

# 능동 임피던스의 구현에 기초한 운동 발생기의 개발

이 세 한\*, 송 재 복\*\*, 김 용 일\*\*\*

## Development of Motion Generator Based on Implementation of Active Impedance

Se-Han Lee\*, Jae-Bok Song\*\*, Yong-Yil Kim\*\*\*

### ABSTRACT

In this research a 2-dimensional motion generator composed of two linear motors was developed. The inertia, damping and/or stiffness characteristics of the motion generator can be changed on the real-time basis by properly regulating the force generated by the linear motors. That is, active impedance is implemented without actual change in the physical structure of the motion generator. Control of the motor force is carried out by controlling the input currents supplied to the linear motors based on the combination of the PI controller and feedforward controller. This motion generator can be used to measure a kinesthetic sense associated with the human arm and thus to develop the products for which the kinesthetic sense is taken into account.

**Key Words** : Motion Generator (운동 발생기), Active Impedance(능동 임피던스), Linear Motor(리니어 모터)

### 1. 서론

오늘날 생활 수준이 향상됨에 따라 기능만이 아니라 사용자의 감성이 강조된 제품들이 주목을 받게 되었다.<sup>(1)</sup> 즉, 사용자가 제품을 사용하는 데 있어서 제품의 성능뿐만 아니라 작동감까지도 중요하게 고려하게 되었다. 따라서 최근에는 제품의 설계 및 개발 단계에서부터 이러한 작동감을 반영할 수 있도록 많은 노력을 하고 있다.

본 연구는 주로 팔의 운동과 관련되는 작동감, 즉 팔의 운동감을 대상으로 하여, 이러한 운동감의 정량화 및 구

현에 필요한 운동 발생기를 개발하는 것을 목적으로 한다. 대부분의 기계 시스템에서의 운동은 관성, 감쇠 및 질량로 구성되는 기계적 임피던스와 밀접한 관계가 있으므로, 운동감 측정에 사용되는 운동 발생기는 이러한 임피던스를 변화시켜 가면서 운전자가 느끼는 운동감을 측정하거나 운전자에게 원하는 운동감을 경험하도록 하여야 한다. 그러나 물리적으로 임피던스를 변화시키는 것은 매우 번거롭고, 비용이 많이 들며, 또한 실시간으로 변화시키는 것이 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서 개발한 운동 발생기에서는 리니어 모터의 제어를 통해서 모터에

\* 고려대학교 대학원 기계공학과  
 \*\* 고려대학교 기계공학과  
 \*\*\* KIST 정보전자연구부

서 발생하는 힘을 적절히 제어함으로써 물리적으로 임피던스가 변화되는 것과 동일한 효과를 내도록 하였다. 또한, 두 개의 리니어 모터를 직각으로 결합하여 2차원 운동이 가능하도록 하였다.<sup>(2)</sup>

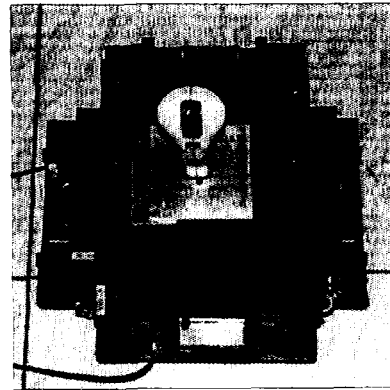
이러한 운동 발생기는 각종 비행 또는 차량 시뮬레이터 등에서 사용되고 있으며, 현재도 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 운동 발생기는 몸 전체에 가해지는 운동을 발생시켜야 하므로 주로 유압을 사용하게 되어 시스템이 커지고 복잡해지며, 개발 및 제작에 많은 비용이 소요된다. 반면에, 본 연구에서 개발하는 운동 발생기는 주로 팔의 운동만을 대상으로 하므로 전기 모터의 사용이 가능하여 시스템 구성 및 제어가 용이하게 된다. 또한, 본 연구에 사용되는 능동 임피던스와 유사한 개념은 로봇 분야에서 그 동안 활발히 연구가 진행되어 왔다.<sup>(3),(4)</sup> 로봇 분야에서는 머니플레이터와 어떤 물체 간에 접촉이 있는 경우에 머니플레이터가 물체에 가해주는 힘과 물체와의 접촉점에서의 운동 간의 관계를 관성, 감쇠 및 강성 등의 임피던스로 모델링한 다음, 이에 기초하여 적절히 위치/힘 제어를 수행하게 된다.

본 연구에서의 능동 임피던스는 로봇에서의 임피던스와 기본 개념은 같으나, 사용 목적 및 방식에서는 많은 차이가 있게 된다.

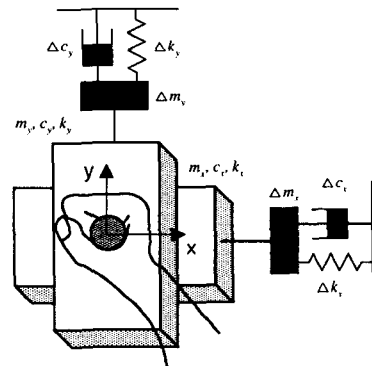
본 논문의 2장에서는 능동 임피던스의 개념 및 리니어 모터에서 발생하는 힘의 제어를 통해서 어떻게 능동 임피던스를 구현하는지에 대해서 자세하게 살펴본다. 3장에서는 운동 발생기 시스템의 하드웨어 구조 및 모터에 공급되는 전류의 조절을 위한 제어 시스템에 대해서 방식에 설명한 다음, 4장에서는 본 연구에서 개발한 운동 발생기를 사용하여 능동 임피던스를 구현한 예를 들어보기로 한다. 마지막으로, 5장에서 결론 및 향후 연구 과제에 대해서 언급하기로 한다.

## 2. 능동 임피던스의 구현

일반적으로 직선 운동은 회전 모터로부터의 회전 운동을 랙-피니언 등의 기구부를 사용하여 변환시켜서 얻지만, 리니어 모터를 사용하면 직선 운동을 바로 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 리니어 모터를 Fig. 1에서와 같이 직각으로 결합하여 2축의 평면 운동을 구현할 수 있는 운동 발생기(motion generator)를 개발하였다. 그림에서처럼 운전자가 운동 발생기의 레버를 손으로 잡고 움직이면, 이러한 운동의 형태로부터 변위, 속도, 가속도 등



(a) Photo of the motion generator



(b) Modeling of the motion generator

Fig. 1 Configuration of the motion generator and concept of active impedance

을 감지하여 모터의 구동 전류를 변환하여 줌으로써 원하는 능동 임피던스(active impedance), 즉 능동 관성, 능동 감쇠 및 능동 강성 등을 얻을 수 있다. 이러한 능동 임피던스의 구현을 통해서 관성, 강성 및 감쇠 등을 변화시켜 가면서 운전자가 느끼는 최적의 작동감을 측정할 수 있으며, 이러한 데이터는 사용자가 보다 쾌적한 운동감을 느끼는 제품을 개발하는 데 사용할 수 있다.

이 장에서는 위에서 언급한 운동 발생기를 사용하여 능동 임피던스를 구현하는 방법에 대해서 구체적으로 설명하고자 한다.

### 2.1 능동 임피던스

전기 시스템에서의 임피던스란 회로에 인가된 교류 전압에 대한 회로의 전류 응답을 나타내는 척도로서, 전기

적 임피던스는 인덕턴스, 커패시턴스 및 저항으로 구성된다. 한편, 기계 시스템에서의 임피던스도 이와 유사한 개념으로 정의되는데, 시스템에 가해진 힘에 대한 운동 응답을 나타내는 척도로서, 관성, 감쇠 및 강성 등으로 구성된다. 본 연구에서 언급하는 능동 임피던스란 리니어 모터의 가동부가 원래 가지고 있는 관성, 감쇠, 강성, 즉 구조적인 임피던스 값을 물리적으로 변화시키지 않으면서도 리니어 모터에서 적절한 힘을 발생시켜서 실제 임피던스 값이 변하는 효과를 얻는 것을 의미한다.

운동 발생기는  $x$ 축 및  $y$ 축 방향으로 2차원 운동이 가능하지만, 동일한 방식이 적용되므로 여기서는 설명의 편의상 1차원 운동으로 가정하여 설명하기로 한다. 먼저 능동 관성에 대하여 고려해 보자. 리니어 모터에 전류가 공급되지 않는 상태에서 운전자가 가동부의 질량이  $m$ 인 리니어 모터의 레버에 힘  $F$ 을 가해서 어느 방향으로 가속시킨다면  $a_0 = F/m$ 의 가속도를 경험하게 된다. 만약, 실제 가동부의 질량  $m$ 보다 부가 질량  $\Delta m$ 만큼 더 큰 능동 관성

$$M = m + \Delta m \quad (1)$$

을 원한다고 가정하면, 운전자는 동일한 힘  $F$ 에 대해서  $a = F/(m + \Delta m) (< a_0)$ 의 가속도를 경험하여야 한다. 이를 위해서 모터에 적절한 전류를 공급하여 운전자가 가해준 힘과 반대 방향으로  $F_1 = \Delta m \cdot a$ 의 힘을 발생시켜 준다면, 가동부에 가해지는 순수한 힘은

$$F - F_1 = (m + \Delta m)a - \Delta m \cdot a = m \cdot a \quad (2)$$

가 되어, 운전자가 질량  $m$ 의 물체에  $F$ 라는 힘을 가하더라도 운전자가 경험하는 가속도는  $a_0$ 가 아니라 능동 관성  $M$ 에 힘  $F$ 을 가한 경우의 가속도인  $a$ 가 된다. 이와 같은 방식으로 실제 관성보다 큰 능동 관성을 구현해낼 수 있다.

한편, 리니어 모터에서 발생하는 힘  $Fm$ 은 모터의 토크 상수(리니어 모터의 경우는 힘 상수)를  $K_T$ , 공급 전류를  $i$ 라 하면  $F_m = K_T \cdot i$ 로 주어지므로, 능동 관성  $M$ 의 효과를 발생시키기 위해서는 모터에

$$i_m = -\frac{\Delta m}{K_T} a \quad (3)$$

의 전류를 공급해 주면 된다. 여기서, 전류에서 첨자  $m$ 은 질량(즉, 능동 관성)과 관련된 전류라는 의미이다. 또한, 음(-)의 부호는 모터에 의해서 발생하는 힘이 운전자가 가해주는 힘과 반대 방향이어야 한다는 점을 나타내

는데, 실제 관성보다 작은 능동 관성을 얻기 위해서는 모터 발생력이 운전자가 가해주는 방향과 같아야 하므로 부호가 양(+)이 되어야 한다.

동일한 방식에 의해서 능동 감쇠  $C$ 와 능동 강성  $K$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = c + \Delta c \quad (4)$$

$$K = k + \Delta k \quad (5)$$

이 때,  $c$ 와  $k$ 는 리니어 모터 가동부의 원래의 감쇠 및 강성,  $\Delta c$ 와  $\Delta k$ 는 부가 감쇠와 부가 강성을 각각 나타낸다. 이러한 능동 감쇠나 강성을 얻기 위해서 모터에 공급해야 하는 전류값은 다음과 같게 된다.

$$i_c = -\frac{\Delta c}{K_T} \cdot v \quad (6)$$

$$i_k = -\frac{\Delta k}{K_T} \cdot x \quad (7)$$

여기서,  $v$ 와  $x$ 는 리니어 모터 가동부의 속도 및 위치를 각각 나타낸다.

한편, 식 (3), (6), (7)에서 원하는 능동 관성, 감쇠 및 강성이 결정되면 부가 관성, 감쇠 및 강성값은 쉽게 계산되지만, 실제로 운전자가 레버에 가해주는 힘의 크기는 알지 못하므로 가속도  $a$ , 속도  $v$  및 변위  $x$ 의 값은 계산에 의해서가 아니라 실제 측정에 의해서 구하여야 한다. 이는 엔코더를 이용하여 측정된 가동부 변위를 적절히 수치 미분하여 산출하게 되는데, 이에 대해서는 다음에 설명하기로 한다.

## 2.2 복합 능동 임피던스의 구현

실제 기계 시스템에서는 관성, 감쇠 또는 강성 등이 단독이 아니라 복합적으로 존재하게 된다. 그러므로 2.1절에서 각각 구현한 능동 관성, 감쇠, 강성을 복합적으로 구현해야만 실제 시스템에 좀더 근사하게 된다. 작용-반작용의 원리에 의해서, 운전자가 운동 발생기(리니어 모터에 연결된 레버)에 어떤 힘을 가해주면 운동 발생기도 크기는 동일하지만, 방향이 반대인 힘을 운전자에게 가해주게 되는데, 이 힘을 반력(또는 반작용력)이라 한다. 따라서 리니어 모터와 연결된 레버에 운전자가 힘을 가하여 운동을 발생시킬 경우에, 사용자는 관성에 의한 반력, 감쇠에 의한 반력 및 강성에 의한 반력 등 3가지 반력을 복

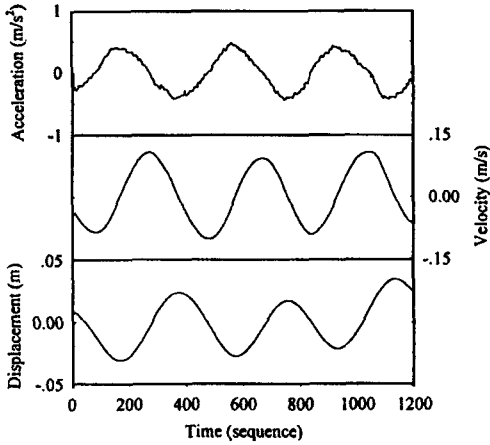


Fig. 2 Displacement, velocity and acceleration due to the arbitrary motion generated by the operator

합적으로 경험하게 된다. 이를 운동 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_{total} = F_{inertia} + F_{damping} + F_{stiffness} = M \cdot a + C \cdot v + K \cdot x \quad (8)$$

한편, 어느 한 순간의 반력을 고려할 때, 이것이 관성, 감쇠 및 강성에 의한 반력들이 어떻게 혼합되어 구성되어 있는지를 구분할 수 없다. 그러나 관성에 의한 반력은 가속도에, 감쇠에 의한 반력은 속도에, 강성에 의한 반력은 위치에 비례한다는 사실에 기초하여, 이러한 시간의 변화에 따른 반력의 형태를 조사함으로써 총 반력의 각 성분을 구분할 수 있다.

운전자가 운동 발생기의 레버를 잡고 Fig. 2의 하단 그림에서와 같이 임의로 진동을 발생시키는 경우를 고려해 보자. 이 때, 엔코더를 통해서 측정된 리니어 모터 가동부의 위치에 기초하여 그림에서의 속도 및 가속도를 산출해 낼 수 있다. 우선 구원하고자 하는 능동 임피던스  $M, C, K$  값이 결정되면, 식 (1), (4), (5)에 의해서 요구되는 부가 임피던스, 즉  $\Delta m, \Delta c, \Delta k$  를 쉽게 산출할 수 있다. 이렇게 산출된 부가 질량, 감쇠 및 강성 값에 위에서 산출한 가속도, 속도 및 변위를 각각 곱한 다음, 이 값을 더하면 리니어 모터가 발생시켜야 하는 힘을 구할 수 있게 된다. 이 때, 운전자가 경험하는 총 반력은 식 (8)로 표현되지만, 이를 위해서 모터에서 발생시켜야 되는 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$F_{motor} = \Delta m \cdot a + \Delta c \cdot v + \Delta k \cdot x \quad (9)$$

따라서 이 힘을 발생시키기 위해서 리니어 모터에 공급해 주어야 하는 전류는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_{total} = i_m + i_c + i_k = -\frac{\Delta m \cdot a + \Delta c \cdot v + \Delta k \cdot x}{K_T} \quad (10)$$

예를 들어, Fig. 3에서와 같이 운전자가 운동 발생기의 레버를 잡고 등가속도  $a$ 로 운동시킨다고 가정하여 보자. 그러면 모터에 공급되어야 하는 전류는 식 (10)에 따라서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_{total} = -\frac{\Delta m \cdot a + \Delta c \cdot (at) + \Delta k \cdot (\frac{1}{2}at^2)}{K_T} \quad (11)$$

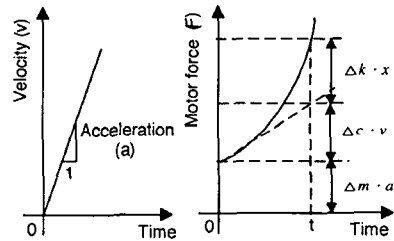


Fig. 3 Motor forces required for active inertia, damping and stiffness during uniformly accelerated motion

### 3. 운동 발생기 시스템

#### 3.1 운동 발생기 시스템의 구조

Fig. 4는 2개의 리니어 모터로 구성된 운동 발생기, 리니어 모터를 구동하기 위한 드라이브 회로, 제어기로 사용하는 TMS320C32 DSP 보드, 실험 데이터를 수집하고 해석하기 위해 직렬 통신선을 통하여 연결된 PC 등의 실험 장치를 나타낸 것이다.

사용된 리니어 모터는 영구 자석과 구동 코일로 구성된 3상 4극 모터부와 위치 검출을 위한 엔코더가 결합되어 일체형으로 구성되어 있다. 리니어 모터의 구동에 사용되는 BLDC(Brushless DC) 모터 전용 드라이브는, 모터의 홀 센서 신호에 의해서 리니어 모터의 위치를 검출하여 해당하는 구동 코일에 PWM(Pulse Width Modulation) 방식으로 전압을 인가하여 구동력을 발생시키는 전압 구동형 방식이다.

주 제어기로 사용되는 TMS320C32 DSP 보드는

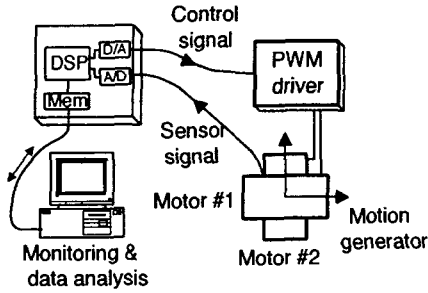


Fig. 4 Schematic of experimental setup

40MHz로 동작하며, 모터 제어에 필요한 알고리즘을 수행한다. 이 보드에는  $\pm 10V$ 의 범위에서 12비트 해상도로 동작하는 A/D 및 D/A 변환기가 설치되어 있는데, A/D 변환기는 모터에 공급되는 아날로그 전류를 측정하여 디지털화하여 DSP에 제공해 주며, D/A 변환기는 제어기에서 출력하는 디지털 신호를 아날로그 전압으로 변환하여 모터 드라이브에 제공해 준다. 한편, PC는 DSP 보드와 통신하며, 실험 데이터의 수집 및 해석 기능을 담당한다.

### 3.2 운동 발생기의 제어 시스템

앞서 설명한 바와 같이 능동 임피던스를 구현하기 위해서는 리니어 모터에서 발생하는 힘을 제어할 필요가 있는데, 이 힘은 모터에 공급해 주는 전류에 비례하게 된다. 그러나 대부분의 모터 드라이브는 전압 구동형이므로 전류를 직접 제어하는 것이 아니라 전압의 조절을 통해서 간접적으로 전류를 제어하게 된다. 즉, 모터에 원하는 전류값을 공급하기 위해서는 전류 목표값과 실제값 사이의 오차에 근거하여 제어기를 통해서 리니어 모터에 인가되는 전압을 조절하여야 한다. 일반적으로 모터에 인가되는 입력 전압  $u$ 와 모터에 흐르는 전류  $i$  사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$u - K_E v = L \frac{di}{dt} + R_i \quad (12)$$

여기서,  $L$ 과  $R$ 은 리니어 모터 권선의 인덕턴스와 저항,  $K_E$ 는 역기전력 상수를 각각 나타낸다. DC 모터 또는 BLDC 모터의 경우에는 속도에 비례하는 역기전력(여기서는,  $K_E v$ )이 발생하며, 이는 모터에 인가된 전압과 반대 방향으로 작용하게 된다. 운동 발생기에서는 운전자가 운동 발생기에 가한 힘과 모터에 의해 발생하는 힘의 합력

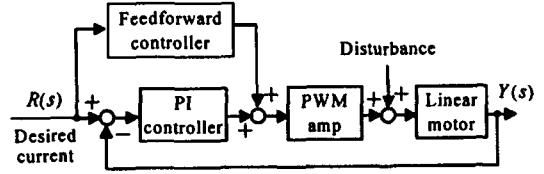


Fig. 5 Block diagram of control system for linear motor

에 의해서 운동이 생성되기 때문에, 모터의 변위, 속도 및 가속도 등은 모터에서 발생하는 힘에도 일부 의존하지만, 대부분 운전자가 임의로 가한 힘에 의하여 결정된다. 따라서 식 (12)의 좌변에서 속도에 비례하는 역기전력에 해당하는 항은 임의로 변하게 된다. 이 때, 제어 시스템의 목적은 전압  $u$ 의 조절을 통해서 원하는 전류  $i$ 를 얻도록 제어를 수행하는 것이므로, 제어 성능에 영향을 주는 역기전력 항은 외란으로 취급하여 제어 시에 이의 영향을 최소화시키는 것이 바람직하다.

Fig. 5는 위에서 언급한 리니어 모터의 전류를 제어하기 위한 제어 시스템의 블록 선도이다. 여기서,  $R(s)$ 와  $Y(s)$ 는 전류 목표값과 전류 출력을 각각 나타내며, 외란은 앞서 언급한 역기전력에 해당한다.

한편, 위의 제어 시스템에서 추종 성능의 향상과 피드백 시스템의 안정성은 서로 상충된다. 즉, 전류의 추종 성능을 향상시키기 위해서 제어기의 이득(특히, 비례 이득)을 상향 조정할 경우에는 발진이 발생하여 안정성은 저하되며, 발진을 방지하고 안정성을 향상시키기 위하여 이득을 하향 조정할 경우 전류 추종 성능이 저하된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 일반적인 PI 제어기에 더하여, 피드포워드(feedforward) 제어기를 첨가하였다.<sup>(5),(6)</sup> 이 때, PI 제어기를 통해서 시스템의 추종 성능 및 외란 제거 성능을 향상시키며, 피드포워드 제어기를 통해서 과도 응답을 향상시킬 수 있다.<sup>(7)</sup>

이와 같이 구성한 제어기를 사용하여 능동 강성을 구현한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 상단의 그림은 능동 강성을 구현하기 위해서 매 순간마다 요구되는 목표 전류값을 나타내며, 하단의 그림은 제어기를 통해서 구현한 실제 전류값을 나타내는데, 동일한 그림에 표시하면 중첩되어 하나의 선도로 보이므로 두 개의 그림으로 표시한 것이다. 즉, 위에서 언급한 제어기를 사용하여 원하는 전류를 정확히 모터에 공급해 줄 수 있으므로, 필요로 하는 능동 강성을 매우 정확하고도 신속하게 구현할 수 있음을 알 수 있다.

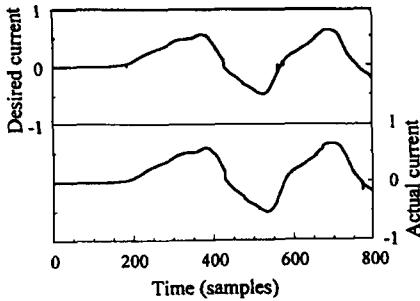


Fig. 6 Implementation of active stiffness

#### 4. 운동 발생기의 성능

능동 임피던스의 구현에 기초하여 개발한 2차원 운동 발생기를 시험한 결과 중 일부를 다음에 소개하기로 한다. Fig. 7은 가동부 질량이  $m = 6\text{kg}$ , 감쇠 계수가  $c \approx 20\text{N}\cdot\text{s/m}$ , 그리고 강성(스프링 상수)이  $k = 0$ 인 리니어 모터에  $\Delta k = 300\text{N/m}$ 인 부가 강성을 인가하여 운동 발생기의 능동 강성을  $K = 300\text{N/m}$ 로 설정한 다음, 약 8cm 정도의 초기 변위에서 레버를 놓았을 때 시간에 따른 리니어 모터 가동부의 변위를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 리니어 모터에 원래 존재하는 감쇠에 의해서 진폭이 점차로 감소하는 감쇠 진동 특성을 보여 준다. 즉, 운동 발생기에 원래 존재하지 않았던 강성을 앞서 설명한 능동 임피던스의 구현에 의하여 시스템에 부과하여 줌으로써, 운동 발생기는 마치 스프링이 달려 있는 기계 시스템처럼 진동을 하게 된다.

Fig. 8은 위와 동일한 리니어 모터에 Fig. 7에서와 같은  $300\text{N/m}$ 의 능동 강성뿐만 아니라  $\Delta c = 60\text{N}\cdot\text{s/m}$  부가 감쇠량을 더하여 준 경우로, 이 때 위와 동일한 초기 변위를 주었을 때 시간에 따른 리니어 모터의 변위 결과를 나타낸다. 예상한 바와 같이 추가적으로 부과된 감쇠 때문에 원래 감쇠만이 존재할 때보다 진동은 급속히 소멸한다.

한편, 운동 발생기는 Fig. 1에서와 같이 리니어 모터를 2개 사용하여 2차원 운동을 구현하는데, 구조상 2개의 동일한 리니어 모터를 직각 방향으로 겹쳐서 배열하므로 상단과 하단의 리니어 모터의 질량은 서로 다르게 된다. 즉, 상단의 리니어 모터의 가동부는 자체 질량(약 6kg)만을 갖는 반면에, 하단의 리니어 모터의 가동부는 자체 가동부의 질량과 상단의 리니어 모터 전체의 질량을 더한 질량(약 21kg)을 갖게 되어 큰 차이가 나게 된다. 그러므

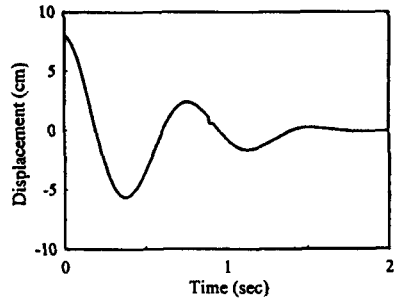


Fig. 7 Displacement response of the motion generator subject to initial displacement with active stiffness implemented

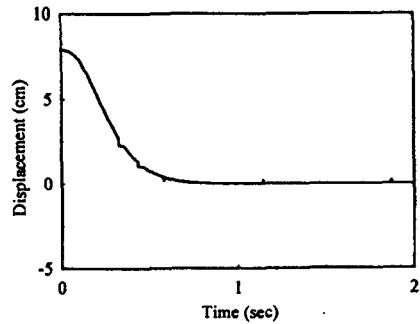


Fig. 8 Displacement response of the motion generator subject to initial displacement with active stiffness and damping implemented

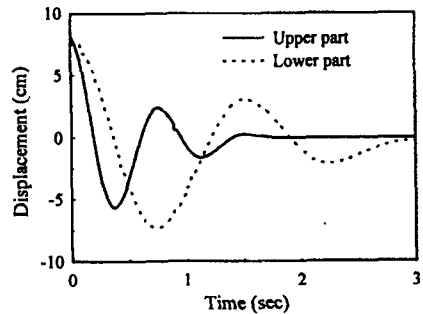


Fig. 9 Displacement responses of the upper and lower parts of the motion generator with the same active stiffness

로 운동 발생기 각 축에 인위적으로 거의 동일한 초기 변위를 주고 변위 응답을 관찰하면 Fig.9와 같은 결과를 얻게 된다. 즉, 질량이 작은 상단부의 고유 진동수가 하단부보다 약 1.8배 ( $=\sqrt{21/6}$ ) 정도이므로, 상단부의 진동 주기는 약 0.8sec, 하단부는 약 1.5sec의 주기를 갖게 된다.

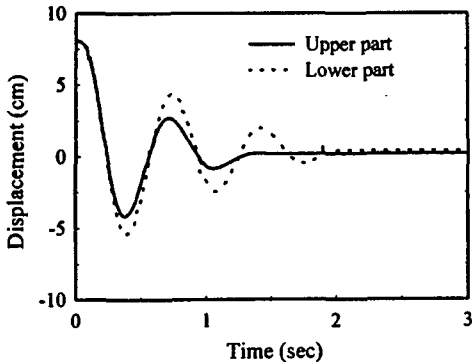


Fig. 10 Displacement responses of the upper part and lower parts of the motion generator with more active stiffness applied to the lower part. Note that the natural frequencies of both parts become almost the same.

Fig. 10은 상하단의 고유 진동수, 즉 진동 주기가 비슷해지도록 하단의 능동 강성을 증가시킨 다음, 위와 유사한 실험을 반복한 결과를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 고유 진동수가 거의 같아졌음을 알 수 있다.

위의 몇 가지 경우에서 살펴본 바와 같이 본 연구에서 개발한 운동 발생기 및 능동 임피던스 개념을 사용하여 다양한 능동 관성, 감쇠 및 강성의 조합을 얻을 수 있다. 이러한 임피던스의 변화는 물리적인 구조의 변화로 얻어지는 것이 아니므로, 실시간으로 변화가 가능하여 여러 다양한 운동감의 측정이 가능해진다.<sup>(6)</sup> 예를 들어, 손으로 레버를 잡고 움직이는 동안 시간에 따라 감쇠값이나 강성 값을 원하는 패턴으로 변화시킬 수 있으며, 이 때 운전자가 경험하는 운동감을 측정하여 운전자가 가장 쾌적하게 느끼는 패턴을 찾아낼 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 두 개의 리니어 모터를 직각으로 결합하여 2차원 운동이 가능한 운동 발생기를 개발하였다. 이 운동 발생기의 모터에서 발생하는 힘을 적절히 제어함으로써 운동 발생기의 관성, 감쇠 및 강성 등의 임피던스가 실제로 변화하는 것과 동일한 효과를 내도록 하는 능동 임피던스를 소프트웨어적으로 구현하였다. 이러한 능동 임피던스의 구현으로 실제 물리적인 임피던스의 변화 없이 실시간으로 관성, 감쇠 및 강성 값을 변화시킬 수 있으므로, 팔과 관련된 다양한 운동감을 측정하는 데 사용할 수 있다. 이러한 연구는 가상 현실 분야와 관련하여 사용

자에게 가상의 운동감을 경험하도록 여러 형태의 힘을 발생시키는 장치에도 응용될 수 있으리라 기대된다.

운동 발생기와 관련된 향후 연구 과제로는 2축의 질량이 현저하게 다른 현재의 운동 발생기의 구조를 2축의 질량이 비슷하게 되어 2축에 대해서 보다 대칭적인 구조로 개발하여 보다 충실한 2차원 운동을 구현할 수 있도록 하는 것이다. 또한, 이러한 2차원 운동 발생기를 팔과 관련된 운동감의 측정 및 정량화에 활용하는 방안을 연구하여, 궁극적으로 실제 제품 개발에 도움을 줄 수 있도록 하는 연구도 수행할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 감성공학 기반기술 개발사업의 일환으로 한국표준과학연구원의 지원하에 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 이순요, 長町三生, "감성 인간 공학," 양영각, 1996.
2. 이세한, 송재복, 김용일, "리니어 모터에 근거한 능동 임피던스 구현," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 462-465, 1997.
3. Spong, M. W., Vidyasagar, M., Robot Dynamics and Control, Wiley, pp. 252-254, 1989.
4. Lewis, F. L., Abdallah, C. T., Dawson, D. M., Control of Robot Manipulators, Mcmillan, 1993.
5. Kuo, B. C., Automatic Control Systems, 7th Ed., Prentice Hall, pp. 775-777, 1995.
6. Phillips, C. L., Harbor, R. D., Feedback Control Systems, 2nd Ed., Prentice-Hall, pp. 159-164, 1984.
7. 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," Proceedings of Advanced Motion Control, pp. 59~64, 1997.
8. 신동윤, 송재복, 김용일, "운동감의 정량화를 위한 감성 공학적 기법 개발," 추계 대한인간공학회 추계학술대회 논문집, pp. 359~365, 1997.