

# 변속보조를 위한 햅틱장치의 최적설계 및 성능평가

## Design and Evaluation of Haptic Device to Support Vehicle Gear-Shifting

한영민† · 오종석\*  
 Young-Min Han, Jong-Seok Oh

### 1. 서 론

최근 에너지 소비 효율 문제에 대한 관심이 커지면서 자동차 분야에서도 차량 연비가 주요한 관심사로 대두되고 있다. 이러한 차량연비에 직접적으로 영향을 미치는 요인은 여러 가지가 있지만 크게 차량에서 기인한 것과 운전자에게서 기인한 것으로 구분할 수 있다. 특히 운전자에게서 기인한 요인은 가/감속량, 기어변속 시점 등이 있으며, 이는 연료소모율 뿐만 아니라 차량의 구동력, 배출가스량과도 밀접한 관련이 있다. 따라서 이를 고려한 보조 시스템의 개발을 위해 많은 노력이 이루어지고 있지만 개개인의 운전습관과 직접적으로 관련이 있는 요인이기 때문에 많은 어려움이 있다<sup>(1)</sup>. 특히 수동변속 차량의 경우에는 최적의 변속시점을 결정하도록 운전자를 보조하는 기술의 구현이 매우 어렵다.

현재 다양한 분야에 활용되고 있는 햅틱기술은 촉감을 통해 적절한 정보를 전달할 수 있으므로 최적의 기어 변속 타이밍을 운전자에게 전달하기 위한 시스템에 효과적으로 응용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 능동적인 힘 반향이 가능하도록 제어 가능한 클러치 장치를 가속페달에 도입하여 주행 중 최적의 기어 변속 타이밍을 토크 신호로 운전자에게 전달하여 기어변속을 유도 하는 변속 보조 햅틱 큐 시스템을 제안하고자 한다. 이를 위해 대표적인 지능재료의 하나인 MR(magneto rheological) 유체를 적용하였으며, 유한요소법을 이용하여 최적 설계를 통해 차량 가속페달과 연계한 햅틱 큐 장치를 제작하였다. 마지막으로 앞먹임제어기(feed-forward controller)를 사용하여 햅틱 큐 제어 성능을 실험적으로 평가하였다.

### 2. MR 클러치형 햅틱 큐 장치 설계

본 연구에서 제안한 MR 햅틱 큐 장치는 클러치 메커니즘을 이용하고 있으며 Fig. 1 과 같은 구조를 갖는다. 클러치는 코일(coil)이 감긴 원형디스크에 연결되어 있고, 원형 디스크는 MR 유체가 채워져 있는 하우징에 조립되어있다. 제안된 MR 햅틱 큐 가속페달 장치에서 발생하는 토크의 크기는 제어 토크(controllable torque)  $T_c$ , 점성 토크(viscous torque)  $T_\eta$ , 마찰 토크(friction torque)  $T_f$  들을 합한 것으로 수학적으로는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$T = 4\pi R^2 d \tau_y(H) + \frac{4\pi\eta R^3 d \dot{\theta}}{h} + C_{cf} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + C_{vf} \dot{\theta} \quad (1)$$

여기서,  $\tau_y(H)$ 는 자기장  $H$ 에 대한 MR 유체의 항복 전단응력,  $\eta$ 는 점성계수,  $\dot{\theta}$ 은 모터에 의해 구동되는 회전 하우징의 회전 각속도,  $R$ 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.

제안된 햅틱용 MR 클러치 장치에 대한 최적의 기하학 형상을 얻기 위해 ANSYS 를 사용하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 최적설계를 수행하기 위한 목적 함수는 다음과 같다.

$$\lambda = \max \left\{ T_c / (T_c + T_\eta) \right\} \quad (2)$$

그리고 자기 회로의 기하학적인 형상이 MR 햅틱 큐 장치의 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 디스크에서 마그네틱 코일을 제외한 부분의 높이 ( $d$ ), 코일의 넓이( $C_a$ ), 코일부분을 제외한 자로의 폭 ( $G_w$ )을 최적화 설계변수로 선정하였다.

본 연구에서는 APDL(ANSYS parametric design language)를 이용하여 최적화를 수행하였다. 먼저 클러치는 축대칭의 기하학적 구조를 갖고 있기 때문에 자로의 전자기 해석을 수행하기 위한 유한요소 모델 2D 축대칭 요소(2D-axisymmetric coupled

† 교신저자; 정회원, 아주자동차대학 자동차계열  
 E-mail : ymhan@motor.ac.kr  
 Tel : (041) 939-3183, Fax : (041) 939-3490  
 \* 인하대학교 대학원

element: Plane 13)와 4 절점 사변형 메쉬(4-node quadrilateral mesh)가 사용되었다. 또한 최적화 과정에서 MR 클러치의 기하학적 크기가 변하기 때문에 메쉬의 크기는 라인당 요소의 개수로 정의하였다. 전체적인 크기를 고정시키기 위해 구속조건으로 디스크의 반지름과 높이를 각각 40mm, 35mm 로 고정하였으며, 간극의 크기  $g$  는 1mm 이다. 해석 수행 시 디스크 높이, 코일의 넓이, 자로의 폭에 대한 범위는 각각 4~7mm, 168~432mm<sup>2</sup>, 10~18mm 로 선정하였으며, 초기값은 각각 4mm, 378mm<sup>2</sup>, 12mm 로 설정하였다. Fig. 2 는 최적설계 결과를 보여준다. 반복회수가 증가함에 따라 목적함수가 수렴하고 있음을 알 수 있다. 그에 따라 디스크 높이, 코일의 넓이, 자로의 폭은 각각 6.49mm, 325mm<sup>2</sup>, 11.21mm 로 수렴하였다. 최종 수렴값에서 자속밀도는 Fig. 2(b)와 같으며, 이때 발생하는 토크는 6.70Nm 이다.

### 3. 햅틱 큐 성능 평가

본 연구에서는 변속 큐 신호를 운전자에게 전달하기 위해 토크 역모델(inverse model)을 이용하여 다음과 같은 앞먹임 제어기에 의해 입력전류를 결정하였다.

$$I = \frac{2h}{N} \left( \frac{T_m - 4\pi\eta R^3 d\dot{\theta} / h - T_f}{\alpha \cdot 4\pi R^2 d} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3)$$

여기서  $T_m$  은 토크맵에 의해 결정되는 값이며, 본 연구에서는 가속페달을 밟는 각도가 30% 이상일 때 2Nm 의 큐 신호가 발생하도록 설정하였다.

Fig. 3 은 실제 제작된 MR 햅틱 큐 장치이다. 토크를 측정하기 위해 10Nm 의 용량을 가진 회전형 토크 센서를, 회전에 따른 위치를 측정하기 위해 1 회전당 3600 의 펄스를 출력하는 인크리멘탈형 엔코더(incremental encoder)를 설치하였다. 먼저 차량을 가속시키기 위해 Fig. 4 와 같이 가속 페달각을 변화시켰다. Fig. 5 는 2 단에서 3 단으로 기어 변속을 위한 햅틱 큐 제어 시 토크 제어 결과를 보여준다. 이 때 약 7.3s 에서 큐 신호가 발생하였고, 적절한 제어 입력에 의해 토크는 요구 궤적을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 이로 부터 운전자가 토크에 의한 큐 신호를 인지하여 7.8s 에서 변속이 실행되었다.

### 4. 결론

본 연구에서는 MR 클러치를 적용하여 새로운 햅틱 큐 변속보조 시스템을 제안하였고, 그에 대한 개념을 실험적으로 증명하였으며, 향후 차량 엔진모델을 적용하여 연구를 발전시켜 나갈 예정이다.

## 후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A2005370).

## 참 고 문 헌

(1) 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.

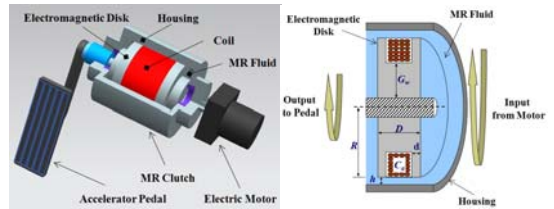
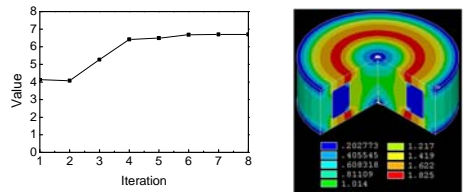


Fig. 1 Geometric configuration.



(a) objective function (b) magnetic flux density

Fig. 2 Optimization results.

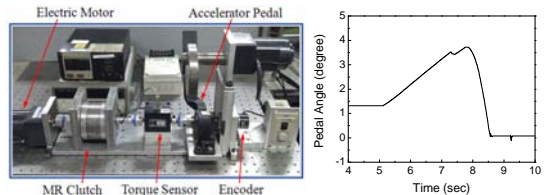
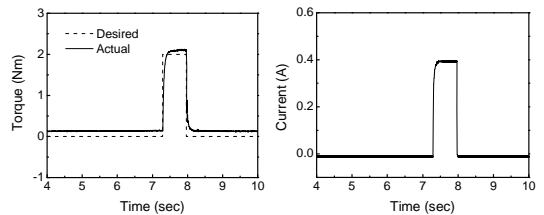


Fig. 3 Experimental setup.

Fig. 4 Pedal Input.



(a) torque tracking

(b) control input

Fig. 5 Haptic control results.