

# 모터와 브레이크의 동시구현에 기초한 다양한 햅틱효과의 제시

## Various Haptic Effects Based on Simultaneous Actuation of Motors and Brakes

권 태 범, 송 재 복\*  
(Tae-Bum Kwon and Jae-Bok Song)

**Abstract :** In the virtual environment, force feedback to the human operator makes virtual experiences more realistic. To ensure the safe operation and enhance the haptic feeling, stability should be guaranteed. Both motors and brakes are commonly used for haptic devices. Motors can generate a torque in any direction, but they can make the system active during operation, thus leading to instability. Brakes can generate a torque only against their rotation, but they dissipate energy during operation, which makes the system intrinsically stable. Consequently, motors and brakes are complementing each other. In this research, a two degree-of-freedom (DOF) haptic device equipped with motors and brakes has been developed to provide better haptic effects. Each DOF is actuated by a pair of motor and brake. Modeling of the environment and the control method are needed to utilize both actuators. Among various haptic effects, contact with the virtual wall, representation of friction and representation of plastic deformation have been investigated extensively in this paper. It is shown that the hybrid haptic device is more suited to some applications than the motor-based haptic device.

**Keywords :** haptics, hybrid haptic devices, motors, brakes, virtual wall

### I. 서론

인간의 오감 중 시각 및 청각 정보의 구현은 오래 전부터 연구되어 왔고 실생활에 많이 사용되고 있지만, 다른 감각에 대한 연구는 아직 실용화 수준에 이르지 못하였다. 이 중에서 촉감이나 역감의 전달 및 구현에 관하여 연구하는 분야가 햅틱스(haptics)이다. 햅틱장치는 가상환경이나 원거리에 있는 환경과 사용자가 상호 작용할 때 사용자에게 촉감이나 힘의 정보를 전달하여 주는 장치이다. 손가락 끝에 촉감을 전달하는 작은 장치부터, 사용자의 전신에 운동감을 전달하는 큰 장치까지 크거나 용도별로 다양한 종류가 있다. 사용하는 액츄에이터도 촉각제시에 사용할 정도의 작은 힘을 발생시키는 고분자 액츄에이터나 형상기억합금 액츄에이터로부터, 탑승자에게 운동감을 제시하는 모션 베이스에 사용할 수 있는 고용량 모터나 유공압 액츄에이터까지 다양한 종류가 있다. 그러나 대부분의 햅틱장치는 모터 또는 브레이크를 주동력원으로 사용한다.

모터를 사용하면 원하는 크기의 힘을 원하는 방향으로 출력할 수 있으며, 응답성능 또한 우수하다. 그러나 제어기의 오류나 기구부의 오작동으로 인해 원하지 않는 큰 힘이 발생할 수 있고, 여러 요인에 의해 불안정한 상태가 발생할 수 있다[1]. 반면에, 브레이크는 사람이 가하는 힘에 대한 반작용력만을 발생하는 수동적인 액츄에이터이기 때문에 항상 안정하며, 대부분의 경우에 단위중량당 발생토크도 모터에 비해서 크다. 그러나 원하는 크기의 힘을 원하는 방향으로 출력할 수 없기 때문에 제어가 어렵고 [2], 일반적으로 응답이 모터에 비해서 느리기 때문에 빠른 응답이 필요한 햅틱효과를 구현할 때에는 문제를 야기한다.

이전의 햅틱장치는 모터나 브레이크 중 용도에 적합한 하나의 액츄에이터만을 사용하여 구성되었지만, 두 개의 액츄에이터를 함께 사용한다면 각각의 특징을 혼합하여 더 좋은 성능을 얻을 수 있을 것이다. 이에 대한 연구는 1자유도 햅틱장치를 통하여 수행된 바가 있었다[3]. 이 연구에서는 구체적인 구현방법에 대해서는 설명되어 있지 않지만, 모터와 브레이크 중 상황에 적합한 것을 사용하여 몇 가지 햅틱효과를 구현하였다. 가장 중요한 햅틱효과 중 하나인 가상벽 충돌을 비롯한 여러 효과를 모터만을 사용한 경우와 브레이크만을 사용한 경우로 나누어 실험하였다. 그러나 이는 두 액츄에이터를 개별적으로 사용한 것으로 진정한 의미의 하이브리드 시스템의 제어라 하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 두 종류의 액츄에이터를 하나의 축에 직렬로 장착한 하이브리드 햅틱장치를 개발하여, 두 액츄에이터를 동시에 구동하는 하이브리드 시스템의 제어에 대한 연구를 수행하였다.

### II. 하이브리드 햅틱장치

본 연구에서 사용하는 하이브리드 햅틱장치(Hybrid Haptic Device, HHD)는 사람의 팔에 힘을 전달하는 범용 햅틱장치로 본 연구실에서 개발하였다. 그림 1은 기구의 구조에 대한 설명이고, 그림 2는 하이브리드 햅틱장치의 사진이다. 1번 모터와 1번 브레이크에 풀리 1이 커플링으로 연결되어 있고, 풀리 1과 풀리 3이 와이어 구동방식(tendon-driven)으로 연결되어 있다. 동일한 방식으로, 2번 모터와 2번 브레이크의 토크가 풀리 4에 전해져서 동력이 직접 전달되는 2개의 관절  $J_1$ ,  $J_2$ 를 형성한다.  $J_1$ 과  $J_2$  사이를 길이가 0인 링크 0으로 하여, 링크 0과 그림의 링크 1-4로 5절 링크를 구성하였다. 자코비안을 이용한 기구학 계산을 통하여 엔드이펙터의 위치와 액츄에이터의 출력이 엔드이펙터에서 생성하는 힘을 계산할 수 있다.

또한, 링크와 핸들 사이에 토크센서를 설치하여 사용자와

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 5. 12., 채택확정 : 2005. 4. 13.

권태범, 송재복 : 고려대학교 기계공학과

(haptics@korea.ac.kr/jbsong@korea.ac.kr)

※ 본 연구는 고려대학교 교내특별연구비의 지원으로 수행되었음.

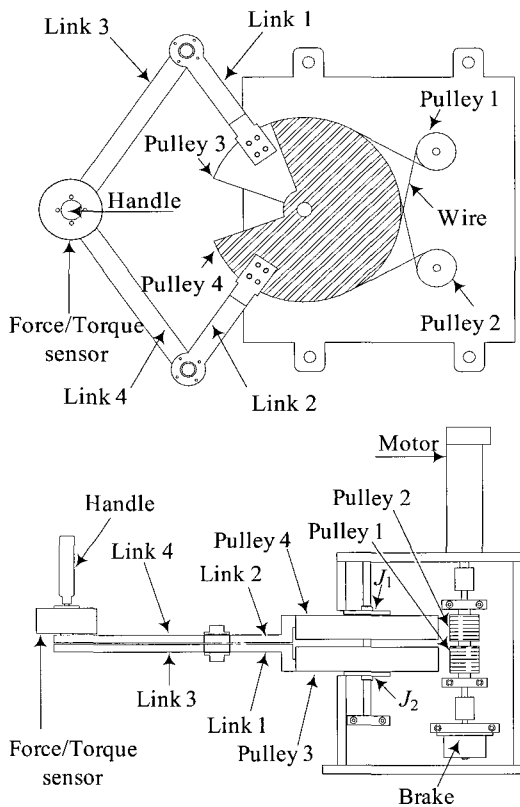


그림 1. 하이브리드 햅틱장치의 기본 구조.  
Fig. 1. Basic configuration of hybrid haptic device.

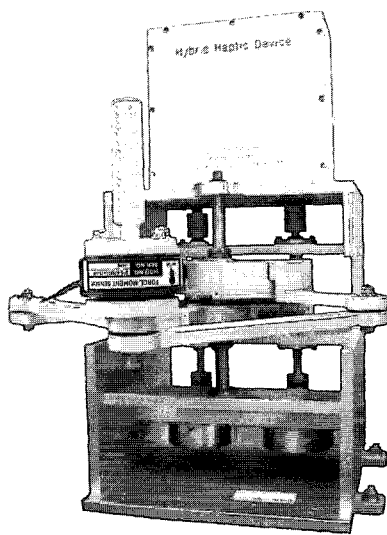


그림 2. 하이브리드 햅틱장치의 모습.  
Fig. 2. Overall view of hybrid haptic device.

햅틱장치 사이에 작용하는 힘을 직접 측정할 수 있다. 이를 이용하면 사용자가 햅틱장치에 가하는 힘의 방향과 크기를 알 수 있고, 이는 곧 사용자가 현재 의도하고 있는 운동의 방향이라 할 수 있다. 햅틱장치에서 브레이크를 적절하게 사용하기 위해서는 운동 방향을 아는 것이 중요한데, 이는 기본적으로 모터나 브레이크에 부착된 엔코더를 통하여 알 수 있다. 그러나 이 경우 잡음이나 엔코더 펄스를 계수하는 셈

플링 주기 등의 영향으로 운동의 방향을 잘못 계산할 수 있다. 이 경우 엔코더로 측정된 운동의 방향과 토크센서로 측정된 사용자가 의도하는 운동의 방향을 적절히 해석하면, 햅틱장치에서 브레이크를 효과적으로 사용할 수 있다.

성인 남자가 평균적으로 발생시킬 수 있는 힘은 어깨는 100N 이상, 팔꿈치는 80N 이상이다[4]. 여기에 관성까지 고려한다면 HHD는 상당히 큰 힘을 발생하여야 한다. 이전의 햅틱장치에 관한 여러 문헌에서 실험조건으로 제시한 작업 공간이나 동작속도에 비해서 큰 범위에서 장치가 동작하기 위해서는 액추에이터의 출력 또한 커야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서 Maxon사의 120W BLDC 모터를 사용하였다. 이 모터는 모터축에서 약 0.298Nm, 감속기축에서 약 4.44Nm의 최대출력을 얻을 수 있으며, 5:1의 직경비를 갖는 2개의 풀리를 통해 길이가 200mm인 링크의 끝단에 전달되는 최대 힘은 약 111N이 된다.

한편, 브레이크로는 Ogura사의 입자 브레이크(particle brake)인 OPB-40N 모델을 사용하였다. 최대토크는 약 4Nm이고, 전압입력이 없더라도 축을 회전시키는 데 약 0.08Nm의 토크가 필요하다. 이 브레이크의 가장 큰 단점은 취구부의 방향을 임의로 할 수 없다는 점이다. 축의 방향이 지면에 수평이 되게 사용하여야 브레이크가 제공하는 최대토크를 얻을 수 있는데, 설계된 HHD에서는 브레이크가 수직하게 설치되므로 최대 발생토크가 약 2Nm 정도로 줄어든 채로 사용하였다. 또한, 시정수가 50ms로 모터의 7ms에 비해서 상대적으로 상당히 느리다는 것도 큰 단점이다. 햅틱장치에서는 충돌과 같이 순간적인 상황의 표현이 많으므로 브레이크의 응답시간이 매우 중요한 요소이다.

### III. 하이브리드 시스템 제어

#### 1. 기본 개념

브레이크를 햅틱장치에 사용하는 것은 일반적으로 어렵다. 이는 브레이크는 수동적인 액추에이터이기 때문에 원하는 방향으로 힘을 제공하지 못하고, 사용자가 가하는 힘에 반대되는 방향으로만 힘을 발생할 수 있기 때문이다. 예를 들어, 하나의 축은 모터로 제어하고 다른 축은 브레이크로 제어하여 스프링으로 모델링되는 가상벽을 표현하는 경우, 그림 3(a)와 같이 사용자가 가상벽의 반력보다 큰 힘으로 가상벽을 압축할 때는 모터 출력  $F_m$ 과 브레이크 출력  $F_b$ 가 가상벽에 수직한 방향으로 원하는 합력  $F$ 을 생성해낼 수 있다. 이는 브레이크의 출력인  $F_b$ 의 방향이 운동(motion)의 방향과 반대이기 때문으로 가능한 것으로,  $xy$  평면에서 운동의 방향 벡터와 브레이크 출력의 방향 벡터의 내적이 음수인 경우에 해당한다. 그러나 그림 3(b)와 같이 가상벽의 반력이 사용자가 가하는 힘보다 커서 엔드이펙터가 가상벽을 빠져 나오는 방향으로 운동할 때는 브레이크 출력과 모터 출력의 합력이 가상벽과 정확히 수직 방향으로 작용하지는 않는다. 이는 브레이크가 사용자가 가하는 힘에 대한 반력만 제시할 수 있기 때문에  $F_{b,desired}$ 와 같은 원하는 방향의 힘이 발생하지 않고, 사용자가 가하는 힘에 따라  $F_{b,actual}$ 과 같은 힘이 발생하기 때문이다. 따라서 가상벽과 수직인  $F_{r,desired}$ 의 힘이 아닌  $F_{r,actual}$ 이라는 힘이 발생하게 되어 가상벽과 수직이 아닌 방향으로 운

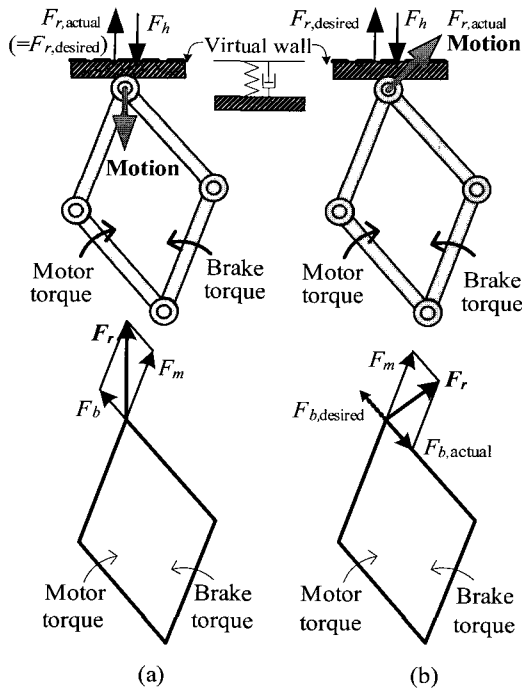


그림 3. 모터와 브레이크가 동시에 구현되는 두 가지 경우. (a) 실제 반력이 원하는 반력과 동일한 경우, (b) 실제 반력이 원하는 반력과 다른 경우.

Fig. 3. Two different cases when both brake and motor are simultaneously activated. (a) actual resultant force = desired resultant force, and (b) actual resultant force  $\neq$  desired resultant force.

동을 한다. 이런 현상은 링크의 형상(configuration), 즉 관절의 각도와 가상벽의 위치에 따라 달라질 수 있으므로 관절공간에서 기술하는 것이 쉽지만, 궁극적으로는 실제 가상벽과의 접촉은 직교공간에서 이루어지므로 이 공간상에서 엔드이펙터의 운동과 힘 간의 관계를 조사하는 것이 필요하다.

따라서 브레이크 토크를 제어할 때에는 항상 운동 방향을 고려하여야 한다. 만약, 출력하고자 하는 힘의 방향이 운동 방향과 반대라면 브레이크는 적절한 방향으로 힘을 출력할 수 있다. 햅틱효과를 표현하는 많은 경우에 액츄에이터는 운동과 반대방향으로 힘을 출력하기 때문에, 운동과 반대방향인 힘을 출력할 때는 모터와 브레이크를 동시에 사용하고, 그 이외의 경우에는 모터만 사용하는 방식으로 하이브리드 시스템 제어를 수행할 수 있다.

IV. 하이브리드 시스템 제어의 결과 및 분석

1. 가상벽 충돌

가상환경에서 어떤 물체와의 충돌을 나타내는 가상벽 충돌은 가장 기본적인 햅틱효과이다. 그러나 시간지연이나 액츄에이터 성능의 한계 등으로 인해 햅틱장치로 표현한 가상벽은 실제 벽과 많은 차이가 있다. 또한, 제어방법에 따라 특정한 조건에서 시스템이 불안정하게 되는 경우가 발생할 수도 있다. 따라서 안정성을 유지하면서 실제 벽과 최대한 유사하도록 제어하는 것이 중요하다.

일반적으로 모터나 브레이크 중 한 종류의 액츄에이터만

을 사용하여 가상벽을 표현할 수 있다. 브레이크만을 사용하는 경우는 엔드이펙터가 가상벽을 침투하였을 때 브레이크를 작동시켜서 더 이상 침투하지 못하도록 하여 가상벽을 구현한다. 브레이크로 순간적으로 강하게 잡아준다면 사용자가 받는 느낌이 실제 벽과 흡사할 것이고, 브레이크가 수동적이므로 시스템도 안정할 것이다. 그러나 브레이크의 응답시간이 길다면 상당한 깊이를 침투한 후 엔드이펙터가 정지하게 된다. 또한, 브레이크는 사용자가 가한 힘에 대한 반력만을 발생시킬 수 있으므로, 이미 침투한 엔드이펙터를 표면으로 내미는 힘을 발생시킬 수는 없다. HHD에 장착된 브레이크는 응답시간이 다소 길기 때문에 브레이크만으로 가상벽을 표현하면 그다지 우수한 성능을 얻을 수 없었다.

모터만을 사용하는 경우는 일반적으로 가상벽을 스프링과 감쇠기로 모델링하는데, 이 때 주된 반력은 스프링 계수와 침투깊이의 곱에 해당하는 힘으로 구현한다. 일단 침투가 발생하면 침투깊이가 커지면서 속도가 줄어들고 모터 출력은 증가하게 되어, 그 힘으로 엔드이펙터가 가상벽 표면으로 밀려나오게 되면서 사용자는 가상벽을 느끼게 된다. 모터의 응답시간이 브레이크에 비해서 상대적으로 빠르므로 더 현실감을 느낄 수 있다. 그러나 침투깊이가 커질수록 모터는 더 큰 힘을 발생시키고, 엔드이펙터가 벽 밖으로 튀는 현상이 발생하기도 한다. 더욱이 더 강한 벽을 표현하기 위해서 가상벽의 강성을 높이면 시스템이 불안정해질 가능성 또한 크게 증가된다.

모터만 사용한 시스템에서 이런 불안정성에 대처하기 위해서 여러 기법이 연구되었다. PO/PC (Passivity Observer/Passivity Control)나 energy bounding algorithm 같은 방법은 시스템의 에너지 입출력을 조절하여 시스템이 passivity 조건을 만족하도록 만들어 시스템을 안정화 시킨다. [5,6] 그러나 PO/PC의 경우 햅틱장치가 출력하는 힘은 200N정도이지만, 가상벽에 충돌하는 속도는 150mm/s 이하에서 실험하였기 때문에 사용자가 가상벽에 강하게 충돌하였을 경우에 대한 결과를 얻을 수 없었다. 만약, energy bounding algorithm을 사용하여 기구의 물리적인 감쇠계수만 적절하게 선정한다면 액츄에이터의 출력과 충돌속도에 관계 없이 항상 안정한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이런 기법을 사용한다 하더라도 빠른 충돌속도를 가지고 모터의 최대 출력 이상의 큰 힘으로 가상벽에 충돌한다면, 초기에 크게 튀어서 현실감을 손상시키는 현상은 피할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 브레이크 출력과 모터 출력을 동시에 사용하여 사용자가 실제로 가하는 힘이 100N 이상인 경우에도 초기에 크게 튀는 현상 없이 가상벽을 현실적으로 표현하도록 하였다.

모터를 사용하여 스프링이 아닌 감쇠기만으로 가상벽을 구현할 수도 있는데, 이 때는 반력을 속도의 함수로 계산한다. 따라서 가상벽에 충돌하는 순간은 속도가 크기 때문에 반력이 크고, 속도가 감소하면서 반력도 작아지게 된다. 충돌하는 순간 큰 힘을 받기 때문에 또렷한 느낌을 얻을 수 있지만, 반력으로 속도가 줄어든 후에는 사용자가 가하는 힘을 이기지 못하여 계속 벽을 파고들게 된다. Rosenberg는 스프링으로 모델링한 가상벽과 감쇠기로 모델링한 가상벽에 대한 사용자의 느낌을 통계적인 방법을 사용하여 연구하였다[7].

하지만 작업공간이 7cm 정도이고, 가상벽의 강성도 최대 7N/mm인 조건에서 연구하였다는 한계가 있다. 반면에, 하이브리드 햅틱장치는 사람의 팔과 상호작용을 하기 때문에 순간적으로 100N정도의 큰 힘도 취급하여야 한다. 따라서 본 연구는 1000mm/s 이상의 속도로 100N 정도의 큰 힘으로 가상벽에 충돌할 때 모터와 브레이크를 동시에 사용하여 보다 더 사실적인 느낌을 표현하는 기법을 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

1.1 하이브리드 시스템으로 가상벽 구현

모터와 브레이크를 함께 사용하는 하이브리드 시스템 제어의 경우 스프링을 이용한 가상벽 모델보다는 감쇠기를 이용한 모델이 적합하다. 즉, 가상벽에 충돌하는 순간 두 개의 축에 각각 연결된 브레이크를 동시에 동작시키면서, 동일한 축에 직렬로 연결된 모터를 사용하여 속도에 따른 감쇠를 구현한다면, 브레이크의 느린 응답을 상대적으로 응답이 신속한 모터출력으로 초기에 보완할 수 있다. 따라서 초기에 브레이크의 응답이 나타나기 전에는 속도에 비례하는 큰 감쇠값이 모터에 의해 발생하게 된다. 시간이 경과하면서 속도가 감소하므로 모터로 표현하는 감쇠값은 작아지게 되지만 브레이크의 출력이 실제로 발생하여 엔드이펙터를 잡아주게 되고, 사용자는 가상벽을 느끼게 된다.

이때, 감쇠기가 선형일 경우에 감쇠계수가 작으면 초기에 큰 힘을 발생시킬 수 없다. 이를 보정하기 위해서 감쇠계수를 크게 하면 초기에 큰 힘을 발생시킬 수 있지만, 속도가 작아진 후에도 큰 힘이 계속 발생하여 시스템이 불안정해진다. 따라서 감쇠기를 선형이 아닌 비선형으로 설계하여 큰 속도에선 출력을 보다 크게 하고, 작은 속도에선 보다 작게 하였다. 실제로 계수가 큰 감쇠기로 모델링한 가상벽과 충돌하는 경우에는 불안정한 상태가 발생하는데, 이 때 관찰되는 고주파 진동은 대부분이 20~40mm/s의 속도를 갖는다. HHD의 출력은 링크의 형상에 따라서 다르지만, 항상 최대출력이 약 100N 정도이다. 따라서 그림 4(c)와 같이 40mm/s에서 약 100N의 힘이 나오면서 그 이하에서 힘이 급격히 줄어들도록 감쇠계수를 설계하였다. 이 경우 속도가 40mm/s가 넘는 경우는 아주 큰 힘이 출력되어야 하지만 액추에이터의 출력에 한계가 있기 때문에 햅틱 장치의 출력은 포화되어 약 100N 정도인 최대출력이 나오게 된다. 본 실험에 사용한 감쇠기는  $F = 0.0016 v^3$  ( $F$ : N,  $v$ : mm/s)의 힘을 출력하는데 이는 속도가 40mm/s일 때 100N의 힘이 출력되는 감쇠기 중 실험적으로 찾은 것이다.

1.2 실험 결과

가상벽을 표현하기 위해 모터와 브레이크를 동시에 사용하는 것과 모터만 사용하는 것을 비교하는 실험을 수행하였다. 모터만을 사용한 경우는 가상벽을 강성이 150N/mm인 스프링으로 모델링하였고, 모터와 브레이크를 동시에 사용한 경우는 가상벽을 1.1절에서 설명한 모델로 구현하였다. 각각의 방법으로 표현한 가상벽에 사용자가 엔드이펙터를 약하게 충돌시킬 때와 강하게 충돌시킬 때의 안전성과 성능을 관찰하였다. 두 방법의 차이를 비교하기 위해서는 동일한 가상벽 모델로 실험하여야 하지만, 모터와 브레이크의 특성이 근본적으로 다르기 때문에 각각에 맞는 모델로 실험을 수행하였다.

그림 5는 약 250mm/s의 속도로 가상벽에 접근하여 충돌순간에 약 20~30N 정도의 힘을 느낄 정도로 약하게 충돌한 경우의 실험결과이다. 실험 결과에서 힘은 햅틱장치가 출력하는 힘이 아니라, 엔드이펙터에 부착되어 있는 토크센서로 측정된 힘으로, 이는 사용자가 햅틱 장치에 가한 힘에 해당한다. 모터를 사용한 경우는 약 0.11초 정도의 과도응답 기간 동안에 바운스 현상이 있지만, 정상상태 오차가 아주 작다. 하이브리드 시스템을 사용한 경우에도 과도응답이 약 0.11초 정도 지속되지만, 바운스 현상은 없다. 하지만 정상상태 오차가 약 1.2mm 정도로 크고, 0.12~0.2초에서 속도가 감소하면서 느리게 운동하는 부분이 있어서 약간 폭신한 느낌을 얻는다. 그림 5(b)의 0.8초 부근의 상황은 사용자가 가상벽 안에 있는 엔드이펙터를 밖으로 빼내기 위해서 힘을 반대 방향으로 주는 순간으로, 마찰 때문에 아직 운동이 일어나기 전이어서 변위는 변하지 않았지만 힘은 음의 값을 가진다.

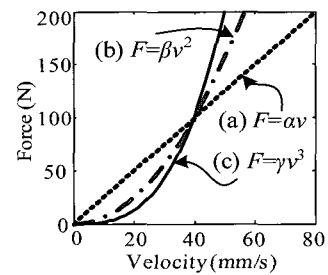


그림 4. 실험에 사용한 댐퍼. (a) 선형 댐퍼, (b)(c) 비선형 댐퍼.  
Fig. 4. Different dampers used in experiments. (a) linear damper, and (b)(c) non-linear dampers.

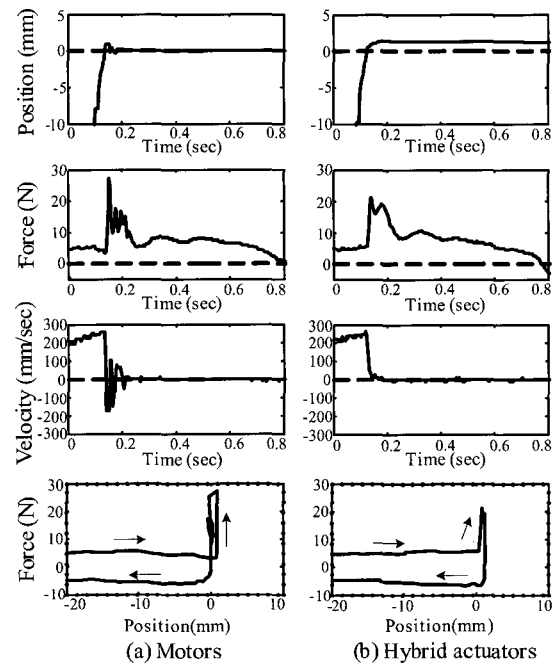


그림 5. 단단한 벽에 저속으로 충돌한 실험 결과. (a) 모터만 작동, (b) 모터와 브레이크 동시에 작동.  
Fig. 5. Experimental results for contact with hard wall at low velocity. (a) only motors in action, and (b) hybrid actuators in action.

그림 6는 약 1500mm/s의 속도로 가상벽에 접근하여 충돌 순간에 약 100N 이상의 힘을 느낄 정도로 강하게 충돌한 경우의 실험결과이다. 모터를 사용한 경우는 불안정한 진동이 발생하거나 심하면 튀는 현상이 발생한다. 반면에, 하이브리드 시스템으로 구현한 경우에는 진동이 없어서 안정하지만, 정상상태 오차가 20mm 정도 발생하게 된다. 이는 응답속도가 느린 브레이크가 미처 동작하기 전에 빠른 속도에 의해서 침투가 크게 일어나기 때문이다. 이 경우 정확한 가상벽의 위치를 제공하지는 못 하지만, 모터 사용시와 같은 불안정한 진동이나 크게 튀는 현상 없이 가상벽과 충돌한다는 느낌을 현실감 있게 전달할 수 있게 된다.

2. 마찰

그림 7(a)에서 보듯이 두 물체가 접촉을 유지한 채로 움직이는 경우에 이들 사이에는 마찰이 존재하며, 이 때의 마찰력은 정지마찰력과 운동마찰력으로 나눌 수 있다. HHD를 사용하여 이러한 마찰현상을 표현하기 위하여 마찰면을 설정하고 마찰면과 접촉하고 있는 가상의 물체를 사람이 미는 경우를 구현하였다. 마찰면과 수직인 방향의 힘을 토크센서로 측정하여 수직항력을 구하고, 마찰계수를 곱하여 마찰력을 계산한다. 마찰면을 가상벽으로 표현한 경우에 가상벽의 반력과 마찰력을 모두 모터로 구현한 경우와 가상벽의 반력은 모터로 구현하고, 동시에 동일한 축에 직렬로 연결된 브레이크로 마찰력을 구현한 경우를 실험하였다. 실험결과와 그림 7(b)와 같은 이상적인 외력-마찰력관계를 비교하였다.

2.1 실험 방법

사용자가 가하는 힘인  $F_h$ 의 y방향 성분인  $F_{hy}$ 를 토크센서로 측정하여 수직항력(normal force)  $N$ 을 구하고, 이 값에 마찰계수  $\mu$ 를 곱하여 마찰력  $F_f$ 를 계산한다. 모터를 사용하여 마찰력을 구현할 경우 수직항력과 마찰계수의 곱으로 구한 마찰력이 사용자가 가하는 힘의 x방향 성분인  $F_{hx}$ 보다 클 경우 마찰력에 의한 능동적인 운동이 발생하므로, 마찰력을  $F_{hx}$ 보다 작거나 같게 유지하여 모터에 의한 능동적인 힘이 발생하지 않도록 주의하여야 한다. 브레이크의 경우는 발생하는 힘 자체가 수동적이기 때문에, 수직항력과 마찰계수로 계산한 힘을 출력하면 된다. 그러나 브레이크에서 출력하는 힘은 방향성이 없기 때문에 사용자가 가하는 힘의 방향을 판단하여 브레이크를 제어하여야 한다.

2.2 실험결과

마찰을 표현하기 위해서 모터만 사용한 경우와 모터와 브레이크를 동시에 사용한 경우를 비교하는 실험을 수행하였다. 모터만 사용한 경우는 마찰면의 수직항력과 마찰력의 합력에 해당하는 힘을 모터로 구현하였고, 모터와 브레이크를 함께 사용하는 경우는 마찰면의 반력은 모터로 구현하고 마찰력은 브레이크로 구현하였다. 각각의 방법으로 표현한 마찰면에 엔드이펙터를 약하게 누르고 움직일 때와 강하게 누르고 움직일 때의 안정성과 성능을 관찰하였다.

그림 9은 수직항력이 약 25N보다 작은 경우에 대한 실험 결과이다. 두 경우 모두 기구 자체의 마찰 등의 이유로 계산된 힘(computed force)과 측정된 힘(measured force)이 완전히 일치하지는 않았다. 그러나 측정된 힘과 x방향 변위를 관찰하면 그림 7(b)와 같이 정지마찰력이 증가하다가 어느 순간

에 크기가 감소하면서 운동마찰력으로 변화하고 있음을 관찰할 수 있다.

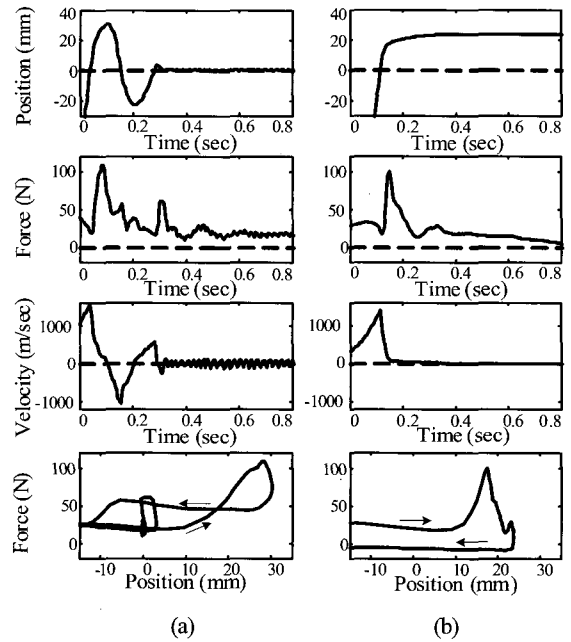


그림 6. 단단한 벽에 고속으로 충돌한 실험 결과. (a) 모터만 작동, (b) 모터와 브레이크 동시에 작동.

Fig. 6. Experimental results for contact with hard wall at high velocity. (a) only motors in action, and (b) hybrid actuators in action.

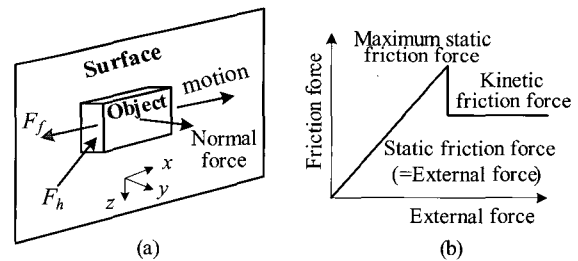


그림 7. 마찰효과 표현. (a) 마찰 모델, (b) 외력과 마찰력 사이의 관계.

Fig. 7. Representation of friction effect. (a) friction model, (b) relationship between external force and friction force.

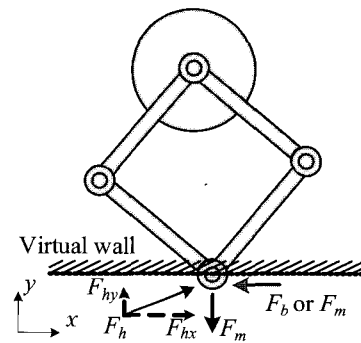


그림 8. 구현하려는 시스템에 작용하는 힘. Fig. 8. Forces acting on the system to represent friction.

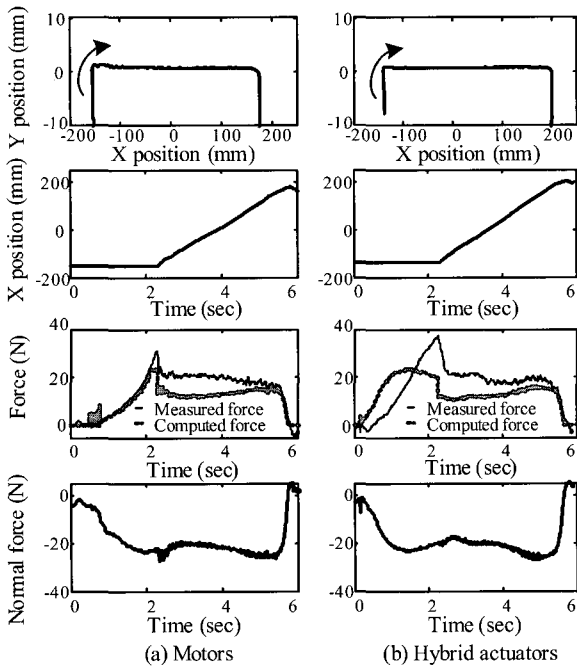


그림 9. 수직항력이 작은 경우의 마찰실험 결과. (a) 모터만 작동, (b) 모터와 브레이크 동시에 작동.  
 Fig. 9. Results for friction experiment with small normal force. (a) only motors in action, and (b) hybrid actuators in action.

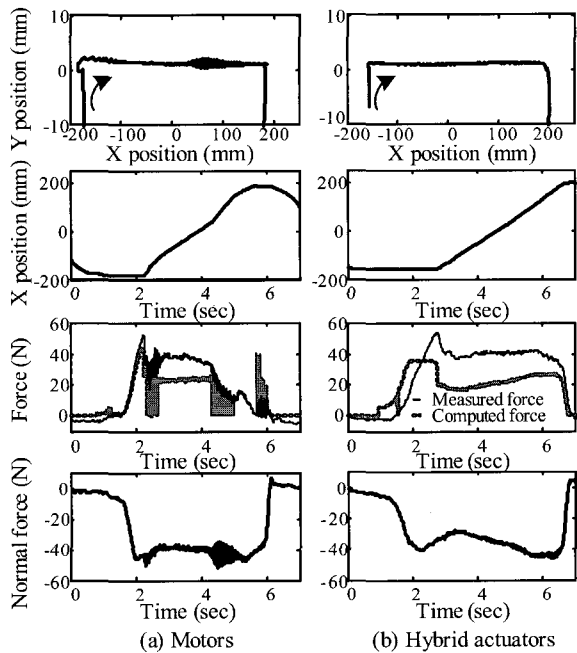


그림 10. 수직항력이 큰 경우의 마찰실험 결과. (a) 모터만 작동, (b) 모터와 브레이크 동시에 작동.  
 Fig. 10. Results for friction experiment with large normal force. (a) only motors in action, and (b) hybrid actuators in action.

그림 10는 수직항력이 약 40N 이상으로 큰 경우에 대한 실험결과이다. 모터만 사용한 경우는 그림 10(a)에서와 같이 가상벽에 수직한 반력과 평행한 반력을 모두 모터로 표현하기 때문에 불안정한 현상이 발생할 가능성이 더 크다. 반면

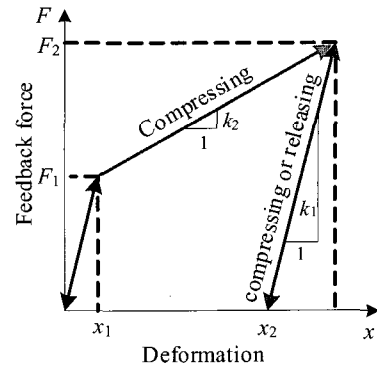


그림 11. 이상화된 탄성-소성 모델.  
 Fig. 11. Idealized elastic-plastic models.

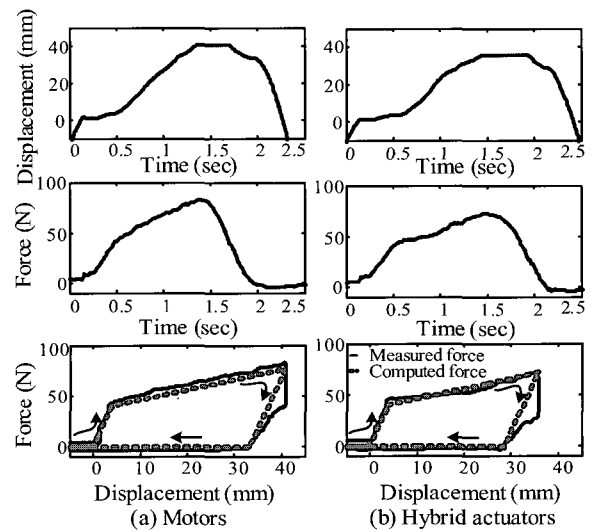


그림 12.  $F_1=40N$ ,  $k_1=10.0N/mm$  and  $k_2=1.0N/mm$ 인 경우의 탄성-소성 변형 실험 결과. (a) 모터만 작동, (b) 모터와 브레이크 동시에 작동.  
 Fig. 12. Experimental results for elastic-plastic deformation with  $F_1=40N$ ,  $k_1=10.0N/mm$  and  $k_2=1.0N/mm$ . (a) only motors in action, and (b) hybrid actuators in action.

에, 하이브리드 시스템으로 구현한 경우에는 모터는 가상벽의 반력만 제공하고 마찰력은 브레이크로 표현하므로, 모터만 사용한 경우에 비해서 훨씬 안정적으로 마찰력을 표현할 수 있다.

3. 소성변형을 하는 가상벽 압축

탄성체를 탄성영역을 벗어나는 범위까지 압축하는 경우나 탄성체가 아닌 물체를 압축하는 경우에 물체는 소성변형을 한다. 이 경우 탄성영역과 소성영역에서의 변형계수가 다른 점과 영구변형이 발생하는 점을 구현하여야 한다. 여러 소성 변형 모델 중에서 그림 11과 같은 이상화된 소성변형 모델을 정하여 실험을 수행하였다.

3.1 실험방법

그림 11과 같은 탄성-소성 모델(elastic-plastic model)의 경우는 처음에 어느 정도의 힘(변위  $x_1$ 에서의 힘  $F_1$ )이 가해질 때까지는 탄성거동을 한다. 즉, 탄성계수  $k_1$ 과 침투깊이로 계산된 반력을 받으며 압축과 방출을 할 수 있다.  $F_1$  이상의 힘이

가해지면, 즉 변위가  $x_1$ 보다 커지면 소성변형이 시작된다. 사용자가 압축을 멈추는 순간의 힘을  $F_2$ 라고 한다면, 이 힘보다 작은 힘을 받는 경우에는 탄성계수  $k_1$ 를 가지고 탄성거동을 한다. 완전히 방출된 후에도  $x_2$ 만큼의 소성변형이 생긴다. 눈이나 모래를 누르는 경우, 캔을 찌그러뜨리는 경우 등이다.

$$F = \begin{cases} k_1 \cdot x, & \text{when } (F_1 = F_2) \& (x \leq x_1) \\ k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot (x - x_1), & \text{when } (F_h \geq F_2) \& (x > x_1) \\ & \text{and } F_2 \text{ is replaced by } F_h. \\ k_1 \cdot (x - x_2), & \text{when } (F_h < F_2) \& (F_1 < F_2) \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $k_1$ 는 탄성변형계수,  $k_2$ 는 소성변형계수,  $x_1$ 는 소성변형이 시작되는 변위,  $x_2$ 는 영구변형의 크기이다.  $F_1$ 는 소성변형이 시작될 때의 반력이고,  $F_2$ 는 사용자가 압축을 멈출 때의 힘인데 초기값은  $F_1$ 으로 정한다.  $F_2$ 가  $F_1$ 과 같고  $x$ 가  $x_1$ 보다 작을 때는 탄성영역에서 압축하는 경우이므로,  $k_1 x$ 에 해당하는 힘을 모터로 출력한다.  $F_h$ 가  $F_2$ 보다 크고  $x$ 가  $x_1$ 보다 클 때는 소성영역에서 압축하는 경우로  $F_2$ 를  $F_h$ 로 계속 바꿔주면서 압축이 멈추는지 확인한다. 모터만을 사용하여 제어한다면  $k_1 x_1 + k_2(x - x_1)$ 에 해당하는 힘을 모터로 출력하고, 하이브리드 시스템 제어를 수행한다면  $k_1 x_1$ 에 해당하는 힘을 모터로 출력하면서  $k_2(x - x_1)$ 에 해당하는 힘을 동시에 브레이크로 출력한다.  $F_h$ 가  $F_2$ 보다 작고  $F_2$ 가  $F_1$ 보다 크다면 탄성영역에서 방출되는 경우이므로, 모터로  $k_1(x - x_2)$ 에 해당하는 힘을 출력한다.

### 3.2 실험결과

변위가 0mm일 때부터  $x_1$ 에 해당하는 4mm일 때까지 탄성 변형을 한 후 4mm부터 소성변형을 하는 것을 확인할 수 있다. 사용자가 압축하는 힘을 줄이면 소성변형이 끝나고 탄성 변형을 하게 된다. 기구의 마찰 때문에 사용자가 힘을 줄이는 순간부터 압축을 푸는 방향으로 움직이지 못하고 어느 정도 힘이 줄어든 때부터 변위가 변하였다. 변위로 계산한 힘(computed force)과 측정된 힘(measured force)이 모두 비슷한 경향을 보여주고 있다.

## V. 결론

높은 강성을 갖는 가상벽과의 충돌을 모터만 사용하여 구현한다면, 충돌 후에 가상벽과 정상상태 오차는 작게 되지만, 정상상태에 도달하기까지 진동 등의 불안정한 상태가 발생하게 된다. 반면에, 하이브리드 시스템으로 구현한 경우에는 진동 등이 없이 항상 안정하지만, 엔드이펙터와 가상벽과의 정상상태 오차가 비교적 크게 된다. 따라서 충돌 후의 변위보다 강하게 충돌하는 느낌을 안정적으로 표현하는 것이 중

요하다면(예를 들어, 권투선수의 펀치) 하이브리드 시스템으로 구현하는 것이 유리하다.

마찰을 표현하는 경우에 사용자가 벽 방향으로 누르는 힘은 항상 변하며, 그에 따른 수직항력 또한 항상 변한다. 따라서 수직항력이 큰 경우에도 안정적으로 마찰을 표현할 수 있는 하이브리드 시스템을 이용한 구현이 더 우수하다. 예를 들어, 벽에 붙어 있거나 책상에 올려져 있는 물체를 미는 경우, 톱질을 하는 경우 등이 있다. 소성변형을 하는 가상벽 압축의 경우는 직접 작동하면서 받은 느낌이나 실험결과를 가지고 하이브리드 시스템으로 구현한 경우와 모터만을 사용하여 구현한 경우의 성능을 비교하기는 어려웠지만, 두 경우 비슷한 결과를 얻었다.

실험을 통하여 고찰한 바와 같이 모든 경우에 하이브리드 시스템의 사용이 장점을 가지는 것은 아니지만, 마찰이나 벽과 강하게 충돌하는 것을 표현할 경우 등에는 장점을 가진다. 따라서 다양한 햅틱효과를 효과적이면서도 안정적으로 표현하기 위해서는 하이브리드 액츄에이터를 장착한 시스템으로 햅틱효과를 구현하는 것이 필요하다. 현재 더 다양한 환경에 대하여 하이브리드 시스템을 이용한 연구가 진행되고 있다.

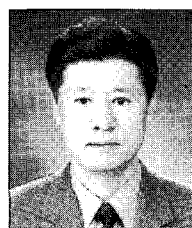
## 참고문헌

- [1] J. E. Colgate, P. E. Grafing, M. C. Stanley, and G. Schenkel, "Implementation of stiff virtual walls in force-reflecting interfaces," *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 202-208, 1993.
- [2] C. H. Cho, M. S. Kim, and J. B. Song, "Performance analysis of a 2-link haptic device with electric brakes," *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Haptic Interfaces and Tele-operator Systems*, Los Angeles, pp. 47-53, 2003.
- [3] J. An and D. S. Kwon, "Hybrid experimentation on a hybrid active/passive force feedback device," *Proc. of 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Washington, DC, May 2002.
- [4] H. Tan, M. Srivasan, B. Eberman and B. Cheng, "Human factors for the design of force-reflection haptic interfaces," *Proc. of ASME WAM, DSC-Vol. 55-1, ASME, NW*, pp. 353-360, 1994.
- [5] B. Hannaford, and J. H. Ryu, "Time-domain passivity control of haptic interfaces," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2002.
- [6] J. P. Kim, and J. H. Ryu, "Energy bounding algorithm based-on passivity theorem for stable haptic interaction control," *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Haptic Interfaces and Tele-operator Systems*, 2004.
- [7] L. B. Rosenberg, and B. D. Adelstein, "Perceptual decomposition of virtual haptic surfaces," *IEEE VR Annual International Symposium*, San Jose, 1993.



권 태 범

1977년 8월 15일생. 2003년 고려대학교 기계공학과(공학사). 2003년~현재 동 대학원 기계공학과 석박사통합과정 재학 중. 관심분야는 햅틱스 및 이동로봇의 주행.



송 재 북

1960년 8월 5일생. 1983년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1985년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1992년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 이동로봇의 주행, 햅틱스, 지능로봇 시스템의 설계 및 제어.