<학술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.9.801** ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

플러그인 하이브리드 차량의 모드변환에 따른 엔진클러치 접합 제어알고리즘 연구§

심규현* · 이수지* · 남궁철** · 이지석** · 한관수*** · 황성호*†
* 성균관대학교 기계공학과, ** 서진오토모티브 기술연구소, *** 성균관대학교 산학협력단

A Study on the Control Algorithm for Engine Clutch Engagement During Mode Change of Plug-in Hybrid Electric Vehicles

Kyuhyun Sim*, Suji Lee*, Choul Namkoong**, Ji-Suk Lee**,
Kwan-Soo Han*** and Sung-Ho Hwang*†
* Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.,
** SECO Seojin Automotive Co., Ltd., *** Research & Business Foundation, Sungkyunkwan Univ.

(Received February 11, 2016 ; Revised June 3, 2016 ; Accepted July 19, 2016)

Key Words: Plug-in Hybrid Electric Vehicle(플러그인 하이브리드 전기자동차), Integrated Starter Generator(통합형 엔진시동/발전기), Engine Clutch(엔진 클러치), Clutch Engagement Shock(클러치 접합 충격)

초록: 플러그인 하이브리드 전기자동차는 내연기관과 전기모터를 동력원으로 사용하며 주행 상황에 따라 다양한 주행 모드을 갖는다. 주행 모드에는 전기모터로만 주행하는 EV 모드(전기주행), 내연기관으로 주행하는 엔진 운전 모드, 두 개의 동력원을 이용하는 HEV 모드(하이브리드 주행)가 있다. 특히 병렬형 구조를 갖는 하이브리드 전기자동차는 모드변환에 따라 엔진 클러지가 접합되거나 해제되는데, 클러치 접합 시 나타나는 충격은 차량의 승차감에 영향을 주기 때문에 중요하다. 본 논문에서는 플러그인 하이브리드 전기자동차의 성능 시뮬레이터를 MATLAB/Simulink를 이용하여 개발하고, 시뮬레이션 결과를 통해 엔진 클러치 접합 시 나타나는 충격 특성을 분석하였다.

Abstract: In this paper, engine clutch engagement shock is analyzed during the mode change of plug-in hybrid electric vehicles. Multi-driving mode includes the EV (electric vehicle) mode, HEV (hybrid electric vehicle) mode, and engine operating mode. Depending on the mode change, the engine clutch is either engaged or disengaged. The magnitude of shock during clutch engagement is very important because it impacts vehicle acceleration and clutch synchronization speed, which affects ride comfort substantially. The performance simulator of plug-in hybrid electric vehicles was developed using MATLAB/Simulink. The simulation results show that the mode change control algorithm is necessary for minimizing shock during clutch engagement.

- 기호설명 -

T_{cl} : 클러치 토크(Nm)
N_f : 클러치 마찰판 개수
F_{app} : 클러치 수직력(N)
μ : 클러치 마찰계수
ω : 클러치 상대속도(m/s)
r_e : 클러치 디스크 등가 반지름(m)
sgn : signal 함수
P_{app} : 피스톤 압력(N/m^2)
A_p : 피스톤 면적(m^2)
a : 클러치 내경(m)
b : 클러치 외경(m)
V : 차량속도(m/s)

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70 주년 기념 학술대회 (2015. 11. 10-14., ICC 제주) 발표논문임.
† Corresponding Author, hsh@me.skku.ac.kr
Ⓒ 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

M : 차량질량(kg)
$F_{traction}$: 구동력(N)
F_{drag} : 공기저항력(N)
F_{roll} : 구름마찰력(N)
t : 시간(sec)
T_{demand} : 요구 토크 값(Nm)
T_{comp} : 보상 토크 값(Nm)
$T_{modified}$: 수정된 토크 값(Nm)
K_p : 비례 게인
K_i : 적분 게인

1. 서 론

하이브리드 자동차(hybrid electric vehicle, HEV)는 1997년 일본 도요타의 시작으로 지속적으로 판매가 증가하고 있으며, 특히 최근 세계 자동차 업체들이 플러그인 하이브리드 자동차(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) 출시에 박차를 가하면서 더욱 주목받고 있다. 플러그인 하이브리드 자동차는 기존 하이브리드 자동차와 달리 배터리의 용량이 크고 순수 전기 자동차(electric vehicle, EV)와 같이 외부 전원으로 배터리를 충전할 수 있어 전기 동력원의 활용도가 더 크다. 따라서 주행 중에 화석연료와 전기에너지를 어떻게 활용하느냐에 따라 연비가 크게 달라질 수 있다. 하지만 전기 모드와 하이브리드 모드 등 빈번한 모드변환은 운전자가 이질감을 느낄 수 있다. 특히 병렬형 하이브리드 자동차의 경우 엔진 클러치를 이용하여 모드변환이 이루어지는데, 이에 따른 클러치 접합 시 충격으로 주행성(drivability)을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 병렬형 하이브리드 자동차의 모드변환 시 특성을 파악하고 제어하고자 하는 연구가 필요하다. 선행 연구로 EV 모드에서 HEV 모드로 모드변환 시의 과도 응답 특성을 파악하기 위한 제어 알고리즘을 개발하고 토크 교란(torque fluctuation)을 줄이기 위한 클러치 슬립 제어(clutch slip control)을 제안하였다.[1~3] 또한 엔진, 모터, 클러치 및 ISG 등 제어를 통해 토크의 진동을 저감하려는 연구는 계속 이어져 왔다.[4~7] 한편, ISG 존재 유무에 따라 두 가지의 하이브리드 구조에 대해 모델링하고 모드변환 제어알고리즘을 적용하여 모드변환 시 충격 특성을 분석한 연구도 있다.[8]

본 논문에서는 병렬형 플러그인 하이브리드 차량에 모드변환 제어 알고리즘을 적용한 성능 시뮬레이터를 개발하였으며, 모드변환 시 엔진 토크 제어에 따른 클러치 접합 충격 특성을 분석하였다.

Table 1 Specification of the vehicle

Engine	Type	Diesel engine
	Max. power	65 kW (1000~4000 rpm)
Motor	Max. power	60 kW (1~6000 rpm)
Engine clutch	Type	Wet clutch
Transmission	Type	DCT (Dual clutch transmission)
	Gear ratio	6 speed
Battery	Type	Li-ion
	Capacity	37 Ah
Vehicle	Mass	1720 kg
	Front area	2.25 m^2
	Drag coefficient	0.29
	Rolling resistance coefficient	0.014

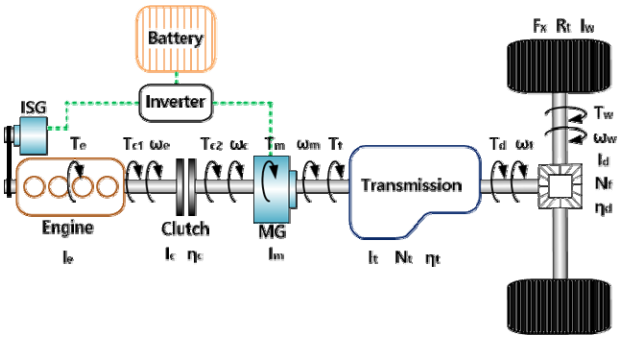

Fig. 1 Configuration of the PHEV system

2. 차량 모델링

2.1 차량 시스템 구성 및 시뮬레이터

본 연구의 플러그인 하이브리드 차량 구조는 엔진의 동력을 엔진 클러치로 전달하는 병렬형 하이브리드 구조이며 Fig. 1과 같다. 엔진과 모터 사이에 클러치가 존재하며 클러치 해제 시 모터로만 주행가능한 구조이고, 클러치 접합 시 엔진과 모터의 두 동력원으로 구동되는 하이브리드 차량이다.

플러그인 하이브리드 차량의 성능 시뮬레이터는 하이브리드 차량을 제어하는 HCU와 각 동력원 및 동력전달 요소들로 구성된 차량 모델로 이루어져있다. 차량 모델에는 배터리, ISG, 엔진, 엔진 클러치, 모터, 변속기, 최종감속기어 등으로 구성되어있다. MATLAB/Simulink로 구성하였으며 Fig. 2와 같다.

2.2 엔진 클러치 모델

엔진 클러치는 엔진과 모터 사이에 존재하며, 타입은 다판 습식 클러치이다. 전기 모드(EV 모

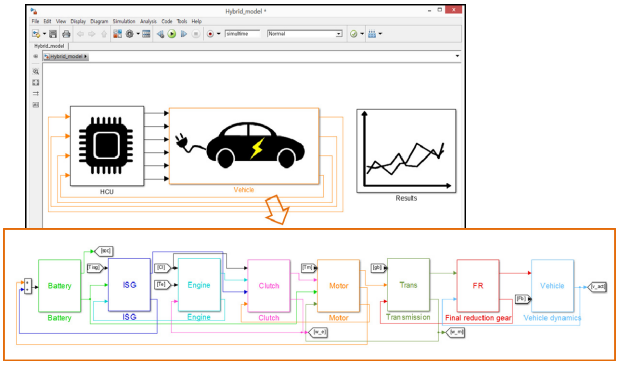

Fig. 2 The PHEV simulator for performance evaluation

드) 시 엔진 클러치가 해제되어 엔진의 동력을 단절 시킨다. 클러치의 동역학 식은 다음과 같다.[9]

$$T_{cl} = N_f \, F_{app} \, \mu(\omega) r_{eq} \, \mathrm{sgn}(\omega) \tag{1}$$

$$F_{app} = p_{app} A_p \tag{2}$$

$$r_{eq} = \frac{2}{3} \frac{b^3 - a^3}{b^2 - a^2} \tag{3}$$

N_f는 클러치가 접합하는 마찰판의 개수이며, F_{app}는 클러치에 작용하는 수직력, μ는 클러치의 마찰계수, r_{eq}는 클러치 디스크의 등가 반지름, sgn는 클러치 속도 차에 의한 클러치 토크의 부호를 결정해주는 signal 함수이다. 이때 클러치의 수직력 F_{app}는 클러치에 작용하는 피스톤 압력 p_{app}와 피스톤 면적 A_p에 따라 결정된다. 클러치 등가 반지름, r_{eq}는 클러치의 내경 a과 외경 b에 따라 결정된다. 이때 클러치 마찰 계수, μ는 클러치 양단의 속도와 정적 마찰 계수, 동적 마찰계수에 따라 일반화한 Stribeck 식에 의해 결정된다.[9]

2.3 Integrated starter generator (ISG) 모델

ISG는 엔진의 크랭크축에 벨트로 연결되어 엔진의 랭킹(cranking) 시 엔진에 동력을 공급하여 클러치가 접합할 수 있는 동기화 속도까지 증가되도록 도와준다. 또한 ISG는 엔진을 이용한 발전기 역할도 가능하다. 이때 벨트 풀리의 ratio 값은 3이며, ISG 토크-속도 특성 그래프를 이용하여 모델링 하였다. ISG 모델의 입력과 출력 변수, ISG의 특성 맵은 Fig. 3과 같다.

2.4 차량 모델

차량 모델은 종방향 차량동역학 모델로 구성하였다. 차량의 구동력, $F_{traction}$에 따른 공기저항력, F_{drag}과 구름마찰력, F_{roll}을 고려한 모델이다.

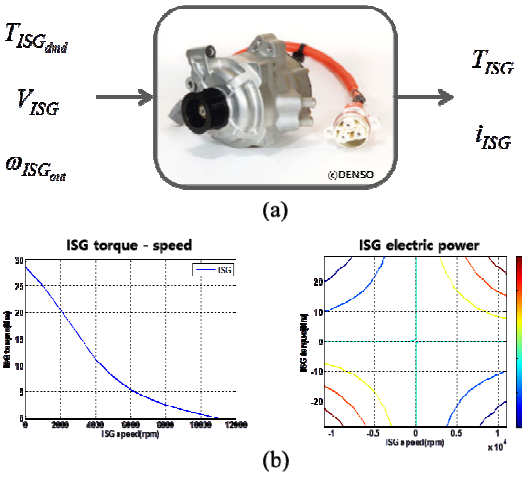

Fig. 3 ISG model; (a) input and output parameters and (b) ISG characteristic maps

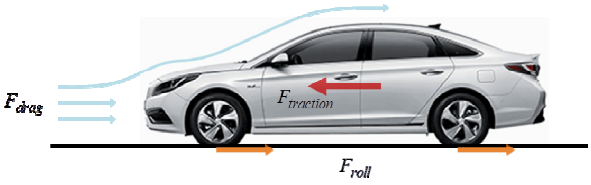

Fig. 4 Longitudinal vehicle model

$$V = \int \frac{1}{M} \left(F_{traction} - F_{drag} - F_{roll} \right) dt \tag{4}$$

3. 시뮬레이션 결과

3.1 플러그인 하이브리드 모드변환 성능 시뮬레이터

성능을 평가하기 위한 시뮬레이션 주행 사이클은 WLTP(world harmonized light vehicles test procedure) level 2를 주행하였으며, 배터리를 소량의 임의값으로 시작하여 모드 변환이 이루어질 수 있도록 상황을 가정하였다. 배터리 state of charge (SOC)가 일정 이하로 감소하면 플러그인 하이브리드 차량은 EV 모드에서 HEV 모드 혹은 엔진으로만 주행하는 엔진 모드로 모드변환하여 주행하게 된다. Fig. 5는 차량의 속도와 배터리의 SOC 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 시간 260.6 sec일 때 배터리의 SOC 값이 일정 이하로 감소하여 EV 모드에서 엔진 모드로 모드변환이 이루어지는 것을 볼 수 있다.

3.2 플러그인 하이브리드 모드변환

모드변환 시에 충격량(G)과 소요시간은 운전 시 주행감에 영향을 미친다.[8] 여기서 충격량은 차량의 종방향 가속도이며 모드변환 소요 시간은 모드

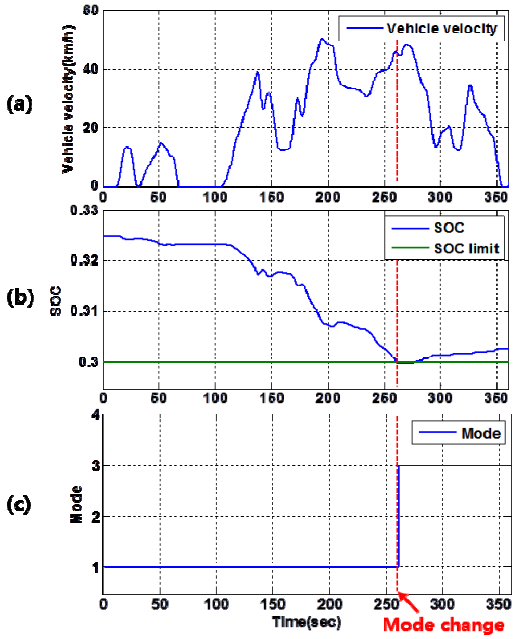

Fig. 5 Simulation results of vehicle velocity and battery SOC

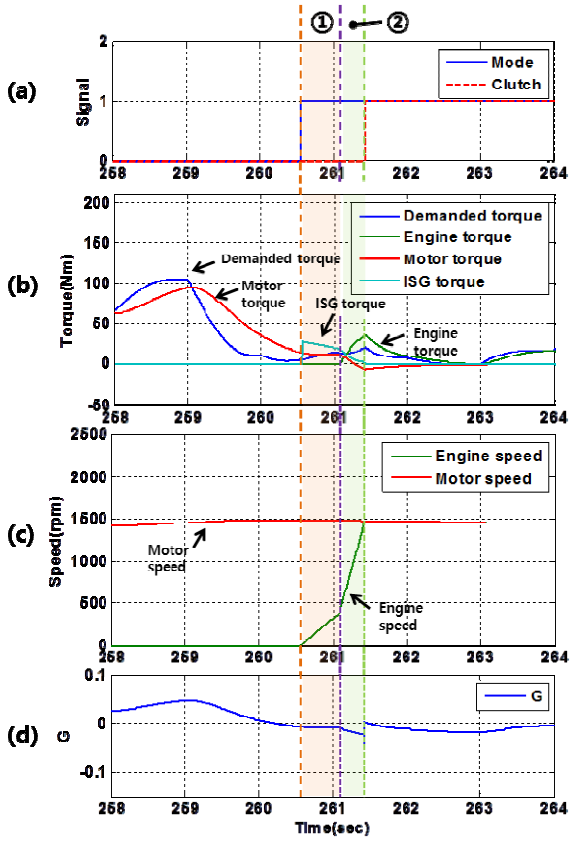

Fig. 6 Simulation #1 results during mode change

변환 신호가 들어왔을 때부터 클러치가 접합 할 때까지 걸린 시간이다.

Fig. 6과 7은 모드변환하는 동안 시뮬레이션 결과이다. 이때 변속은 4단으로 일정한 구간이다. 모드변환 중 변속기의 기어단수 변화 필요 시, 기어변속 완료 전 엔진 클러치의 접합이 이루어지도록 제어한다.[10] 모드변환은 두 개의 구간으로 나뉜다. 먼저 구간 ①은 모드변환 신호가 들어왔을 때부터 엔진이 켜질 때까지이며, 구간 ②는 엔진이 켜지고 클러치가 접합하여 모드변환이 끝날 때까지이다. 먼저 모드변환 신호가 들어오면 ISG 토크를 발생시켜 엔진의 속도가 증가하게 된다. 일반적인 경우에는 크랭킹 구간 이후에 클러치 속력 동기화가 이루어져 최종적으로 클러치 접합이 이루어진다. 하지만 주행상황에 따라 모터 속도가 빠를 경우에는 ISG의 토크만으로 클러치의 속력을 빠르게 동기화시키기 어려워 모드변환 소요시간이 늘어지게 된다.[1] 따라서 크랭킹 이후 ISG 토크와 동시에 엔진 토크 발생시킨다면 클러치 속력 동기화 시간을 단축할 수 있다. 엔진 토크 제어는 Fig. 8과 같으며, 클러치의 속력 차에 의한 PI 제어를 적용하였다. 기존 요구 토크(T_{demand})에 보상 토크(T_{comp})를 더해 모드변환이 신속히 수행되도록 하였다. 비례 게인은 K_p이고 적분 게인은 K_i이다.

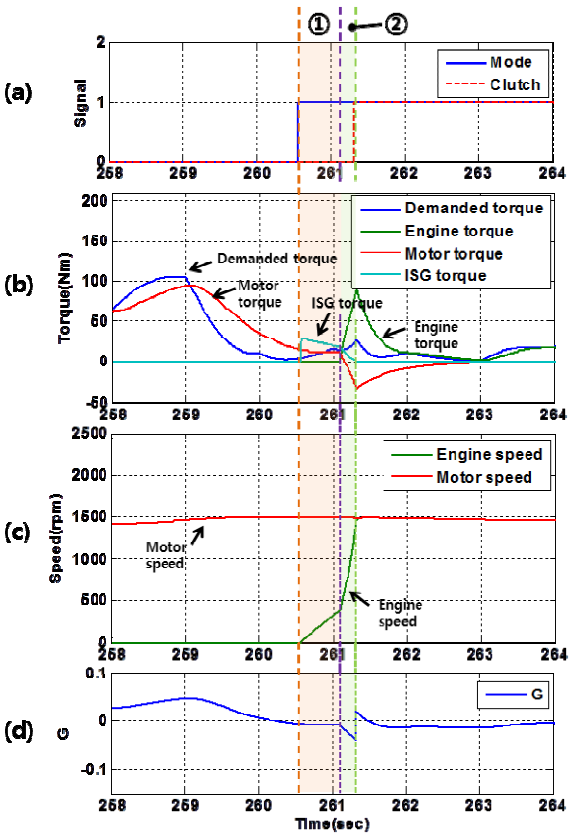

Fig. 7 Simulation #2 results during mode change

Table 2 Simulation results of control with engine operating time

Simulation #	Vehicle acceleration	Clutch speed synchronization time
1	0.05 g	0.8 sec
2	0.06 g	0.7 sec

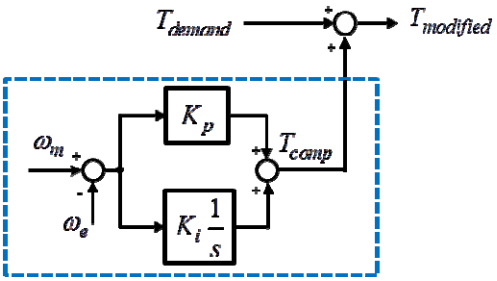

Fig. 8 Engine torque control

3.3 모드변환 시 충격 특성

크랭킹 구간 이후에 엔진 토크의 제어하면서 클러치가 접합하며 발생하는 충격 특성을 살펴보았다. 시뮬레이션 결과는 Table 2와 같다. 시뮬레이션 결과 #1과 같이 접합 시기를 조금 늦춰 충격량을 감소 시키면 모드변환 소요 시간이 길어져서 운전자에게 이질감을 느끼게 한다. 반면, 시뮬레이션 #2와 같이 모드변환 소요 시간을 줄이면 클러치 접합 시 충격량을 증가시켜 주행감에 악영향을 미친다. 모드변환 소요시간과 충격량은 trade-off 관계에 있다. 따라서 이를 적절하게 제어하는 알고리즘 개발이 필요하다.

4. 결 론

플러그인 하이브리드 차량 성능 시뮬레이터를 개발하고 모드변환 제어알고리즘을 통해 클러치 접합 시의 충격 특성을 파악하였다. 신속한 클러치의 속도 동기화를 위해 엔진토크를 제어하였으며, 클러치 접합 시 나타나는 모드변환 충격량과 소요시간을 분석하였다. 모드변환 시 주행감에 있어서 충격량과 소요시간은 trade-off 관계를 나타내며 따라서 적절한 제어알고리즘 개발이 필요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업융합원천기술 개발사업 “1리터카급 디젤 하이브리드 원천기술 개발 (10047586)” 과제의 지원으로 수행되었음.

참고문헌
(References)

(1) Jung, H., Lee, H., Rhee J. and Lee, S., 2007, “Control Strategy Development for Belt-Driven ISG(Integrated starter generator) System applied to the Parallel Hybrid Vehicle,” *KSAE 2007 symposium*, pp. 24~36.

(2) Kim, S., Park, J., Yoon, S., Lee, M. and Shim, H., 2008, “A Study of Control Strategy for Hybrid Electric Vehicle during Mode Change,” *KSAE 2008 Annual Conference*, p. 556.

(3) Kim, S., Park, J., Hong, J., Lee, M. and Shim, H., 2009, “Transient Control Strategy of Hybrid Electric Vehicle during Mode Change,” *SAE Technical Paper 2009-01-0228*.

(4) Kim, J., Kim, H., Park, T., Han, K., Hong, J. and Lee, H., 2009, “A Study on the Control Algorithm improving transient response of a Parallel Hybrid Electric Vehicle,” *KSAE 2009 Annual Conference*, pp. 1454~1460.

(5) Hwang, H., Kim, S., Yang, D., Hong, J., Kim, H. and Hwang, S., 2009, “A Study of Response of Mode Change with Engine Clutch and Torque Control for Driving Quality in Hybrid Electric Vehicle,” *KSAE 2009 Annual Conference*, pp. 1486~1491.

(6) Kim, S., Song, M., Kim, J., Hong, J. and Kim, H., 2009, “A Study on Engine Clutch Control Algorithm for a Parallel HEV during Mode Change,” *KSAE 2009 Annual Conference*, pp. 2873~2879.

(7) Kwon, O., Chai, M., Ji, J. and Kim, H., 2013, “Design of Integrated Starter Generator for Parallel CVT Hybrid Electric Vehicle,” *KSAE 2013 Annual Conference*, pp. 1834~1837.

(8) Song, M., Oh, J., Choi, S., Kim, Y. and Kim, H., 2013, “Motor Control of a Parallel Hybrid Electric Vehicle during Mode Change without an Integrated Starter Generator,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 8, pp. 742~749.

(9) Deur, J., Petric, J., Asgari, J. and Hrovat, D., 2005, “Modeling of Wet Clutch Engagement Including a Thorough Experimental Validation,” *SAE Technical Paper 2005-01-0877*.

(10) Lee, B. and Jeong, T., 2015, “Method and System for Controlling Shift Down of Hybrid Vehicle,” *Korean Patent, 10-1500374*.