

적응형 피드-포워드 제어 기법을 이용한 습식 듀얼 클러치 변속기의 유압 클러치 충전 제어기 설계

정상훈¹⁾ · 최세범^{*1)} · 김진성²⁾ · 이호영²⁾ · 고영호²⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾, 현대자동차²⁾

Design of Hydraulic Clutch Fill Control for Wet Dual Clutch Transmission using an Adaptive Feed-Forward Control

Sanghun Jung¹⁾ · Seibum B. Choi^{*1)} · Jinsung Kim²⁾ · Hoyoung Lee²⁾ · Youngho Ko²⁾

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, KAIST, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea

²⁾ Hyundai Motor Company, Hwasung 18280, Korea

Abstract : 본 논문은 습식 DCT에 적용되는 유압 클러치의 새로운 충전 제어 기법을 제안한다. 습식 DCT는 습식 클러치의 큰 드래그 토크로 인하여 정밀한 사전 충전 제어가 어려우며, 클러치 피스톤이 움직이는 충전 구간 제어 기술이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 충전 구간을 보상 해주기 위해 여러 실용적인 문제를 고려한 감소 차수 모델을 제안한다. 제안된 감소 차수 모델은 유압 시스템의 충전 구간을 사실적으로 묘사한다. 제안된 감소 차수 모델은 충전 구간을 보상하는 피드-포워드 제어기를 구성하는데 이용된다. 피드-포워드 제어기는 모델 정보를 내포하기 때문에 다양한 입력에 맞춰 제어 출력을 생성하게 된다. 하지만, 유압 시스템의 여러 불확실성 및 외란으로 인해 감소 차수 모델의 변수가 변화하는 경우, 이에 대한 대응이 필요하게 된다. 본 논문에서는 측정된 클러치 내부 압력을 이용하여 모델의 변수를 실시간으로 업데이트 하는 적응형 피드-포워드 제어기를 제안한다. 제안된 제어기는 정확한 시뮬레이션 모델을 이용하여 검증되었다. 시뮬레이션 결과는 제안하는 제어기가 다양한 입력 상황 및 모델 변수의 변화에도 좋은 성능을 나타냄을 보여준다.

Key words : Clutch fill control(클러치 충전 제어), feed-forward control(피드-포워드 제어), Adaptive control(적응 제어), Wet dual clutch transmission(습식 듀얼 클러치 변속기), Hydraulic actuator(유압 액추에이터)

Nomenclature

P : pressure, Pa
x : piston displacement, m
k : spring stiffness, N/m

Subscripts

p,c : clutch
d : disired

* 정상훈, shjung0225@kaist.ac.kr.

1. 서론

듀얼 클러치 트랜스미션(DCT)는 기존 변속기인 자동변속기 및 수동변속기의 장, 단점을 보완한 차세대 변속기로 많은 연구가 이뤄져 왔다. 하지만, 건식 클러치를 사용하는 건식 DCT의 경우 직접적으로 마찰이 이뤄지기 때문에 발열, 클러치의 마모 등의 문제로 인해 높은 출력의 자동차에 사용하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 습식 DCT를 개발하고, 상용차에 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 하지만, 습식 DCT는 유체의 영향으로 인한 비선형 특성으로 인해 정밀한 제어가 과제로 남는다.¹⁾⁻³⁾

DCT는 자동변속기에서 사용하는 토크 컨버터를 생략했기 때문에 높은 연비 특성을 보이지만, 이로 인하여 정밀한 제어가 요구된다. DCT의 변속 과정에서의 잘못된 제어는 나쁜 승차감과 직결된다. 좋은 승차감을 위해서는 해방되는 클러치와 결합되는 클러치의 속도 및 토크 제어가 정밀하게 이뤄져야 한다. 이를 위하여 제어가 시작되기 전, 결합 클러치에서 토크가 전달되기 시작되는 지점까지 클러치 피스톤을 제어해야한다. 이 과정을 클러치 충전 과정이라고 하며, 클러치 - 클러치 변속에서 중요한 기술 중 하나이다.

클러치 충전 과정은 클러치 피스톤 및 유압 방정식이 결합된 잘 알려진 비선형 과정이다. 이러한 충전 과정을 보상하지 않으면 충전 구간 비선형성으로 인하여 지연된 출력이 나오게 된다. 또한, 잘못된 보상으로 인하여 클러치 과충전(overflow)이 일어날 경우 변속 충격이 나타나게 되며 이는 모두 변속 품질 저하 및 승차감의 저하로 이어지게 된다. 따라서, 변속이 시작될 때 빠르고 정확한 토크 과정(Torque phase)으로 진입하기 위하여 사전 충전(Pre-fill) 과정을 거치게 된다.³⁾

본 연구에서는 이러한 사전 충전 과정 및 토크 과정으로의 진입을 정밀하게 하기 위한 제어 방법을 제안한다. 클러치 충전 구간의 비선형 식을 감소 차수 모델로 간략화 한다. 감소 차수 모델은 실차 적용 가능성을 고려하여 생성되며, 이는 모델 기반 피드-포워드 제어기 생성에 사용된다. 또한, 피드-포워드 제어기의 단점인 모델 변수의 불확실성을 보상하기 위하여 적응 제어 기법을 도입

한다. 적응 제어 기법을 통해 실시간으로 모델 변수를 업데이트 하며, 출력된 압력 값이 원하는 값을 추종할 수 있도록 제어한다. 제안하는 제어기의 성능은 정밀하게 모델링이 된 상용 모델링 제품인 AMESim 및 Matlab Simulink 기반으로 검증한다.

2. 클러치 시스템 모델링

일반적인 유압 기반 클러치 작동 시스템은 Fig.1.에 나타난다. 일반적으로 비례 제어 밸브(PSV)를 이용하여 솔레노이드 전류 입력을 통해 압력을 제어하고, 제어된 압력 및 유량이 클러치 챔버 내부에 들어가게 된다. 클러치 충전 과정의 경우, Fig.1a에서 Fig.1b로 변화하는 것처럼 피스톤이 마찰 판을 접촉할 때 까지 과정을 의미한다. 이러한 충전 과정으로 인해 Fig.2 와 같은 결과가 나타나게 된다.

여러 기존 연구에서 이와 같은 충전 과정에 대한 수학적 모델링이 진행되었다. 일반적으로 충전 과정은 압력 동역학과 피스톤의 동역학이 결합된 3차 식으로 이뤄지게 된다. 하지만, 압력의 경우 10^5 단위(Pa)를 가지게 되며, 피스톤 운동의 경우 약 10^{-3} (mm)의 단위를 가지게 된다. 이러한 단위의 차이는 수치적인 불안정성을 유발하게 되며, 실차 적용 및 제어기 구성에 악영향을 끼치게 된다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위한 감소 차수 모델을 제안한다.

감소 차수 모델은 몇 가지 가정을 통해 생성된다. 첫 번째, 충전 구간에서는 유체는 준-정적 흐름으로 가정되며, 피스톤의 댐핑과 가속도는 무시할 수 있다고 가정한다. 위와 같은 가정을 통해 클러치 피스톤 방정식을 다음과 같은 식으로 유도할 수 있다.

$$A_c P_c = F_{pre} + kx_p \quad (1)$$

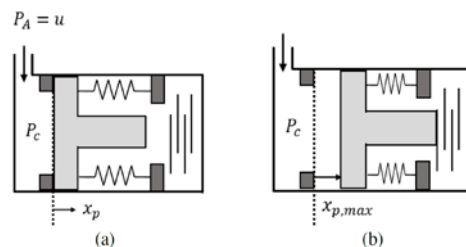


Fig. 1 유압 클러치 작동 시스템 (a) 충전 전 (b) 충전 후

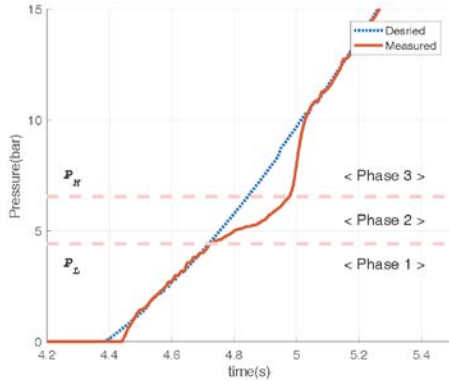


Fig. 2 클러치 시험 결과: 충전 구간(phase 2)의 영향

여기서 A_c , F_{pre} , k , x_p 는 각각 클러치 피스톤의 면적, 스프링 프리로드, 스프링 상수, 피스톤의 변위를 나타낸다. 또한, Fig.2 에서 표시된 P_L 과 P_H 는 충전 구간이 시작되는 지점과 끝나는 지점을 의미한다. 이는 사전 실험을 통해 측정할 수 있는 값이며, 측정된 P_L 과 P_H 를 이용하여 F_{pre} 및 k 등에 대한 정보를 알 수 있다.

유압 방정식의 경우, 일반적으로 오르피스 식을 이용하여 유량을 모델링한다. 하지만, 클러치 챔버의 기하학적 형상으로 인해 오르피스 식뿐 아닌 파이프 식을 이용해서 유량을 다음과 같이 표현할 수 있다.⁶⁾

$$\Delta P = u - P_c \quad (2)$$

$$Q = K_1 \Delta P + K_2 \sqrt{\Delta P} \quad (3)$$

여기서 u 는 제어 입력 압력이며, K_1, K_2 는 각각 라미나 상수, 터블런트 상수를 의미한다. K_1 과 K_2 는 실험 데이터를 이용해 얻어야 하는 튜닝 변수이다. 유체의 양은 유량을 적분하여 얻을 수 있다. 따라서 (3)을 이용하여 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$A_c x_p = \int K_1 \Delta P + K_2 \sqrt{\Delta P} dt \quad (4)$$

식 (4)를 통해서 구해진 x_p 는 식 (1)에 적용되며, 이로 인하여 압력이 생성되고 유량이 생성되어 충전 구간에서의 동적 특성을 반영하는 모델이 구성되게 된다. 위 모델의 특징으로는 단 2개의 튜닝 변수가 있으며, 나머지 변수는 모두 사전 실험을 통해 측정되거나 간단히 계산될 수 있다. 또한, 수치적으로도 안

정적이어서 실차 적용에 문제가 없다. 자세한 모델링 및 관련 내용은 ¹⁾에서 찾아볼 수 있다.

3. 충전 보상 제어기 설계

3.1 모델 기반 피드-포워드 제어기 설계

충전 구간의 보상 제어기 설계는 원하는 압력 입력을 출력이 추종하게 하도록 하는 압력 추종 제어 문제로 해석할 수 있다. 목표 압력을 추종하는 제어기를 설계하기 위하여, 2장에서 설계된 감소 차수 모델을 다음과 같이 재정리할 수 있다.

$$P_c = \frac{1}{A_c} (F_{pre} + kx_p) \quad (5)$$

$$\dot{x}_p = \frac{1}{A_c} (K_1(u - P_c) + K_2\sqrt{u - P_c}) \quad (6)$$

식 (5)를 미분하고 정리하여 (6)에 대입하면 다음과 같은 압력 동역학 식으로 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_c &= \frac{k}{A_c^2} (K_1(u - P_c) + K_2\sqrt{u - P_c}) \\ &= a_1(u - P_c) + a_2\sqrt{u - P_c} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 a_1 과 a_2 는 $a_1 \triangleq \frac{k}{A_c^2} K_1$, $a_2 \triangleq \frac{k}{A_c^2} K_2$ 로 정의된 상수로, 각각 라미나 및 터블런트 효과로 인한 유량을 의미하게 된다. a_1 과 a_2 값은 사전에 알고 있는 값을 이용하여 계산할 수 있다.

제어의 목적은 출력 압력이 목표 압력을 추종하는 제어기이기 때문에, 목표 압을 생성하도록 하는 제어 입력은 제어 모델 (7)에서 실제 압력 P_c 대신 목표 압력 P_d 를 대입해서 구할 수 있다.

$$\dot{P}_d = a_1(u - P_d) + a_2\sqrt{u - P_d} \quad (8)$$

위 식을 제어 입력 u 에 대해서 풀게 되면 목표 압력을 추종하도록 하는 피드-포워드 제어 입력을 구할 수 있게 된다. 그 결과는 다음과 같이 정리된다.

$$u = \left(\frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 + 4a_1\dot{P}_d}}{2a_1} \right)^2 + P_d \quad (9)$$

즉, 기존 목표압 추종 명령인 P_d 를 제외한 나머지 항이 클러치 충전 구간을 보상해주는 역할을 하게 된다. 항을 살펴보면 라미나 상수 및 터블런트 상수인 a_1 과 a_2 , 그리고 목표 압의 기울기의 함수로 구성되어 있음을 알 수 있다.

3.2 적응형 피드-포워드 제어기 설계

앞선 절에서 설계된 충전 보상 제어기는 감소 차수 모델 (8)을 기반으로 생성된 모델이다. 앞서 설명했듯이, 두 개의 변수인 a_1 과 a_2 는 각각 라미나 흐름과 터블런트 흐름에서의 유량을 나타내는 척도를 의미한다. 즉, 더 큰 a_1 값은 더 많은 유량이 나타남을 의미한다. 제안하는 감소 차수 모델은 해당 유량을 나타내는 상수가 가장 중요한 변수로 작용한다. 하지만, 실제 상황에서는 위 변수가 고정된 값이 아닐 수 있다. 전자식 유압 액추에이터 시스템은 굉장히 많은 불확실성을 가진 시스템으로 알려져 있다. 온도의 변화, 밸브의 라인압의 변화, 입력 압력의 기울기 등등의 영향으로 인하여 a_1 이 실제 플랜트와 달라질 수 있다. 피드-포워드 제어기는 피드백 제어기에 비해 빠른 반응성과 안정성이 보장되지만, 이러한 모델의 변화에 대응할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 절에서는 모델 변수를 실시간으로 업데이트를 하는 적응 로직을 제안하여 모델 변화에 대한 강건한 성능을 얻고자 한다.

감소 차수 모델에서 실제 플랜트의 거동은 (7)과 같이 이뤄지게 된다. 여기서, 모델로서 예측되는 움직임은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{P}_d = \hat{a}_1(u - P_d) + a_2\sqrt{u - P_d} \quad (10)$$

여기서 \hat{a}_1 은 모델이 정의한 a_1 값을 의미한다. 따라서, 실제 a_1 값과 알고 있는 \hat{a}_1 의 차이는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{a}_1 = \hat{a}_1 - a_1 \quad (11)$$

대상으로 하는 시스템에서 측정값은 클러치 챔버 내부 압력 P_c 1개이며, 추정해야하는 변수는 a_1 과 a_2 2개이다. 일반적인 추정 로직은 추정하는 변수의 개수와 측정하는 변수의 개수가 같아야 한다. 따라서, 본 논문에서는 실험 결과에 근거하여 a_1 이 a_2 에 비하여 훨씬 지배적이라고 판단하여 a_2 는 고정 값을 사용하고 a_1 만을 업데이트 한다.

실제 플랜트의 거동과 모델 예측 값의 차이로부터 업데이트 법칙을 유도할 수 있다. 식 (7)에서 식 (9)를 빼면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_c - \dot{P}_d &= \tilde{a}_1(u - P_c) - a_1(P_c - P_d) \\ &+ a_2\sqrt{u - P_c} - a_2\sqrt{u - P_d} \end{aligned} \quad (12)$$

제어 오차를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$s = P_c - P_d \quad (13)$$

정의된 오차를 이용하여 식 (11)을 정리하면 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \tilde{a}_1(u - P_c) - a_1s \\ &+ a_2(\sqrt{u - (s + P_d)} - a_2\sqrt{u - P_d}) \end{aligned} \quad (14)$$

업데이트 법칙의 목표는 제어 오차 s 와 추정 오차 \tilde{a}_1 동시에 0으로 수렴시키는 것이다. 따라서 Lyapunov candidate 함수를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{a}_1^2 \quad (15)$$

여기서 γ 는 업데이트 튜닝 변수이다. Lyapunov 안정성 이론에 의해, 식 (14)의 미분 값 \dot{V} 이 negative definite이면 식 (10)과 (12)가 동시에 0으로 수렴하게 된다. 대상으로 하는 변수 a_1 의 변화가 충분히 느리다고 가정했을 때 ($\dot{a}_1 \cong 0$), 식 (14)를 미분하고 식 (13)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \frac{1}{\gamma}\tilde{a}_1\dot{\tilde{a}}_1 \\ &= -a_1s^2 - \tilde{a}_1\left(\frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{a}}_1 - (u - P_d)s\right) \\ &+ a_2s(\sqrt{u - (s + P_d)} - a_2\sqrt{u - P_d}) \end{aligned} \quad (16)$$

위 식에서, 마지막 항은 항상 0보다 작은 양수이기 때문에, $\dot{\tilde{a}}_1$ 을 다음과 같이 설정해주면 식 (15)가 negative definite이 된다.⁵⁾

$$\dot{\tilde{a}}_1 = \gamma(u - P_d)s \quad (17)$$

따라서 Lyapunov 안정성 이론을 만족함과 동시에 식 (10)과 (12)를 0으로 수렴시키는 업데이트 법칙이 설계될 수 있다. 모델의 에러가 없을 경우, 즉 $s = 0$ 일 경우, 식 (16)이 0이 되기 때문에 업데이트가 일어나지 않게 된다. 즉, 식 (15)는 항상 0보다 작게 된다. 식 (16)에서의 u 는 식 (9)에서 생성된 제어 입력이기 때문에, 제어 에러와 충전 구간 보상을 위한 입력 값을 이용하여 업데이트가 이뤄진다는 것을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

2장과 3장에서 설계된 감소 차수 기반 적응형 피드-포워드 제어기의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션에 사용되는 플랜트는 유압 시스템을 정밀하게 묘사할 수 있는 AMESim으로 구성되었으며, 제어기는 감소 차수 모델 기반으로 하여 Matlab Simulink로 구성하였다. AMESim으로 구성된 유압 클러치 시스템은 라인압의 영향, 온도의 영향, 유로의 마찰 등 여러 불확실성이 고려되어 실제와 비슷한 특징을 가지는 모델이다. 구성된 플랜트와 제어기는 동시 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시나리오는 토크 과정에서 나타나는 램프 증가 시나리오로 선정했다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 3에 나타난다.

시뮬레이션은 5bar/s, 12bar/s 두 가지 경우에 대해서 진행하였다. 위와 같은 기울기는 실차 적용 시 운전자의 페달 입력에 따라 결정되는 변수이다. 감소 차수 기반 피드-포워드 제어기인 식 (9)에서 나타나듯이, 유량을 뜻하는 모델 변수 및 목표 압력의 기울기를 고려하여 제어 입력을 계산하기 때문에, 기울기가 변화하여도 그에 알맞은 제어 입력을 생성하는 사실을 확인할 수 있다. 그 그래프에서 확인할 수 있듯이 피드-포워드 제어기의 큰 장점인 빠른 입력 생성과 안정성의 이점이 잘 드러나는 것을 확인할 수 있다. 충전 보상 제어의 시점과 끝점은 추가적으로 들어가는 유량을 통해 계산되었으며, 자세한 사항은 ¹⁾에서 찾아볼 수 있다. 결론적으로 서로 다른 기울기의 입력에도 적은 오차와 함께 충전 구간을 보상하여 목표 압력을 추종한다는 것을 검증할 수 있다.

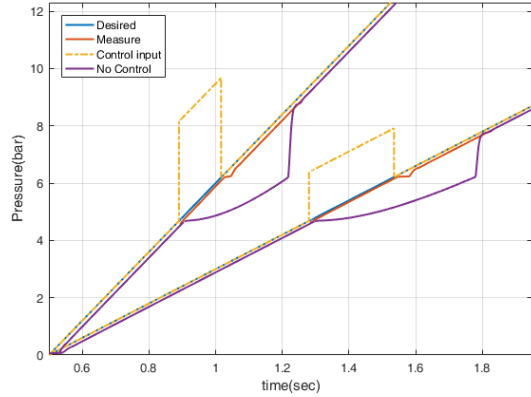


Fig. 3 시뮬레이션 결과: 감소 차수 모델 기반 피드-포워드 제어기 검증

하지만, 위와 같은 피드-포워드 제어기는 모델의 정확도에 큰 영향을 받게 된다. 제안하는 감소 차수 모델의 경우 유량을 나타내는 변수 a_1 의 정확도에 크게 영향을 받게 된다. 따라서, 변수 a_1 의 초기 값이 정확하지 않을 때, 제안하는 적응 제어 로직의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과는 Fig. 4에 나타난다.

Fig. 4에서 여러 번의 램프 시나리오 시행 중, 처음에는 a_1 의 값이 너무 크게 잡혀 충전 구간에 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 충전 제어의 오차는 과충전 및 변속 충격으로 이어질 수 있다. 하지만, 여러 번의 시행을 거치며 a_1 은 적절한 값으로 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 앞선 장에서 수학적으로도 보인 바와 같이 압력 제어 오차 및 변수 추

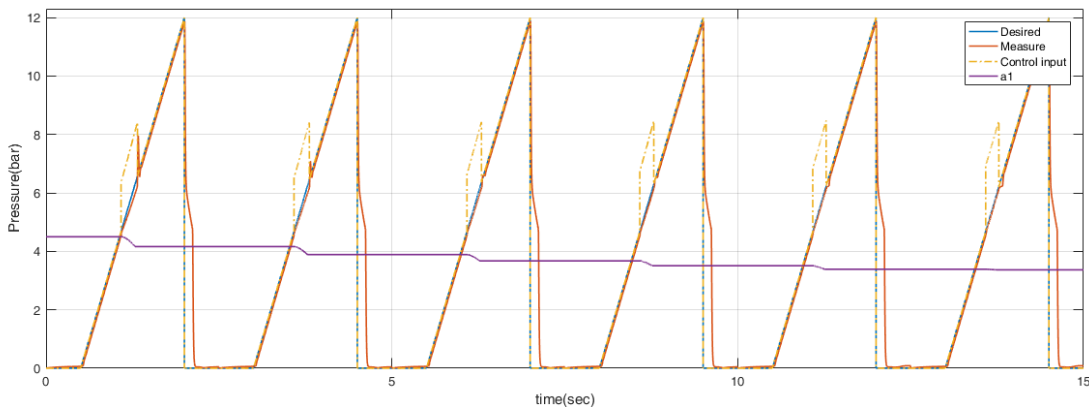


Fig. 4 시뮬레이션 결과: 적응형 피드-포워드 제어기 성능 검증

중 오차가 모두 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 위와 같은 로직은 양산 차량에 적용하여 초기 α_1 값을 찾는 데도 이용할 수 있으며, 많은 시간과 비용을 절약할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 논문은 습식 DCT에 적용되는 유압 클러치 액추에이터 시스템의 새로운 충전 제어 기법을 제안한다. 실차 적용 가능성을 고려한 충전 구간 감소 차소 모델을 제안하였으며, 제안된 모델을 기반으로 하여 피드-포워드 제어기가 구성되었다. 설계된 피드-포워드 제어기는 빠르고 안정적으로 목표 압력을 추종하도록 함을 확인하였다. 또한, 적응 로직을 접목하여 피드-포워드의 단점인 모델 불확실성에 대한 오차를 보정할 수 있도록 하였다. 특히나 적응 로직은 실차에 적용할 시에 공장 초기 단계에서 개별 차량에 설치된 클러치 시스템에 알맞은 변수를 스스로 튜닝할 수 있는 가능성을 제시한다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 검증되었으며, 실차 실험을 통해 추가적인 검증이 향후 과제로 남는다.

Acknowledgement

본 연구는 Hyundai Motor Company의 지원 및 한국 교육부가 후원하는 NRF를 통한 BK21+ 프로그램의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- 1) Hydraulic Clutch Fill Control using Control-oriented Model in Wet Dual Clutch Transmission, American Control Conference 2019
- 2) H.Chen and B.Gao, Nonlinear estimation and control of automotive drivetrains, Springer Science & Business Media, 2013
- 3) X.Song, M.A.M.Zulkefli, and Z.Sun, "Automotive transmission clutch fill optimal control: An experimental investigation", in Proceedings of the 2010 American Control Conference. IEEE, 2010,

- pp.2748-2753
- 4) X.Song, C.S.Wu, and Z.Sun, "Design, Modeling, and control of a novel automotive transmission clutch actuation system", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.17, no.3, pp.582-587. 2012.
- 5) PA Ioannou, J Sun, Robust adaptive control, Springer, 2012
- 6) S.Thornton, G.M.Pietron, D.Yanakiev, J.McCallum, and A.Annaswamy, "Hydraulic clutch modeling for automotive control", in 52nd IEEE conference on Decision and Control. IEEE, 2013, pp.2828-2833
- 7) H.Hao, T.Lu, J.Zhang, and B. Zhou, "A new control strategy of the filling phase for wet dual clutch transmission", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol.230, no.12, pp. 2013-2027, 2016