

# 차량구동계 모델링 및 동적 시뮬레이션에 관한 연구

김진성\*<sup>1)</sup> · 최세범\*<sup>2)</sup>  
KAIST 기계공학과<sup>1)</sup> · <sup>2)</sup>

## Vehicle Driveline Modeling and Dynamic Simulation Method

Jinsung Kim\*<sup>1)</sup> · Seibum B. Choi\*<sup>2)</sup>

\*<sup>1)2)</sup> Department of Mechanical Engineering, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

**Abstract** : Transmission is the one of the major parts for determining overall energy efficiency in the automotive system. In the last few years, the modern automatic transmission technology such as an automated manual transmission(AMT) and a dual clutch transmission(DCT) attract the interest of almost all manufacturers due to fuel efficiency and driver’s convenience. Since they are servo-actuated, appropriate control strategies should be needed to guarantee the performance. To achieve this, the development for the driveline model and clutch engagement model are required to design a model-based control system before the experimental verification. In addition, transient response during clutch engagement operation depends primarily on the modeling methodology in the computer simulation environment. In this paper, the clutch operation models to describe the stick-slip transition mode is introduced and compared with each other.

**Key words** : Powertrain modeling and simulation(파워트레인 모델링 및 시뮬레이션), Automatic transmission(자동변속기), Dual clutch transmission(듀얼클러치변속기), Clutch(클러치), Driveline control(구동계 제어)

### Nomenclature

J : moment of inertia, kg m<sup>2</sup>  
 T : Torques, Nm  
 k : stiffness, Nm/rad  
 b : damping coefficient, Nms/rad  
 f : driveline state vector  
 n: normal direction unit vector  
 F : force, N  
 $\alpha$  : throttle angle, deg  
 $\omega$  : angular velocity, rad/s  
 $\Omega$  : angular velocity vector , rad/s  
 $\eta$  : stick range  
 $\tau$  : time constant  
 $\xi$  : convex parameter for transition

### Subscripts

c: clutch  
 e: engine  
 f: final drive  
 n: normal direction  
 o: output shaft  
 r: relative speed  
 t: trnasmission  
 v: vehicle  
 w: wheel

### 1. 서론

유가 상승 및 에너지 위기로 인하여, 자동차 관련 기술의 주된 관심사는 연비효율 향상 및 친환경 기술로 모아지고 있다. 차량의 주행을 위한 기본적인 조건은, 엔진의 구동력이 휠까지 전달되는 것이다. 따라서 클러치 및 변속기로 대표되는 동력전달 장치는 매우 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 이는 엔진의 구동력 전달에 있어 중간 매개체 연결을

\* 김진성, E-mail: jsk@kaist.ac.kr.

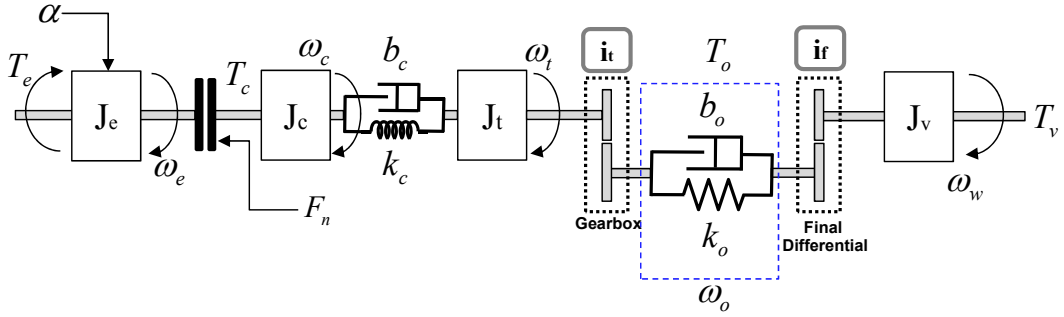


Fig. 1 Diagram of driveline model

하고 있기 때문에, 차량전체의 연비효율에 큰 영향을 미치게 된다. 최근 자동화수동변속기(AMT) 및 듀얼클러치변속기(DCT) 등과 같은 새로운 형태의 자동변속기 관련기술이 등장하고 있으며, 이를 기반으로 하는 제어기술 또한 계속해서 발전하고 있다. 자동차의 여타 부품제어기술과 더불어, 동력전달장치와 관련된 제어기개발 또한 비용 및 시간절약을 위해, 모델 기반의 개발구조를 지향하고 있다. 따라서 세부목적에 따른 구동계 모델의 개발과 시뮬레이션 환경이 요구되고 있다.

본 연구에서는 차량의 구동계 및 클러치 체결-분리를 위한 모델을 제시하고, 이를 모사할 수 있는 시뮬레이션 환경을 비교 분석하고자 한다. 특히 클러치의 체결 및 분리과정은 불연속 특성을 가지며, 구동계의 자유도를 변화시키게 된다. 결국 이러한 과정을 어떻게 모델링하느냐에 따라 과도특성이 달라지게 된다. 이러한 과도특성의 변화는 변속제어기의 설계 및 차량출발 시의 Launch 제어기 설계에 있어, 실험결과와 현격한 차이를 유발 할 수 있다. 따라서, 구동계 및 클러치 체결 모델 및 solver에 따른 시뮬레이션 결과를 비교 분석하고, 향후 관련 제어기 설계에 응용하기 위한 기반을 구축하고자 한다.

## 2. 구동계 모델

구동계 모델링 및 시뮬레이션의 비교 분석을 위한 대상 차량은 Fig.1 과 같다. 이는 일반적인 차량 동력전달계를 나타내며, 엔진, 클러치, 변속기, 구동축, 차량으로 이루어져있다. 따라서 각 요소별 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>2)</sup>.

$$J_e \dot{\omega}_e = T_e - T_c \quad (1)$$

$$J_c \dot{\omega}_c = T_c - T_d - b_c(\omega_c - \omega_t) \quad (2)$$

$$J_t \dot{\omega}_t = T_d - b_t \omega_t - T_o / i_t \quad (3)$$

$$J_v \dot{\omega}_w = i_f T_o - T_v \quad (4)$$

여기서 식(1-4)는 각각 엔진, 클러치, 변속기, 휠 속도를 상태변수로 가지는 운동방정식을 나타내며, 각 운동방정식에 적용되는 토크값은 다음과 같이 구해진다.

$$T_e = T_e(\omega_e, \alpha) \quad (5)$$

$$T_c = \mu R c F_n \operatorname{sgn}(\omega_e - \omega_c) \quad (6)$$

$$\dot{T}_d = k_c (\omega_c - \omega_t) \quad (7)$$

$$T_o = k_o \left( \frac{\theta}{i_t} - i_f \theta_w \right) + b_o \left( \frac{\omega_t}{i_t} - i_f \omega_w \right) \quad (8)$$

식(5)의 엔진토크는 스로틀 입력과 엔진 속도의 값의 함수로서 실험으로부터 구해진 정상상태값을 사용하며, 식(6)은 건식마찰클러치로부터 발생하는 클러치토크로서 클러치반경 및 체결력에 의해 정해진다. 식(7)은 마찰디스크에 부착된 스프링댐퍼의 특성을 표현하고 있으며, 구동축의 토크는 식(8)로부터 구해진다.

클러치의 체결 및 분리는 식(6)에 나타난 수직력에 따라서 결정된다. 식(1-4)에 나타난 구동계 운동방정식은 클러치에 슬립이 일어날 때를 표현하고 있다. 만약, 클러치가 체결되어 엔진과 클러치 이

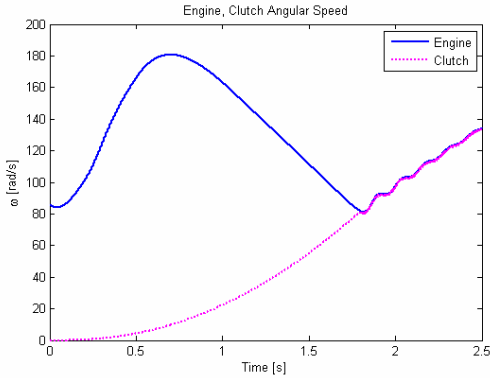


Fig. 1 Karnopp approach

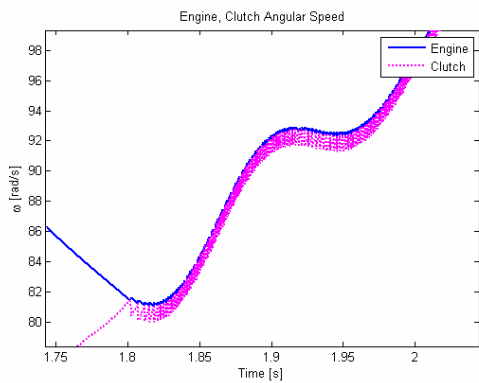


Fig. 2 Karnopp approach (Zoom)

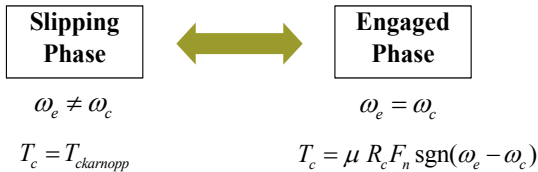


Fig. 3 Concept of the Karnopp approach

하의 차량 구동계가 연결되는 경우, 식(1)과 식(2)를 하나의 식으로 표현가능하며 이는 간단한 체결조건  $\omega_e = \omega_c$  으로부터 쉽게 얻을 수 있다.

### 3. 기존의 시뮬레이션 방법

2장에서 소개한 모델을 기반으로 하여, 구동계 모델을 시뮬레이션 하고자 한다. 클러치의 체결 및 분리는 수직력에 따라 이루어진다. 본 연구에서는 구동계 모델 관점에서 클러치 체결 및 분리를 어떻게 시뮬레이션할 수 있는가에 중점을 두고

있다. 따라서 클러치 액추에이터는 간단한 1차식으로 표현되는 동적모델로 가정한다. 또한 시뮬레이션 테스트는 MATLAB/Simulink를 통해 수행한다. Solver의 경우, 필요에 따라, variable step 및 fixed step의 경우를 비교 하도록 한다.

### 3.1 Karnopp Approach

물리적 관점에서 마찰클러치의 체결력이 엔진토크 이상 가해졌을 때, 슬립이 일어나기 시작하면서 체결이 이루어진다. 따라서 식(6)의 값에 따라 식(1)과 식(2)의 관계가 변하게 된다. 단순히 식(6)의 수직력  $F_n$  이 엔진토크이상으로 충분히 나오도록 해줌으로써, 시뮬레이션 테스트를 수행할 수 있다. 이 방법의 경우 클러치의 양쪽 상대속도가 일정범위  $\eta$  안에 들어왔을 경우 체결로 간주하며 기본 구조는 Fig. 3과 같다<sup>3)</sup>.

Fig. 1은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 엔진 및 클러치는 약 1.8초에 체결되어 원하는 결과를 보여준다. 하지만 Fig. 2와 같이, 이를 확대하였을 경우 클러치 회전속도값이 oscillation하는 것을 살펴볼 수 있다.

클러치토크의 경우 클러치에 발생하는 마찰을 통하여 그 값이 생성된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 Fixed Type으로 수치적분하였을 경우, 시스템 파라미터들의 매개변수 값들에 매우 민감해진다. 다시 말해서, 반드시 표현하고자 하는 시스템 상태 변수들이 발산할 수 있는 단점을 가지고 있다.

따라서 수직력에 따른 단순한 modeling switching 은 수치적분의 안정성을 보장하지 못한다는 것을 확인할 수 있다.

## 4. Improved Model Switching

### 4.1 Karnopp approach의 문제점

본 절에서는 앞서 3절에서 소개한 Karnopp approach를 개선한 새로운 방법론을 소개하고자 한다. Karnopp approach의 경우 상대속도가 zero인 경우 발생할 수 있는 문제를 개선하였으며, zero 근처의 속도값에서 적절한 boundary를 부여하여 시스템이 chattering하는 문제를 해결하였다. 하지만, 그림 1,2에서와 같이 이산시간(discrete time)도메인에서 샘플링 시간에 민감한 성능을 보인다. 이는

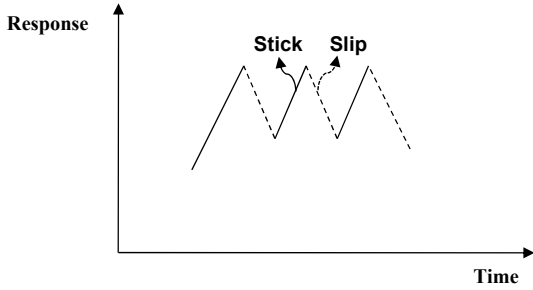


Fig. 4 Stick-slip phenomenon

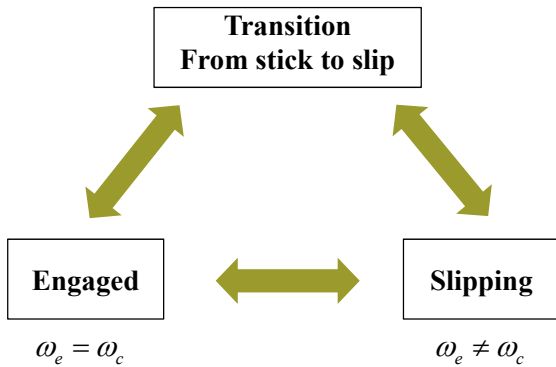


Fig. 5 Concept of the Improved switching model

계산량 및 계산시간에도 악영향을 주어 시스템을 불안하게 만들 수 있다.

이러한 문제는, 클러치 토크에 따라 구동계 모델의 상태가 변하게 되며, 클러치 토크는 마찰특성을 반영하고 있기 때문이다. Fig. 4는 마찰의 기본적인 특성을 나타낸다. 일반적으로, 건식 마찰이 발생할 때에는 stick-slip현상이 일어나게 된다<sup>1)</sup>. 이때 마찰로 인하여 에너지가 들고 나는 현상이 반복적으로 일어난다. 이로 인하여 limit cycle과 같이 경우에 따라 원치 않는 현상이 일어나기도 하며, 클러치에서는 judder현상을 유발하여, 불필요한 진동으로 인한 승차감 저하등의 문제가 발생한다.

따라서, 이러한 stick-slip 현상은 동적모델에도 불안정성을 유발하게 되며, 이러한 현상을 피하기 위한 다른 접근법의 필요성이 발생하게 된다..

#### 4.2 개선된 방법 및 적용

앞서 지적된 문제점들을 해결하기 위하여,

stick-slip mode에 대한 마찰모델<sup>4)</sup>을 적용한 보완책을 제안한다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 앞선 Karnopp approach를 기반으로하여, 체결상태(stick phase)와 슬립상태(slip phase)사이에 전환모드(transition mode)를 삽입한다. 전환모드는 시상수  $\tau$ 를 갖는 1차 미분방정식의 형태로 표현하며 양식은 다음과 같다.

$$\dot{\omega}_r = -\tau\omega_r \quad (9)$$

여기서  $\omega_r$ 은 상대속도( $\omega_r = \omega_e - \omega_c$ )를 나타낸다. 식(9)는 상대속도가 1차 저역통과필터(LPF)의 형태로 표현되었음을 알수있다. 이는, 클러치가 체결됨에 따라, 상대속도가 0으로 줄어드는 과정이 지수적으로 감소하도록 표현한 것이다.

이러한 모델을 적용하기 위하여, normal vector  $n$ 을 (10)과 같이 정의하고, 엔진 및 클러치의 속도를 (11)과 같은 벡터로 타나태면 식(9)는 식(12)와 같이 표현할 수 있다.

$$n^T = [1 \quad -1] \quad (10)$$

$$\Omega^T = [\omega_e \quad \omega_c] \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{\partial \omega_r}{\partial \Omega} \frac{\partial \Omega}{\partial t} = n^T \frac{\partial \Omega}{\partial t} \quad (12)$$

여기서, 구동계모델을 둘로 나누어, 동력이 엔진에서 클러치로 전달될 때를  $f_{max}$ , 반대의 경우를  $f_{min}$ 이라 하자. 그리고 클러치 토크  $T_c$ 는 클러치 체결시에  $T_{c\_stick}$ 을 사용하도록 하며, 그 값은 식(1),(2)와 체결조건  $T_c$ 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{c\_stick} = \left( \frac{J_e J_c}{J_c + J_e} \right) \left( \frac{T_e}{J_e} + \frac{1}{J_c} [T_d + b_o(\omega_c - \omega)] \right) \quad (12)$$

또한 식 (10), (11)과 (12)를 통해  $\xi$ 을 정의하고 상대가속도 (9)를 클러치의 체결 및 분리간의 convex form으로 정의하면, 각각 식 (14), (15)와 같이 나타낼 수 있다.

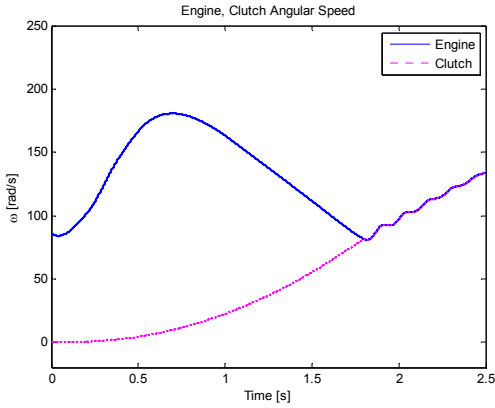


Fig. 6 Improved switching model

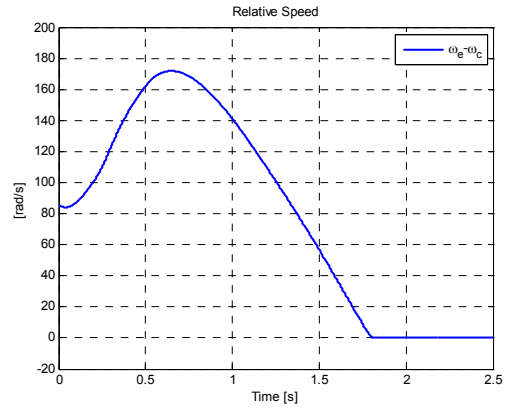


Fig. 8 Improved switching model (relative speed)

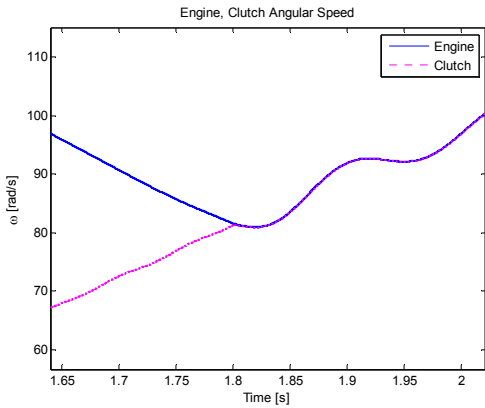


Fig. 7 Improved switching model (zoom)

결과는 다음과 같다. Fig. 6은 엔진과 클러치의 회전속도를 나타낸다. 약 1.8초에 체결이 이루어지는 것을 살펴볼 수 있다. Fig. 7은 체결시점에서의 확대된 그림을 나타낸다. Fig. 2와 비교해 보았을 때 결과 신호의 oscillation이 없음을 알 수 있다. 이는 전환모드를 사용하여 체결모델로 완전히 switching 되었음을 보여준다. 슬립상태에서의 구동계모델은 식(9)의 저역통과필터 효과로 인하여 smooth한 체결과정이 이루어지며 Fig. 8을 통하여 확인할 수 있다.

이는 Karnopp의 방법에 비하여 개선된 성능을 나타낸다. 연산시간에 있어서도 큰 차이를 보이지 않으므로 매우 유용하다고 볼 수 있다. 추가적으로, 이러한 모델을 사용하면 클러치의 슬립을 이용한 피드백제어기 등을 설계할 때에도 매우 유용할 것임을 알 수 있다.

$$\xi = \frac{n^T f_{\min} + \tau(\omega_e - \omega_c)}{n^T (f_{\min} - f_{\max})} \quad (14)$$

$$\dot{\omega}_r = \xi f_{\max} + (1 - \xi) f_{\min} \quad (15)$$

여기서  $\xi=1$ 의 경우, 차량의 일반적인 주행 상태를 나타내며,  $\xi=0$ 은 제동 시 또는 엔진에 음의 토크가 가해질 때를 나타낸다고 볼 수 있다. 또한 클러치 슬립이 일어나면서 체결 및 분리가 이루어질 때에는  $\xi$ 의 값이 0과 1사이의 값을 가지게 된다.

### 4.3 테스트 결과

Leine의 방법<sup>4)</sup>을 클러치 시뮬레이션에 응용한

## 5. 결론

본 연구에서는 체결 및 분리시 불연속 특성을 갖으며 시스템의 자유도가 바뀌는 클러치 상태를 시뮬레이션하기 위한 방법들을 소개하였다. 우선 Karnopp의 방법은 적용이 간편하고, 구조가 간단한 반면, 이산시간상태에서 적용할 때 샘플링시간에 민감한 단점을 가지고 있다. 이는 시뮬레이션 결과를 실차실험 등과 연계할 때에 있어, 그 결과의 차이를 유발하게 된다. 따라서, 이를 보완하기 위한

switching model을 소개하였다. 이는 클러치의 체결 및 분리상태 사이에 전환모드를 적용하여, switching 이 smooth하게 이루어지도록 한 방법이다. 따라서, slip 시간을 시상수 값의 조절을 통하여 결정할 수 있으며, 체결 완료 시 다른 모델로 완전히 전환되므로, 수치적분 상의 문제점이 발생하지 않는 장점이 있다.

이러한 시뮬레이션 방법들을 활용하여, 차량발진(launch) 및 기어변속(gearshift)등의 모의실험에 응용할 수 있으며, 실제 실험결과를 정확히 모사하는데 있어 이점을 제공할 것이다.

## References

- 1) D.N. Centea, H. Rahnejat, M.T. Menday, The influence of interface coefficient of friction upon propensity to judder in automotive clutches, Proc. Instn. Mech. Engrs., Part D: J. Automobile Engineering, bf 213 (D2), 1999
- 2) M. Petterson, Driveline modeling and control, Ph.D Dissertation, Linkopings University, Sweden, 1997.
- 3) D. Karnopp. Computer simulation of slip-stick friction in mechanical dynamic systems, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 107H11 pp.100-103, 1985.
- 4) R. I. Leine, D. H. Van Campen, A. De Kraker, L. Van Den Steen, Stick-Slip Vibrations Induced by Alternate Friction Models, em Nonlinear Dynamics 16, pp.41-54, 1998.