

MR 브레이크를 이용한 햅틱 큐 가속페달 장치 설계 및 제어

Design and Control of Haptic Cue Device for Accelerator Pedal Using MR Brake

노경욱* · 한영민** · 최승복†

Kyung-Wook Noh, Young-Min Han and Seung-Bok Choi

Key Words : Haptic Device(햅틱 장치), Magnetorheological (MR) Fluid(자기유변유체), Vehicle Gear Shifting(차량 기어 변속), Virtual Environment(가상환경), Feed-forward Control(앞먹임 제어기).

ABSTRACT

This paper proposes a new haptic cue vehicle accelerator pedal device using magnetorheological (MR) brake. As a first step, an MR fluid-based haptic cue device is devised to be capable of rotary motion of accelerator pedal. Under consideration of spatial limitation, design parameters are optimally determined to maximize control torque using finite element method. The proposed haptic cue device is then manufactured and integrated with accelerator pedal. Its field-dependant torque is experimentally evaluated. Vehicle system emulating gear shifting and engine speed is constructed in virtual environment and communicated with the haptic cue device. Haptic cue algorithm using the feed-forward control algorithm is formulated to achieve optimal gear shifting in driving. Control performances are experimentally evaluated via feed-forward control strategy and presented in time domain.

1. 서 론

자동차 산업에서는 차량의 주행 안전성과 운전자 편의성을 향상시키기 위해 다양한 주행 보조 시스템이 개발 되어 왔다. 특히 최근 들어 자동차 연비와 배출 가스 문제가 크게 대두됨에 따라 이를 위한 보조 시스템 개발도 활발하게 진행되고 있다. 대표적으로 연속적인 기어변속으로 연료소모를 최소화하는 자동변속 차량의 무단변속기(continuously variable transmission)가 있다⁽¹⁻²⁾. 하지만 수동 변속 장치를 적용한 차량의 경우에는 엑셀러레이팅과 기어변속 등 운전자의 운전 습관에 크게 의존하므로 이를 고려한 연료절감 보조 시스템의 개발에 큰 어려움이 있다.

따라서 수동 변속기가 장착된 차량에서는 최적의 연료 효율을 얻기 위해 적절한 기어 변속 타이밍을 운전자에게 전달할 수 있는 시스템이 필요하다. 이는 촉감을 전달하는 햅틱 메커니즘을 가속 페달에 적용하여 구현될 수 있으며, 운전자의 의지를 반하지 않는 한도 이내의 토크 신호를 가속 페달을 통해 운전자의 다리에 전달하도록 하는 것이다. 일반적으로 햅틱 큐라고 알려진 이러한 개

념은 아직까지 차량에 적용된 사례가 전무하다.

햅틱 기술은 사람의 감각 중에서 시각적, 청각적 전달 방법이 아닌 촉각적 감각을 기초로 하고 있다. 많은 연구자들은 자동차에 적용할 수 있는 다양한 햅틱 장치 연구를 활발히 진행하였다. Aoki등은 운전자에게 측정된 도로 상태를 알려주기 위한 햅틱 페달을 제안하였으며⁽³⁾, Kobayashi등은 차량의 후방 충돌 위치를 피하기 위해 운전자에게 촉각 반응을 전달하는 가속 페달을 제안하였다⁽⁴⁾. 이러한 햅틱 피드백 장치들은 모터를 이용하기 때문에, 작동 메커니즘이 복잡하고 힘 제어를 연속적으로 또는 미세하게 제어하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 MR유체(magnetorheological fluid)나 ER유체(electrorheological fluid)와 같은 지능재료를 이용한 햅틱 장치 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이를 이용한 클러치나 브레이크 장치⁽⁵⁻⁶⁾들은 큰 힘과 간단한 설계, 연속 제어가 가능한 특징 때문에 햅틱 분야에서 널리 연구되고 있다. 대표적인 연구로 Li등은 MR유체를 이용한 햅틱 노브를 제안하였다⁽⁷⁾. 또한 Kim등은 MR유체를 이용하여 다기능 햅틱 장치를 제안하였다⁽⁸⁾.

본 연구에서는 상용 가속 페달과 연결된 MR 브레이크 장치를 이용하여 주행 중 기어 변속 타이밍 시 토크 신호를 전달하여 기어변속을 유도하게 하는 보조 햅틱 장치를 제안하고자 한다. 우선 중

† 교신저자; 인하대학교 기계공학부

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

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

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과

형 승용차의 공간적 제한을 고려하여 브레이크 페커니즘을 이용한 로터리 타입의 MR 햅틱 큐 장치를 고안하였다. 유한요소법을 이용하여 최적 설계 변수를 결정한 후에, MR 햅틱 큐 장치를 제작하고, 제작된 장치에 가속 페달을 연결하였다. 또한 dSPACE 와 Matlab-Simulink 프로그램을 이용하여 엔진 작동과 기어 변속을 모방한 가상 환경을 구성하고, 이를 제작된 햅틱 장치와 연동하였다. 마지막으로 앞먹임제어기(feed-forward controller)를 사용하여 제어 성능을 실험적으로 평가하였다.

2. MR 햅틱 큐 가속페달 장치 설계

본 연구에서 제안한 MR 햅틱 큐 가속페달 장치는 Fig. 1 과 같다. 가속페달은 코일(coil)이 감긴 원형디스크에 연결되어 있고, 원형 디스크는 MR 유체가 채워져 있는 하우징에 조립되어있다. 본 연구에서 사용된 MR 유체는 미국 Lord 사의 MRF-132DG⁽⁹⁾로 Carbonyl iron 과 Hydrocarbon oil을 합성한 것이다. 자기장 H 가 MR 유체에 작용하면 전단 응력은 다음과 같은 빙햄 모델로 표현할 수 있다.

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

여기서, η 는 MR 유체의 기본 점성계수이고, $\dot{\gamma}$ 는 전단 속도비, $\tau_y(H)$ 는 자기장에 대한 MR 유체의 항복 전단 응력을 나타낸다. 이 때 비례상수 α 와 지수 β 는 MR 유체의 항복 응력을 결정하는 고유 특성 값이다. MR 응용 장치들은 MR 유체와 전극의 상대 운동에 따라 유동 모드(flow mode), 전단 모드(shear mode), 압착 모드(squeeze mode)의 형태로 분류할 수 있는데, 제안된 MR 햅틱 큐 가속페달 장치는 회전 운동을 위한 전단 모드가 발생한다. 발생하는 토크의 크기는 제어 토크(controllable torque) T_c , 점성 토크(viscous torque) T_η , 마찰 토크(friction torque) T_f 들을 합한 것으로 수학적으로는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= T_c + T_\eta + T_f \\ &= 4\pi R^2 d \alpha (H)^\beta + \frac{4\pi \eta R^3 d \dot{\theta}}{h} + C_{cf} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + C_{vf} \dot{\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\dot{\theta}$ 는 회전 운동시에 MR 햅틱 큐 가속페달 장치의 각 속도이며, R 은 디스크의 반지름, h 는 디스크의 높이, d 는 디스크에서 마그네틱 코일을 제외한 부분의 높이, C_{cf} 는 쿨롱 마찰 계수, C_{vf} 는 점성 마찰 계수, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 는 signum 함수이다. 다른 설계 변수는 Fig. 2에 나타내었다.

제안된 MR 햅틱 큐 가속페달 장치에 대한 최적의 기하학 형상을 얻기 위해 상용 소프트웨어

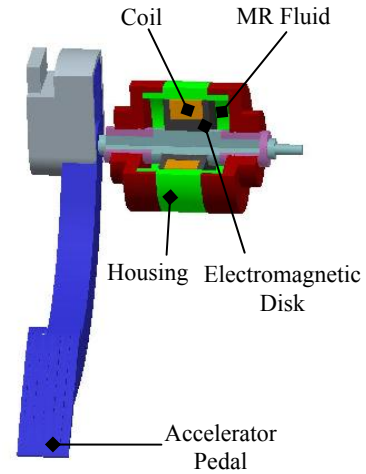


Fig. 1 Schematic configuration of the MR haptic cue device.

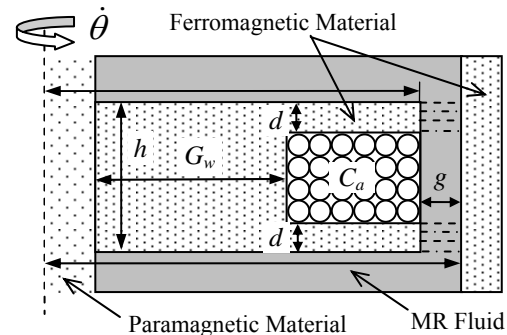
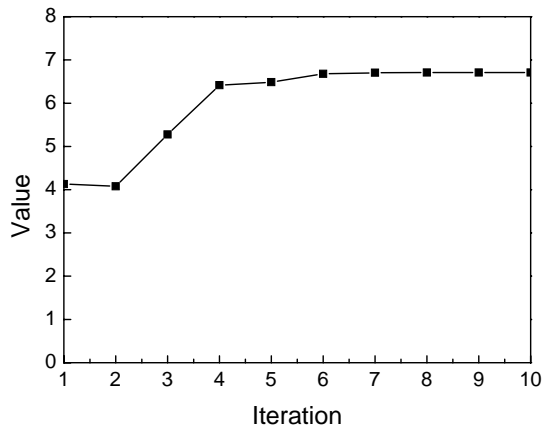


Fig. 2 Geometric parameters of the MR haptic cue device.

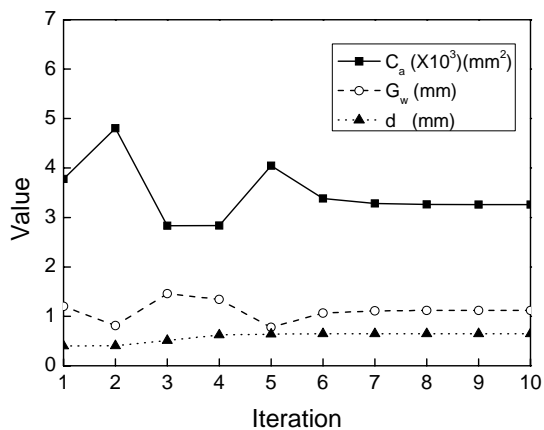
인 ANSYS 를 사용하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 식(2)에서의 토크 발생 요소 중에, 제어 토크가 MR 햅틱 큐 가속 페달의 성능에 가장 큰 영향을 가지고 있고, 전체 토크에 대해 제어 토크가 가능한 한 큰 값을 가져야 한다. 따라서, 설계의 최적화를 수행하기 위해 다음과 같이 목적 함수의 역수 값을 최대화하는 것으로 설정하였다.

$$\lambda = \max \left\{ \frac{T_c}{T_c + T_\eta} \right\} \quad (3)$$

자기 회로의 기하학적인 형상은 MR 햅틱 큐 가속페달 장치의 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 디스크에서 마그네틱 코일을 제외한 부분의 높이 (d), 코일의 길이(C_a), 코일부분을 제외한 자로의 폭 (G_w)을 최적화 설계변수로 선정하였다. 이 때 제한 조건으로 전체적인 크기를 고정시키기 위해 디스크의 반지름과 높이를 각각 40mm, 35mm로 고정하였다. 해석 수행 시 간극의 높이, 코일의 길이, 자로의 폭에 대한 범위는 각각 4~7mm, 168~432mm², 10~18mm로 선정하였으며, 초기값은 각각 4mm, 378mm², 12mm로 설정하였다. MR 햅틱 큐 가속페달 장치의 회전 속도와 전류는



(a) objective function



(b) design parameters

Fig. 3 Optimization results of the MR haptic cue device.



(a) exploded



(b) assembled with accelerator pedal

Fig. 4 The manufactured MR haptic cue device.

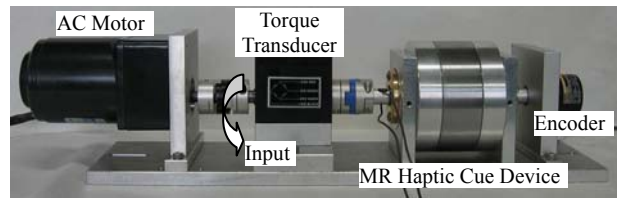


Fig. 5 Experimental apparatus for torque measurement.

80deg/s, 0.8A/mm로 설정하였으며 초기 해석결과 토크는 4.13Nm가 산출되었다. Fig. 3(a)과 같이 최적화를 수행한 결과 7 번의 연산 수행 후 목적함수에 수렴함을 확인할 수 있었다. 이 때, 토크는 6.70Nm으로 초기 해석 결과에 비해 약 62%가 증가되었음을 확인할 수 있었다. Fig. 3(b)의 수렴한 설계 변수들을 이용하여 MR 햅틱 큐 가속페달 장치를 제작하였다. 최적화를 수행한 결과로부터, 디스크 간극의 높이(d)는 6mm, 디스크의 폭(G_w)은 11mm 및 코일의 면적(C_a)은 $345mm^2$ 으로 결정하였다. MR 유체의 효과를 받는 부분인 디스크의 반지름 R 은 40mm, 간극의 크기 g 는 1mm로 설계하였다.

3. MR 햅틱 큐 가속페달 장치 성능실험

제작된 MR 햅틱 큐 가속 페달 장치는 Fig. 4(a)에 나타내었다. MR 햅틱 큐 가속 페달 장치의 자로(flux guide)는 강(steel S45C)으로 만들었고, 나머지 외부와 축은 알루미늄(Al 6061)으로 제작하였으며, 직경 0.75mm의 동선을 디스크에 500회 감았다. Fig. 4(b)는 완전 조립된 MR 햅틱 큐 가속페달 장치를 나타낸 것이다. 제작된 MR 햅틱 큐 장치에서 발생하는 토크를 실험적으로 평가하였으며 이를 위한 실험 장치를 Fig. 5와 같이 구축하였다. 이 때 구동원은 일정한 속도의 입력을 위해 교류 모터(ac motor)를 사용하였고, MR 햅틱 큐 장치의 입력축에 연결하였다. 토크를 측정하기 위해 10Nm의 용량을 가진 회전형 토크 센서를 모터와 입력축에 설치하였고, 회전에 따른 위치를 측정하기 위해 1회전당 3600의 펄스를 출력하는 분해능을 가진 인크리멘탈형 엔코더(incremental encoder)를 출력축에 설치하였다. MR 햅틱 큐 장치에 전류를 0.2~0.8A를 부하하였으며, 입력 각속도는 10~80deg/s 일 때 전달되는 토크를 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. 식(2)로부터 예측된 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치되고 있으며, 입력 속도가 80deg/s 이고, 전류 0.8A를 부하하였을 때의 발생한 토크는 7.97Nm이다. 이는 마찰 토크 1.03Nm를 고려해보면, 유한요소해석에 의한 토크 값과 측정된 토크 값의 차이는 0.24Nm으로 약 3.5%차이가 난다. 또한 가속 페달을 연결하여, 페달의 위치에

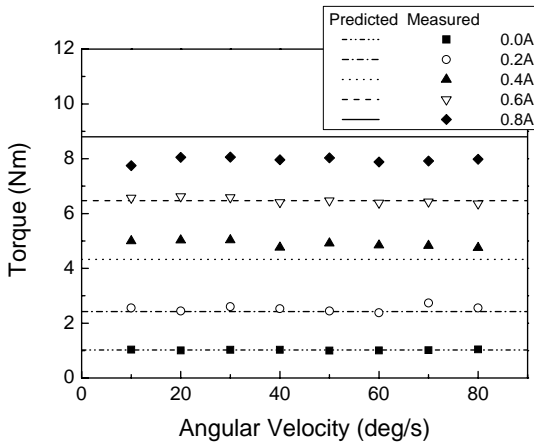


Fig. 6 Field-dependent torque of the manufactured MR haptic cue device.

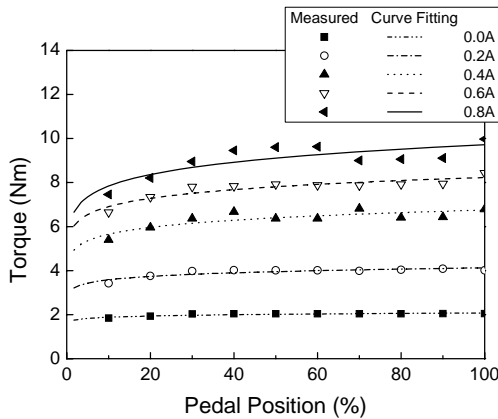


Fig. 7 Toque-position characteristics for the integrated haptic cue device with the accelerator pedal.

따른 발생 토크를 Fig. 7 에 나타내었다. 결과로부터 전류 입력 값에 따라 MR 햅틱 큐 가속페달 장치는 연속 제어가 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

4. 가상 환경과 햅틱 큐 장치의 연동

제작된 MR 햅틱 큐 가속페달 장치, 운전자, 제어 입력 알고리즘, 컴퓨터에 구축된 가상 환경을 구성하여 Fig. 8 과 같은 햅틱 전체 시스템을 구축하였다. 여기서 가상환경은 엔진 작동과 기어 변속을 모방하였다. 제작된 MR 햅틱 큐 가속페달 장치는 사람의 페달 작동과정, 가상 환경을 거쳐 나오는 큐 신호를 통해 힘 반향 알고리즘을 적용한 MR 햅틱 큐 장치에 전달하는 전류와 페달 위치를 통해 차량 가상 환경과 상호작용한다. 그 동안에 MR 햅틱 큐 가속페달 장치를 작동하는 운전자는 가상 환경으로부터 기어 변속이 요구 되는 시점을 느낀다. 이 과정에서 가상환경은 Fig. 9 와 같이 dSPACE 와 Matlab-Simulink 프로그램을 이용하여 구성하였다. 가상 환경은 차량 속도, 엔진 회전속도, 기어 단수, 입력과 출력 측정 데이터 창으로 구성되었다. 운전자가 페달을 밟을 때, 밟아진

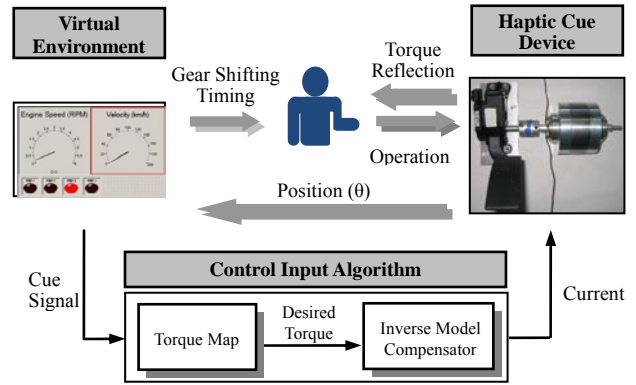


Fig. 8 Architecture of the haptic system.

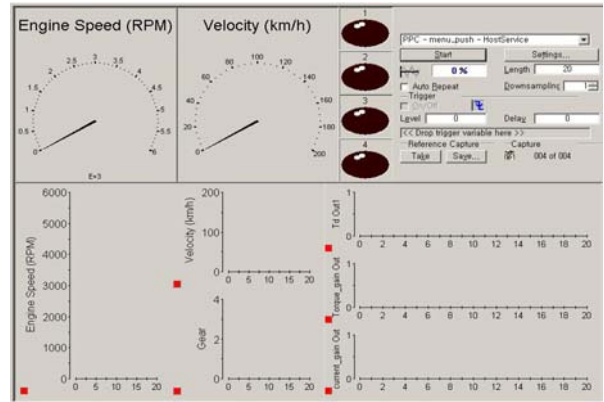


Fig. 9 Virtual environment.

변위각도가 전체 밟을 수 있는 범위의 30%가 되었을 때 엔진 회전 속도가 2000rpm 이 되는 것으로 가정하였다. 이 때, 최적 기어 변속 요구를 위한 큐 신호가 엔진 회전 속도를 기초로 하여 작동하게 된다. 가상 환경 상에서 큐 신호가 선택된 후에 요구 토크 궤적은 다음과 같이 측정된 위치에 따라 생성된 토크맵으로부터 다음과 같이 결정된다.

$$\tilde{T}_d = \tilde{T}(\theta) - (4\pi\eta R^3 d/h)\dot{\theta} - T_f(\theta) - T_p(\theta) \quad (4)$$

여기서 $\tilde{T}(\theta)$ 은 최적 맵에 의해 계산된 토크궤적이고, $T_p(\theta)$ 는 페달에 걸리는 토크로 다음과 같이 주어진다.

$$T_p(\theta) = (K_p \alpha_p + F_i) l_p \quad (5)$$

여기서 K_p 는 페달의 스프링 상수, α_p 는 페달의 변위이며, F_i 는 페달이 움직이기 시작할 때의 요구되는 초기 힘, l_p 는 가속 페달의 팔 길이이다.

기어 1 단에서 2 단으로의 변속이 요구되는 시점에 대한 토크맵의 구성을 Fig. 10 과 같이 구성하였다. 식 (4)에 요구되는 토크 궤적을 만족시키기 위한 제어 가능한 토크는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$T_c = 4\pi R^2 d \cdot \alpha H^\beta \quad (6)$$

따라서 자기장 항에 대한 제어 입력은 식(6)으로부터 역모델(inverse model)을 이용한 앞먹임 제어를 사용하여 다음과 같이 표현 할 수 있다.

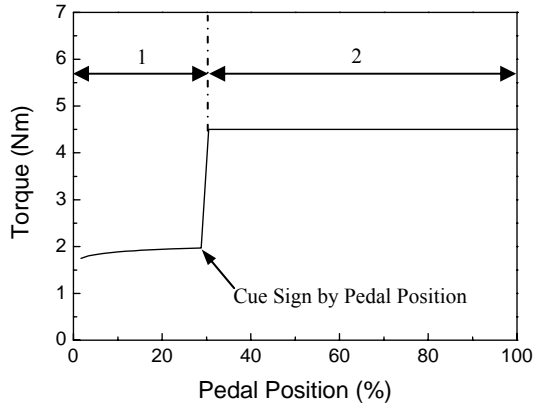


Fig. 10 Torque map of the gear shifting timing (1 → 2).

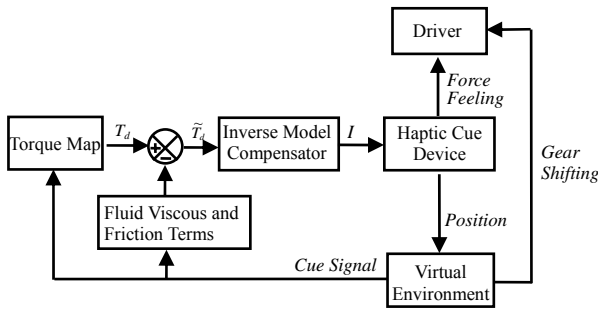


Fig. 11 Block diagram of the feed-forward controller.

$$H = \left(\frac{\tilde{T}_d}{\alpha \cdot 4\pi R^2 d} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (7)$$

여기서 α 와 β 는 빙햄모델(Bingham model)을 이용하여 실험적으로 구한 MR 유체의 고유 값이고, 그 값은 각각 0.092, 1.236 이다. 자기장 H 항에서 제어 입력을 결정하기 위해 다음과 같이 입력 전류를 계산하였다.

$$I = \left(\frac{2g}{N} \right) H \quad (8)$$

여기서 N 은 코일이 감긴 횟수, g 는 하우징과 디스크 사이의 간극 길이를 나타낸다. 따라서 MR 햅틱 큐 가속 페달 장치의 입력 전류는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$I = \frac{2g}{N} \left(\frac{\tilde{T}_d}{\alpha \cdot 4\pi R^2 d} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (9)$$

Fig. 11 은 역모델을 이용한 앞먹임 제어기의 블록 선도를 나타낸다. 역모델은 토크 맵에서 결정된 \tilde{T}_d 를 입력 받아 제어 입력(I)를 계산하여 계산된 전류를 MR 햅틱 큐 가속페달 장치에 인가하여 실제 토크를 발생시킨다.

dSPACE 와 Matlab-Simulink 프로그램을 이용하여 구성된 가상 환경과 상호 작용시켜 제안된 MR 햅틱 큐 가속페달 장치에 대한 제어 성능을 평가하기 위해 Fig. 12 와 같은 실험 장치를 구성하였다. MR 햅틱 큐 장치의 디스크에 연결된 가속페달은 차량 운전자에 의해 작동된다. 운전자가

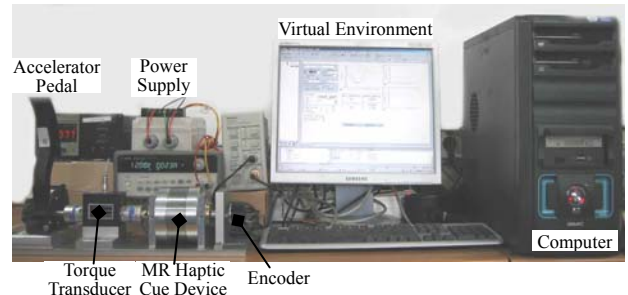
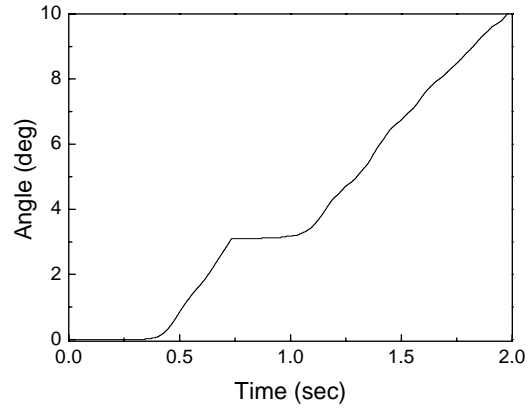
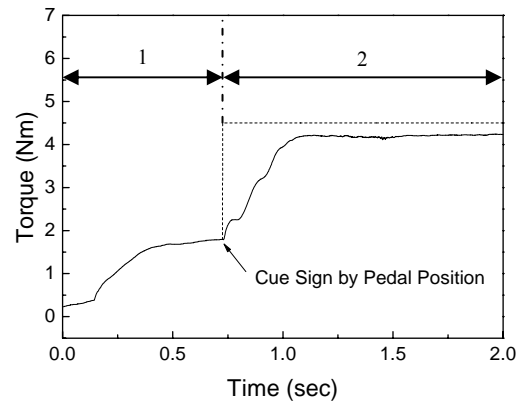


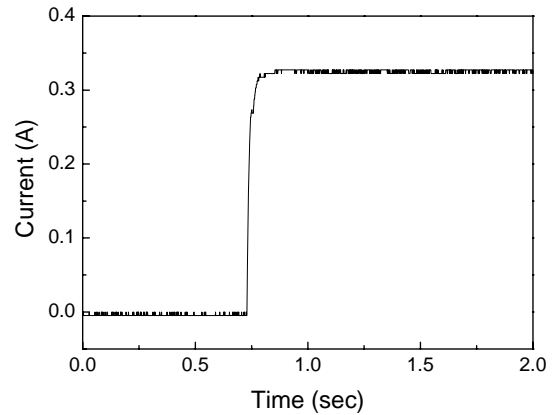
Fig. 12 Experimental apparatus for control performance evaluation.



(a) pedal position input



(b) tracking result



(c) control input

Fig. 13 Control result and input torque for cue sign gear shifting timing from 1 to 2.

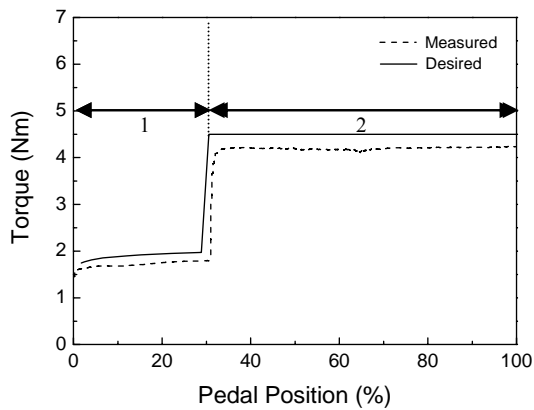


Fig. 14 Torque tracking control result for the cue signal gear shifting timing from 1 to 2

가속페달을 밟을 때, 페달의 위치 정보는 엔코더에 의해 얻어진다. 엔진 회전과 기어변속을 모방한 가상의 차량은 맵에 의한 가속페달 위치 정보에 따라 요구 토크에 대한 큐 신호가 작동되며 가상 환경에서 기어 변속 단계의 요구 시점을 보여준다. 식 (9)에 의해 주어진 앞먹임 제어기는 운전자에게 요구 제어가 반영된 MR 햅틱 큐 가속페달 장치를 작동시키게 한다. 기어 변속 요구가 이루어지는 순간 운전자는 이를 인식하게 된다. 이 과정에서 토크 센서에 의해 발생한 토크를 측정한다.

Fig. 13 은 1 단에서 2 단으로 기어 변속 시점을 위한 토크 추적 제어를 나타낸 결과이다. 가속페달을 밟는 동안 가속페달의 회전하는 각도는 Fig. 13(a)와 같이 증가하였다. 이 때, MR 햅틱 큐 장치의 작동에 의해 0.7 초와 0.9 초 사이에는 가속페달의 회전각도가 증가하지 않았음을 관찰 할 수 있었다. Fig. 13(b)에 의하면 차량 가속을 시작 한 지 약 0.7 초 후에 토크가 증가하기 시작하였고, 이 때부터 기어 1 단에서 2 단으로 변속을 운전자에게 요구하였으며, 이 순간 기어변속을 하게 되면 최적 연료 소모가 이루어짐을 알 수 있었다. 이 때 측정된 토크는 약 4.23Nm 로 설정된 요구 토크와의 오차는 약 0.27Nm 였다. 이 때 입력된 전류의 양은 Fig. 13(c)와 같이 약 0.32A 로 측정되었다. Fig. 14 는 가속페달 위치에 의한 생성된 토크의 결과를 보여준다. 가상 환경에 의해 작동된 요구 토크궤적에 대해 생성된 MR 햅틱 큐 가속페달 장치에 작동된 토크는 잘 추적되고 있음을 관찰할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 MR 유체를 적용하여 새로운 햅틱 큐 가속페달을 제안하였고, 그에 대한 개념을 실험적으로 증명하였다. 우선 유한 요소법을 적용한 최적 설계 기법을 이용하여 MR 햅틱 큐 장치를 설계 및 제작하였고, 제작된 장치는 가속페달

과 연결하였다. 보다 실제적인 실험환경을 구성하기 위해 MR 햅틱 큐 가속페달 장치는 엔진 회전과 기어 변속을 모방된 차량 가상 환경과 상호 작용시켰다. 차량의 최적 기어변속을 위해 제안된 햅틱 큐 개념을 증명하기 위해, 토크 맵과 가속페달의 위치에 따라 요구된 큐 신호 프로파일을 생성하였고, 이를 추종하기 위해 시스템의 제어 토크 역모델로부터 앞먹임 제어기를 구축하였다. 이로부터 차량 가속 시 기어 1 단에서 2 단으로의 변속하는 경우를 고려하여 햅틱 큐 성능을 평가하였고, 최적의 기어 변화시점과 최소 연료 소모를 도출할 수 있음을 확인하였다. 향후 비선형 엔진 모델을 이용하여 연비를 평가할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국 학술 진흥 재단 2008 년도 기초연구 지원 기초 과학사업 (과제번호 D00049)지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, D. K., Peng, H., Bai, S. and Maguire, J. H., 2007, "Control of Integrated Powertrain with Electronic Throttle and Automatic Transmission," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.15, No.3, pp. 474~482.
- (2) Haj-Fraj, A. and Pfeiffer, F., "Optimal Control of Gear Shift Operations in Automatic Transmissions," 2001, Journal of the Franklin Institute, Vol.338, pp. 371~390.
- (3) Aoki, J. and Murakami, T., 2008, "A Method of Road Condition Estimation and Feedback Utilizing Haptic Pedal", Proceedings of the 10th International Workshop on Advanced Motion Control, pp.777-782.
- (4) Kobayashi, Y., Kimura, T., Yamamura, T., Naito, G. and Nishida, Y., "Development of a Prototype Driver Support System with Accelerator Pedal Reaction Force Control and Driving and Braking Force control," SAE, 2006-01-0572.
- (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) Kim, S. J., Cho, C. H., Lee, J. M., Hwang, Y. and Kim, M., 2004, "A Small MR Brake for Force Feedback Devices," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 169~172.
- (7) Li, W. H., Du, H., Guo, N. Q. and Kosasih, P.B., 2004, "Magnetorheological Fluids Based Haptic Device," Emerald Sensor Review, Vol.24, No.1, pp. 68~73.
- (8) Kim, C. J., Han, Y. M., Sung, K. G. and Choi, S. B., 2008, "Controllable Haptic Knob for Vehicle Instrument Using MR Fluids," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.18, No.3, pp. 307~314.
- (9) Lord Corporation, Lord technical data, [Http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7015.pdf](http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7015.pdf).