

MR 유체를 이용한 제어 가능한 차량용 햅틱 노브

Controllable Haptic Knob for Vehicle Instrument Using MR Fluids

김 찬 중* · 한 영 민** · 성 금 길* · 최 승 복†

Chan-Jung Kim, Young-Min Han, Kum-Gil Sung and Seung-Bok Choi

(2007년 10월 1일 접수 ; 2007년 11월 30일 심사완료)

Key Words : Magnetorheological Fluid(자기유변유체), Haptic Device(햅틱 장치), Finite Element Method(유한요소법), Virtual Environment(가상환경), Feed-forward Controller(앞먹임 제어기)

ABSTRACT

The paper presents control performance of a magnetorheological(MR) fluid-based haptic knob which is applicable to in-vehicle comfort functions. As a first step, MR fluid-based haptic knob is devised to be capable of both rotary and push motions with a single device. Under consideration of spatial limitation, design parameters are optimally determined to minimize a reciprocal of control torque using finite element analysis. The proposed haptic knob is then manufactured and its field-dependent torque is experimentally evaluated. Subsequently, in-vehicle comfort functions are constructed in virtual environment and make them communicate with the haptic knob. Control performances such as reflection force are experimentally evaluated via simple feed-forward control strategy.

1. 서 론

최근 자동차가 다양한 기능을 제공함에 따라 이를 조종하기 위한 수많은 장치나 스위치들이 운전석에 설치되고 있다. 하지만 이는 운전자의 시인성을 떨어뜨리거나 혼돈을 야기할 수 있는 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 기능의 버튼들을 하나의 버튼으로 통합하여 운전자의 시각적인 주의 없이 사용자에게 효과적으로 정보를 전달할 수 있는 장치를 필요로 하고 있다. 즉, 오디오, 에어컨, 네비게이션 등의 각종 조정 장치를 하나의 장치에 통합함으로써 운전자의 시선을 전방에서 흐트러뜨리지 않게 하여 안정성을 도모할 수 있다⁽¹⁾. 기존 상용화된 통합 노브(knob)는 모터를 이용하여 작은

힘을 연속적으로 제어하는 것으로 미세제어가 어려우며 안정적인 정지력을 제공하지 못해 촉감 구현 능력이 떨어진다. 따라서 최근 지능재료를 이용한 각종 햅틱 노브에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 연구로 Vitrani는 ER 유체(electrorheological fluid)를 이용하여 차량용 햅틱 노브를 제안하였으며⁽²⁾, Li는 MR 유체(magnetorheological fluid)를 이용한 햅틱 노브를 제안하였다⁽³⁾. 또한 Choi 등은 ER 유체를 이용한 의료용 햅틱 마스터를 제안하였다⁽⁴⁾.

다양한 지능재료 중에서도 MR 유체는 자기장(magnetic field)의 세기에 의해 전단저항력이 조절되는 특성을 갖는 재료이다. MR 유체는 같은 유변 유체인 ER 유체와는 달리 넓은 온도 범위에서 성능의 안정성이 보장되며 고전압 장치가 필요하지 않다. 또한 높은 항복 응력으로 인해 소형화에 매우 유리하다^(5,6).

이 연구에서는 MR 유체를 이용한 회전과 상하 수직 운동이 가능한 자동차용 햅틱 노브를 구축하고자 한다. 이를 위하여 유한요소법을 사용하여 토크의

† 교신저자 : 정회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : (032)860-7319, Fax : (032)868-1716

* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 인하대학교 기계공학과

역수를 최소화하는 최적화 기법을 적용하여 설계 변수를 결정하였다. 이를 통하여 제작된 MR 햅틱 노브의 정상상태 및 과도응답 성능시험을 수행하였다. 또한 앞먹임 제어기(feed-forward controller)를 사용하여 햅틱 장치의 힘 반향 성능을 구현하였다. 마지막으로 실제 자동차의 여러 편의 기능들을 고려한 가상 환경(virtual environment)과 연계하여 토크/힘 맵(torque/force map)을 설계하고, 이에 따른 가상환경에서 햅틱 노브 장치의 힘반향(force reflection) 제어 성능을 평가하였다.

2. MR 햅틱 노브

이 연구에서 설계한 MR 햅틱 노브 장치는 Fig. 1 과 같다. 제안된 햅틱 노브 장치는 그림처럼 회전 운동과 수직 운동이 가능한 장치로서 노브에 연결되어 있는 원형 디스크에 코일(coil)이 감겨있고 디스크 주변으로 MR 유체가 채워져 있다.

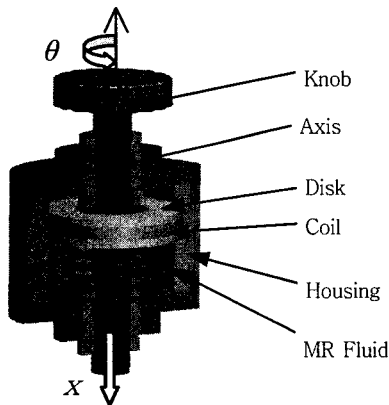


Fig. 1 Schematic configuration of the proposed MR haptic knob

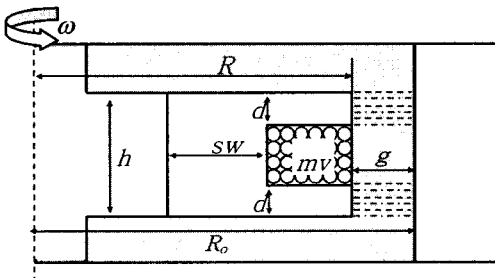


Fig. 2 Geometric parameters of the MR haptic knob

MR 응용장치들은 MR 유체와 전극의 상대 운동에 따라 유동 모드(flow mode), 전단 모드(shear mode), 압착 모드(squeeze mode)의 형태로 분류할 수 있다⁽⁷⁾.

제안된 햅틱 노브에서는 회전 운동시에는 전단모드가 발생하며 수직 방향의 운전시에 유동 모드와 전단모드가 동시에 작용한다.

먼저, 전단모드의 경우 MR 유체의 거동은 일반적으로 다음과 같은 빙햄 모델로 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad \tau_y(H) = \alpha H^\beta \quad (1)$$

여기서 τ 는 MR 유체의 전단응력을 나타내며, η 는 MR 유체의 기본점성 계수이고, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비를 나타낸다⁽⁸⁾. τ_y 는 MR 유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로서, 자기장의 세기(field intensity) H 의 증가와 더불어 증가한다. 이때, 비례상수 α 와 지수 β 는 MR 유체의 항복응력을 결정하는 고유 특성 값이다. 자기장의 세기(H)는 권선수(N)와 여기에 흐르는 전류(I)를 이용하면 다음과 같은 관계식이 성립된다⁽⁹⁾.

$$NI = H \times L \quad (2)$$

여기서 L 은 자기장 경로의 길이를 나타낸다. 이 연구에서 제안된 MR 햅틱 노브 구조(Fig. 2)를 보면 MR 유체에 흐르는 자기장의 경로는 2개이며, 강자 성체에 흐르는 자기장의 경로는 1개이다. 따라서 식 (2)를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$NI = 2 \times H_M L_M + H_S L_S \quad (3)$$

여기서 첨자 M , S 는 각각 MR 유체와 철을 의미한다. 이때 철에 흐르는 자기장은 MR 유체의 자기장에 비해 매우 작기 때문에 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_M = \frac{NI}{2g} \quad (4)$$

여기서 g 는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 MR 유체에 흐르는 자기장 경로의 길이를 나타낸다 ($g = L_M$).

회전 운동에서 발생하는 토크의 크기는 전단응력과 접촉면적으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T &= \tau \times A \times R + T_f \\
 &= 4\pi R^2 d \tau_y + \frac{4\pi\eta R^3 d\omega}{h} + T_{cf} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + b_t \dot{\theta} \\
 &= 4\pi R^2 d \alpha \left(\frac{NI}{2g} \right)^\beta + \frac{4\pi\eta R^3 d\omega}{h} + T_{cf} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + b_t \dot{\theta} \\
 &= T_c + T_\eta + T_f
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 T_c 는 전기장이나 자기장 부하 시 발생하는 제어토크(controllable torque), T_η 는 전기장이나 자기장과는 무관한 MR 유체의 점성으로 인한 점성토크(viscous torque), T_f 는 베어링 등에서 발생하는 마찰토크(frictional torque)이다. 또한 R 은 디스크의 반지름, A 는 접촉 면적, h 는 디스크의 높이, d 는 디스크에서 마그네틱 코일을 제외한 부분의 높이, ω 는 입력값인 햅틱 노브의 각속도, T_{cf} 는 쿨롱 마찰력(coulomb friction), b_t 는 점성 마찰 계수(viscous friction coefficient)를 나타낸다.

또한 수직 방향의 운동에서는 전단모드의 영향이 미소하므로 다음 식과 같이 유동 모드에서 힘을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F &= (\Delta P_c + \Delta P_\eta) \times (A_p - A_r) + kx + F_f \\
 &= \left(\frac{2d}{g} \tau_y + \frac{12\eta h}{g^3 b} (A_p - A_r) \dot{x} \right) \times (A_p - A_r) \\
 &\quad + kx + F_{cf} \operatorname{sgn}(\dot{x}) + b_f \dot{x} \\
 &= \frac{2d}{g} (A_p - A_r) \alpha \left(\frac{NI}{2g} \right)^\beta + \frac{12\eta h}{g^3 b} (A_p - A_r)^2 \dot{x} + kx \\
 &\quad + F_{cf} \operatorname{sgn}(\dot{x}) + b_f \dot{x} \\
 &= F_c + F_\eta + F_k + F_f
 \end{aligned} \tag{6}$$

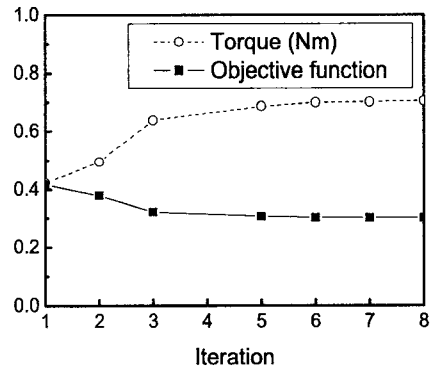
여기서 F_c , F_η , F_k , F_f 는 각각 제어력(controllable force), 점성력(viscous force), 스프링 복원력(restoring force), 마찰력(frictional force)을 나타낸다. 이때, ΔP_c , ΔP_η 는 각각 자기장에 영향을 받는 압력계수와 영향을 받지 않는 압력 계수를 나타낸다. A_p , A_r 는 축과 축 로드의 면적을 의미하고 x , \dot{x} 는 축의 변위와 속도를 나타낸다. 그리고 b 는 디스크의 외경(R)과 하우징의 내경(R_o)의 평균 원둘레를 나타내며, k 는 스프링 상수이다.

3. MR 햅틱 노브의 최적설계 및 제작

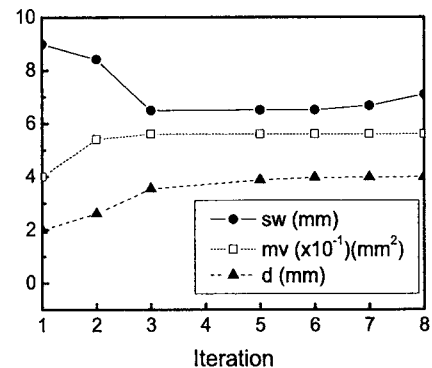
이 연구에서는 MR 햅틱 노브 내의 자기회로를 최적화하기 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS (<http://www.ansys.com/>)를 사용하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 이 연구에서 사용된 MR 유체는 미국 Lord사의 MRF-132DG⁽¹⁰⁾로 Carbonyl iron과 Hydrocarbon oil을 합성한 것이며, 중량비는 80.98%이며, 기본점성계수는 0.092 Pa·s, 밀도는 2.92~3.18 g/cm³이다.

설계 최적화를 수행하기 위하여 목적함수는 전체 토크에서 제어토크를 최대화하기 위해 다음과 같은 함수의 역수를 최소화하는 것으로 설정하였다.

$$\text{Obj} = \min \left\{ \frac{T_\eta}{T_c + T_\eta} \right\} \tag{7}$$



(a) Objective function



(b) Design variables

Fig. 3 Optimal design results of the MR haptic knob

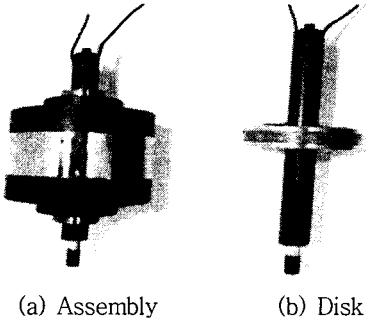


Fig. 4 Photograph of the MR haptic knob

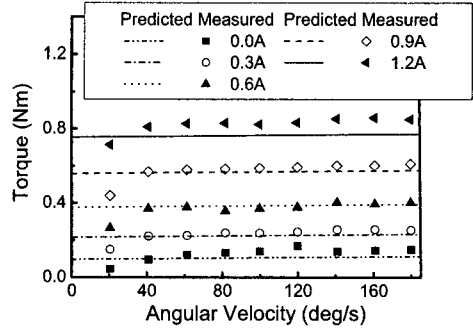


Fig. 6 Torque responses under rotary motion

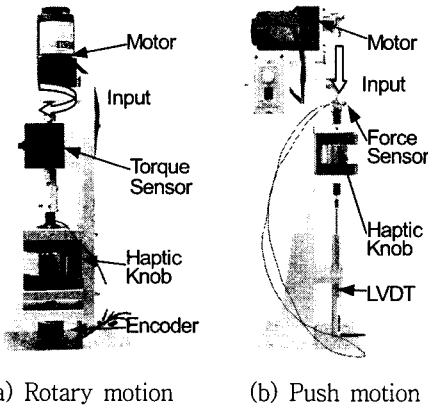


Fig. 5 Photograph of the experimental apparatus

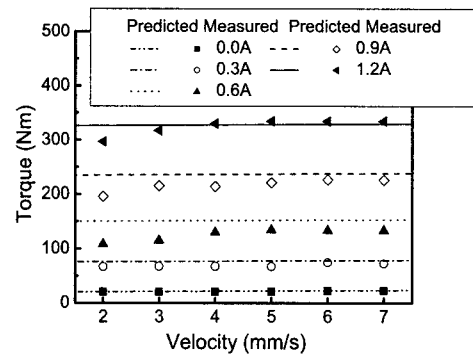


Fig. 7 Force responses under push motion

Table 1 Design parameters of the MR haptic knob

Design Parameters	Values
Height of disk d	0.004 m
Area of coil mv	56 mm ²
Width of disk sw	0.007 m
Gap size g	0.001
Radius of disk R	0.03 m
Max. yield shear stress τ_y	14.6 kPa
Max. field H	50 A/mm
Max. electrical input	1.2 A
Max. total torque T_f (T_f is not considered)	0.66 Nm
Max. total force F_f (F_f is not considered)	305.7 N

여기서 점성토크는 간극의 높이 g 가 1~4 mm의 값을 가질 때 $5.0776 \times 10^{-6} \sim 2.0310 \times 10^{-5}$ Nm의 값을

가진다. 이는 제어토크에 비해 굉장히 작은 값임으로 작은 변화에 전체 토크에는 영향이 적으나 목적함수의 값은 크게 변한다. 따라서 목적함수의 점성토크를 평균값인 1.2694×10^{-5} Nm로 고정시켜 최적화를 수행하였다.

자기회로의 기하학적인 형상은 MR 햅틱 노브의 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 간극의 높이(d), 코일의 넓이(mv), 코일부분을 제외한 자로의 폭(sw)을 최적화 설계변수로 선정하였다. 이때 제한 조건으로 전체적인 크기를 고정시키기 위해 디스크의 반지름과 높이를 각각 30 mm, 15 mm로 고정하였다. 해석수행 시 간극의 높이, 코일의 넓이, 자로의 폭에 대한 범위는 각각 1~4 mm, 21~56 mm², 3~13 mm로 선정하였으며, 초기값은 각각 2 mm, 40 mm², 9 mm로 설정하였다. MR 햅틱 노브의 회전속도와 전류는 140 deg/s, 1.2 A/mm로 설정하였으며, 초기 해석결과 토크는 0.4239 Nm가 산출되었다.

Fig. 3(a)의 최적화를 수행한 결과로부터 목적함수의 값이 연산을 반복 수행함에 따라 최소값으로 수렴함을 확인할 수 있다. 이때, 토크는 0.4239 Nm의

값에서 0.6788 Nm으로 약 38%가 증가되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 3(b)의 수렴한 설계 변수들을 이용하여 제작된 MR 햅틱 노브 장치의 설계변수 값은 Table 1에 나타나 있다. 최적화를 수행한 결과로부터 디스크의 간극 높이 0.004 m, 코일 면적 56 mm² 및 디스크의 폭 0.007 m로 결정되었다. MR 유체의 효과를 받는 부분인 디스크의 반지름 R 과 간극의 크기 g 는 0.03 m, 0.001 m로 설계하였다. 이때 햅틱 장치가 전달하는 토크와 힘의 크기는 MR 유체의 특성인 항복전단 응력과 기본점성에 의하여 결정된다. 예상되는 최대의 토크와 힘은 마찰 및 탄성력을 무시하면, 각각 0.66 Nm와 305.7 N이다.

제작된 MR 햅틱 노브는 Fig. 4에 나타내었다. MR 햅틱 노브의 자로(flux guide)는 강(steel S45C, 경질크롬도금)으로 만들었고 나머지 외부와 축은 알루미늄(AL 6061, 아노다이징 후처리)으로 제작하였으며, 직경 0.0006 m의 동선을 디스크에 100회 감았다. 제작된 MR 햅틱 노브에서 발생하는 힘과 토크를 실험적으로 평가하였으며 이를 위한 실험 장치를 Fig. 5와 같이 구축하였다. 이때 햅틱 노브의 구동원은 일정한 속도의 입력을 위해 교류 모터(AC motor)를 사용하였다.

Fig. 6은 햅틱 노브의 회전 운동 시 토크 측정 결과이다. 식 (5)로부터 예측된 결과와 실험 결과가 매우 잘 일치하고 있다. 각속도가 140 deg/s이고 전류 1.2A를 부하시켰을 때의 마찰을 제외한 토크는 0.69174이다. 이는 최적화 모델과 2% 차이가 나는 것으로 설계의 타당성을 보여주고 있다. 그리고 MR 효과로 인한 제어토크가 점성토크보다 상당히 크기 때문에 제어토크가 전체토크에 지배적인 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 계단입력전압에 대한 토크의 과도응답실험을 통해 0.6A의 계단입력전압에 대한 전류의 시상수는 9 ms, 입력전류를 제거하는 경우 시상수는 5 ms임을 확인할 수 있었다. 이때, MR 햅틱 노브의 구동원의 회전속도는 100 deg/s로 설정하였다.

Fig. 7은 상하 수직운동 시 전달력을 측정한 결과이며, 축의 속도를 2 mm/s에서 7 mm/s까지 증가시켰다. 회전운동과 마찬가지로 모델로부터의 예측값과 실험값이 잘 일치하고 있으며 제어토크가 전체토크에 지배적인 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

4. 통합 제어 시스템 구축 및 성능평가

제작된 햅틱 노브를 컴퓨터에 구축된 가상환경과 연동하여 Fig. 8과 같은 전체 햅틱 제어 시스템을 구축하였다. 그림에서 보는 바와 같이 전체 시스템은 힘 반향을 구현하는 햅틱 노브, in-vehicle function 가상환경, 요구 토크와 힘이 계산되는 힘 반향 회로(force reflection circuit)로 이루어져 있다. 먼저 사용자의 움직임이 MR 햅틱 노브를 통해 가상 햅틱 환경에 전달되면 가상 환경에서 발생하는 이벤트를 힘 반향 서킷에 보내어 이벤트에 대응되는 요구 토크/힘이 계산된다. 이에 햅틱 노브를 통해 대응하는 힘을 사용자에게 전달하여 줄 수 있으며 사용자는 화면을 통해 수행 상황을 모니터링 할 수 있다.

이 연구에서는 실제 자동차의 각종 편의 장치의 선택 조작 환경을 고려하여 in-vehicle function을 가상 환경으로 구축하였으며 이는 Fig. 9와 같이 메뉴 선택 부분과 데이터 측정 부분으로 나누어진다. 메뉴는 트리 형태의 구조로 구성되어 있으며 Fig. 10과 같다. 상부 메뉴에서 하부 메뉴로의 이동시 회전 운동과 상하 운동을 번갈아 사용하여 메뉴를 선택할 수 있도록 하였으며 이벤트의 최종 결정은 추가로 장착된 확인 버튼으로 선택하도록 하였다.

가상 환경에서 이벤트가 결정되면 각 기능에 필요한 토크/힘을 생성시키기 위해서는 적절한 제어입

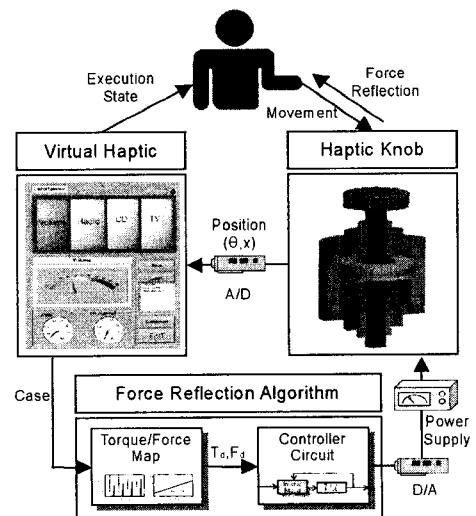


Fig. 8 Architecture of the haptic system

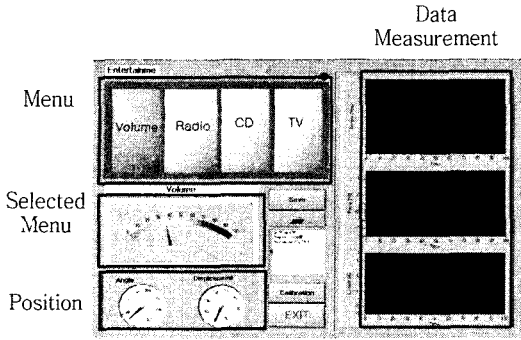


Fig. 9 Virtual environment of in-vehicle comfort function

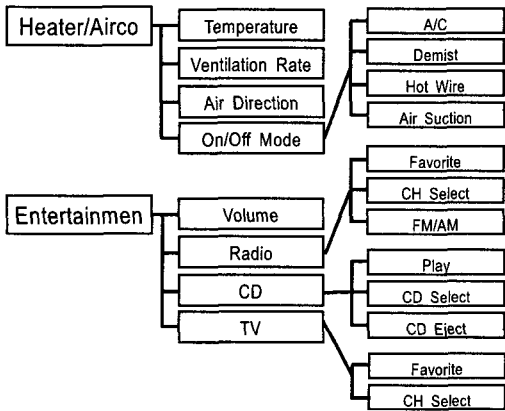
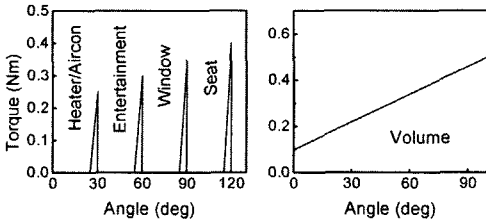


Fig. 10 Tree Menu of the virtual in-vehicle function



(a) Root directory map (b) Volume map

Fig. 11 Example of the torque/force map

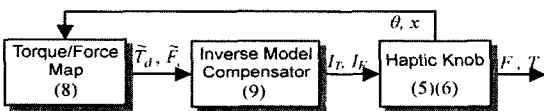
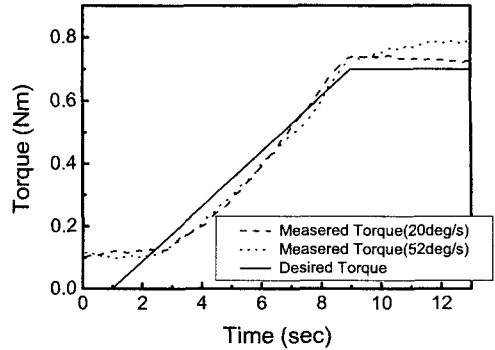
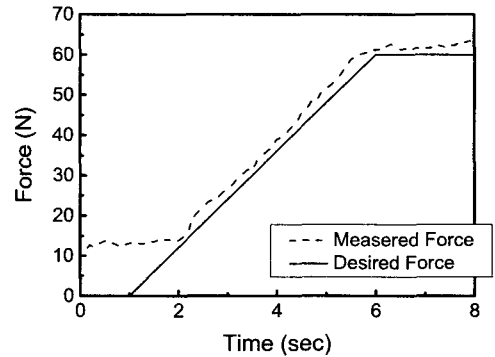


Fig. 12 Block diagram of feed-forward controller

력을 결정하여야 한다. 이를 위해 이 연구에서는 토크/힘 맵(torque/force map)과 제어기(controller)로 구성된 힘 반향 알고리즘을 구축하였다. 우선 가상



(a) Rotary motion



(b) Push motion

Fig. 13 Experiment verification of the inverse model

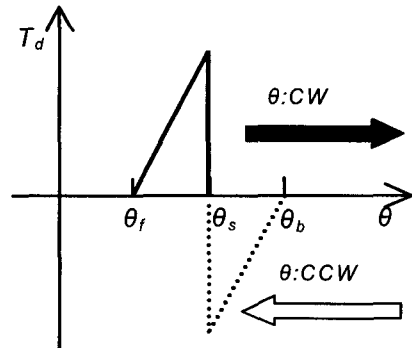


Fig. 14 Torque/force map of menu shifting event

햅틱 인터페이스에서 선택되는 메뉴에 따라 토크/힘 맵이 선택되어 그에 따르는 요구 토크/힘이 결정된다. 결정된 토크/힘은 제어기를 통해 필요한 전류가 계산되고, 전류공급장치를 거쳐 MR 햅틱 노브에 전달하여 사용자가 토크/힘을 느낄 수 있도록 한다. Fig. 11(a)는 최상위 메뉴에서 발생하는 토크 맵을 보여주며, Fig. 11(b)는 최하위 메뉴 중 볼륨(volume) 선택 시 발생하는 토크 맵을 보여준다. 토

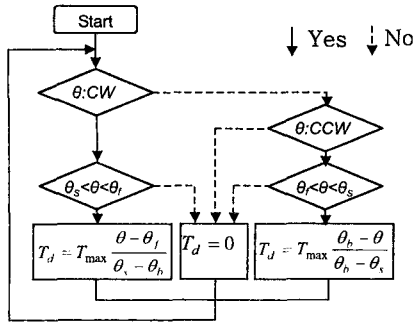


Fig. 15 Flow chart of the menu shifting algorithm

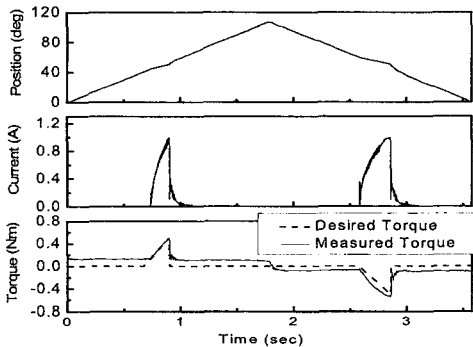


Fig. 16 Experimental verification of the menu shifting event

크/힘 맵을 통해 정의된 토크/힘은 다음과 같은 식을 통해 점성 부분과 마찰 부분이 제외된 요구 제어 토크/힘(\tilde{T}_d, \tilde{F}_d)이 계산된다.

$$\begin{aligned} \tilde{T}_d &= T_d - (4\pi\eta R^3 d/h)\dot{\theta} - T_f \\ \tilde{F}_d &= F_d g - \frac{12\eta h}{g^2 b} (A_p - A_r)^2 \dot{x} - F_f g - kx \end{aligned} \quad (8)$$

선택된 기능 맵에서 계산된 요구 제어 토크/힘을 추종하기 위해 이 연구에서는 역모델(inverse model)에 의한 개루프 보상을 사용하였다. 따라서 제어 입력은 식 (5), (6)로부터 제어입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_T &= \frac{NI}{2g} \left(\frac{\tilde{T}_d}{4\pi R^2 d\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \\ I_F &= \frac{NI}{2g} \left(\frac{\tilde{F}_d}{2d(A_p - A_r)\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \end{aligned} \quad (9)$$

이때, I_T 와 I_F 는 각각 요구 토크와 힘에 필요한 인가 자기장으로 전류를 나타낸다. Fig. 12는 역모델을 이용한 앞먹임 제어기의 블록 선도를 보여준다. 역모델은 토크/힘 맵에서 결정된 \tilde{T}_d, \tilde{F}_d 를 입력 받아 제어입력(I)을 계산하여 계산된 전류를 햅틱 노브에 인가하여 실제 토크/힘을 발생한다. Fig. 13은 설계된 제어기의 추적 제어 실험 결과를 보여준다. 이 결과로부터 토크와 힘에 대한 요구제적을 잘 추적하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 메뉴 이동 시 발생하는 힘 반향 알고리즘의 토크/힘 맵이다. 이 연구에서는 시계방향으로 노브를 작동시킬 때와 반시계방향으로 노브를 작동시킬 때 각각의 토크/힘 맵을 다르게 적용하였다. Fig. 15는 이때의 토크/힘 결정 알고리즘 순서도를 나타낸다. 이때 실제 노브 동작 시 발생할 수 있는 조건을 고려하여 토크/힘의 입력이 없으면 요구 토크/힘은 0을 전달하도록 하도록 하였다.

Fig. 16은 통합 제어 시스템의 실험 결과를 도시한 것이다. 이때, 0°에서 100°까지 시계방향의 입력이 주어지고 다시 0°까지 반시계방향의 입력이 주어진다. 이때 메뉴의 이동은 50°에서 이루어진다. 결과에서 보는 바와 같이 햅틱 노브가 시계방향과 반시계방향으로 회전 시 각각 다른 모양의 요구 토크가 발생하며 힘 반향 요구제적을 잘 추적하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 제안된 MR 햅틱 노브 장치가 올바른 힘 반향 제어성능을 발휘할 수 있음을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 자동차 운전자를 위한 통합 조정 장치로서 새로운 MR 햅틱 노브를 설계 및 제작하였다. 가상환경과 연동하여 MR 햅틱 노브 장치의 힘 및 토크에 대한 추적제어 성능을 평가하였으며, 가상환경에 in-vehicle function의 수행과정을 모니터 하였다. 이로부터 제안된 MR 햅틱 노브의 우수한 제어성능을 입증하였다. 향후 자동차의 실제 편의 장치 환경과 연동하여 제안된 MR 햅틱 장치의 힘 반향 제어를 고찰 할 예정이다.

후 기

이 연구는 한국 과학재단 도약연구지원사업(과제 번호 R17-2007-028-0100-0) 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) BMW, iDrive Controller, <http://www.bmwworld.com/models/e65.htm>.
- (2) Vitrani, M. A., 2006, "Torque Control of Electrorheological Fluidic Resistive Actuators for Haptic Vehicular Instrument Controls", American Society of Mechanical Engineers, Vol. 128, pp. 216~226.
- (3) Li, W. H., 2004, "Magnetorheological Fluids Based Haptic Device", Emerald Sensor Review, Vol. 24, pp. 68~73.
- (4) Kang, P. S., Han, Y. M. and Choi, S. B., 2006, "Force Feedback Control of an Electrorheological Haptic Device in MIS Virtual Environment", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16. No. 12, pp. 1286~1293.
- (5) Choi, S. B., Hong, S. R., Cheong, C. C. and Park, Y. K., 1999, "Comparison of Field-controlled Characteristics Between ER and MR Clutches", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 10, No. 8, pp. 615~619.
- (6) Neelakantan, V. A. and Washington, G. N., 2005, "Modeling and Reduction of Centrifuging in Magnetorheological (MR) Transmission Clutches for Automotive Applications", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16, No. 9, pp. 703~712.
- (7) Jolly, M. R., Bender, J. W. and Carlson, J. D., "Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids", The International Society for Optical Engineering, Vol. 3327, pp. 262~275.
- (8) Ginder, J. M. and Ceccio, S. L., 1995, "Effect of Electrical Transients on the Shear Stresses in Electrorheological Fluids", Journal of Rheology, Vol. 39, No. 1, pp. 211~234.
- (9) Lord Corporation, Engineering Note : Magnetic Circuit Design, www.lord.com/Portals/0/MR/Magnetic_Circuit_Design.pdf.
- (10) Lord Corporation, Lord technical data, <http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7015.pdf>.