

# 듀얼 클러치 변속기가 장착된 차량의 클러치 및 구동축 토크 추정

김수영<sup>\*1)</sup> · 최세범<sup>1)</sup>  
한국과학기술원 기계공학과<sup>1)</sup>

## Torque Estimation of Individual Clutches and Drive shaft in Vehicles with Dual-clutch Transmission

Sooyoung Kim<sup>\*1)</sup> · Seibum Choi<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

**Abstract** : 본 논문은 듀얼 클러치 변속기(DCT)가 장착된 차량 구동계에서의 각 클러치와 구동축에 전달되는 토크의 추정 방법을 다루었다. 클러치 토크와 구동축 토크를 실시간으로 아는 것은 차량 파워트레인 제어 시 매우 유용하게 사용될 수 있다. 예를 들어, DCT 장착 차량의 경우, 원하는 변속 성능을 내기 위해서는 변속기 내 두 클러치를 통해 전달되는 토크를 정확하게 제어해주는 것이 중요한데, 이 때 실시간 전달 토크를 알 수 있다면 클러치 제어 성능을 급격히 향상시킬 수 있다. 그러나 양산 차량에는 가격, 공간 부족 등의 문제로 구동계에 토크 센서가 장착될 수가 없다. 본 논문에서는 이러한 토크 센서를 대체할 수 있는 구동계 토크 관측기를 개발하였다. 개발된 토크 관측기는 적응 슬라이딩 모드 관측기 (adaptive sliding mode observer)의 형태를 가지며, 클러치 마찰 계수와 엔진 토크의 불확실성에 강건한 특성을 가진다. 또한 관측기의 안정성을 Lyapunov stability 분석을 통해 수학적으로 검증하였고, 토크 센서가 장착된 DCT 테스트 벤치를 활용하여 토크 관측기의 추정 성능을 실험적으로 검증하였다.

**Key words** : Dual-clutch transmission(듀얼 클러치 변속기), Torque estimation(토크 추정), Sliding mode observer(슬라이딩 모드 관측기), Adaptation law(적응 기법)

### Nomenclature

F: force, N  
i: gear ratio, -  
k: torsional stiffness, N·m/rad  
J: rotational inertia, kg·m<sup>2</sup>  
T: torque, N·m  
 $\theta$ : rotational angle, rad  
 $\omega$ : angular velocity, rad/s

### Subscripts

c: clutch  
d: damper  
e: engine  
o: drive shaft (output shaft)  
t: transfer shaft  
v: vehicle  
w: wheel

\* 김수영, E-mail: westkllr@kaist.ac.kr

### 1. 서론

듀얼 클러치 변속기 (Dual-clutch transmission, DCT)는 변속 시 두 개의 클러치를 동시에 활용하는 변속 시스템으로서 타 종류의 변속기에 비해 좋은 연비와 승차감, 변속의 편리함까지 모두 갖출 수 있는 잠재력이 있다. DCT는 토크컨버터의 사용하지 않기 때문에 자동 변속기에 비해 연비가 뛰어나며, 클러치를 하나만 사용하는 수동 변속기나 자동화 수동 변속기에 비해 빠르고 부드러운 동력 전달이 가능하다. 그러나 이러한 DCT의 장점들은 차량 구동계 내의 정교한 토크 전달 제어가 이뤄졌을 때만 가능하며, 토크 제어가 잘못 됐을 경우에는 오히려 가속력, 승차감, 구동계의 내구성 등이 모두 나빠질 수 있다.

많은 문헌들에서 DCT를 이용한 변속 시 두 클러치와 엔진을 제어하여 부드럽고 빠르게 토크를 전달하는 방법에 대해서 다루었다.<sup>1)-3)</sup> 이 때 DCT 구동계에 전달되는 토크를 실시간으로 관측할 수 있다면 변속 제어 성능을 매우 향상시킬 수 있다. 변속 시 클러치에 전달되는 토크를 알면 클러치 액추에이터의 직접적인 토크 피드백 제어가 가능해지고, 차륜에 전달되는 구동축(drive shaft) 토크를 알 수 있다면 토크 기반 제어 로직을 통해 차량의 가속 성능 및 승차감을 향상시킬 수 있다. 그러나 양산 차량에는 이러한 토크를 측정할 수 있는 센서가 비싼 가격, 장착 공간 부족 등의 문제로 장착되지 않는다. 따라서 본 논문에서는 구동계 전달 토크를 실시간 모니터링할 수 있는 토크 관측기를 설계하였다.

관측의 대상이 되는 토크는 두 클러치의 전달

토크와 구동축 토크이며, 설계된 토크 관측기는 ECU (engine control unit)에서 계산되는 엔진 토크 값, 클러치 마찰 계수 등의 파라미터 불확실성에 강건한 적응 슬라이딩 모드 관측기의 형태를 띠고 있다. 토크 관측기의 추정 성능은 토크 센서가 장착된 DCT 벤치를 활용해 실험적으로 검증하였다.

### 2. DCT 구동계 모델링

DCT 구동계 모델은 각 부품들을 회전 관성(rotational inertia)으로 해석하여 쉽게 도출할 수 있다. 듀얼 매스 플라이휠을 동력 전달 특성을 고려해 간단히 비틀림 댐퍼라고 가정했을 때, 엔진과 비틀림 댐퍼의 각속도 동역학식은 다음과 같다.

$$J_e \dot{\omega}_e = T_e - T_d, \tag{1}$$

$$J_d \dot{\omega}_d = T_d - T_{c1} - T_{c2}, \tag{2}$$

각 클러치를 통해 동력을 전달받는 두 개의 변속기 입력 축의 각속도 식은 (3)-(4)로 표현할 수 있다.

$$J_{c1} \dot{\omega}_{c1} = T_{c1} - \frac{T_{i1}}{i_{i1}}, \tag{3}$$

$$J_{c2} \dot{\omega}_{c2} = T_{c2} - \frac{T_{i2}}{i_{i2}}, \tag{4}$$

식 (3)과 (4)에서  $i_{i1}$ 는 첫 번째 입력 축의 기어비를 나타내며  $i_{i2}$ 는 두 번째 축의 기어비를 나타낸다. 이 때 회전 관성 값  $J_{c1}$ ,  $J_{c2}$ 는 각각 클러치 1과 클러치 2에서 바라본 equivalent 회전 관성 값으로서, 변속기 입력 축, transfer 축, 기어 및 싱크로나이저 등의 관성을 모두 포함한

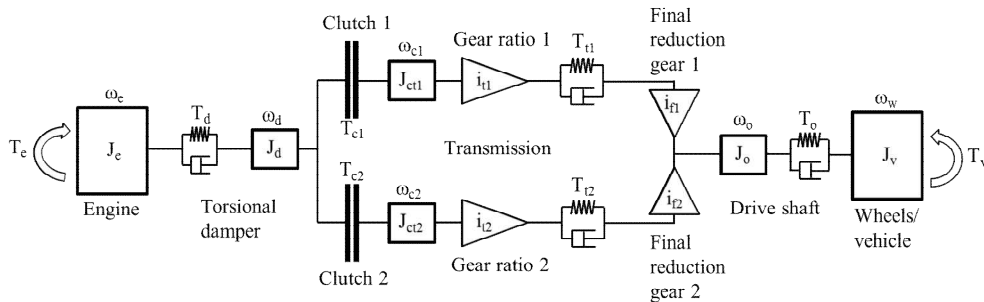


Fig. 1 DCT 구동계 다이어그램

다.

클러치를 통해 전달되는 토크는 클러치 상태에 따라, 즉 해제, 슬립, 체결 여부에 따라 다음과 같이 수학적으로 묘사할 수 있다.

$$T_{c1} = \begin{cases} 0 & \text{if disengaged} \\ \mu_{k1} F_{n1} r_{c1} N_1 \operatorname{sgn}(\omega_d - \omega_{c1}) & \text{if slipping} \\ T_{in1} \triangleq T_d - T_{c2} - J_d \dot{\omega}_d, & \text{if engaged} \end{cases} \quad (5)$$

$$T_{c2} = \begin{cases} 0 & \text{if disengaged} \\ \mu_{k2} F_{n2} r_{c2} N_2 \operatorname{sgn}(\omega_d - \omega_{c2}) & \text{if slipping} \\ T_{in2} \triangleq T_d - T_{c1} - J_d \dot{\omega}_d, & \text{if engaged} \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $\mu_k$ ,  $F_n$ ,  $r_c$  그리고  $N$ 은 각각 클러치의 동적 마찰계수, 클러치에 작용하는 수직항력, 유효 마찰 반경, 그리고 마찰면의 개수이다. 마찬가지로 구동축과 휠의 각속도 모델은 식 (7)-(8)로 표현할 수 있다.

$$J_o \dot{\omega}_o = i_{f1} T_{r1} + i_{f2} T_{r2} - T_o, \quad (7)$$

$$J_v \dot{\omega}_w = T_o - T_v, \quad (8)$$

식 (7)-(8)에서  $T_o$ 는 구동축 토크를 의미하며  $T_v$  휠에 작용하는 차량 부하를 의미한다.

차량 부하 토크는 도로 기울기, 공기 저항, 구름 저항 효과를 고려한 식 (9)로 표현할 수 있다.

$$T_v = \left( M_v g \sin(\varphi) + \frac{1}{2} \rho_{air} A_v C_D V^2 + M_v g C_{rr} \right) r_w. \quad (9)$$

식 (9)에서  $M_v$ ,  $\varphi$ ,  $\rho_{air}$ ,  $A_v$ ,  $C_D$ ,  $V$ ,  $C_{rr}$ ,  $r_w$ 는 각각 차량 무게, 도로 기울기 각, 공기 밀도, 차량 전면 면적, 공기 저항 계수, 차량 속도, 구름 저항 계수, 휠 반경을 의미한다.

### 3. 구동계 토크 관측기 설계

#### 3.1 감소 차수 모델

모델 기반 관측기를 설계하기 위해 식 (1)-(9)에 제시된 구동계 모델을 간소화할 필요가 있다. 엔진 각속도, 입력 축 1의 각속도, 휠 각속도, 구동축 토크를 편의상 각각  $x_1, x_2, x_3, x_4$ 라고 정의했을 때, 다음과 같은 4차의 감소 차수 모델을 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{J_{e+d}} (T_e - T_{c1} - T_{c2}) \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{J_{ct1\_eq}} (i_{r1} i_{f1} T_{c1} + i_{r2} i_{f2} T_{c2} - x_4) \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{J_v} (x_4 - T_v) \\ \dot{x}_4 &= k_o \left( \frac{x_2}{i_{r1} i_{f1}} - x_3 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

where  $J_{e+d} = J_e + J_d$ ,

$$J_{ct1\_eq} = \left( i_{r1} i_{f1} J_{ct1} + \frac{(i_{r2} i_{f2})^2}{i_{r1} i_{f1}} J_{ct2} + \frac{1}{i_{r1} i_{f1}} J_o \right).$$

식 (10)에서는 기어나 축을 통해서 기계적으로 연결된 곳을 하나의 lumped 회전 관성으로 해석해서 모델 차수를 급격히 감소시켰다. 또한 구동축 토크의 동역학적 식을 비틀림 스프링 모델을 사용하여 간단히 표현하였다. ( $k_o$ : 구동축의 비틀림 탄성 계수)

#### 3.2 토크 관측기 설계

본 논문에서 제안하는 토크 관측기는 외란과 파라미터 불확실성에 강건한 슬라이딩 모드 옵저버와 클러치 파라미터를 보정하기 위한 적응 기법이 융합된 형태를 가지고 있다.

##### 3.2.1 구동축 토크 추정을 위한 슬라이딩 모드 관측기

감소 차수 모델 (10)에 기반하여 구동축 토크를 추정하는 슬라이딩 모드 관측기는 식 (11)과 같이 설계된다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1 &= \frac{1}{J_{e+d}} (T_e - \hat{T}_{c1} - \hat{T}_{c2}) + l_1 \tilde{x}_1 + L_1 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_2 &= \frac{1}{J_{ct1\_eq}} (i_{r1} i_{f1} \hat{T}_{c1} + i_{r2} i_{f2} \hat{T}_{c2} - \hat{x}_4) \\ &\quad + l_2 \tilde{x}_2 + L_2 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2) \\ \dot{\tilde{x}}_3 &= \frac{1}{J_v} (\hat{T}_o - \hat{T}_v) + l_3 \tilde{x}_3 + L_3 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_3) \\ \dot{\tilde{x}}_4 &= k_o \left( \frac{\hat{x}_2}{i_{r1} i_{f1}} - \hat{x}_3 \right) - l_4 \tilde{x}_2 + l_5 \tilde{x}_3 \\ &\quad - L_4 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2) + L_5 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_3). \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $l_{1-4}$ ,  $L_{1-5}$ 는 관측기 게인이다.

3.2.2 클러치 파라미터 보정을 위한 적응 기법

슬립 시 클러치를 통해 전달되는 토크는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$T_{c1} = \mu_{k1} r_{c1} N_1 F_{n1} = \mu_{k1} r_{c1} N_1 f_1 \theta_{m1}, \quad (12)$$

$$T_{c2} = \mu_{k2} r_{c2} N_2 F_{n2} = \mu_{k2} r_{c2} N_2 f_2 \theta_{m2}.$$

$\theta_{m1}, \theta_{m2}$  는 클러치 액추에이터 회전 각도이며  $f_1, f_2$  는 액추에이터 회전각에서 클러치에 작용하는 수직항력을 계산하기 위한 힘 계수이다. 식 (12)에서 클러치 동적 마찰계수와 힘 계수는 클러치 마모도, 온도 등에 따라 실시간으로 바뀔 수 있는 부분이다. 우리가 실험적으로 알고 있는 nominal 값과 실시간으로 변할 수 있는 부분을 나누어서 식 (12)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{c1} = (\mu_{k1,n} k_{f1,n} + \tau_{c1}) r_{c1} N_1 \theta_{m1}, \quad (13)$$

$$T_{c2} = (\mu_{k2,n} k_{f2,n} + \tau_{c2}) r_{c2} N_2 \theta_{m2}.$$

$\mu_{k1,n}, \mu_{k2,n}, k_{f1,n}, k_{f2,n}$  는 알고 있는 파라미터 값 부분이며  $\tau_{c1}, \tau_{c2}$  는 불확실성을 나타낸다. 이  $\tau_{c1}, \tau_{c2}$  을 실시간 보정할 수 있는 적응 기법을 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\dot{\tau}_{c1} \triangleq \gamma_{c1} r_{c1} N_1 \theta_{m1} \left( -\frac{\tilde{x}_1}{J_{e+d}} + \frac{i_{t1} i_{f1}}{J_{c1\_eq}} \tilde{x}_2 \right), \quad (14)$$

$$\dot{\tau}_{c2} \triangleq \gamma_{c2} r_{c2} N_2 \theta_{m2} \left( -\frac{\tilde{x}_1}{J_{e+d}} + \frac{i_{t2} i_{f2}}{J_{c1\_eq}} \tilde{x}_2 \right).$$

식 (14)에서  $\gamma_{c1}, \gamma_{c2}$  는 적응 기법의 보정 속도를 결정하는 게인 값이다.

3.3 설계된 토크 관측기의 stability 분석

설계된 토크 관측기의 추정 성능을 수학적으로 검증하기 위해 Lyapunov stability 분석을 수행하였다. 토크 관측기에 대한 Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$V = \frac{1}{2} \tilde{x}_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{x}_2^2 + \frac{1}{2} \tilde{x}_3^2 + \frac{1}{2} \tilde{x}_4^2 + \frac{1}{2\gamma_{c1}} \tilde{\tau}_{c1}^2 + \frac{1}{2\gamma_{c2}} \tilde{\tau}_{c2}^2 > 0 \quad (15)$$

ECU에서 계산되는 엔진 토크 값의 불확실성을  $\delta_e$  라고 정의하고 클러치 파라미터 변화가 충분히 느리다고 가정했을 때 ( $\dot{\tau}_{c1}, \dot{\tau}_{c2} \approx 0$ ) (15)의 시간에 대한 미분 식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \tilde{x}_1 \left( \frac{1}{J_{e+d}} \delta_e - l_1 \tilde{x}_1 - L_1 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \right) \\ &+ \tilde{x}_2 \left( \frac{1}{J_{c1\_eq}} (-\tilde{x}_4) - l_2 \tilde{x}_2 - L_2 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2) \right) \\ &+ \tilde{x}_3 \frac{1}{J_v} (\tilde{x}_4 - l_3 \tilde{x}_3 - L_3 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_3)) \\ &+ \tilde{x}_4 \left( k_o \left( \frac{\tilde{x}_2}{i_{t1} i_{f1}} - \tilde{x}_3 \right) + l_4 \tilde{x}_2 - l_5 \tilde{x}_3 \right. \\ &\quad \left. + L_4 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2) - L_5 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_3) \right) \\ &= \tilde{x}_1 \left( \frac{1}{J_{e+d}} \delta_e - L_1 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \right) + \tilde{x}_2 \tilde{x}_4 \left( -\frac{1}{J_{c1\_eq}} + \frac{k_o}{i_{t1} i_{f1}} + l_4 \right) \\ &+ \tilde{x}_3 \tilde{x}_4 \left( \frac{1}{J_v} - k_o - l_5 \right) - l_1 \tilde{x}_1^2 - l_3 \tilde{x}_3^2 \\ &- L_3 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_3) \tilde{x}_3 - l_2 \tilde{x}_2^2 - L_2 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2) \tilde{x}_2 \\ &+ L_4 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2) \tilde{x}_4 - L_5 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_3) \tilde{x}_4 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 관측기 게인을 다음 조건이 만족되도록 설정해주면,

$$L_1 > \left| \frac{1}{J_{e+d}} \delta_e \right|, l_1, l_2, l_3, L_2, L_3 > 0$$

식 (17)이 유도 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \tilde{x}_1 \left( \frac{1}{J_{e+d}} \delta_e - L_1 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \right) - l_1 \tilde{x}_1^2 - l_2 \tilde{x}_2^2 \\ &- L_2 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2) \tilde{x}_2 - l_3 \tilde{x}_3^2 - L_3 \operatorname{sgn}(\tilde{x}_3) \tilde{x}_3 \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)로부터  $\dot{V}$  이 0이 되는 집합

$$\Omega = \{ \tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \tilde{x}_4, \tilde{\tau}_{c1}, \tilde{\tau}_{c2} \mid \tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3 = 0 \}$$

를 설정했을 때 원점인  $\tilde{x}_1 = \tilde{x}_2 = \tilde{x}_3 = \tilde{x}_4 = \tilde{\tau}_{c1} = \tilde{\tau}_{c2} = 0$  만이  $\Omega$  의 invariant set이므로, Lyapunov stability 정리에 의해 모든 관측 값들은 실제

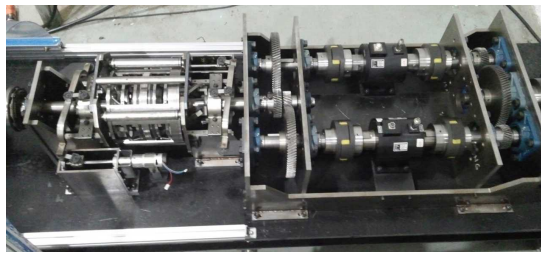


Fig. 2 토크 관측기 검증용 DCT 실험 장비

### 4. 토크 관측기 성능 실험 검증

토크 관측기의 성능 검증을 위해 DCT 실험 벤치를 이용한 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 DCT 벤치는 양산 DCT와 같은 기계적인 구조를 가지지만, 엔진 축, 두 개의 클러치 축 등에 토크를 직접 측정할 수 있는 토크 센서가 장착되어 있다. 이 토크 센서는 오직 관측기 검증용으로만 활용되었다. 검증은 1단 클러치가 체결되며 시작되는 차량 출발 상황에서, 두 클러치의 체결-해제 과정이 일어나는 1-2단 기어 변속 상황까지 포함하는 연속적인 주행조건에서 이뤄졌다.

토크 관측기 실험 결과는 Fig. 3-4와 같다.

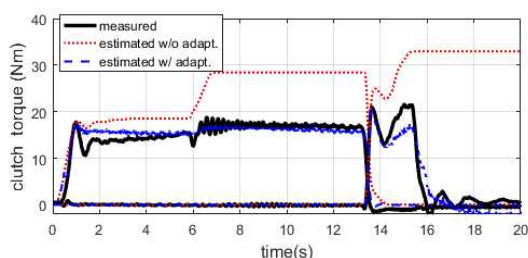


Fig. 3 토크 관측 실험 결과: 두 클러치 토크

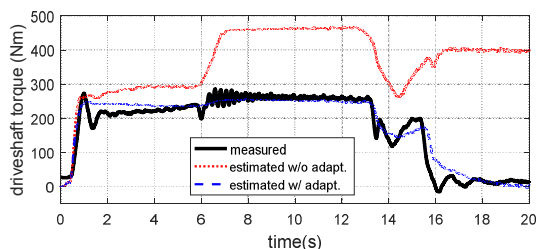


Fig. 4 토크 관측 실험 결과: 구동축 토크  
실험에서 정확한 값을 모르는 클러치 동적 마찰계수는 각각 0.3이라고 가정하고 토크 관측기를 작동시켰다. Fig. 3과 4에서 마찰 계수를 0.3으로 알고 적응 기법을 적용 시켰을 때와 아무 보정 로직을 적용하지 않았을 때의 결과를 같이 첨부하였다. Fig. 3을 보면 적응 기법이 적용되지 않은 경우에는 마찰계수를 단순히 0.3으로 계속 가정하고 토크 값을 계산하였기 때문에 실제 값과 굉장히 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 반면에 적응 기법이 적용된 경우, 마찰 계수를 포함한 클러치 파라미터를 실시간 보정을 하기 때문에 실제 값에 가깝게 추정이 되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4에서는 구동축 토크 역시, 제안된 적응 슬라이딩 모드 관측기를 통해 실제 값에 가깝게 추정된 것

을 확인하였다. 결과적으로 설계된 토크 관측기의 성능이 실험적으로 검증되었다.

### 5. 결론

본 논문에서는 DCT가 장착된 차량에서의 구동축과 두 클러치에 전달되는 토크를 실시간 추정하는 방법을 다루었다. 설계된 토크 추정기는 파라미터 불확실성과 외란에 강인한 적응 슬라이딩 모드 관측기의 형식을 취하고 있으며, 그 추정 성능은 토크 센서가 장착된 DCT 실험 벤치에서 실험적으로 검증되었다.

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업 (IITP-2017-2012-0-00628)과 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1A2B4004116).

### References

- 1) Sooyoung Kim, Jiwon Oh, Seibum B. Choi, "Gear shift control of a dual-clutch transmission using optimal control allocation", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 113, pp. 109-125, July, 2017.
- 2) Walker, Paul D., Nong Zhang, and Richard Tamba. "Control of gear shifts in dual clutch transmission powertrains." *Mechanical Systems and Signal Processing* 25.6, pp. 1923-1936, 2011.
- 3) Sooyoung Kim, Seibum Choi, Saebom Kim, "Design of a Highly Efficient Friction Clutch Apparatus for Vehicle Applications Using Self-Energizing Mechanism", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, DOI: 10.1177/0954407017697478, 2017.
- 4) Jiwon Oh, Seibum Choi, Youngjoon Chang, Jeongsoo Go, "Engine Clutch Torque Estimation for Parallel-type Hybrid Electric Vehicles", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 125-135, February 2017
- 5) Sooyoung Kim, Hyomin Jin, Seibum B. Choi, "Exhaust Pressure Estimation for Diesel Engines Equipped with Dual-Loop EGR and VGT", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, DOI: 10.1109/TCST.2017.2665541, 2017.