Transactions of the KSNVE, 24(1) : 54~61, 2014
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2014.24.1.054

한국소음진동공학회논문집 제24권 제1호, pp. 54~61, 2014
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

차량모델을 고려한 햅틱 큐 기어변속보조 시스템의 성능평가

Performance Evaluation of Driver Supportive System with Haptic Cue Gear-shifting Function Considering Vehicle Model

한 영 민†·성 락 훈*
Young-Min Han and Rockhoon Sung

(Received October 31, 2013 ; Revised January 13, 2014 ; Accepted January 13, 2014)

Key Words : Haptic Cue Device(햅틱 큐 장치), Magnetorheological Fluid(자기유변유체), MR Clutch(MR 클러치), Vehicle Gear-shifting(차량 기어변속), Feed-forward Control(앞먹임 제어), Vehicle Model(차량모델)

ABSTRACT

This paper proposes a driver supportive device with haptic cue function which can transmit optimal gear shifting timing to a driver without requiring the driver's visual attention. Its performance is evaluated under vehicle model considering automotive engine, transmission and vehicle body. In order to achieve this goal, a torque feedback device is devised and manufactured by adopting the MR (magnetorheological) fluid and clutch mechanism. The manufactured MR clutch is then integrated with the accelerator pedal to construct the proposed haptic cue device. A virtual vehicle emulating a four-cylinder four-stroke engine, manual transmission system of a passenger vehicle and vehicle body is constructed and communicated with the manufactured haptic cue device. Control performances including torque tracking and fuel efficiency are experimentally evaluated via a simple feed-forward control algorithm.

1. 서 론

현재 자동차 산업 분야에서는 차량에 새로운 부가기능을 부여하거나 운전자 편의성을 증대시키기 위해 다양한 주행보조시스템이 연구 개발되고 있다. 이 연구에서는 수동변속 차량에서 연비를 향상시킬 수 있는 방안으로서 적절한 기어변속 타이밍을 운전자에게 전달할 수 있는 기능의 필요성에 착안하였으며, 이를 구현하기 위한 새로운 주행보조시스템을 제안하고자 한다. 차량연비에 직접적으로 영향을 미치는 요인은 여러 가지가 있지만 변속 타이밍은 운전자에게서 기인한 요인으로서 개개인의 운전습관과 직접적으로 관련이 있는 요인이기 때문에 이를 위한 운전자 보조 기술의 개발에는 많은 어려움이 있다[(1)]. 이를 극복하기 위한 가장 주요한 기술 중에 하나는 운전자에게 변속 타이밍을 전달할 수 있는 효과적인 매개수단을 구현하는 것이다.

사람의 촉각적 감각을 기초로 정보를 전달하는 햅틱기술은 최근 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 자동차 분야에서 많은 연구자들에 의해 활발한 연구가 진행되고 있다. 대표적으로 Aoki 등은 운전자에게 측정된 도로 상태를 알려주기 위한 햅틱 페달을 제안하였으며[(2)], Kobayashi 등은 차량의 후방 충돌

† Corresponding Author ; Member, Ajou Motor College
E-mail : ymhan@motor.ac.kr
Tel : +82-41-939-3183, Fax : +82-41-939-3490
* Ajou Motor College

A part of this paper was presented at the KSNVE 2013 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

위치를 피하기 위해 운전자에게 촉각 반응을 전달하는 가속 페달을 제안하였다[3]. 일반적으로 햅틱 피드백 장치들은 서보급의 전기모터를 이용하기 때문에, 작동 메커니즘이 복잡하고 힘 제어를 연속적으로 또는 미세하게 제어하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 MR 유체(magnetorheological fluid)와 같은 지능재료를 이용한 햅틱 장치 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 이를 이용한 클러치나 브레이크 장치들은 큰 힘과 간단한 설계, 연속 제어가 가능한 특징 때문에 햅틱 분야에서 널리 연구되고 있다. 대표적인 연구로 Li 등은 MR 유체를 이용한 햅틱 노브를 제안 하였다[4]. 또한 Kim 등은 MR 유체를 이용하여 다기능 햅틱 장치를 제안하였다[5].

이러한 햅틱기술을 차량에 적용하면 촉감을 통해 적절한 정보를 운전자에게 전달할 수 있다. 따라서 수동 변속기가 장착된 차량에서 최적의 연료 효율을 얻기 위해 적절한 기어 변속 타이밍을 운전자에게 전달하기 위한 시스템에 응용될 수 있다. 즉 촉감을 전달하는 햅틱 메커니즘을 적용하여, 운전자의 의지를 반하지 않는 한도 이내의 토크 신호를 운전자의 신체에 직접 전달하는 것이다. 일반적으로 햅틱 큐라고 알려진 이러한 개념은 Han 등이[6] 제안하여 MR 클러치 메커니즘을 차량의 가속페달에 적용한 햅틱 큐 장치의 기초연구를 진행하였으나, 햅틱장치의 최적설계와 토크구현 성능평가에 제한되었다. 따라서 제안된 개념과 장치의 타당성을 평가하기 위해서는 차량의 주행모델과 엔진-트랜스미션모델에 기반한 햅틱 큐 성능과 연료 소모율에 대한 검증이 필수적이다.

따라서 이 연구에서는 MR 유체를 이용한 클러치형 햅틱 큐 장치를 제작하고 차량의 가속페달에 적용하였다. 그리고 제안된 시스템의 성능평가를 위해 차량엔진모델과 차량주행모델을 이용한 가상차량을 구축하여 제안된 햅팁 큐 장치와 연동하였다. 또한 햅틱 큐 장치의 토크모델을 고려한 앞먹임 제어기(feed-forward controller)를 적용하여 햅틱 큐 성능을 실험적으로 평가하고 이로부터 제안된 시스템의 연비향상을 검증하였다.

2. MR 햅틱 큐 장치

Fig. 1은 이 연구에서 기어변속을 보조하기 위해 제안한 MR 햅틱 큐 장치이다[6]. 그림에 나타낸 바와 같이 이 연구에서 제안된 MR 햅틱 큐 장치는 가속페달과 연결되는 구조를 채택하고 있다. 차량의 가속페달은 운전자의 발 조작에 의해 회전 운동이 일어나므로 제안된 장치는 전단모드(shear mode)형 클러치 메커니즘을 이용하고 있다. 그림에 나타낸 바와 같이 클러치는 코일(coil)이 감긴 원형디스크에 연결되어 있고, 원형 디스크는 MR 유체가 채워져 있는 하우징에 조립되어있다. 유체점성에 의해서 거동하는 일반 뉴토니언(Newtonian) 유체와는 달리 MR 유체는 자기장이 인가되면 항복전단응력을 갖게 된다. 따라서 자기장 H가 MR 유체에 작용하면 전단 응력은 다음과 같은 빙햄 모델로 표현할 수 있다[7].

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y(H) + \eta\dot{\gamma} \\ \tau_y(H) &= \alpha H^{\beta} \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 η는 MR 유체의 기본 점성계수이고, $\dot{\gamma}$는 전단 속도비, $\tau_y(H)$는 자기장에 대한 MR 유체의 항복 전단 응력을 나타낸다. 이 때 비례상수 α와 지수 β는 MR 유체의 항복 응력을 결정하는 고유 특성 값이다. 따라서 제안된 햅틱장치에서 발생하는 토크는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = 4\pi R^2 d\tau_y(H) + \frac{4\pi\eta R^3 d\dot{\theta}}{h} \tag{2}$$

여기서, $\tau_y(H)$는 자기장 H에 대한 MR 유체의 항복 전단응력, η는 점성계수, $\dot{\theta}$은 모터에 의해 구동되는 회전 하우징의 회전 각속도, R은 디스크의 반지름, h는 디스크의 높이, d는 디스크에서 마그네틱 코일을 제외한 부분의 높이이다. Fig. 2는 실제 제작된 MR 클러치이다. 클러치 자로(flux guide)의 재질은 강(steel S45C)이며, 나머지 외부와 축은 알루미늄(Al 6061)으로 제작하였고, 자기장의 생성을 위해 직경 0.75 mm의 동선을 500회 감았다.

3. 차량 모델

Fig. 3은 이 연구에서 제안된 햅틱 큐 장치의 제어 성능 평가를 위한 차량모델을 보여준다. 제안된

모델은 흡기 매니폴드에서 연소실린더로 이동하는 공기-연료혼합기의 매니폴드 운동방정식과 연소모델 그리고 엔진토크에 의해 구동되는 차량의 운동방정식으로 구성된다.

먼저 운전자가 악셀을 밟으면 스로틀 개도각의 증가에 따라 엔진 내부로 연료가 유입된다. 이 때 기체연료 혼합기의 충진율은 스로틀 개도각(ϕ)과 매니폴드 압력(p)의 함수로 나타나므로 매니폴드 유입되는 질량유량($\dot{m}$)은 다음과 같이 표현된다[8,9].

$$\dot{m} = f(\phi) \cdot g(p) \tag{3}$$

$$f(\phi) = 2.821 - 0.05231\phi + 0.10299\phi^2 - 0.00063\phi^3$$

$$g(p) = \begin{cases} 1, & if \;\; p < 0.5 p_{atm} \\ \dfrac{2}{p_{atm}}\sqrt{p_{atm}p - p^2}, & if \;\; p \geq 0.5 p_{atm} \end{cases}$$

여기서 p_{atm}은 대기압으로 약 100 kPa이다. 그리고

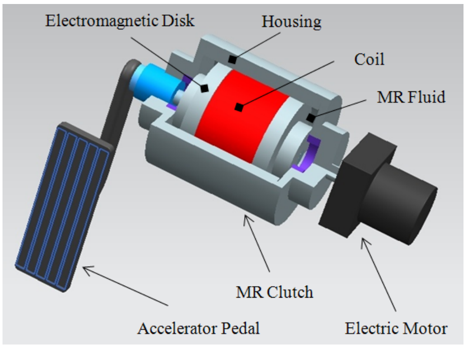


Fig. 1 Configurations of the MR haptic cue device

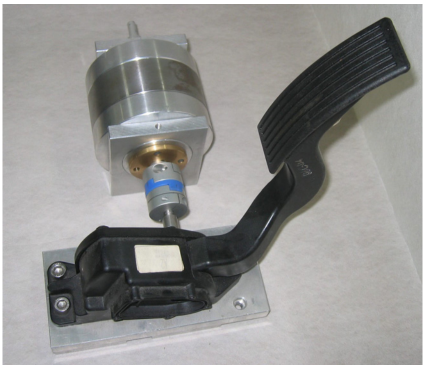


Fig. 2 The manufactured MR clutch

매니폴드에서 나가서 연소 실린더로 유입되는 질량유량($\dot{M}$)은 다음과 같다.

$$\dot{M} = -0.366 + 8.979979pn - 337np^2 + 0.01n^2p \tag{4}$$

여기서 n은 엔진의 회전 각속도이다. 이 때 크랭크 샤프트가 첫 180° 회전하는 흡입행정에서 연료혼합기가 모두 연소 실린더로 유입되는 것으로 가정한다. 이로부터 매니폴드 운동방정식은 다음과 같이 1차 선형모델로 표현된다.

$$\dot{p} = k(\dot{m} - \dot{M}) \tag{5}$$

여기서 k는 비기체상수로 약 0.5786이다. 이로부터 각 실린더에 충진되는 연료혼합기의 양을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_c = \dot{M}\frac{\pi}{n} \tag{6}$$

따라서 연소행정에서 발생하는 엔진 구동토크는 실린더에 충진되는 연료혼합기 양으로부터 다음과 같이 경험적인 함수로서 구해진다[8,9].

$$\begin{aligned} T_{eng} &= -181.3 + 379.36M_c + 21.91(A/F) \\ &\quad - 0.85(A/F)^2 + 0.26\sigma - 0.0028\sigma^2 \\ &\quad + 0.027n - 0.000107n^2 + 0.00048n\sigma \\ &\quad + 2.55\sigma M_c - 0.05\sigma^2 M_c \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 (A/F)는 공기-연료 혼합율로서 약 14.6이다. 그리고 σ는 스파크 어드밴스로서 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma = \frac{0.26 + 0.00048n + 2.55M_c}{0.0056 + 0.1M_c} \tag{8}$$

마지막으로 엔진으로부터 인가된 구동력 F_{eng}에 의한 차량의 동적 거동은 간단히 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$J\dot{n} + M_v\dot{v} = F_{eng} - F_l \tag{9}$$

여기서 n과 v은 각각 엔진회전속도와 차량의 주행속도를 나타내며 J는 엔진의 회전관성 모멘트, M_v

는 차체의 질량이다. 그리고 F_l은 주행저항이다. 이 때 엔진에 의해 발생한 회전력은 변속장치를 통해 휠을 회전시켜 차량을 주행하게 하므로 다음과 같이 차량속도와 엔진회전속도의 선형관계가 성립한다.

$$v = r_w g_r(i) n, \quad i = 1,2,3,4 \tag{10}$$

여기서 r_w는 타이어 반경이다. $g_r(i)$는 i단에서의 변속비이다. 따라서 차량의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\left\{ J + \frac{M_v}{[r_w g_r]^2} \right\} \dot{n} = \frac{1}{r_w g_r(i)} \left[T_{eng} - T_l \right] \tag{11}$$

여기서 T_l은 엔진마찰, 타이어 구름저항, 공기역학적 항력을 고려한 것이며 다음과 같이 계산되었다.

$$\begin{aligned} T_l = {} & C_{ce} \cdot \mathrm{sgn}(n) + C_{ce} n + \mu_t M_v g r_w g_r(i) \\ & + 0.5 C_d \rho A_v [r_w g_r(i)]^3 n^2 \end{aligned} \tag{12}$$

여기서 C_{ce}와 C_{ve}는 엔진의 회전운동에 따른 쿨롬 마찰계수와 점성마찰계수이다. μ_t는 타이어의 동마찰계수, g는 중력가속도를 나타낸다. 그리고 C_d는 공기역학적 항력계수, ρ는 공기밀도, A_v는 차량정면의 단면적이다. 따라서 엔진, 차체, 변속기, 크랭크축을 포함한 차량의 동적운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \left\{ J + \frac{M_v}{[r_w g_r(i)]^2} \right\} \dot{n} \\ & = \frac{1}{r_w g_r(i)} \left\{ \begin{aligned} & -181.3 + 379.36 M_c + 21.91 (A/F) \\ & -0.85 (A/F)^2 + 0.26\sigma - 0.0028\sigma^2 \\ & +0.027n - 0.000107n^2 + 0.00048n\sigma \\ & +2.55\sigma M_c - 0.05\sigma^2 M_c \end{aligned} \right\} \\ & \quad - \frac{1}{r_w g_r(i)} \left\{ \begin{aligned} & C_{ce} \cdot \mathrm{sgn}(n) + C_{ce} n + \mu_t M_v g r_w g_r(i) \\ & + 0.5 C_d \rho A_v [r_w g_r(i)]^3 n^2 \end{aligned} \right\} \end{aligned} \tag{13}$$

단, 이 연구에서는 차량 ECU(engine control unit)의 개입을 배제하였으며, 또한 엔진마찰이 전체 차량 부하에 포함된 것으로 가정하였다. 이는 클러치 작동 후반부에 엔진회전수의 리플이 실제차량 보다 크게 나타나게 할 수 있다.

4. 햅틱 큐 알고리즘

Fig. 4는 햅틱 큐 아키텍처를 보여주고 있다. 제작된 MR 햅틱 큐 장치는 운전자가 가속을 하기 위해 가속페달을 밟는 과정, 힘 반향 알고리즘에 의해

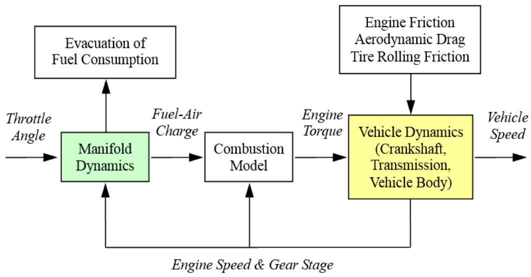


Fig. 3 Vehicle model

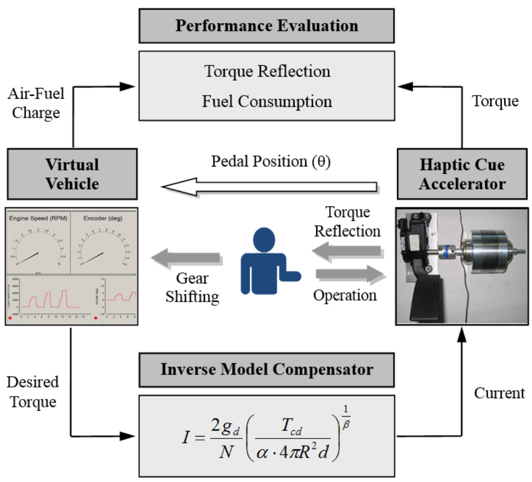


Fig. 4 Haptic cue architecture

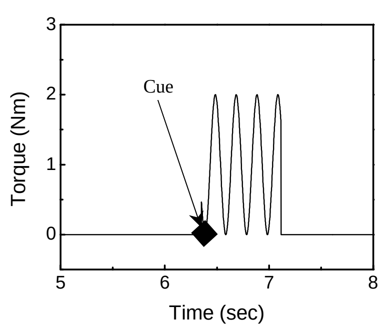


Fig. 5 Torque map

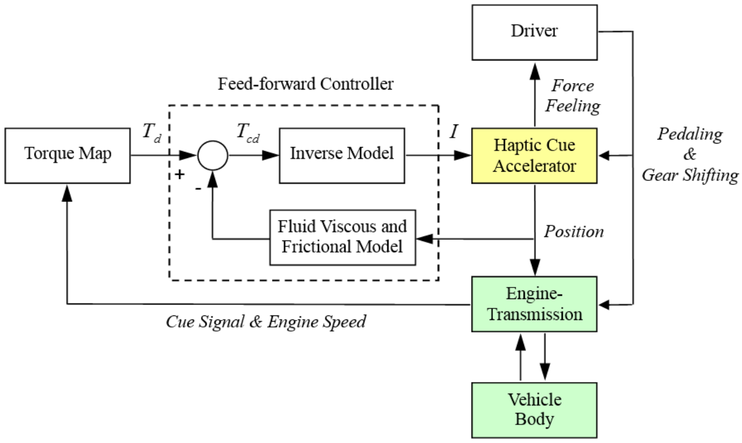


Fig. 6 Control block diagram

변속 큐 신호를 운전자에게 전달하는 과정, 그리고 운전자의 변속실행 과정을 통해 운전자와 상호작용한다. 그 동안에 MR 햅틱 큐 가속페달 장치를 작동하는 운전자는 기어 변속이 요구 되는 시점을 다리로 전달되는 반력을 인지하여 변속을 실행하게 된다. 이 연구에서는 햅틱 큐 신호를 발생시키기 위해 모델 기반의 앞먹임 제어기를 구성하였다. 이는 센서가 필요 없고 구조가 간단하여 실제 적용이 용이한 장점이 있다. 특히 정밀한 토크추적에는 어려움이 있지만 운전자가 인지할 수 있는 범위의 토크 자극을 구현해야 하는 본 연구에서는 가장 단순하면서도 신뢰할 수 있는 제어기법이다. 이를 위해 먼저 운전자에게 전달되는 토크 중에서 MR 장치에 의해 구현할 수 있는 토크는 다음과 같이 결정된다.

$$\tilde{T}_{cd} = \tilde{T}_{md}(\theta) - (4\pi\eta R^3 d / h)\dot{\theta} - T_f(\theta) - T_p(\theta) \tag{14}$$

여기서 $\tilde{T}_{md}(\theta)$은 미리 주어진 맵에 의해 계산된 토크궤적이며, 이 연구에서는 효과적인 큐 신호의 인지를 위해 Fig. 5와 같이 2 Nm의 진폭에 4 Hz의 진동수를 갖는 사인파형의 맵을 설정하였다. 맵의 진폭과 진동수는 각각 2 Nm와 4 Hz로 설정하였으며, 이는 운전자를 방해하지 않는 최소한의 반력으로 0.5초 이내에 최소 2회의 큐 신호를 전달하기 위한 것이다. 그리고 $T_p(\theta)$와 T_f는 각각 페달이 원위치로 복귀하기 위한 스프링 토크와 쿨롱(Coulomb) 마찰에 의한 토크이며, 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} T_p(\theta) &= (K_p \alpha_p + F_i)\, l_p \\ T_f &= C_{cf}\,\mathrm{sgn}(\dot{\theta}) + C_{vf}\dot{\theta} \end{aligned} \tag{15}$$

여기서 K_p는 페달의 스프링 상수, α_p는 페달의 변위이며, F_i는 페달이 움직이기 시작할 때의 요구되는 초기 힘, l_p는 가속 페달의 길이이다. 그리고 C_{cf}는 쿨롱 마찰 계수, C_{vf}는 점성 마찰 계수, $\mathrm{sgn}(\cdot)$는 signum 함수이다. 이 때 요구되는 토크 궤적을 만족시키기 위한 제어 가능한 토크와 그에 따른 제어입력은 다음과 같이 결정된다[6].

$$\begin{aligned} T_c &= 4\pi R^2 d \cdot \alpha H^{\beta} \\ H &= \left(\frac{\tilde{T}_{cd}}{\alpha \cdot 4\pi R^2 d} \right)^{\frac{1}{\beta}} = \frac{NI}{2g} \end{aligned} \tag{16}$$

여기서 N은 코일이 감긴 횟수, g는 하우징과 디스크 사이의 간극 길이를 나타낸다. Fig. 6은 역모델을 이용한 앞먹임 제어기의 블록선도를 나타낸다. 역모델은 토크 맵에서 결정된 $\tilde{T}_{cd}$를 입력받아 제어 입력(I)를 계산하고, MR 햅틱 큐 장치에 인가하여 실제 토크를 발생시키면 이를 큐 신호로 활용한다.

4. 햅틱 큐 성능 평가

Fig. 7은 실제 제작된 햅틱 큐 장치를 이용한 실험장치의 구성을 보여준다. 이전 연구에서 최적설계를 통해 제작된 MR 클러치가 실제 차량에 사용되는

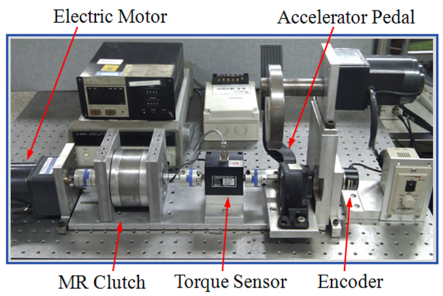
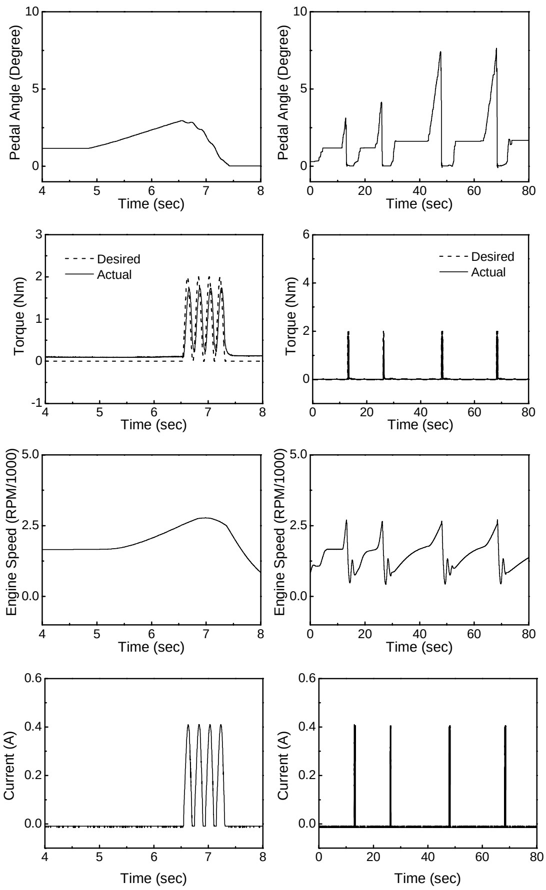


Fig. 7 Experimental configurations



(a) Gear 1stà gear 2nd (b) Gear 1stà gear 5th

Fig. 8 Haptic cue results

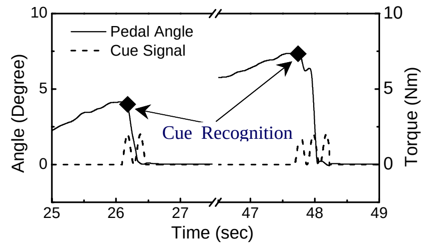
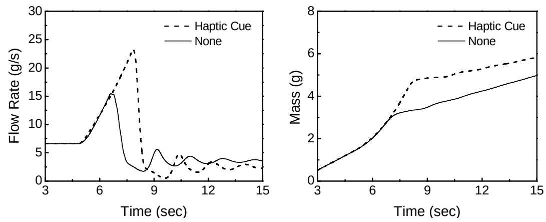


Fig. 9 Haptic cue recognition



(a) Air-fuel charge (b) Fuel mass

Fig. 10 Fuel consumption

상용 가속페달에 직결되어 햅틱 큐 시스템을 구성하고 있다. 이 때 토크를 발생시키는 구동원으로 교류모터(ac motor)를 사용하였으며, MR 클러치의 입력전류를 조절함으로서 가속페달에 전달되는 토크신호를 조절할 수 있다. 이 때 전달되는 토크와 페달 회전각을 측정하기 위해 토크센서와 엔코더가 설치되었다. 토크센서는 10 Nm의 용량을 가진 회전형 토크 센서이며, 엔코더는 1회전당 3600개의 펄스를 출력하는 분해능을 갖는 인크리멘탈형 엔코더(incremental encoder)이다. 그리고 사용된 MR 유체는 미국 Lord사의 MRF-132DG[10]로 Carbonyl iron과 Hydrocarbon oil을 합성한 것이다.

실험장치 구성을 보면 MR 햅틱 큐 장치의 디스크에 연결된 가속페달은 차량 운전자에 의해 작동된다. 운전자가 가속페달을 밟을 때, 페달의 위치 정보는 엔코더에 의해 얻어진다. 측정된 가속페달 위치정보는 차량엔진모델로 전달되어 스로틀밸브 각이 조절된다. 이로부터 엔진연소모델에 의해 엔진구동력이 결정되며, 이는 차량 주행모델과 연동되어 엔진회전수와 그에 따른 차량 속력이 결정된다. 이 연구에서 차량은 엔진회전수 1800 rpm에서 항속하는 것으로 가정하였으며, 2500 rpm에 도달하면 변속을 위해 큐 신호가 발생하도록 하였다. 따라서 식 (16)에 의해 결정된 앞먹임 제어입력이 인가되어 햅틱 큐 장치의 MR 클러치를 작동시키게 되면 사인파형의 토크신호를 운전자에게 전달한다. 이로부터 운전자는 기어변속 시점을 인식하고 실행하게 된다.

Fig. 8은 햅틱 큐 제어 결과를 보여준다. 먼저 Fig. 8(a)는 차량을 가속시키기 위해 변속기어를 1단

에서 2단으로 상승시키는 경우이며, 가속 페달각을 변화에 따라 엔진회전수가 증가하고 있다. 회전수가 2500 rpm에 도달하여 사인파형의 토크 큐 신호가 성공적으로 발생하였으며 햅틱장치는 큐 신호의 토크궤적을 최대오차 12.5 % 이내에서 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 이 때 기어변속이 실행되면 큐 신호는 자동으로 종료되며, 운전자가 변속을 실행하지 않더라도 1초 이상 지속되지 않도록 설정되었다.

Fig. 8(b)는 운전자가 차량을 가속시키면서 수동으로 1단에서 5단으로 기어변속을 수행하도록 한 결과이다. 결과에 나타낸 바와 같이 운전자가 햅틱 큐 신호를 인지하여 성공적으로 변속을 실행함을 알 수 있다. 이 때 평균인지시간은 Fig. 9와 같이 0.4초 이내로 계측되었다. Fig. 10은 차량의 엔진모델의 동적 거동에 기초하여 계산된 연료소모량을 나타내고 있다. 먼저 Fig. 10(a)는 기어 1단에서 2단으로 변속 시 연소실린더로 유입되는 공기- 연료혼합기의 유량을 나타내고 있으며, 그에 따른 연료소모량은 Fig. 10(b)와 같다. 결과와 같이 햅틱 큐에 따라 변속을 실행한 경우에 소모된 연료의 양이 줄어들고 있으며, 이로부터 제안된 장치가 과도한 엔진회전수의 상승을 막아 적정수준의 연료소모량을 유지하여 연비를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 수동변속 차량에서 운전자에게 최적의 변속시점을 전달하기 위해 햅틱 기술과 MR 클러치 메커니즘을 이용한 햅틱 큐 기어변속보조 시스템을 제안하여 실제 구현하였고, 차량모델에 기반하여 그 제어성능을 실험적으로 검증하였다. 먼저 4개의 실린더를 갖는 4행정 엔진에 대한 차량연소모델을 구축하여 엔진구동력을 계산하였으며, 이를 차량주행모델과 연동하였다. 이 때 공기역학적 항력, 크랭크축 마찰, 타이어 구름저항을 차량의 주행저항으로 고려하였다. 또한 운전자가 용이하게 인지할 수 있는 사인파형의 토크 궤적을 햅틱 큐 맵으로 작성하였으며, 햅틱 큐 장치의 토크모델에 기반한 앞먹임 제어 알고리즘에 의해 구현하였다. 마지막으로 운전자가 직접 실험에 참여하여 제안된 MR 장치에 의한 우수한 토크 추종성능과 햅틱 큐에 의한 정확한 변속시점 인지를 확인하였으며, 연소 실린더로 유입되는 공기-연료 혼합기의 유량으로부터 연료소모량을 계산하여 연비향상을 평가하였다. 이상의 결과로부터 이 연구에서 제안된 시스템의 성능을 실험적으로 증명하였으며 향후 실제차량에 적용하여 연구를 발전시켜 나갈 예정이다.

후 기

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

References

(1) Haj-Fraj, A. and Pfeiffer, F., 2001, Optimal Control of Gear Shift Operations in Automatic Transmissions, Journal of the Franklin Institute, Vol. 338, No. 2-3, pp. 371~390.

(2) 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.

(3) Kobayashi, Y., Kimura, T., Yamamura, T., Naito, G. and Nishida, Y., 2006, Development of a Prototype Driver Support System with Accelerator Pedal Reaction Force Control and Driving and Braking Force control, SAE, 2006-01-0572.

(4) 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.

(5) 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.

(6) Han, Y. M. and Min, C. G., 2013, Performance Evaluation of Vehicle Gear-shifting Supportive Device Utilizing MR Haptic Cue, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 160~166.

(7) Bingham, E. C., 1916, An Investigation of the Laws of Plastic Flow, U.S. Bureau of Standards Bulletin, Vol. 13, No. 2, pp. 309~353.

(8) Crossley, P. R. and Cook, J. A., 1991, A Nonlinear Engine Model for Drive Train System Development, IEE International Conference Control, Vol. 91, No. 2, pp. 921~925.

(9) Beydoun, A., Wang, L. Y., Sun, J. and Sivashankar, S., 1998, Hybrid Control of Automotive Powertrain Systems: a Case Study, Hybrid Systems: Computation and Control, Vol. 1386, No. 1, pp. 33~48.

(10) Lord Corporation, Lord technical data, Http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7015.pdf.

Young-Min Han was born in Changwon, Korea on December 1, 1969. He received the Ph.D. degree in mechanical engineering from Inha University, Incheon, Korea in 2005. Since 2011, he has been a Professor at Ajou Motor College, Chungman, Korea. His current research interest includes design and control of functional mechanisms utilizing smart materials such as active mounts, semi-active shock absorbers, hydraulic valve systems, robotic manipulators and human-machine interfaces. Professor Han is the author of over 50 international journal papers and 25 international conference proceedings.

Rockhoon Sung was born on February 20, 1965. He received the M.S. degree in mechanical engineering from KAIST, Chungnam, Korea in 1990. Since 1996, he has been a Professor at Ajou Motor College, Chungnam, Korea. Before joining College, he worked at Agency of Defense Development of Korea. His current research interest includes vibration control and crush analysis.