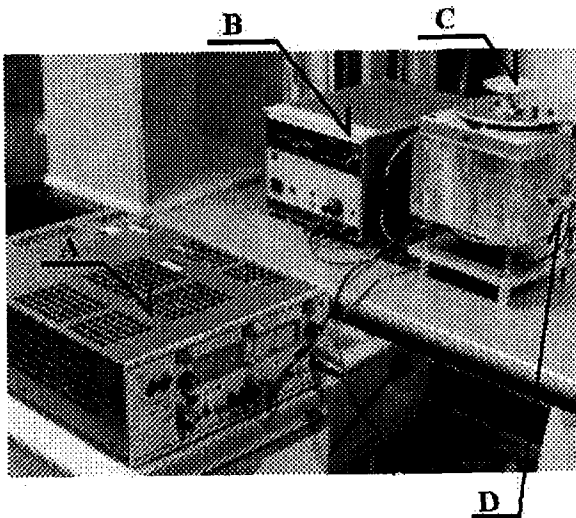


Fig. 3. Compliance emulator system
 A : current amplifier, B : voltage source,
 C : surface plate, D : LVDT sensor

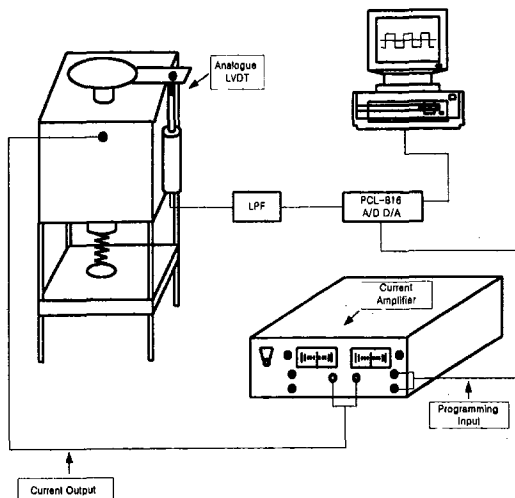


Fig. 4. Interface schematics of Compliance Emulator System

사용된 바이폴라 전류증폭기의 대역폭은 15KHz이며 최대전압출력이 100volt, 최대전류출력이 2 amp.이다. 여섯 개의 스펀에 감긴 코일은 모두 직렬로 연결되었으며 이들 전체의 시상수는 $50\mu\text{sec}$ 로 측정되었다. 유동부의 위치 (Δx)는 Schlumberger사 제품인 아날로그 LVDT센서에 의해 측정되며 속도는 이 위치센서의 값을 미분함으로써 추정되었다. LVDT센서의 최대행정거리는 10.9mm이며 입력전압이 15 volts가 인가되었을 때, 출력신호의 변환계수는 0.8483 mm/V 였다. 한편, 재현하고자 하는 콤플라이언스의 크기를 보완할 필요가 있을 때를 위하여 스프링을 유동부의 기저판과 기저부사이에 장착하였다.

5. 비선형 전자력의 측정

앞서 고찰해 본 모델링을 통한 시스템의 해석에서 영구자석과 전자석 사이에서 발생하는 전자력을 선형화 하여 근사화시켜 해석할 수 있음을 확인하였다. 이에따라, 영구자석과 전자석사이의 공극 내에서 비선형적으로 발생하는 전자력을 보다 효과적으로 측정하여 시스템에 적용시키기 위하여 6자유도 힘/토크 센서(JR)가 이용되었다. 사용된 힘센서의 최대 데이터 출력 속도는 8 KHz이다. 내부에 여섯 개의 필터가 직렬로 설치되어 있는데 이들 필터를 통과할 때마다 속도가 1/4로 늦어지므로 작업여건에 따라 센서의 출력을 선정할 수 있다. 힘 센서는 시스템에 의해 발휘되는 자력을 측정하기 위해 유동부의 기저판과 지면사이에 설치되었다. 유동부를 다양한 위치에 각각 고정시키고 그 위치에서의 자력을 측정하였다.

구현된 시스템으로부터 전류가 코일에 가해질 때 유동부에서 다소의 회전토크와 벤딩 모멘트가 발생되었는데, 이는 영구자석이나 코일이 감긴 스펀 코어 등의 비균일성, 그리고 이들이 정확하게 정렬되지 않았거나, 코일의 감긴 형상의 비균일성등으로 인한 것으로 추정된다. 이러한 모든 영향은 유동부와 고정부사이의 마찰을 증가시키는 효과를 나타내었다. Fig. 5는 가해진 입력전류와 위치 변위, 위치에 대해 측정된 자력의 3차원 그림을 나타낸다. 특히, 전류가 0.6 amp.보다 적은 부분이 포함되지 않았는데 이는 정지 마찰로 인하여 정확한 자력의 측정이 어려웠기 때문이다.

Fig. 5로부터 자력이 위치 변위와 인가전류에 대해

여 거의 선형에 가까운 특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있으며, 이를 통하여 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 작용점을 가능한 큰 자력을 나타내는 위치로 선정할 수 있다. 그러나, 작용점이 영구자석과 전자석이 가깝게 놓이는 위치로 선정되는 경우 유동부가 고정부에 부딪치게 되므로 영구자석과 전자석간의 거리(작용점의 위치)는 4 mm로 선정하였으며 선정된 작용점에서의 유동부의 중력상쇄를 위한 전류는 대략 0.4 amp. 였다. 그리고 이점에서의 k_M 와 k_f 의 값은 각각 135.72kg/m와 131.31kg/m으로 측정되었다.

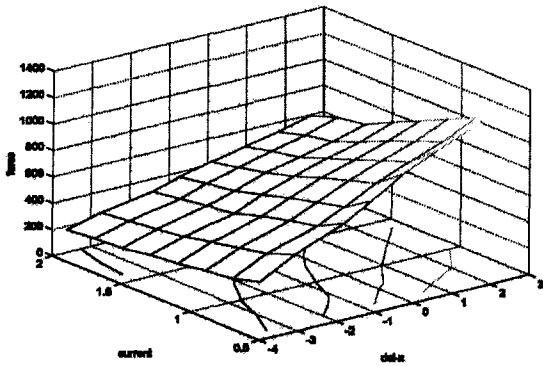


그림 5. 3 dimensional plot of magnetic force

6. 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 성능

콤플라이언스 에뮬레이터 시스템의 성능은 재현된 콤플라이언스의 정확도와 재현할 수 있는 콤플라이언스 범위로 평가될 수 있다. 시스템에 사용된 아날로그 LVDT센서는 심각한 출력잡음을 갖고 있는 것이 확인되었으며, 생성된 자력의 비선형 특성은 재현된 콤플라이언스의 정확도를 저하시켰다. 시스템의 내외관과 동적특성은 시스템의 안정성을 저하시킴으로서 시스템의 콤플라이언스 재현 범위를 제한하였다. 특히, 유동부의 관성은 시스템의 대역폭을 감소시키므로 높은 강성을 효과적으로 재현할 수 없게 하였다. 따라서, 위치센서의 잡음제거, 영구자석과 전자석간의 비선형 특성보완, 그리고 제한된 콤플라이언스 재현범위의 확장방안은 구현된 시스템의 성능에 관계된 주요한 고려사항들로 간주되었으며 이에 관하여 기술한다.

위치센서의 잡음제거 : 시스템에 사용될 수 있는 위치센서로 레이저 센서, 디지털 LVDT센서, 엔코

더 센서등을 고려하였으나 디지털 LVDT 센서의 경우 가격 면에서 뿐 만 아니라 데이터의 출력속도가 200에서 250Hz정도로 적합하지 않았다. 또한, 다른 센서들의 경우도 가격이 매우 높을 뿐 아니라, 데이터의 출력속도들이 대략 1-2KHz정도로 제한되는 단점이 있었다. 그러나, 아날로그형 LVDT센서의 경우는 이론적으로 무한대의 분해능을 가지며, 가격이 매우 저렴하므로 본 시스템에 사용되었다. 그러나, 센서 자체의 출력신호에서 9.09KHz의 주파수를 갖는 잡음이 발견되었는데 이들의 크기는 대략 ±1.0 volt이며 Fig. 6과 같은 파형을 가지고 있었다.

센서의 출력 잡음을 제거하기 위하여 여러 가지의 방법을 활용해 보았으나, 그 중 다음과 같은 방법에서 그 효과를 보았다. 먼저, 센서의 출력신호를 A/D 컨버터 앞에 설치한 LPF(저대역필터)를 통과하게 하고, 아날로그 센서에서 출력되는 잡음의 주기와 A/D 컨버터의 샘플링 레이트를 고려하여 센서의 출력데이터 21개를 100KHz의 입력속도를 가지는 A/D 컨버터를 통하여 받아들인 후, 입력된 데이터를 크기대로 정렬한다. 정렬된 데이터 중 11번째 즉, 정 가운데 데이터를 유효 입력 데이터로 인식한다. 이러한 유효 데이터의 입력속도는 대략 100/21 KHz보다 조금 낮은 속도를 가진다. 기존의 상용센서의 샘플링 레이트가 대략 1KHz에서 2KHz임을 감안할 때, 매우 빠른 샘플링 레이트를 갖고 있음을 알 수 있다.

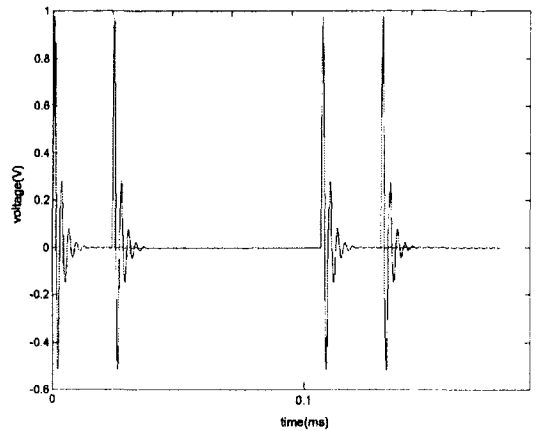
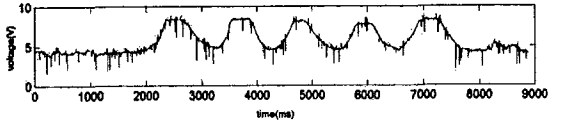


Fig. 6. Raw output signal from an analog LVDT sensor.

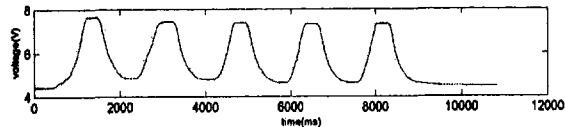
Fig. 7a)는 출력 잡음을 제거하기 위한 과정을 거치지 않은 상태에서 A/D 컨버터를 통하여 입력되는 센서의 출력을 보여주고 있다. Fig. 7b)는 앞에서 언

급된 과정을 거쳐 입력된 유효데이터를 보여주고 있다. 이들 두 그림으로부터 센서의 잡음이 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있다.

한편, 식 (16)에서 필요한 궤환 속도 데이터는 이러한 유효 데이터를 이용하여 아래와 같이 구해졌다.



a)



b)

Fig. 7 a) Raw data from the LVDT sensor

b) Filtered data from LVDT sensor

$$\dot{x}_k = 0.4 \dot{x}_{k-1} + 0.6 (u_k - u_{k-1}) \quad (21)$$

여기서 u_k 는 현재의 유효 위치 데이터를 나타낸다. Fig. 8은 유효입력데이터와 식 (21)로부터 얻어진 속도 데이터를 보여주고 있는데 미세한 센서잡음으로 인하여 유동부의 속도를 정확히 추정하지는 못한 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 이러한 속도궤환을 통한 댐핑의 효과는 시스템의 안정성을 증가시키는데 다소 긍정적인 효과를 나타낸다는 점을 실험을 통하여 확인하였다. 그러므로, 시스템의 성능향상을 위해서는 보다 개선된 정확한 속도 추정 알고리즘이 적용되어야 할 것이다.

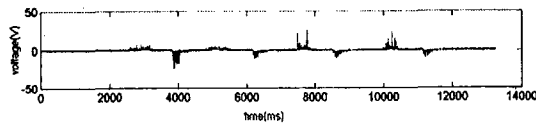
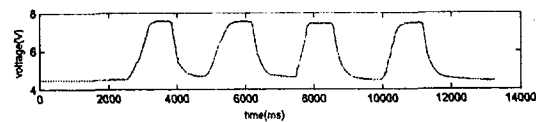


Fig. 8. Estimated velocity data from LVDT sensor

제한된 콤플라이언스의 재현 범위 확장 : 시스템의 실험결과 제어이득이 $K_p = 11, K_v = 700$ 보다 크거

나 $K_p = 1.5, K_v = 20$ 보다 작은 경우에는 불안정한 특성이 나타났으며, 특히 이 상태에서 외력이 가해졌을 때는 이러한 특성이 두드러졌다. Fig. 9는 시스템의 이러한 제한된 콤플라이언스 재현특성 결과를 보여주고 있는데 시스템이 제시할 수 있는 콤플라이언스의 범위가 두 선에 의해 포함된 영역으로 제한되어 있는 것을 보여준다.

이러한 제한된 강성크기의 재현범위를 확장하기 위해 스프링을 부착하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 시스템의 콤플라이언스 재현범위에 맞추어 적절한 크기의 간격의 강성을 가지는 스프링이 준비된 것을 가정한다. 일단, 재현하고자 하는 콤플라이언스의 크기가 설정되면 준비된 스프링 중에서 이에 가장 근접한 강성을 가지는 스프링을 선정하여 시스템에 장착한 후, 원하는 콤플라이언스를 재현시키는 방법이다.

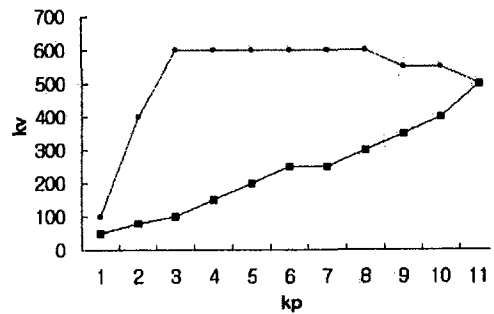


Fig. 9. Limited range of emulated compliance

설치된 스프링은 콤플라이언스 에뮬레이터 시스템에 의해 발생하는 자력 스프링과 병렬로 연결된 구조를 갖고 있기 때문에 전체 시스템의 유효강성 (k_{eff})은 다음과 같이 표현된다:

$$k_{eff} = \frac{k_s k_d}{k_s + k_d} \quad (22)$$

그러므로, 원래의 콤플라이언스 시스템에 의해 제시할 수 있는 콤플라이언스의 범위가 결정되면 식(22)로부터 스프링이 장착된 시스템의 콤플라이언스의 크기를 구할 수 있다. 실제로, 스프링이 추가되는 경우, 시스템의 동역학식은 다음과 같이 수정된다:

$$M \ddot{\Delta x} + (b + k_v k_v) \dot{\Delta x} + k_{eff} \Delta x = f_{ext} \quad (23)$$

영구자석과 전자석간의 비선형 자력특성 보완 : 앞에서 구한 위치정보와 속도정보를 가지고 식 (18)에 적용하여 콤프라이언스를 재현하는 실험을 수행하였다. 재현된 콤프라이언스를 측정하기 위하여 유동부의 표면판 위에 힘 센서를 고정 부착하였을 때 구현된 시스템의 자력이 유동부와 힘센서의 중량을 지탱하지 못하였다. 그러므로, 이를 보완하기 위해 강성 (k_s)을 가지는 스프링을 유동부의 기저판과 지면사이에 설치하였다. 시스템의 실제 작동시, 힘센서는 제거될 것이며 이 경우 설치된 스프링도 필요에 따라 쉽게 제거될 수 있다.

그리고 이 경우, 전체 시스템에 가해진 힘과 변위 그리고 유효강성사이의 관계식은 다음과 같으며

$$k_{eff} = \frac{f_{ext}}{\Delta x} \quad (24)$$

식 (24)와 식 (22)로부터 시스템에 의해 실제로 재현된 강성은 다음과 같이 얻어진다.

$$k_d = \frac{f_{ext} k_s}{k_s \Delta x - f_{ext}} \quad (25)$$

역으로, 식 (16)에 사용된 위치 제어 이득 k_p 의 값은 식 (19)로부터 구해질 수 있다.

Fig. 10은 식 (16)에서의 제어이득이 ($k_p=4, k_v=250$)일 때, 각각 위치변위, 가해진 힘, 그리고 재현된 시스템의 유효강성을 나타낸다. 재현된 유효강성이 위치변위에 상관없이 거의 동일한 크기를 갖는다는 사실을 보여주기 위해서 점차 증가된 힘을 가하여 발생한 변위, 힘, 그리고 유효 강성에 대한 결과를 보여주고 있다. 유효강성을 나타내는

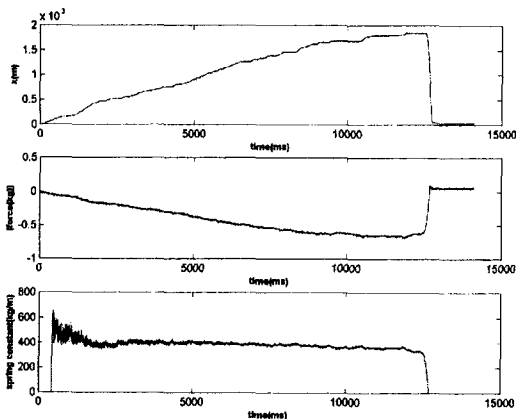


Fig. 10. Position, applied force and emulated compliance.

그래프를 보면 이동변위가 적을수록 재현된 강성효과가 크며, 변위가 클수록 재현된 강성효과가 감소됨을 확인할 수 있다. 또한, 영구자석과 전자석간의 거리가 멀수록 생성된 강성이 미세하지만 다소 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 자력의 비선형성과 부정확한 중력상쇄로 인한 것으로 추론된다. 보다 정확한 콤프라이언스의 재현을 위해서는 정확한 중력보완은 물론, 자력의 비선형성 효과를 보완할 수 있는 제어규칙이 시스템에 적용되어야 할 것이다. 현재 이에 적합한 제어 알고리즘에 관한 연구가 수행되고 있다.

7. 결론

물체의 콤프라이언스 특성의 재현을 통해 가상의 촉감을 재현할 수 있는, 자력부공을 이용한 콤프라이언스 시스템을 구현을 통하여 촉감 제시 시뮬레이터의 구현에 필요한 핵심적인 방안을 제시, 확인하였다.

아날로그 LVDT 위치센서로부터 속도데이터를 추정하였으며, 시스템의 안정성을 저하시키는 위치센서의 출력잡음을 효과적으로 제거할 수 있는 방안이 제시되었다. 이들 위치 및 추정된 속도 신호를 PD제어기에 피드백 신호로 이용하여 다양한 크기의 콤프라이언스를 재현하는 실험을 수행하였다.

재현된 콤프라이언스의 크기가 위치변위에 따라 영향을 받으며, 재현범위가 다소 제한됨을 확인할 수 있었는데, 이는 유동부의 정지 마찰력, 관성 및 부정확한 속도 추정 데이터 및 중력상쇄, 그리고 자력의 비선형성으로 인한 것으로 추정되었다. 시스템의 콤프라이언스 재현범위를 확장하기 위한 방안으로 다양한 크기의 강성을 가지는 스프링을 시스템에 장착하는 방안을 제시하고 이에 관한 실험을 통하여 유효성을 확인하였다.

시스템의 성능을 향상시키기 위하여서는 유동부의 관성과 마찰을 줄이고, 정확한 속도추정 알고리즘의 적용, 그리고 자력의 비선형성을 고려한 보완 알고리즘이 요구되며 이들을 고려한 개선된 콤프라이언스 시스템의 개발에 관한 연구가 진행되고 있다.

참고문헌

[1] R.S. Fearing and J.M. Hollerbach, "Basic Solid

- Mechanics for Tactile Sensing," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No.3, Fall 1985, pp. 40-54.
- [2] R.D. Howe and M.R. Cutkosky, "Sensing Skin Acceleration for Slip and Texture Perception," *IEEE Conf. of robotics and automation*, 1989, pp. 145-150.
- [3] B.L.Gray and R.S. Fearing, "A Surface Micromachined Microtactile Sensor Array," *proceedings of the 1996 IEEE int'l conf on robotics and automation*, April 1996, pp. 1-6.
- [4] R.D.Howe and M.R. Cutkosky, "Dynamic Tactile Sensing: Perception of Fine Surface Features with Stress Rate Sensing," *IEEE Trans. on robotics and automation*, Vol. 9, No. 2, 1993, pp. 140-151.
- [5] M.A. Srinivason and K. Dandekar, "An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two-Dimensional Models of the Primate Fingertip," *Trans. of the ASME Journal of Biomechanical Engineering*, Vol 118, Feb. 1996, pp. 48-55.
- [6] R.S. Fearing, "Tactile Sensing Mechanisms," *The international Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 3, June 1990, pp. 3-23.
- [7] 김철중, "감성공학 기술 개발," *감성공학기술*, 한국표준과학연구원, pp. 22-30.
- [8] R. Andrew Russel, *Robot Tactile Sensing*, published by Prentice Hall, 1990.
- [9] J.K. Salisbury, "Active Stiffness control of a Manipulator in Cartesian Coordinates," *19th IEEE conf. on Decision and Control*, 1980.
- [10] 안인석외5인, "자석의 반발력을 이용한 원격조종용 촉각궤환장치," *Journal of cont. auto. and sys. eng.*, vol.3,no.1, 1997, pp. 67-76.
- [11] Takashi Onuki, et. al, "Calculation of elelctro-magnetic 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.