

듀얼 클러치 변속기의 최적화된 변속 레퍼런스 생성

이태현*1)·최세범1)

한국과학기술원 기계공학과1)

Generation of optimized shift reference for dual clutch transmission

Taeheon Lee*¹⁾ · Seibum Choi^{*1)}

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

Abstract : DCT(Dual Clutch Transmission)는 최근 여러 장점을 동시에 가질 수 있는 높은 가능성을 인정받아 활발히 연구되고 있는 변속기의 한 종류이다. DCT는 수동변속기의 높은 연비, 자동 변속기의 부드러운 변속 모두가 가능한 장점을 갖는다. 하지만 DCT의 성능은 변속 과정에서의 클러치 제어에 의해서 온전히 결정되게 된다. 따라서 어떤 변속 전략을 세우는지에 따라 DCT 변속 성능이 다양하게 변하게 된다. DCT 제어 전략이 DCT의 성능을 결정하는 핵심 요소가 되는데, 이는 상위 제어기와 하위 제어기로 나뉘게 된다.

본 논문에서는 DCT의 1단에서 2단 upshift 과정에서 운전자의 요구를 반영하고, driveline dynamics와 하위 제어기의 성능을 고려한 저크를 최소화시키는 최적화된 변속 reference 생성에 관한 전략을 제시한다. 변속 reference를 생성할 때, 실제 양산 차량에서 사용 가능한 센서들만을 이용하여 변속 reference를 만들 수 있도록 분석하였다. 제안된 변속 reference가 기존에 사용되고 있는 reference들에 비해 좋은 성능을 갖는지 보기 위해, simdriveline을 이용해 만든 DCT 모델에서의 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다.

Key words : DCT, gear shifting strategy(변속 제어 전략), gear shift reference(변속 레퍼런스), minimize jerk(저크 최소화), reflect driver's demand(운전자 요구 반영)

Nomenclature

T : torque, N*m
J : inertia, kg*m²
w : angular speed, rad/s
i : gear ratio

Subscripts

e : engine
d : damper
c : clutch
o : output shaft
w : wheel
v : vehicle

* 이태현, pos99126@kaist.ac.kr

1. 서론

DCT(Dual Clutch Transmission)는 두 개의 클러치를 가지는 구조로 이루어져 있으며, 구조적인 장점으로 인해, 변속 과정에서 수동 변속기의 전달 동력이 끊긴다는 단점과 자동 변속기의 낮은 연비라는 단점을 모두 커버할 수 있게 되며, 수동 변속기의 높은 연비, 자동 변속기의 부드러운 변속 모두가 가능한 장점을 갖는다. 하지만 DCT의 변속 성능은 변속 상황에서의 두 클러치의 제어 전략에 따라 결정되게 된다. 따라서 좋은 변속 성능을 내기 위해선 클러치 제어 전략이 필수적인 핵심 요소가 된다. 제어 전략은 변속 레퍼런스를 생성하는 상위 제어기와 레퍼런스를 실제로 트래킹하는 방법인 하위 제어기로 나뉘게 된다.

많은 논문들에서 DCT의 변속 상황에서의 하위 제어 방법에 대해 다양한 방법들을 제시하고 있다. 하지만 이때, 변속 레퍼런스로 사용되는 상위제어기의 경우 논문마다 다른 형태로 레퍼런스를 만들어주고 있다. 또한 물리적으로 따라갈 수 없는 레퍼런스를 만들어주는 경우도 빈번하다.¹⁾⁻²⁾ 하위 제어기가 따라갈 수 없는 레퍼런스를 주는 경우, 하위 제어 전략이 아무리 좋더라도, 좋은 변속 성능을 기대할 수 없게 된다. 이때 상위제어기를 개선해 주는 것 만으로도 DCT의 변속 성능을 크게 향상시킬 수 있게 된다.

본 논문에서는 DCT의 driveline dynamics와 하위 컨트롤러의 성능을 고려하여, 저크를 최소화시킬 수 있는 최적화된 레퍼런스를 제작하였다. 또한 최적화된 레퍼런스를 사용하였을 때, 변속 성능이 얼마나 향상되는지는 simdriveline을 이용해 구성된 DCT simulation tool을 이용하여 검증하였다.

2. DCT driveline 모델링

DCT driveline 모델링은 엔진에서 발생하는 토크를 받아 회전하는 lumped inertia의 torque balance equation을 사용하면, 쉽게 모델링 할 수 있다. 또한 실제 shaft의 특성을 반영하기 위하여 shaft compliance model을 추가해 주었다.

엔진 출력 토크는 engine static map으로 표현

이 가능하다. 또한 엔진과 damper의 torque balance equation을 구하면 다음과 같다.

$$T_e = f(\phi, \dot{w}_e) \tag{1}$$

$$T_e - T_d = J_e \dot{w}_e \tag{2}$$

$$T_d - T_{c1} - T_{c2} = J_d \dot{w}_d \tag{3}$$

각 클러치는 engaged, slipping, disengaged 세 가지 상태로 분류된다. 클러치 1과 클러치 2는 똑같은 형태로 토크를 전달하게 되는데, 클러치1에서 전달되는 토크를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_{c1} = T_d + T_{c2} - J_d \dot{w}_d \quad (\text{engaged}) \tag{4}$$

$$T_{c1} = \mu_{k1} N_1 D_1 A_1 r_{c1} P \text{sgn}(w_d - w_{c1}) \quad (\text{slipping}) \tag{5}$$

$$T_{c1} = 0 \quad (\text{disengaged}) \tag{6}$$

각 클러치 부분의 torque balance equation을 구하면 다음과 같다.

$$T_{c1} - T_{i1} / i_{i1} = J_{c1} \dot{w}_{c1} \tag{7}$$

$$T_{c2} - T_{i2} / i_{i2} = J_{c2} \dot{w}_{c2} \tag{8}$$

마지막으로 output shaft와 차량 dynamics 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{i1} i_f + T_{i2} i_f - T_o = J_o \dot{w}_o \tag{9}$$

$$T_o - T_v = J_w \dot{w}_w \tag{10}$$

여기서 J_w 는 바퀴의 inertia와 vehicle equivalent inertia를 더한 값이다. 그리고 T_v 는 external resistance torque로써, aerodynamic drag과 rolling resistance, road gradient가 포함된 값이다.

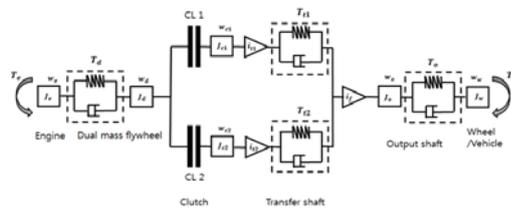


Fig. 1 DCT 구동계 모델링

Fig.1의 diagram처럼 driveline을 모델링하여 simdriveline DCT 모델을 구성하였다.

3. 변속 레퍼런스 생성

본 논문에서 생성하고자 하는 변속 레퍼런스는 운전자의 의도를 반영하는 것을 목표로 하고 있다. 운전자가 페달을 세게 밟으면, 빠른 가속을 원하는 것이므로, 승차감이 덜 좋더라도 빠른 변속이 일어나도록 변속 시간이 짧게 설정되고, 운전자가 페달을 약하게 밟으면, 스무스한 변속이 되도록 변속 시간이 길게 설정된다. 설정된 변속 시간에 맞춰 변속이 일어나도록 하며, 승차감과 관련된 팩터인 저크를 최소화시키도록 변속 레퍼런스를 생성한다. 또한 하위 제어기의 트래킹 성능까지 고려하여 변속 레퍼런스를 생성하고 있다.

3.1 Cost function

승차감을 저하시키는 factor인 저크와 관련된 값으로 cost function을 구성하였다. 저크는 차량 가속도를 시간에 대해 미분한 값이지만, 구동계 dynamics로부터 차량의 가속도를 직접적으로 알아낼 수 없기 때문에 cost function을 저크로 구성할 수가 없다. 1단에서 2단으로의 inertia phase에서 클러치 2 토크가 차량의 바퀴 쪽으로 전달되는 것을 볼 수 있는데, 이때 클러치 2 토크는 차량의 가속도와 비례하는 값을 갖는다. 그래서 저크 대신 구동계 dynamics로부터 얻어낼 수 있는 값인 클러치 2 토크의 시간에 대한 미분 값의 제곱을 cost function으로 잡는다.

$$\text{costfunction} = \int_0^{t_f} (\dot{T}_{c2})^2 dt \quad (11)$$

클러치 2 토크의 경우, 감소 차수 모델을 이용하여 구동계 dynamics로 표현하면 다음과 같다.

$$T_{c2} = T_e - (J_e + J_d) \dot{w}_e \quad (12)$$

(11), (12)로부터 cost function은 엔진 토크 레퍼런스, 엔진 속도 레퍼런스로 구성됨을 알 수 있다.

3.2 Reference boundary condition

Inertia phase가 시작될 때, 양산 차량에 탑재된 센서로부터, $w_{e,i}$, $\dot{w}_{e,i}$ 값을 얻어낼 수 있고, DCT 모델로부터 $T_{e,i}$ 를 얻을 수 있다.

$w_{e,ref} = f(t)$, $T_{e,ref} = g(t)$ 라 하면, 위의 조건으로부터 다음과 같은 boundary condition을 얻을 수 있다.

$$f(0) = w_{e,i}, \quad f'(0) = \dot{w}_{e,i}, \quad g(0) = T_{e,i} \quad (13)$$

변속이 끝날 때, lockup oscillation을 줄여주기 위해서는 inertia phase에서 전달되는 dynamic torque와 변속이 끝난 후에 전달되는 static torque 사이의 차이가 적어야 한다. 이를 만족하려면 다음과 같은 boundary condition을 만족해야 한다.

$$\dot{w}_{e,ref}(t_f) = \dot{w}_{c2,ref}(t_f) = \dot{w}_{e,i} i_2 / i_1 \quad (14)$$

또한 $f(t_f) = w_{e,f}$ 에서, $w_{e,f}$ 값은 driveline dynamics로부터 예측될 수 있다. 그 식을 정리하면 다음과 같다.

$$w_{e,f} = (J_2 w_{c2,i} + J_1 w_{e,i} + \int_0^{t_f} T_e dt - \int_0^{t_f} T_v / i_{12} i_{f1} dt) / (J_1 + J_2) \quad (15)$$

(15)에서 T_v 는 inertia phase가 시작될 때, DCT 모델로부터 얻을 수 있다. 또한 변속하는 짧은 시간 동안은 변하지 않는다고 가정한다. 즉, T_v 는 상수 값으로 취급한다.

(15)가 의미하는 바는 $T_{e,ref}$ 가 변속이 끝날 때 엔진과 클러치 2가 engaged되는 지점인 $w_{e,f}$ 에 영향을 미친다는 것이다.

3.3 Engine torque constraint

엔진은 내부적으로 dynamics를 가지고 있다. 그래서 스로틀을 여닫는 즉시 엔진 토크가 반응하지 못하고, 천천히 반응하여 토크가 발생하게 된다. 이를 1차 lag 모델을 사용하여 표현해주면 다음과 같다.

$$\tau \dot{T}_{e,lag} + T_{e,lag} = T_e \quad (16)$$

(16)에서 τ 는 시간 상수이다. 식 (16)은 엔진 토크가 $T_{e,ref}$ 를 따라가도록 제어하는데, 한계가 있다는 의미를 갖는다. 하위 컨트롤러의 성능을 고려하여, $T_{e,ref}$ 를 생성해야 하기 때문에, 다음과 같은 constraint 가 생긴다.

$$T_{e,i}e^{-t/\tau} \leq T_{e,ref} \leq T_{e,i} \quad (17)$$

3.4 Generating shift reference

먼저 $T_{e,ref}$, $w_{e,ref}$ 의 다항식 차수를 각각 결정한다. 그리고 3.2에서 얻은 boundary condition을 만족하도록 해준다. 그러면 6개의 연립방정식이 생기게 되는데, 이를 연립하여 $T_{e,ref}$, $w_{e,ref}$ 의 다항식 계수들을 연립방정식의 해로 표현해준다.

위 과정을 거치면 $T_{e,ref}$, $w_{e,ref}$ 의 다항식의 계수들은 이제 독립적으로 표현된다. 이를 3.1의 cost function에 표현된 $T_{e,ref}$, $w_{e,ref}$ 다항식에 대입하고, matlab의 fval 함수를 사용하여 3.3의 조건을 만족하면서 cost function을 최소화 시키는 $T_{e,ref}$, $w_{e,ref}$ 의 계수들을 찾아주면, 변속 레퍼런스 ($T_{e,ref}$, $w_{e,ref}$)가 생성된다.

4. 변속 레퍼런스 성능 검증

생성된 변속 레퍼런스의 성능을 검증하기 위해 2.에서 만든 DCT 모델을 사용하여 시뮬레이션을 실행하였다. Fig.2는 다른 논문에서 사용된 변속 레퍼런스를 이용하여 변속 시뮬레이션을 실행한 결과이다. 또한 Fig.3은 본 논문에서 제안한 변속 레퍼런스를 이용하여 변속 시뮬레이션을 실행한 결과이다. 엔진 스토폴을 이용하여 T_e 가 $T_{e,ref}$ 를 따라가도록 하였고, 클러치 2 토크를 이용하여 w_e 가 $w_{e,ref}$ 를 따라가도록 하였다.

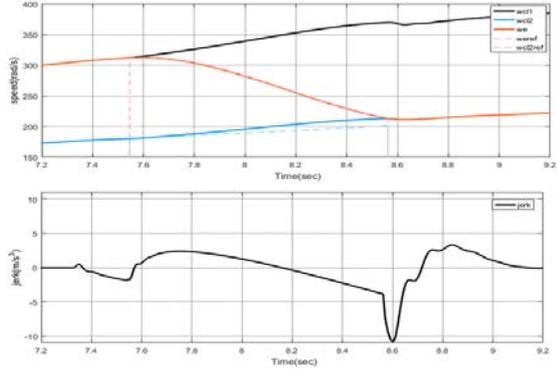
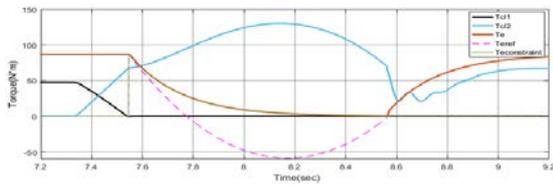


Fig. 2. 기존의 변속 레퍼런스를 사용해 실험한 결과

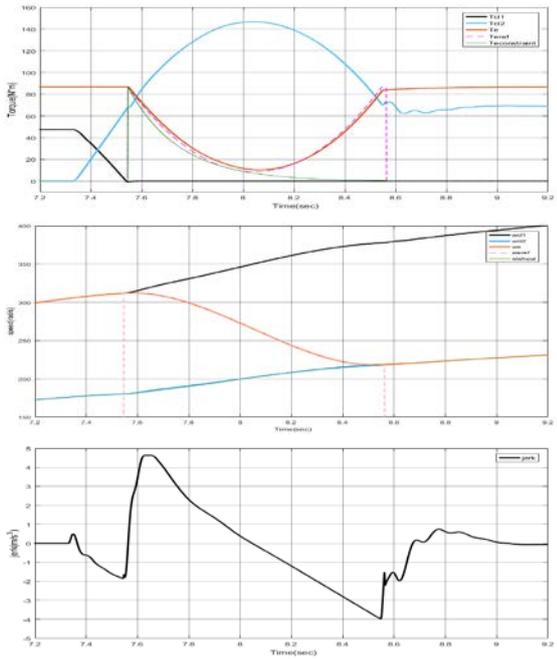


Fig. 3. 생성된 변속 레퍼런스를 사용해 실험한 결과

똑같은 상황에서 저크를 비교하기 위해서 Fig. 3, Fig. 4의 변속 시간을 1초로 동일하게 맞춰 주었다.

Fig. 3의 경우, 저크 값을 살펴보면, 최고 값이 10 정도이고, 변속이 끝날 때 lockup oscillation이 크게 일어남을 볼 수 있다.

Fig. 4의 경우, 저크 값을 살펴보면, 최고 값이 5 정도이고, lockup oscillation이 현저히 작아짐을 볼 수 있다. 또한 Fig. 3에 비해서 Fig. 4가 변속 시간동안 저크 합도 적어짐을 확인하였다.

결과적으로 본 논문에서 생성된 변속 레퍼런스의 변속 성능이 더 향상되었음이 DCT 모델 시뮬레이션

을 통해 검증 되었다.

transmission using optimal control allocation”, Mechanism and Machine Theory, vol. 113, pages 109-125, 2017

5. 결 론

본 논문에서는 DCT의 1단에서 2단 upshift에서 저크를 최소화시키는 최적화된 변속 레퍼런스를 생성하였다. 제안된 변속 레퍼런스는 운전자의 의도를 반영하여 변속 시간을 설정할 수 있게 만들어졌다. 제안된 변속 레퍼런스는 다항식으로 이루어져 있으며, driveline dynamics와 하위 컨트롤러의 성능을 고려하여, 변속 과정에서의 저크를 최소화시키도록 만들어졌다. 또한 제안된 변속 레퍼런스는 기존에 사용되고 있는 변속 레퍼런스 보다 더 적은 저크 합과 최대 저크를 갖는다는 것이 시뮬레이션을 통해 검증되었다. 이는 변속 과정에서의 승차감이 향상되었음을 의미한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 연구비 지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

References

- 1) M Goetz, M C Levesley, and D A Crolla, “Dynamics and control of gearshifts on 대 twin clutch transmission”, SSAGE journals, volume 219, issue 8, pages 951-963, 2005.
- 2) Yonggang Liu, Datong Qin, Hong Jiang, Yi Zhang, “Shift control strategy and experimental validation for dry dual clutch transmissions”, Mechanism and Machine Theory, volume 75, pages 41-53, 2014
- 3) Jiwon J. Oh, Seibum B. Choi, Jinsung Kim “Driveline modeling and estimation of individual clutch torque during gear shifts for dual clutch transmission”, Mechatronics, volume 24, issue 5, pages 449-463, 2014
- 4) Sooyoung Kim, Jiwon Oh, Seibum B. Choi, “Gear shift control of a dual clutch