

자석의 반발력을 이용한 원격조종용 촉각계환장치

Tactile Feedback Device Using Repulsive Force of the Magnets for Teleoperation

안인석, 문용모, 이정훈, 박종오, 이종원, 우광방

(Ihn Seok Ahn, Yong Mo Moon, Jung Hun Lee, Jong Oh Park, Jong Won Lee, Kwang Bang Woo)

Abstract : In this paper we developed a tactile feedback device using repulsive force of magnets. The force of the tactile feedback device was derived from the Maxwell's stress method by using the concept of magnetic charge. Magnetic repulsive force is linear function with respect to current and nonlinear to displacement. Experimental data shows these characteristics. To compensate the fact that the presented tactile feedback device can not be controlled by close loop control, we developed a simulation model which predicts output displacement and force by using Runge-Kutta method. And, this paper evaluated the presented tactile feedback device and compared it with commercial tactile feedback devices.

Keywords : tactile feedback device, teleoperation, magnet repulsive force, telerobot

I. 서론

원격조종 로봇시스템은 방사능환경, 화학환경, 심해산업, 폐기물처리, 우주공간 등의 극한환경 등에 사용되는 시스템이다[1][2]. 이런 시스템에서는 조작자에게 원격지와 유사한 가상환경을 만들어 조작자가 실제 원격지에 있는 느낌을 갖도록 하는 것이 중요하다. 이런 목적을 실현하기 위하여 원격지의 각종 감각정보를 종합하여 실제 원격지 상황과 근사한 가상환경을 만들어야 한다. 기존의 원격조종 로봇시스템에서의 가상환경은 주로 시각, 청각 그리고 역각의 정보를 조작자에게 전달하여 조작자의 작업수행 능력을 향상시키는 방향으로 발달하였다. 그러나, 많은 경우에 앞에 열거한 감각정보와 더불어 촉각정보도 필요하다. 특히 세밀한 작업이 필요한 경우에 촉각정보는 더욱 중요한 정보가 된다. 그러므로 본 연구에서는 원격지의 슬레이브 로봇의 말단장치와 작업대상 또는 환경과의 접촉에 의한 촉각정보를 조작자에게 전달해주는 촉각계환장치(tactile feedback device)를 개발하고 그 특성을 연구한다.

기존의 촉각계환장치에 관한 연구는 다음의 5가지 분야로 분류할 수 있다[3]. 첫째로서, 시각 표현방식은 슬레이브 손가락(slave finger)의 촉각상태(touch status)를 아이콘, 힘을 수치 또는 그래프로 표현하는 방식이다[4]. 이 방식은 힘을 시각 정보로 바꾸기 때문에 조작자에게 촉각의 정보에 대한 충분한 인식을 주지 못한다. 둘째, 공압자극방식은 공기분사(air-jet), 공기주머니(airpocket), 공기고리(air-ring)등을 사용하여 슬레이브 손가락의 감각을 공압을 통해서 조작자에게 전달한다[5][6]. 이 방식은 촉각정보를 힘 또는 진동의 형태로 나타내며, 비교적 크고 안정된 힘을 낼 수 있다. 그러나 고주파수 대역에서 잡음의 영향을 많이 받고 손가락 1마디당 1개만을 배치해야 하는 문제가 있다. 셋째로서, 진동자극방식은 핀 진동 방식, 보이스코일 방식, 압전소자 방식이 있다[7]. 이 중에서 핀 진동(vibrating blunt pin)방법은 큰 힘을 낼 수 있는 반면에 높은 전력이 필요하며 무겁다. 보이스코일(vibrating voice coil)방법은 높은 주파수발생과 잡음발생과 전력소비가 작은 반면, 감각기관의 피로가

있으며 크기가 크다는 것이다. 압전소자(piezoelectric crystal)방법은 가볍고 작으며, 작은 전력을 소비하는 반면, 단점은 감각기관의 피로와 고전압을 필요로 한다. 넷째, 전기자극방식은 가장 가벼우며, 작고 적은 전력을 소비하는 장점을 가지고 있으나, 임계점과 고통(pain)사이의 범위가 작고 신뢰성이 작다는 문제가 있다[8]. 마지막으로 신경자극방식은 전기자극을 직접 신경(neuromuscular)에 가함으로써 침해성(invasiveness)을 가지는 문제를 가진다.

기존의 상용화된 촉각계환장치로는 영국의 ARRC/Air-muscle사의 Teletact II와 미국의 Xtensory사의 Tactools XTT1이 있으며, 그 구성 및 원리는 다음과 같다. Teletact II는 공압에 의하여 구동하며, 비례적으로 팽창할 수 있는 작은 공기주머니를 부착하고, 전자제어기와 압축기를 사용하여 압력의 형태로 전달한다[6]. 텍터(tactor) 1개의 크기는 직경 15mm이며, 완전히 부풀려졌을 때, 접촉 단면적은 100mm²이다. 손가락 마디에 1개씩 부착이 가능하며 각 텍터당 최대 출력은 8.4 gf/mm² 정도이다. Tactools XTT1은 형상기억합금(SMA)을 이용한 것인데, 출력을 연속적으로 제어할 수 없는 스위칭 형태로 구동한다[9]. 텍터 1개의 크기는 9x20x5 mm³이므로 사람의 손가락 1개에 1개밖에 장착할 수 없으며, 각 텍터당 1개씩 부착된 직경 1mm의 전달부가 손가락 끝마디의 피부에 출력을 내게 된다.

본 연구에서는 기존의 방법과 달리 자석의 반발력을 이용하는 촉각계환장치에 대하여 연구한다. 자석의 반발력을 사용하게 되면 제한되는 힘의 전기적 제어가 가능하고 연속적으로 힘을 제어할 수 있다. 그러므로 본 방식은 기존의 방식들이 연속적인 촉각신호를 진동이나 압력의 형태 혹은 시각정보로 변환하여 전달하는데 비하여 직접 전달이 가능하다는 장점을 가질 수 있다. 또한 본 방식은 압력의 형태로 전달하는 방식(Tactools)에 비하여 작은 크기를 가진다. 즉, 기존의 압력전달 장치들은 손가락 한 마디당 1개의 촉각계환장치만을 부착 가능한데 비하여 손가락 1개에 어레이 형태의 배치가 가능해진다.

II. 인간의 촉각과 촉각계환의 필요기능

1. 인간의 촉각

피부에 있는 감각수용기가 피부에 균등치 못한 자극이나 압력이 가해질 때 그것에 대한 순응 및 반사활동으로 느끼

접수일자 : 1996. 3. 18., 수정완료 : 1996. 11. 7.

안인석, 우광방 : 연세대학교 전기공학과 자동화공학연구소
문용모, 이정훈, 박종오, 이종원 : 한국과학기술연구원 기전연구부

는 감각을 촉각이라 한다. 촉각수용기의 분포 및 밀도는 얼굴과 사지 말단 부위가 조밀하며 특히 손가락 끝과 입술에서 가장 예민하게 느낀다. 촉각은 외력에 의해 변형되거나 털에 닿으면 느껴지는 감각으로서 손가락, 입술, 혀 등에서 몹시 예민하다. 촉각이 심해지면 압각이 된다[10][11].

인간의 손에 분포하는 촉각수용기의 밀도는 그림 1에 보이는 것과 같이 각 손가락의 끝단과 손바닥 가장자리 그리고 손바닥 아래 부분에 주로 분포한다. 사람의 촉각 수용기는 다음의 4가지-마이스너소체(Meissner's Corpuscles), 머켈디스크(Merkel's Disks), 파치니소체(Pacinian Corpuscles), 루피니소체(Ruffini Endings)-로 분류할 수 있다. 이 4가지 수용기는 각각 43%, 25%, 13% 그리고 19%의 공현도를 가지며 이들은 계속적인 동일 자극에 대하여 반응이 줄어드는 특성을 가진다. 이러한 특성을 순응(adaptation)이라 하고 그 순응속도는 마이스너소체와 파치니소체는 빠르고, 머켈디스크와 루피니소체는 비교적 늦은 편이다. 각 수용기의 특성은 표 1에 나타냈다.

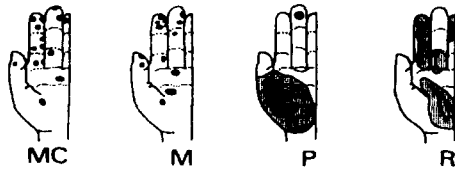


그림 1. 촉각 수용기의 분포.

Fig. 1. Relative frequencies and sizes of a human sensory receptor.

표 1. 촉각 수용기의 특성.

Table 1. Characteristics of the human sensory receptor.

	마이스너소체	파치니소체	머켈디스크	루피니소체
자극순응속도	빠름	빠름	느림	느림
위치	얕음	깊음	얕음	깊음
자극수용면적	13 mm ²	101 mm ²	11 mm ²	59 mm ²
공간 해상도	나쁨	아주 나쁨	아주 좋음	좋음

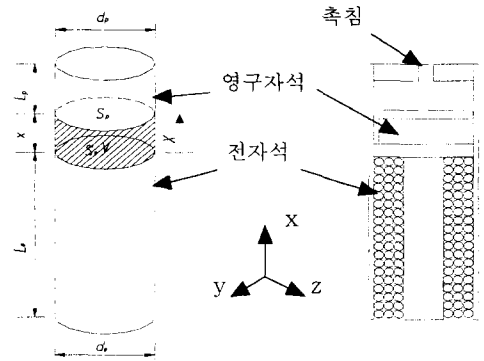
2. 촉각회환장치의 필요기능

촉각회환장치가 기본적으로 갖추어야 할 특징으로는 첫째, 조작자의 조작의 용이성을 증대시키고 피로를 줄이기 위하여 무게가 가벼워야 한다. 둘째, 사람 손가락의 운동을 제한하지 않도록 크기가 작아야 하고 움직이기 용이해야 한다. 셋째, 정확한 힘의 인가가 가능해서 원격지의 말단장치에서 전달되는 촉각정보를 그대로 전달할 수 있어야 한다. 이 외에도 조작자가 통증을 느끼도록 강한 힘을 전달해서도 안되며, 안전해야 한다. 인간의 손가락은 0.2N/m² 이상의 압력 또는 0.5N 이상의 힘의 변화에 대해서만 인지 할 수 있다[5]. 그러므로 촉각회환장치는 이의 10배 이상의 감도를 가지고 있어야 한다. 또한 너무 과도한 힘을 조작자에게 전달하여 조작자가 피로를 느끼지 않도록 하여야 한다. 1절에서 언급한 자극 순응 현상이 인간촉각 수용기에 있으므로 이에 대한 고려도 하여야 한다. 한편, 인간의 촉각 수용기의 공간 밀도는 11mm²~101mm² 이다. 그러므로, 촉각회환장치는 이 밀도를 만족하는 크기를 가져야 한다.

III. 자석의 반발력을 이용한 촉각회환장치의 해석

본 연구에서는 촉각센서로부터 전달되는 힘 정보를 효과적으로 조작자에게 회환시키기 위하여 자석의 반발력을 이

용한 방식의 촉각회환장치를 제안한다. 이 방식은 전자석과 영구자석을 그림 2와 같이 배치하여 전자석을 자화시켜 영구자석과의 반발력을 제어함으로써 연속적인 제어가 가능하도록 구성된다. 본 장에서는 자석의 반발력을 맥스웰의 응력방법을 이용하여 유도한다.



(a) 촉각회환장치모델 (b) 촉각회환장치

그림 2. 촉각회환장치.

Fig. 2. The tactile feedback device.

1. 촉각회환장치의 모델링

실제 촉각회환장치는 그림 2(b)와 같다. 그림 2(b)의 촉침은 인간의 피부와 직접 접촉하는 부분이고 갭은 영구자석이 전자석 코어를 자화시키는 양을 줄이기 위하여 설치한 것이다. 그림 2(b)에서 영구자석과 전자석사이의 자기장을 이용하여 힘이 발생하므로 그림 2(a)와 같이 단순화한다.

그림 2의 촉각회환장치의 빗금친 부분의 자기장의 관계에 의하여 자석사이의 반발력이 발생하여 촉각회환장치가 작동하도록 되어 있다. 그림 2(b)의 갭의 크기와 변위가 그림 2(a)의 x에 해당한다. 영구자석과 전자석의 자극에서 발생하는 자속선은 모두 빗금친 부분에 있다고 가정하고 맥스웰의 응력텐서를 다음과 같이 정의한다[12].

$$\begin{matrix}
 & & x & y & z \\
 \hline
 x & H_x B_x - \frac{\bar{H} \cdot \bar{B}}{2} & H_x B_y & H_x B_z \\
 y & H_y B_x & H_y B_y - \frac{\bar{H} \cdot \bar{B}}{2} & H_y B_z \\
 z & H_z B_x & H_z B_y & H_z B_z - \frac{\bar{H} \cdot \bar{B}}{2}
 \end{matrix} \quad (1)$$

여기서, H_k는 자기장의 세기 (k=x, y, z), 그리고 B_k는 자속밀도 (k = x, y, z)이다.

(1)을 이용하여 미소부피에 대한 힘을 계산하면 (2)와 같다.

$$\bar{f}_k = \frac{\partial T_{kx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{ky}}{\partial y} + \frac{\partial T_{kz}}{\partial z} = \nabla \cdot \bar{T}_k \quad (2)$$

$$\bar{T}_k = (T_{kx}, T_{ky}, T_{kz}), \quad k = x, y, z \quad (3)$$

위의 (2)를 이용하여 그림 2(a)의 두 자석사이의 부피 V에 대해 적분을 수행하여 두 자석간의 작용력을 계산하면 (4)와 같다.

$$\bar{F}_k = \int_V \bar{f}_k dV = \int_V \nabla \cdot \bar{T}_k dV = \int_S \bar{T}_k \cdot \bar{n} dS \quad (4)$$

여기서, \bar{n} 는 단위 법선 벡터 (unit normal vector), 그리고 S는 부피 V의 표면적을 나타낸다. (4)의 적분을 수행하면

그림 2의 축각회환장치는 중심에 대하여 대칭이므로 축방향의 힘을 제외하고 y, z 방향의 힘은 상쇄된다. 그러므로 축각회환장치의 반발력은 x축 방향의 힘만의 1자유도 계로 모델링된다.

그림 2의 영구자석과 전자석의 표면자속밀도를 균일하다고 보고, (4)의 적분을 수행하면 다음과 같다.

$$F = \frac{S_p B_p H_e}{2} + \frac{S_e B_e H_p}{2} \quad (5)$$

여기서, S_i 는 표면적 ($i = e$: 전자석, p : 영구자석)이다. 한편 두 자석을 자극강도 m_e, m_p 인 자하로 가정하면, 이들 각각에 의한 자장의 세기는

$$H_e = \frac{m_e}{4\pi\mu_0 x^2}, \quad (6)$$

$$H_p = \frac{m_p}{4\pi\mu_0 x^2} \quad (7)$$

이며, 여기서 μ_0 는 진공의 투자율을 나타내며, 두 자하의 자극강도는 각각

$$m_e = B_e S_e \quad (8)$$

$$m_p = B_p S_p \quad (9)$$

와 같다. (6),(7)과 (8),(9)를 (5)에 대입하면 자극강도 m_e, m_p 인 두 자하 사이에 작용하는 힘 F 는 다음과 같다.

$$F = \frac{m_e m_p}{4\pi\mu_0 x^2} \quad (10)$$

여기에서, x 는 두 자하 사이의 거리이다.

그림 2(a)의 두 자석간의 힘은 (11)과 같이 반발력 2가지와 흡인력 2가지가 존재 한다.

$$\alpha \left(\frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x+L_e)^2} - \frac{1}{(x+L_p)^2} + \frac{1}{(x+L_e+L_p)^2} \right) \quad (11)$$

여기서, α 는 두 자석간의 힘에서 변위성분(x, L)을 제외한 상수항을 치환한 항이다. (11)에서 $L_e \gg L_p, L_e \gg x$ 이므로, (11)의 두 번째 항과 네 번째 항은 소거되어, (12)와 같이 전자석 위쪽 극과 영구자석의 양극 사이의 두 힘만이 남는다.

$$\alpha \left(\frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x+L_p)^2} \right) \quad (12)$$

그리고, 축각회환장치의 전자석은 초기 운동 전에는 반발력을 생성하지 못하므로, 본 연구에서는 전자석이 자화된 이후의 상태만을 고려한다. 이상에서 논의한 바와 같이 다음과 같은 가정을 축각회환장치의 모델링에 도입한다.

- 1) 축각회환장치는 1 자유도 이다.
- 2) 자극간의 힘은 전자석의 한 극과 영구자석의 양극 사이의 힘만을 고려한다.
- 3) 축각회환장치의 전자석은 자화되어 있다.

2. 자석의 반발력 해석

축각회환장치의 힘은 자석의 반발력에 의한다. 축각회환장치의 자석반발력 F_m 은 (10)과 (12)를 이용하면, (13)과 같다.

$$F_m = \frac{m_e m_p}{4\pi\mu_0 x^2} - \frac{m_e m_p}{4\pi\mu_0 (x+L_p)^2} \quad (13)$$

여기서 전자석의 자극강도 m_e 는 표면자속밀도와 면적의 곱으로 (14)와 같으며,

$$m_e = B_e S_e = B_e \pi a_e^2 \quad (14)$$

전자석의 표면자속밀도를 구하면 다음과 같다. 먼저, 그림 3과 같이 코일이 1회 감긴 경우에 대해서 고려한다. Biot-Savart의 법칙에 의해, 자속밀도 \bar{B} 는

$$\bar{B} = \oint_C d\bar{B} \quad (15)$$

이며, 여기서

$$d\bar{B} = \frac{\mu I}{4\pi} \left(\frac{dl' \times \bar{a}_R}{R^2} \right) = \frac{\mu I}{4\pi} \left(\frac{dl' \times \bar{R}}{R^3} \right) \quad (16)$$

로 얻어진다. 그리고 그림 3으로부터

$$dl' = \bar{a}_\phi a_e d\phi' \quad (17)$$

$$\bar{R} = \bar{a}_z z - \bar{a}_r a_e \quad (18)$$

$$R = \sqrt{z^2 + a_e^2} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} dl' \times \bar{R} &= (\bar{a}_\phi a_e d\phi') \times (\bar{a}_z z - \bar{a}_r a_e) \\ &= \bar{a}_r a_e z d\phi' + \bar{a}_z a_e^2 d\phi' \end{aligned} \quad (20)$$

임을 알수 있다.

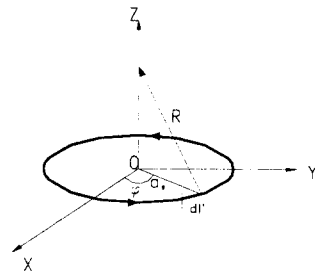


그림 3. 전류 I가 흐르는 Coil (1권선).
Fig. 3. Coil flowing with current I (1 turn).

(20)을 (16)에 대입하여 적분을 수행하면, (20)의 첫째 항은 코일이 축대칭이므로 소거되어, 다음의 (21)과 같다.

$$\bar{B} = \frac{\mu I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \bar{a}_z \frac{a_e^2 d\phi}{(z^2 + a_e^2)^{3/2}} = \bar{a}_z \frac{\mu I a_e^2}{2(z^2 + a_e^2)^{3/2}} \quad (21)$$

다음으로, 코일 1회 감긴 경우의 자속밀도인 (21)을 이용하여 권선수 N인 전자석의 자속밀도를 구한다. 그림 4에 투자율 μ 인 코아에 코일이 N회 감긴 전자석을 나타낸다.

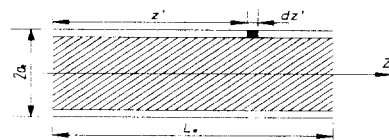


그림 4. 길이 L_e 인 전자석.
Fig. 4. An electromagnet of length L_e .

(21)에서, $d\bar{B}$ 를 구하면 (22)와 같다.

$$d\bar{B} = \bar{a}_z \frac{\mu I a_e^2}{2\{(z'-z)^2 + a_e^2\}^{3/2}} \frac{N}{L_e} dz' \quad (22)$$

(22)를 z축 방향으로 0에서 전자석 길이 L_e 까지 적분하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \frac{\mu N I a_e^2}{2 L_e} \int_0^{L_e} \frac{dz'}{\{(z'-z)^2 + a_e^2\}^{3/2}} \\ &= \frac{\mu N I a_e^2}{2 L_e} \left[\frac{L_e - z}{\sqrt{(L_e - z)^2 + a_e^2}} + \frac{z}{\sqrt{z^2 + a_e^2}} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

(23)에서 전자석의 자극은 $z = L_e$ 이므로, 그림 4의 전자석의 자속밀도는 B_e 는 (24)와 같다.

$$B_e = \frac{\mu N I}{2 L_e} \left\{ \frac{L_e}{\sqrt{L_e^2 + a_e^2}} \right\} \quad (24)$$

이제, (24)를 (14)에 대입하면 전자석의 자극강도 m_e 는 다음과 같이 구해진다.

$$m_e = \frac{\mu \pi a_e^2 n I L_e}{2 \sqrt{L_e^2 + a_e^2}} \quad (25)$$

여기서, n 은 단위 길이당 권선수이다.

한편, 영구자석의 자극강도 m_p 는 영구자석의 자극강도는 영구자석의 표면자속밀도와 면적의 곱으로 (26)과 같다.

$$m_p = B_p S_p = B_p \pi a_p^2 \quad (26)$$

여기서, B_p 와 S_p 는 각각 전자석의 표면자속밀도와 전자석 자극의 표면적을 나타낸다.

(25)와 (26)의 전자석의 자극강도 m_e 와 영구자석의 자극강도 m_p 를 (13)에 대입하면, 다음과 같이 촉각케환장치의 자석반발력이 구해진다.

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{\mu \pi B_p a_e^2 a_p^2 n I L_e}{8 \mu_0 \sqrt{L_e^2 + a_e^2} x^2} - \frac{\mu \pi B_p a_e^2 a_p^2 n I L_e}{8 \mu_0 \sqrt{L_e^2 + a_e^2} (x + L_p)^2} \\ &= \frac{\mu \pi B_p a_e^2 a_p^2 n I L_e}{8 \mu_0 \sqrt{L_e^2 + a_e^2}} \left(\frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x + L_p)^2} \right) \end{aligned} \quad (27)$$

(27)을 정리하면 다음과 같다.

$$F_m = \beta \left(\frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x + L_p)^2} \right) I \quad (28)$$

여기서,

$$\beta \triangleq \frac{\mu \pi B_p a_e^2 a_p^2 n I L_e}{8 \mu_0 \sqrt{L_e^2 + a_e^2}} \quad (29)$$

β 는 시스템의 물성치와 형상에 의해 결정되는 상수로서, 설계변수인 길이와 반경 그리고 물성치의 함수이다.

3. 촉각케환장치의 해석

본 연구에서 개발된 그림 2의 촉각케환장치는 1절에서 논의된 세 가지의 가정하에서 유도되어, (28)과 같이 모델링된다. (28)에서 알 수 있는 바와 같이 변위를 구속한 경우, 힘은 입력전류의 크기에 따라 선형적인 특성을 갖는다.

(27)에서 영구자석의 길이에 의한 흡인력을 나타내는 두 번째 항의 값은 첫 번째 항의 크기에 비해 약 1/10 정도의 크기로 작으며, 첫째 항은 변위의 제곱에 반비례하므로 변위가 달라짐에 따라 큰 변화를 보인다. 촉각케환장치의 유효변위는 1mm이고 초기변위는 1mm이므로 (28)의 첫째항의 크기는 4배정도 변한다. 그리고, 촉각케환장치의 힘은 자석의 반발력과 영구자석에 작용하는 중력, 그리고 동적인 손실에 의해 결정되는데, 영구자석의 중력에 의한 힘은 약 1gf로 전체 힘의 1~2% 정도이므로 잡음의 크기보다 작다. 그러므로 시뮬레이션에서는 고려하지 않는다.

본 연구에서는 실험을 통하여, 그림 2의 촉각케환장치의 입출력 특성의 선형성을 고찰하고, 물질상수값 μB_p 값을

산출한다. 이 결과로부터 동적 시뮬레이션을 수행하여 변위 측정실험과 비교하여, 시뮬레이션의 성능을 확인하고, 원하는 출력을 얻을 수 있는 입력을 정확히 예측할 수 있음을 보임으로써 실험결과와 본 연구에서 단순화된 모델로부터의 결과가 (27)과 일치함을 보인다.

IV. 촉각케환장치의 실험 결과

1. 실험의 개요

본 연구에서 개발된 촉각케환장치는 연속적으로 힘의 출력을 조절할 수 있다. 촉각케환장치는 인간의 피부와 연동되기 때문에 변위가 발생한다. 본 연구의 촉각케환장치는 자석의 반발력을 이용하기 때문에 변위가 변하는 경우라면 비선형 특성을 나타낸다. 그러므로, 실제 사용할 경우에는 이 점을 고려하여야 한다. 그러므로, 본 장에서는 촉각케환장치가 힘을 선형적으로 낼 수 있는 변위가 제한된 경우와 실제 사용환경과 유사한 변위가 구속되지 않는 경우에 대해서 실험을 수행한다. 또한 개발된 촉각케환장치의 모델링을 하고 이에 대한 동적 시뮬레이션을 수행하여 출력의 예측을 가능하게 한다.

촉각케환장치의 변위가 제한된 경우에 대하여 특성을 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험은 촉각케환장치의 변위를 제한하고 입력에 따른 출력되는 힘의 특성을 살펴보았다. 힘의 응답은 입력전류에 대한 힘의 크기를 측정하였다. 입력전류의 크기에 따라 선형적인 변화를 하는 것을 (28)에서 알 수 있다. 선형성 확인을 위하여 선형 입력을 인가한 실험에서 선형성을 확인한다. 또한, 계단입력에 대한 출력을 이용하여 지연시간, 정정시간, 상승시간을 구한다.

(29)의 β 에서 물성치는 B 와 μ 를 의미하는데 각각에 대한 측정은 곤란하다. 그리고 분산되는 자속의 양을 고려하기 위하여 두 값의 곱을 실험을 통하여 측정한다. 이 때는 앞의 실험에서 사용한 선형 입력 데이터에 최소자승법을 이용하여 선적합을 하여 구한다. 전자석이나 영구자석의 반경에 대한 거리의 비가 1 이하이므로 자속선의 분산은 무시할 수 있다. 그러므로 실제 실험장치의 자속밀도의 측정과정에서 이 영향이 포함 되도록 하였다.

촉각케환장치는 자석반발력 (27)의 비선형성에 의하여 비선형특성을 가진다. 이 비선형특성을 규명하기 위하여 정현파입력을 이용하여 반복신호에 대한 출력의 변화를 고찰하였다. 이 때는 촉각케환장치의 변위를 구속하지 않고 비접촉식 센서를 이용하여 변위를 측정한다. 정현파 입력을 이용함으로써 반복되는 입력에 대하여 안정된 출력을 보이는 것과 비선형 종류에 대해 규명한다.

시뮬레이션은 실험에서 구한 물성치를 이용하여 모델을 만들고, Runge-Kutta방법을 이용하여 수행한다. 시뮬레이션 결과는 실험 데이터와 비교하여 검증한다. 그리고, 만들

표 2. 촉각케환장치의 사양.

Table 2. Specifications of the tactile feedback device.

전체 크기	$\phi 4.7 \times 38.0$ [mm]
전자석 길이	29.5 [mm]
영구자석 길이	5.0 [mm]
갭 크기	2.3 [mm]
영구자석 반지름	2.0 [mm]
전자석 코아 반지름	1.5 [mm]
전자석 권선수	440 [회]

어진 시뮬레이션 모델을 이용하여 촉각케환장치의 힘, 변위 출력특성과 원하는 힘을 낼 수 있는 입력에 대해서 검토한다.

실험에 사용된 촉각케환장치는 그림 5에 나타나 있고, 표 2에 촉각케환장치의 사양을 보여준다. 그림 5과 같이 촉각케환장치는 황동성분의 축침, 영구자석과 전자석이 붙지 않도록 하는 갭, 그리고 영구자석(Nd-Fe-B)으로 이루어져 있다. 그리고 외부의 관찰이 용이하도록 유리관을 사용하였다.

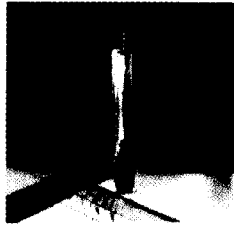


그림 5. 촉각케환장치.
Fig. 5. The tactile feedback device.

2. 촉각케환장치의 특성실험

촉각케환장치의 특성을 얻기 위하여 계단입력을 가하여 응답을 구한다. 입력은 컴퓨터의 전압신호를 전류신호로 바꾸는 앰프를 통하여 촉각케환장치에 인가되고 출력되는 힘은 로드셀에 의하여 측정된다. 로드셀은 스트레인게이지 두개가 연동하는 형식의 것을 사용하였다. 입력의 종류는 계단입력을 사용하였으며, 초기자화 되는 양을 고려해 일정량의 전압을 초기에 인가하도록 한다. 그림 6에 실험장치를, 표 3에 실험장치의 사양을 나타냈다.

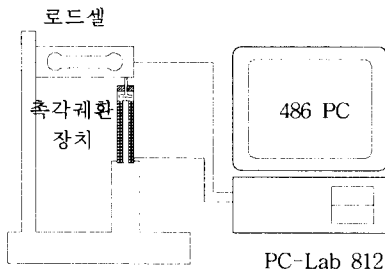


그림 6. 힘 측정 실험장치.
Fig. 6. The experimental system for force measurement.

표 3. 힘 측정 실험장치의 사양.
Table 3. Specifications of the experimental system.

	생산업체	형 명	특 성	
Load -Cell	CAS	BC-120M	rated load	120 [g]
			accuracy	0.04 [g]
AMP	CAS	FS-1010	A/D resolution	16 [bit]
			A/D sampling time	1/20 [sec]

그림 7은 계단입력의 응답이다. 그림 7의 실험은 변위를 구속한 상태에서 힘을 측정한 실험이다. 실험 데이터에서 약간의 구배가 존재하는 것은 촉각케환장치의 앰프와 코일의 특성이라고 판단된다. 그림 7에서 알 수 있듯이 이 시스템은 오버슈트가 없다. 계의 응답으로 알 수 있듯이, 이 계는 1차 계의 응답을 보인다. 그러므로 표 4의 특성치를 이용하여 계의 시간상수를 구하면 0.467 sec이다. 그러므로 대

역은 2.14 Hz 이다. 감소하는 입력의 경우 상승하는 입력과 대칭적으로 출력이 발생하겠지만 계의 구성이 음의 힘은 발생하지 않도록 되어있으므로 측정되지 않아서 확인되지 않는다. 그러므로 표 4의 특성값은 상승신호에 대한 값이다.

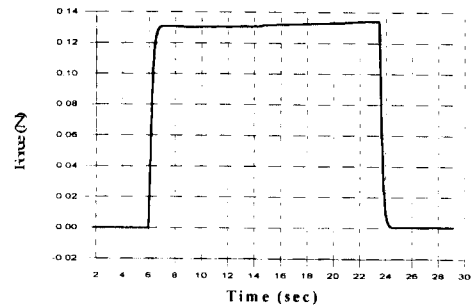


그림 7. 촉각케환장치의 응답특성 (계단입력).
Fig. 7. Step response of the tactile feedback device.

표 4. 촉각케환장치의 특성치.
Table 4. System specifications of the tactile feedback device.

시스템 특성	Time(sec)
지연시간 t_d	0.35
정정시간 t_s	2.66
상승시간 t_r	0.94

다음으로 촉각케환장치의 선형성을 확인하기 위하여 선형 입력을 가하고 응답을 측정하였다. 이 경우 역시 변위를 구속한 상태에서 수행하였다. 그림 8은 시스템의 선형응답을 보인다. 그림 8의 출력은 초기자화의 영향을 받는 전반부는 나타내지 않고 전자석이 완전히 자화된 이후를 나타낸다. 그림 8에서 알 수 있듯이 선형 입력에 대한 촉각케환장치의 출력은 선형성을 가지며 그 오차는 1% 내외이다.

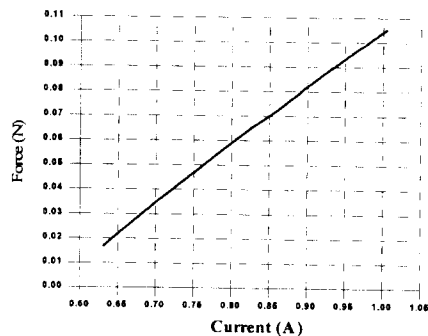


그림 8. 촉각케환장치의 응답특성 (선형입력).
Fig. 8. Ramped response of the tactile feedback device.

실제 촉각케환장치가 사용되는 경우의 촉각케환장치의 기능은 슬레이브 로봇이 외부의 물체와 접촉을 하였는가 여부와 접촉되는 힘의 크기를 전달하여야 한다. 접촉이 일어난 후 원격지에서 힘 정보는 촉각케환장치가 출력력을 선형적으로 조절할 수 있는 기능이 있어야 전달이 가능하다. 세밀한 작업이 요구되는 원격제어 시스템에 사용되는 촉각케환장치는 출력 힘을 연속적으로 제어할 수 있어야 한다. 실험에서 확인된 바와 같이 본 연구에서 개발된 촉각케환장치는 촉각에 전달하는 힘을 선형적으로 조절 할 수 있다. 그러므로 세밀한 작업을 하는 원격제어 시스템에 적절하다.

또한 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 램프입력에 대하여 정상상태의 결과가 0.01 N에서 0.1 N까지의 구간에서 선형적으로 잘 응답하므로, 접촉이 일어난 직후부터 접촉 힘을 조정할 수 있다.

3. 촉각궤환장치 물성치 산출

촉각궤환장치의 힘을 계산하는 식의 상수항에 필요한 물성치는 $B \times \mu$ 이다. 이 값을 실험을 통해서 얻기 위하여 그림 8의 데이터를 직선에 최소자승법을 이용해서 구한다. 실험에서 구한 $B \times \mu$ 값을 이용해서 다시 계산한 힘과 실험에서 측정된 힘을 그림 9에서 비교한다.

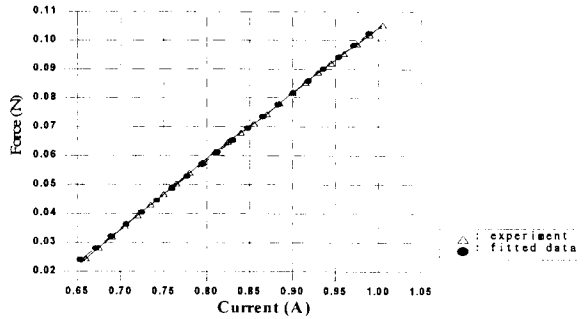


그림 9. 촉각궤환장치의 응답비교 (선형입력).
Fig. 9. Comparison of response of the tactile feedback device (ramped input).

그림 9에서 두 가지 데이터 오차의 평균은 -0.00086792 N이고, 표준편차는 0.01479 이다. 그러므로 실험에서 구한 $B \times \mu$ 의 값은 적절하다. 그림 10은 $B \times \mu$ 값의 변화 경향을 나타낸다. 그림 9에서 보인 바와 같이 추출된 물성치 값으로 다시 계산된 촉각궤환장치의 출력은 실험에서 얻은 값에 잘 수렴한다. 또한, 그림 10의 물성치의 변화 추세는 전체적으로 약간 하강하는 경향을 보이거나 전체적으로 일정한 값을 유지한다. 그러므로 본 연구의 시뮬레이션에 사용하는 것이 적절하다.

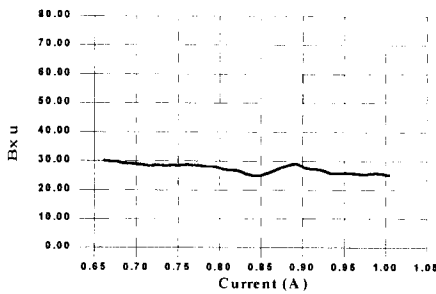


그림 10. $B \times \mu$ 값의 변화 경향.
Fig. 10. Variation of $B \times \mu$ values.

4. 촉각궤환장치의 비선형특성

촉각궤환장치의 힘을 계산하는 식은 변위의 변화에 따라 비선형특성을 나타낸다. 본 실험에서는 촉각궤환장치의 변위를 자유상태로 하고 변위를 측정함으로써 촉각궤환장치의 비선형특성을 확인한다. 그림 11에 정현파 입력을 주고 변위를 측정할 경우이다. 그림 12에서 알 수 있듯이 촉각궤환장치는 히스테리시스 특성을 가진다.

그림 11의 히스테리시스에서 ①은 상승하는 부분이고 ②가 하강하는 부분이다. 그림 12에서 알 수 있듯이 상승하는 부분(①)이 하강하는 부분(②)보다 더 선형적이다. 이 두 부분을 각각 직선에 적합하면 직선의 식은 다음과 같다.

$$X = 0.000331891 \times I - 1.88495 \times 10^{-5} \quad (30)$$

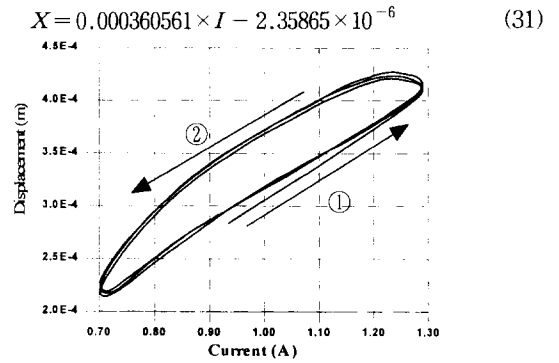
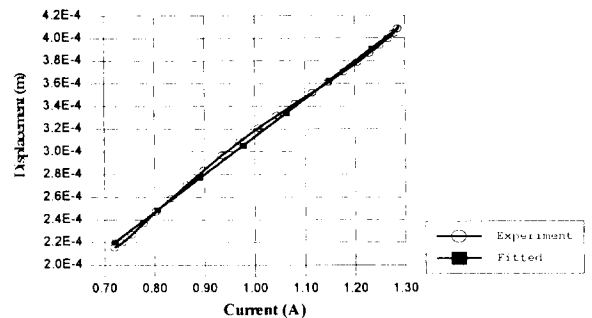
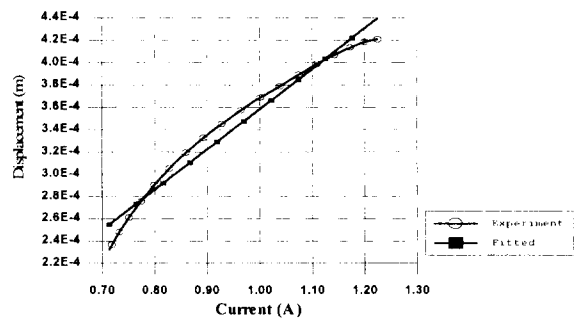


그림 11. 촉각궤환장치의 히스테리시스 특성.
Fig. 11. Hysteresis characteristics of the tactile feedback device.

또한, (30)과 (31)에서 확인 할 수 있듯이 직선적합을 하면 두 직선은 평행 이동된 두 직선으로 간주할 수 있다. 두 직선의 평행이동량은 약 $4.737 \times 10^{-7} \text{m}$ 이다. 그림 11의 경우 전체 변위는 $2.5 \times 10^{-4} \text{m} \sim 4.5 \times 10^{-4} \text{m}$ 이다. 전체 변위에 대한 직선간의 이동량은 변위의 0.1% 정도이다. 그러므로 촉각궤환장치가 가지는 히스테리시스에 대해서는 무시할 수 있을 정도로 작다고 할 수 있다. 또한 히스테리시스루프가 안정되어 있으므로 계의 안정된 출력을 기대할 수 있다.



(a)



(b)

그림 12. 히스테리시스와 직선적합의 비교.
(a) 상승 (b)하강

Fig. 12. Comparison between the hysteresis and the line-fitting.
(a) ascent (b) descent

5. 촉각궤환장치의 시뮬레이션

촉각궤환장치의 실제 사용환경에서는 변위를 구속하지 않고 강성이 첨가되는 경우이다. 이 경우를 모델링하기 위하여 촉각궤환장치에 연한 스프링을 첨가해서 실험을 수행하였으며, 그림 13에 실험장치를 보인다.

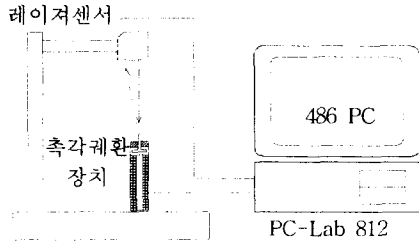


그림 13. 변위측정 실험장치.
Fig. 13. The experimental system for displacement measurement.

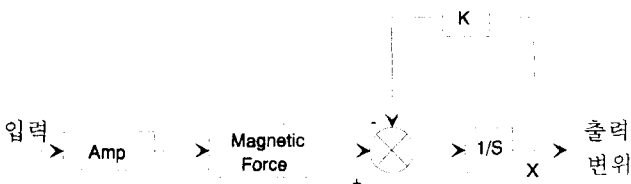


그림 14. 촉각궤환장치의 시뮬레이션 모델.
Fig. 14. Simulation model of the tactile feedback device.

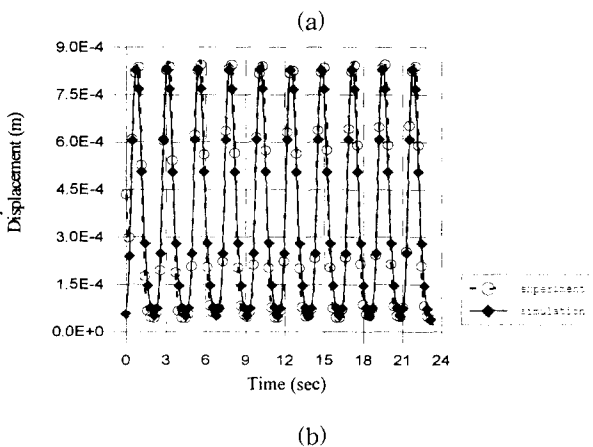
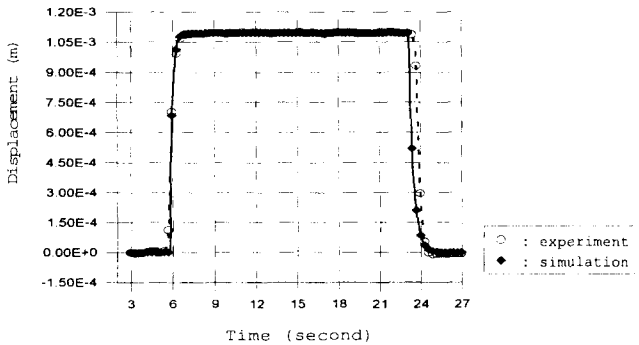


그림 15. 촉각궤환장치의 변위비교.
(a) 계단입력, (b) 정현파입력.
Fig. 15. Comparison of displacement between an experiment and a simulation.
(a) Step Input, (b) Sinusoidal Input.

그림 13의 실험장치를 이용하여 측정한 실험 데이터와 Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 데이터를 비교한다. 그림 14에 시뮬레이션을 위한 Simulink 모델을 나타낸다.

Simulink에서는 Runge-Kutta방법을 사용하였으며 입력은 계단입력과 정현파입력을 사용하였다. 그림 15에 입력에 따른 데이터를 비교하였다. 그림에서 시뮬레이션과 실험 값의 초기 변위의 차가 있는데, 이는 3장에서 언급한 초기자

화를 위하여 전류를 가하였기 때문이다.

촉각궤환장치는 2차계로 모델링할 수 있지만 질량에 의한 영향인 2차항의 전체에 대한 영향을 무시할 수 있으므로 1차 항까지만 고려했다. 앞의 2절에서도 계의 응답이 1차계의 특성을 나타냈으므로 1차계로 모델링하는 것이 타당하다.

그림 15와 같이 시뮬레이션과 실험을 비교하면 전체적으로 잘 수렴함을 알 수 있다. 변위가 변하는 경우 촉각궤환장치는 비선형특성을 가지게 되므로 그림 15에서 알 수 있듯이 상승부분과 하강 부분에 다른 경향의 출력을 나타낸다. 하지만 변위가 1mm 이하이고 전체의 크기에는 주로 입력전류가 영향을 미치게 되므로 비선형성의 영향은 약하다. 그림 15(b)의 변위 파형중 윗봉과 아랫봉의 형태가 서로 다른 것은 이 비선형성의 영향이다.

3절의 물성치를 이용한 시뮬레이션 결과가 그림 15와 같으므로 3절의 $B\mu$ 값은 적절하다. 이상으로 구축된 모델을 이용하여 촉각궤환장치의 출력되는 힘의 예측이 가능하다.

6. 힘의 예측 결과

5절의 시뮬레이션과 실험의 결과를 비교하면 변위는 비교적 실험 데이터에 잘 수렴한다. 5절에서 만든 시뮬레이션 모델을 이용하여 촉각궤환장치의 실제 작동 중에 출력할 수 있는 힘을 예측할 수 있다. 시뮬레이션 모델에 입력값을 바꾸어가며 출력을 예측하는 것이 가능하다. 실제 작동중인 촉각궤환장치에 출력되는 힘을 측정하는 것은 곤란하므로 변위를 측정하여 힘을 계산하는 방법을 사용하여야 한다. 그러므로 시뮬레이션 모델에 실제 입력 값을 주어 출력을 예측하고 이 값을 측정하는 것이 더 유용하다. 이 경우에는 센서의 입력을 이용하지 않고 바로 출력되는 힘을 예측할 수 있다.

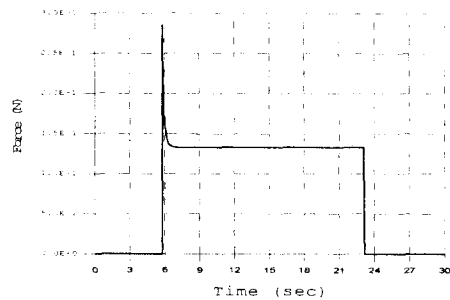


그림 16. 촉각궤환장치의 힘 출력.
Fig. 16. Force output of the tactile feedback device.

그림 16에서 알 수 있듯이 출력되는 힘은 입력의 파형을 그대로 따라가지 않고 파형이 약간 불규칙한 형태를 띤다. 특히 입력전류가 상승하는 부분에서 입력에 비해 큰 힘의 값을 가진다. 그러므로, 원하는 힘을 내기 위하여 입력을 가할 경우에는 입력의 상승부분에 대해 신중한 고려가 요구된다. 입력에 균일한 값을 유지하는 경우에는 출력도 균일한 값을 유지하므로 이에 대해서는 3절과 마찬가지로 예측할 수 있다. 그림 18에 보인 바와 같이 선형입력에 대해서는 힘의 불규칙성이 덜하므로 이 특성을 이용하여 입력을 조정하면 출력되는 힘의 경향을 원하는 바와 같이 조정할 수 있다.

이상의 시뮬레이션과 실험을 통하여 자석의 반발력을 이용하는 촉각궤환장치의 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 자석의 반발력을 모델링한 결과 자석의 반발력이 비선형 특성을 나타냈고, 그 영향이 변위가 변하는 경우에 나타남을 확인하였다. 비선형 특성의 경우는 고주파수 입력의 상승시에 주로 영향을 주며, 그 영향에 의하여 실제 촉각궤환장

치의 출력되는 힘에 불규칙성을 만든다. 하지만 정상상태의 입력이나 선형입력의 경우에는 그 영향이 줄어든다.

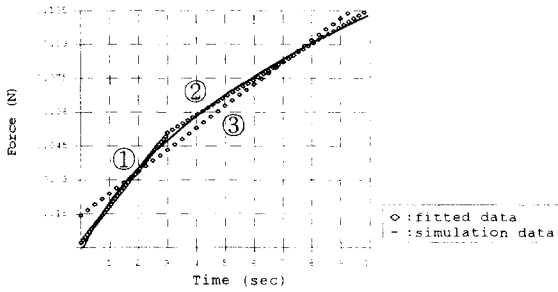


그림 17. 선형입력에 대한 시뮬레이션 결과.
Fig. 17. The simulation results for ramped input.

그림 17에 선형입력에 대한 힘의 출력을 시뮬레이션을 통해 계산해서 나타낸다. 앞서 언급된 바와 같이 계단입력이나 정현파 입력의 경우보다는 비선형의 영향이 줄어들었음을 알 수 있다.

표 6. 선적합 결과.
Table 6. Results of the line fitting.

	직선의 방정식	표준편차
①	$F=0.0160233*t+0.00225307$	2.41928×10^{-6}
②	$F=0.0160233*t+0.00225307$	2.41928×10^{-6}
③	$F=0.0096873*t+0.0142556$	2.43883×10^{-5}

그림 17의 결과에서 알 수 있듯이 힘의 출력은 비교적 선형적이며 그에 따르는 변위도 선형적인 특성을 보인다. 표 6에 그림 17의 그래프를 두 구간으로 나누어 직선에 적합한 식과 표준편차를 비교했다. 그림 17의 두그래프에서 알 수 있듯이 응답은 이중선형의 형태이다. 이는 (28)의 분자에 전류에 비례하는 항이 있고 분모에 거리의 증가에 따른 감소의 영향이 있기 때문이다.

그림 18은 0.1N의 힘을 내기 위하여 전류를 가한 경우 입력 신호의 상승신호에 따르는 오버슈트를 비교하였다. 그림 18에서 알 수 있듯이 상승시간을 증가시킬수록 오버슈트는 감소하며 일정시간이 지나 출력이 안정된 경우에는 원하는 힘을 발생시킴을 알 수 있다.

이상의 시뮬레이션과 실험의 결과 개발된 자석반발력방식의 촉각재환장치는 입력되는 전류에 따르는 힘의 값이 자석의 반발력의 비선형성에 비해 선형적으로 변화하며 특히 변위가 제한된 경우에는 선형적임을 확인할 수 있었다. 또한, 입력에 따르는 출력의 변화를 예측하여 원하는 힘을 낼 수 있었다.

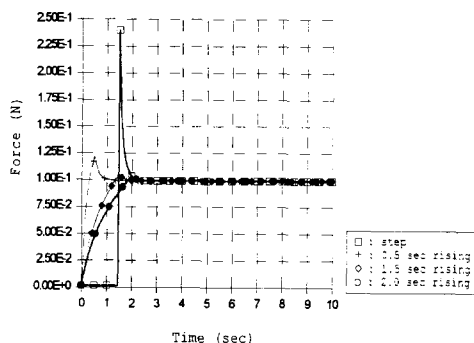


그림 18. 신호 상승시간에 따르는 힘 출력.
Fig. 18. Force output with respect to the rising time.

7. 결과고찰

자석반발력을 이용한 촉각재환장치는 변위가 제한된 경우 선형적인 힘응답을 보이며 선형성에 대한 오차는 1% 이하이므로 무시할 수 있다. 또한 계단 입력에 대한 응답은 1차계의 특성을 보였다. 그러므로 촉각재환장치는 오버슈트가 없고 입력에 대한 선형적인 응답을 기대할 수 있다. 또한 이 계의 대역은 2.14 Hz이며 이 계의 다른 특성치 값은 표 4에 나타내었다. 이 계의 대역은 인간이 진동을 힘으로 느끼는 주파수 반응 대역의 최소 값인 40 Hz아래에 존재하므로 특성입력의 반응을 그대로 인간이 느끼게 하는데 적합하다.

(28)의 물성치는 실험을 통하여 계산되는 물성치와 차이가 존재하게 되는데 이는 식의 유도과정에서 도입되는 가정에 의한 것이다. 그러므로, 자속선의 분산과 자속밀도등을 고려하기 위하여 전체 계에서 바로 물성치를 측정하였다. 3절에서는 이 $B\mu$ 값을 구하기 위하여 선형입력에 대한 응답을 이용했다. 이 값은 촉각재환장치의 시뮬레이션을 위해 사용된다.

촉각재환장치가 실제 사용되게 되면 인간의 피부가 촉각재환장치의 촉침부와 연동하게 되므로 변위가 존재하게 된다. 이 경우에는 자석반발력식의 비선형성에 영향을 받아 응답이 불안정해지게 된다. 이 비선형성의 특성을 알아보기 위하여 정현파 입력에 의한 응답을 측정하였다. 실험결과 계는 히스테리시스 현상을 보이는데 그 크기가 $1 \mu m$ 이하이므로 무시해도 무방하다. 하지만 실험결과 비선형성의 영향은 입력이 급격히 변화하는 구간에서 영향을 준다. 그러므로 입력이 급격히 변화하는 경우에는 비선형성에 대한 고려가 필요하다. 6절에서 살펴 본 바와 같이 입력의 변화 정도를 조정함으로써 출력의 오버슈트가 발생하는 것을 방지할 수 있다.

Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 출력을 예측할 수 있었다. 또한, 이를 이용하여 입력에 따른 출력을 정확히 예측하였다. 그러므로, 폐회로 제어를 할 수 있는 촉각재환장치의 출력을 시뮬레이터를 이용하여 예측하고 그 입력신호를 가하는 방법을 이용하여 출력을 조정할 수 있다.

이상의 실험과 시뮬레이션을 수행한 결과 자석 반발력의 비선형성의 영향은 입력이 급격히 변화하는 경우에 발생하며 이는 입력신호의 구배를 조정함으로써 피할 수 있음을 확인하였다. 또한, 본 연구에서 개발된 촉각재환장치는 출력 힘을 선형적으로 제어할 수 있었다. 본 연구의 촉각재환장치는 힘을 끝단에서 측정하여 제어할 수 없으므로 시뮬레이터를 이용하여 출력 힘을 예측하여 입력을 정하고 그 특성을 검증하여 힘의 안정된 제어가 가능하였다.

V. 결론

본 연구에서는 원격지에 있는 로봇트 팔의 끝단과 작업대상물 사이의 접촉에 의한 촉각정보를 중앙제어실에 있는 조작자에게 전달하여 더욱 정교하고 효과적인 작업을 할 수 있도록 하는 원격조종로봇용 촉각재환장치를 개발하였다. 기존에는 앞에 언급한 5개의 방법 즉, 시각표현방식, 공압자극방식, 진동자극방식, 전기자극방식, 신경자극방식이 존재한다. 위의 각 방법은 힘을 다른 형태의 정보로 변환하여 전달하는 한계를 가지며, 대부분의 경우에는 손가락 한개당 한개의 텍터만을 장착할 수 밖에 없다. 이 경우 사람의 촉각 수용기의 특성을 만족시켜 조작자에게 원격지의 현장감을 진할 수 없다.

본 연구에서 개발, 해석된 촉각재환장치는 자석의 반발력으로 구동된다. 전자석과 영구자석을 배치하고, 두 자석사이

의 반발력을 조정함으로써, 연속적인 제어가 가능하도록 메카니즘을 구성하였다. 촉각쾌환장치의 경우 손가락의 표면에 배치하여야 하므로 크기가 작아야 한다. 따라서 촉각쾌환장치의 어레이형 배치가 가능하도록 하였고 각 장치를 연속적이고 독립적으로 제어하는 것이 가능하도록 하였다. 자석의 반발력은 맥스웰의 용력방법으로 부터 유도하였다. 식의 유도과정에서 자하의 개념을 도입하였다. 반발력 식은 변위에 대한 비선형 식이 된다. 그러므로, 변위가 고정되어 있지 않으면 비선형특성을 나타낸다. 이 비선형 특성에 대하여 정현파 입력 실험을 수행하였다. 정현파 입력 신호에 의한 실험을 수행한 결과 계의 비선형성은 변위가 크지 않고 입력의 변화 정도가 크지 않은 경우에 대하여는 무시할 수 있음을 확인하였다. 또한 반발력 식은 형상과 물성치에 대한 상수항을 가진다. 자하를 도입하는 과정에서 가정된 자속의 균일성 등을 만족하기 위하여 물성치 즉 영구자석의 자속밀도 B와 전자석 코아의 투자율 μ 의 곱을 실험을 통하여 구하였다. 실험결과 선형입력에 대한 이 물성치의 곱은 적당함을 확인하였다.

자석반발력을 이용한 촉각쾌환장치의 특성에 대한 실험을 수행한 결과 계는 계단입력에 대하여 1차계의 특성을 보였다. 또한, 선형입력이 주어지고 변위가 제한되어있는 경우, 선형성 오차는 3%이하 이어서 변위가 제한된 경우 선형적인 힘의 조정이 가능함을 알 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 개발된 촉각쾌환장치의 출력을 선형적으로 조정할 수 있다.

본 연구에서 제안된 자석의 반발력 식을 이용하여 촉각쾌환장치의 시뮬레이터를 구성하고 응답을 실험과 비교한 결과 시뮬레이터가 계의 특성을 잘 표현함을 확인하였다. 실제 촉각쾌환장치를 사용하는 경우에는 출력되는 힘을 페루프 제어하는 것이 곤란하므로 이 시뮬레이터를 이용하여 출력되는 힘을 측정하고 제어할 수 있도록 할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 촉각쾌환장치는 다음의 특징을 가짐을 알 수 있다. 첫째, 기존의 촉각쾌환장치는 공압, 형상기억합금 또는 압전소자를 사용하는데 비하여 구동방식이 자석의 반발력을 이용한다. 둘째, 기존의 방식은 진동, 압력 혹은 전기자극등의 방식으로 촉각 정보를 전달하는데 비하여 촉각정보를 직접 힘의 형태로 전달한다. 셋째, 기존의 상용화된 촉각쾌환장치는 손가락마디당 한개의 텍터만이 배열 가능했지만 본 연구의 촉각쾌환장치는 어레이형의 배치가

가능하도록 크기가 작다. 셋째, 연속적인 힘의 제어가 가능하므로 접촉의 유무와 더불어 접촉되는 정도의 정보도 전달할 수 있다. 다섯째, 전기적신호를 직접 입력으로 사용하므로 전기적 제어가 용이하다.

참고문헌

- [1] T. B. Sheridan, "Telerobotics," *Automatica*, vol. 25, no. 4, pp. 487-507, 1989.
- [2] 허훈, 김희국, "첨단원격조종시스템의 개발현황 및 활용에 관하여," 대한기계학회지, 제31권, 제7호, 590-603, 1991.
- [3] Karun B. Shimoga, "Finger force and touch feedback issues in dexterous telemanipulation," *CIRSSE*, pp. 159-178, 1992.
- [4] M. S. Sanders, E. J. McCormick, *Human Factors in Engineering and Design*, McGraw-Hill, 1987.
- [5] R. A. Grupen, T. C. Henderson, T. D. McCammon, "A survey of general purpose manipulators," *Int. J. Robotics Research*, vol. 8, no. 1, pp. 38-62, 1989.
- [6] Robert J. Stone, "Advanced human-system interfaces for teletrobotics using virtual reality & telepresence technologies," *ICAR'91*, pp. 168-173, 1991.
- [7] J. D. Foley, "Interfaces for advanced computing," *Scientific American*, pp. 127-135, 1987.
- [8] B. T. Tan, "Sensor application to space-suit glove," in J. G. Webster(Ed.), *Tactile sensors for robotics and medicine*, John Wiley and Sons, NY, pp. 331-340, 1988.
- [9] Ken Pimentelk & Kevin Teixeira, *Virtual Reality: through the new looking glass*, Windcrest/McGraw-Hill, 1992.
- [10] William F. Ganong, *Review of Medical Physiology*, Prentice-Hall, 1989.
- [11] 장남섭외, 인체생리학, 수문사 1992.
- [12] Takashi Onuki, et al., "Calculation of electromagnetic forces in magnetic levitation system by 3-D magnetic field analysis," *Electromagnetic Forces and Applications* (T. Tani & T. Takagi (eds.)), Elsevier Science Publishers B. V., 1992.



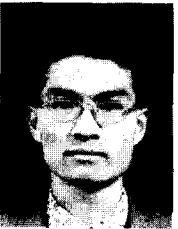
안 인 석

1987년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1989). 1989~현재 삼성 전자 생산기술센터 선임연구원. 1991~현재 동대학원 박사과정. 주관심분야는 공장자동화, 로봇응용시스템, 원격제어 로봇.



문 용 모

1993년 연세대 공대 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1995). 1995년~1996년 KIST 기전연구부 연구원. 1996년~현재 미국 미시건대 기계공학과 박사과정. 주관심 분야는 로봇제어, 원격제어 로봇.



이 정 훈

1995년 한양대 공대 기계공학과 졸업. 1995년~현재 동대학원 기계설계학과 석사과정, KIST 학생연구원. 주관심분야는 Virtual Reality, Robotics & Control.



박 종 오

1978년 연세대 공대 기계공학과 졸업. 1981년 KAIST 기계공학과(석사). 1987년 독일 Stuttgart대 기계공학과(박사). 1987년~현재 KIST 기전연구부 책임연구원. 주관심분야는 지능형 가공/조립시스템, 서비스로봇, 원격제어로봇.



이 종 원

1976년 미국 미네소타대 기계공학과(박사). 1988년~1991년 과학기술처 연구개발조정실 기계연구조정관. 1991년~1993년 동연구개발조정실장. 1995년~현재 KIST 휴먼로봇연구센터 센터장. 주관심 분야는 CAD/CAM, Robotics & Control, Rapid Prototyping.

우 광 방

제어·자동화·시스템공학회 논문지 제1권 제1호 참조.