

# 연비 평가를 위한 6속 DCT기반 HEV 성능 시뮬레이터의 개발 Development of Performance Simulator for 6-speed DCT-based Hybrid Electric Vehicle to Evaluate the Fuel Economy

백진주<sup>1</sup> · 이용관<sup>1</sup> · 박진현<sup>1</sup> · 한관수<sup>1</sup> · 황성호<sup>1\*</sup>

J. J. Baek, Y. K. Lee, J. H. Park, K. S. Han and S. H. Hwang

Received: 10 Sep. 2013, Revised: 11 Nov. 2013, Accepted: 14 Nov. 2013

**Key Words** : Dual Clutch Transmission (DCT), Hybrid Electric Vehicle (HEV), Performance Simulator

**Abstract:** With aggravation of environmental contamination and energy resource exhaustion, Hybrid Electric Vehicles (HEV) that can be economically operated with low fuel consumption are receiving greater attention. For performance improvement of such HEV, the development of efficient transmission can be seen as one of core technologies such as performance of components and driving strategy. Dual clutch transmission (DCT) is actively studied as a transmission type for HEV due to its advantages of having excellent power transmission efficiency based on manual transmission characteristic, resolving the problem of power interruption, and realizing driving convenience of automatic transmission (AT). In this paper, one diesel HEV equipped with 6-Speed DCT, modelled using MATLAB/Simulink, and a performance simulator developed for this vehicle are introduced. Driving simulation with driving cycles such as FTP75 and NYCC was performed using the developed performance simulator, and the simulated results regarding state of charge and fuel economy, when AT and DCT are applied to this diesel hybrid vehicle respectively, are compared. This performance simulator can be utilized to develop a control algorithm for improving the fuel economy of HEV with DCT.

## 1. 서 론

최근 석유자원의 고갈, 환경문제 그리고 배기가스의 법적 규제가 강화됨에 따라 이러한 문제들을 해결하기 위한 연구가 미래 자동차 산업의 핵심기술로서 활발히 진행되고 있다.

친환경 자동차는 기존의 내연기관 자동차보다 운행 시 배출하는 이산화탄소, 배기가스의 양이 적고 효율이 좋은 것이 특징이다. 친환경 자동차 중 하이브리드 자동차(Hybrid Electric Vehicle; HEV)는 가장 실현성이 높은 방안으로 이미 많은 자동차 메이

커에서 상용화하여 시판하고 있으며, 이에 대한 확대 개발이 이루어질 것으로 전망된다.

HEV에서 연비(fuel economy)를 극대화시키고 배기가스 배출을 최소화하기 위해서는 자동화된 변속장치를 장착하여 엔진, 모터, 변속기의 통합적인 제어를 수행하는 것이 필수적이다. HEV에 적용될 수 있는 변속기의 종류로는 AT(Automatic Transmission), CVT(Continuously Variable Transmission), DCT(Dual Clutch Transmission) 등이 있다.

이 중 DCT는 MT(Manual Transmission)의 우수한 동력 전달효율을 가지면서 동력 단절 문제를 해결하고 AT와 같이 우수한 변속감을 구현할 수 있는 최신 변속기의 기술로써 세계 우수 자동차 업체들에서 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. DCT는 변속기 내부의 축을 홀수 단과 짝수 단 2개의 축으로 구성하고 클러치를 제어함으로써 동력 단절 현상이 발생하지 않고 기어 변속을 수행할 수 있게 된다. 하지만, 두 개의 클러치 제어성능에 따른 거동 특성이

\* Corresponding author: hsh@me.skku.ac.kr

1 School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Copyright © 2013, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

변속 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

지금까지 DCT가 장착된 HEV 관련 연구로는 가솔린 엔진 자동차의 거동 특성을 바탕으로 DCT 제어에 따른 차량의 동적 해석에 대한 연구<sup>1)</sup>, 변속감 개선을 위한 제어 알고리즘<sup>2)</sup> 및 발전 성능 해석에 대한 연구<sup>3)</sup>가 진행되어 왔으며, 현대 자동차에서 DCT용 건식클러치 전달토크 특성 규명 및 제어 모델 개발에 대한 연구를 진행해왔다<sup>4)</sup>.

본 논문에서는 디젤 엔진 HEV에 6속 DCT를 장착한 차량을 대상으로 성능 시뮬레이터 개발을 수행하였다. MATLAB/Simulink를 이용하여 부품별 모델링을 수행하였으며, driving cycle에 따른 driving 시뮬레이션을 수행하였다. 디젤 HEV에 변속기를 AT와 DCT로 달리 장착하여 시뮬레이션을 수행하여 SOC(State of Charge)와 연비를 비교하였다. 본 논문에서 개발된 성능 시뮬레이터는 DCT를 장착한 디젤 HEV의 연비 향상을 위한 제어 알고리즘 개발 등에 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 6속 DCT기반 HEV 시스템

### 2.1 6속 DCT기반 HEV 동력 전달 구조

Fig. 1은 6속 DCT기반 HEV의 동력 전달 메커니즘을 보여준다. TEMD(Transmission Mounted Electric Device) 타입 병렬형 하이브리드 시스템 구조로 엔진과 모터가 모두 차량 동력원으로 사용되며 엔진과 모터 사이에 클러치가 장착되어 있어 엔진의 동력을 단절시키고 모터 단독으로 구동하는 EV모드 구현이 가능하다. 또한 제동 시 엔진 브레이크 효과를 차단하여 회생제동 효율을 높일 수 있어 연비 효율을 향상시킬 수 있다.

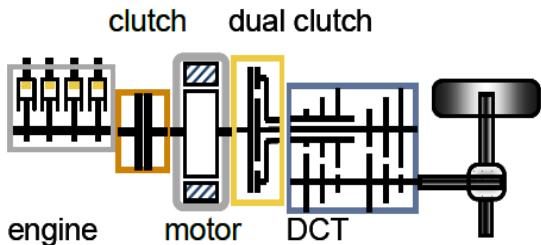


Fig. 1 Powertrain configuration of 6-speed DCT-based HEV

### 2.2 디젤 HEV 모델링

본 논문의 연구대상 차량은 한국에서 양산되었던

2리터급 디젤 차량이다<sup>5)</sup>. 기존 모델의 디젤 연료 방식을 개선하여 디젤 HEV 모델링을 구현하고 6속 건식 DCT를 추가 장착한 것으로 모델을 구현하였다.

MATLAB/Simulink를 사용하여 연구대상 차량의 주요 제원이 반영된 디젤 하이브리드 자동차용 성능 시뮬레이터를 개발하였다. 성능 시뮬레이터는 Fig. 2와 같이 운전자, 클러치, 모터, 배터리, 차량 모델링 등으로 구성된다.

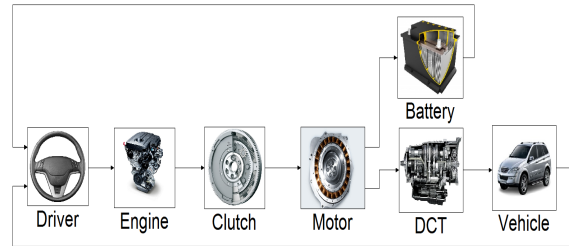


Fig. 2 6-speed DCT-based HEV model

엔진은 2리터 디젤 엔진을 대상으로 Fig. 3 엔진맵을 이용하여 모델링을 수행하였다. 각 부품별 모델링은 Fig. 4와 같다.

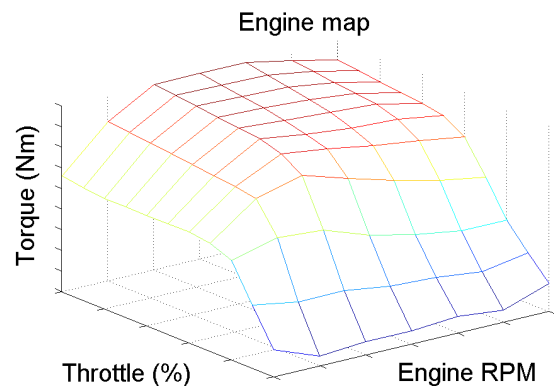


Fig. 3 Engine map

구동모터는 35kW급 BLDC모델을 사용하였으며, 모터의 토크 효율 맵을 이용하여 모델링하였다. 배터리는 2.4kWh급을 사용하였으며, 식 (1), (2)와 같이 기전력  $E$ , 내부저항  $R_i$ , 배터리 부하전류  $i_a$ 를 이용하여 모델링하였다.

$$P_{battery} = E i_a - i_a R_i \quad (1)$$

$$SOC = \frac{Q_u}{Q_m} = \frac{\text{현재 배터리 용량}}{\text{배터리 최대 용량}} \quad (2)$$

이상의 부품들을 거쳐 동력은 차량으로 전달되어

식 (3), (4)와 같이 종방향 특성만이 고려된 일차원 차량 모델이 사용되었으며, 동력원으로부터 형성된 차량의 속도는 운전자 모델에 피드백 되어 엑셀의 파라미터 값을 결정하게 된다<sup>6)</sup>.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{T_{driveshaft} / R_{tire} - F_{load} - F_{brake}}{M_{vehicle}} \quad (3)$$

$$F_{load} = F_{air} + F_{rollingfriction} + F_{slope} \quad (4)$$

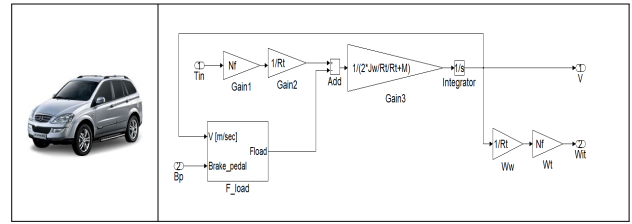


Fig. 4 Modeling of components for diesel HEV

### 2.3 6속 DCT 모델링

여러 개의 클러치와 브레이크의 on-coming과 off-coming을 통해 동력을 전달하는 AT와 달리 DCT는 두 개의 클러치 제어를 통해 구동축으로 전달되는 동력을 제어한다. 예를 들어, 1단 기어가 선택된 상태에서는 홀수 단 회전축의 클러치가 연결되어 동력을 전달한다. 이 상태에서 2단 기어가 미리 물려있는 상태로 짝수 단 회전축도 함께 회전하고 있지만 짝수 단 회전축의 클러치는 분리되어 있어 동력이 전달되지 않는다. 1단에서 2단으로 변속 시에는 홀수 단 회전축의 클러치가 분리됨과 동시에 짝수 단 홀수 단 회전축의 클러치가 연결되어 미리 물려있던 2단 기어가 동력을 전달하게 된다. 즉, 홀수 단 기어와 짝수 단 기어 중 인접한 단의 기어는 항상 회전축에 물려있는 상태이며 회전축에 연결된 클러치가 번갈아 작동시킴으로써 해당 기어가 선택된다. 이와 같이 두 개의 클러치의 on-coming과 off-coming가 진행되는 상태에서 역토크가 발생하며, 동력전달계에 토크 충격이 발생한다<sup>7)</sup>.

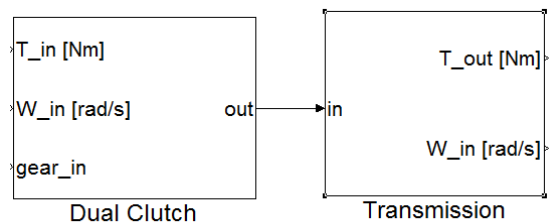
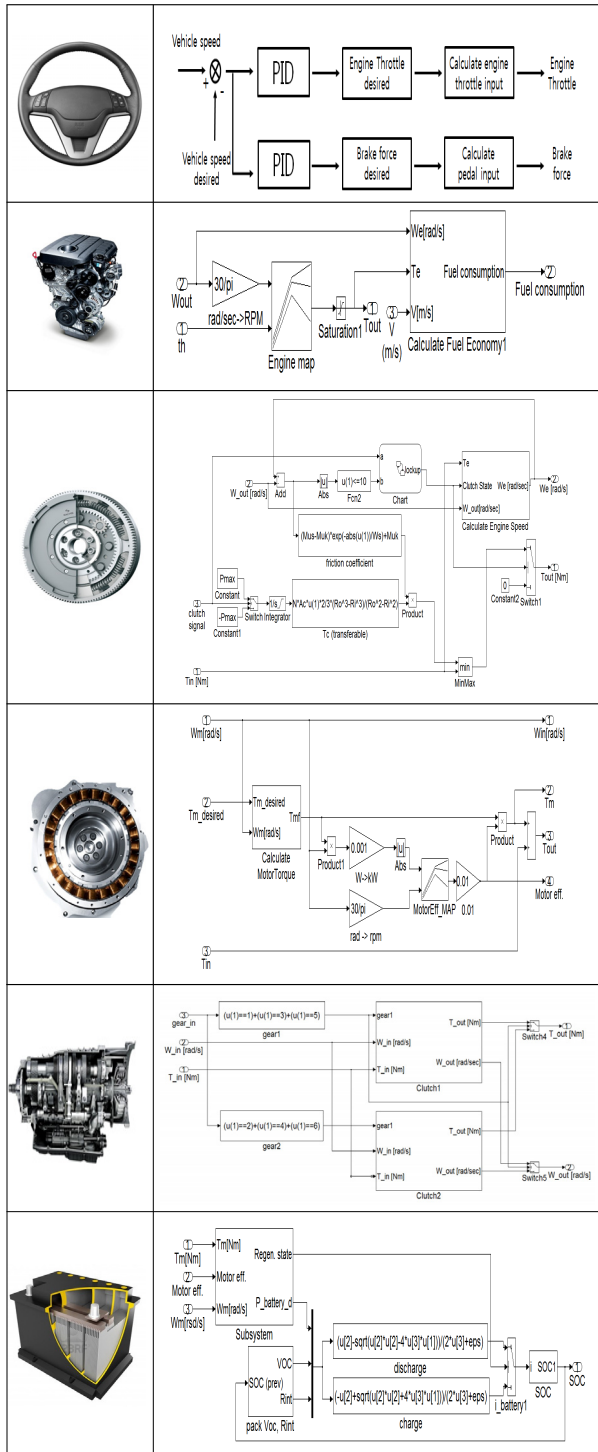


Fig. 5 Input/output signals of DCT model

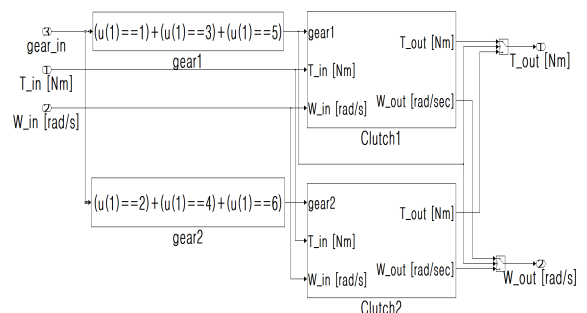


Fig. 6 Inside of dual clutch modeling

Fig. 5는 DCT의 두 개의 클러치와 변속기 모델을 나타내며, 이 두 클러치를 통해 변속기로 토크를 전달한다. Fig. 6은 Dual clutch 모델의 내부를 보여준다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 Dual Clutch의 기어 1, 3, 5단은 클러치 1으로 기어 2, 4, 6단은 클러치 2로 토크가 전달된다. 클러치 내부의 모델링에는 클러치의 마찰계수  $\mu$ 와 클러치 마찰판 개수  $Z$ , 클러치 마찰면의 외경  $R_o$  및 내경  $R_i$ , 클러치 압력판에 가해지는 압력  $P$ 를 이용하여 클러치 전달 토크 식 (5)를 이용하여 모델링하였다<sup>8,9)</sup>.

$$T_c = Z \frac{2}{3} \mu \left( \frac{R_o^3 - R_i^3}{R_o^2 - R_i^2} \right) P \quad (5)$$

### 2.4 TCU 모델링

Fig. 7과 Fig. 8은 TCU에 적용된 변속맵 Upshift map과 Downshift map을 나타낸다.

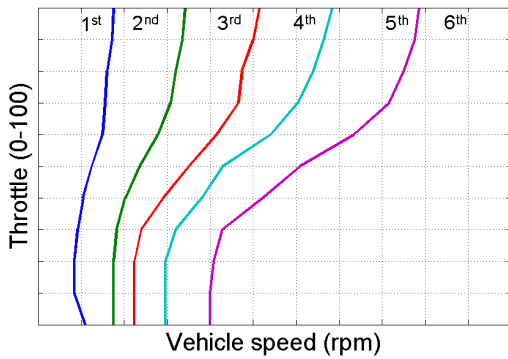


Fig. 7 Upshift map

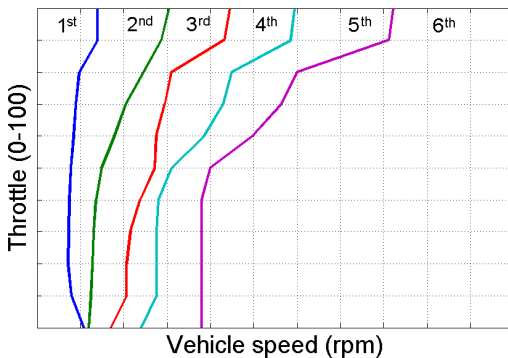


Fig. 8 Downshift map

Fig. 9는 스로틀 페달값과 차속을 입력으로 받아 변속맵을 통해 적절한 현재 기어 단수를 정해주는 TCU 내부 모델을 보여준다. DCT TCU와 AMT와 AT TCU(Transmission Control Unit)의 차이점은

AMT와 AT TCU는 스로틀 페달값과 차속을 입력값으로 받아 변속맵을 통하여 현재 기어단의 값만 결정하여 변속기로 전달되지만 DCT TCU는 현재 기어단 값과 더불어 운전자의 다음 단 기어 값을 결정하여 변속기로 전달한다. 이 전달값을 통해 현재 기어는 회전축의 클러치가 연결되어 동력을 전달하고 다음 기어 단은 싱크로나이저와 미리 물려있는 상태로 두 클러치가 서로 on-coming과 off-coming를 수행할 시 바로 다음 단의 기어로 동력을 전달할 수 있게 해준다.

Fig. 10은 다음 단 기어 값 출력과 기어 변속 신호 값을 출력해 주는 TCU 모델링이다.

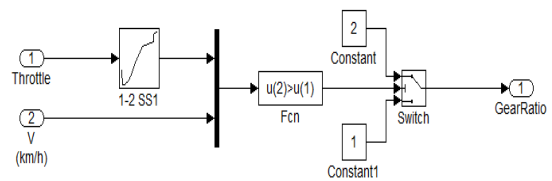


Fig. 9 Determination of internal gear ratio in TCU model

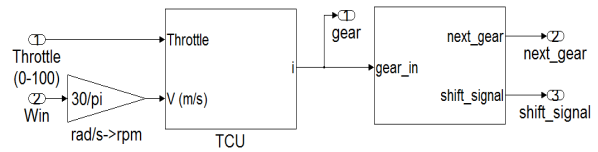


Fig. 10 Input/output signals of TCU

### 3. 시뮬레이션 결과

6속 DCT기반 HEV용 성능 시뮬레이터를 검증하기 위해, 도심 주행을 대표하는 모드인 FTP75 (Federal Test Procedure) 주행모드와 저속구간에서 가·감속이 많은 주행 사이클을 대표하는 NYCC(New York City Cycle) 주행모드를 사용하였다. Step-Size는 0.01sec로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 6속 DCT 기반 HEV 모델이 FTP75와 NYCC 주행모드 속도를 추종한 시뮬레이션 결과를 보여준다.

동일한 디젤 HEV 에 변속기를 AT와 DCT로 변경 장착하여 FTP75와 NYCC주행모드 시뮬레이션을 수행하였으며, 이에 따른 SOC와 주행 연비 결과를 확인해 보았다. Fig. 13과 Fig. 14는 FTP75주행모드를 1,900sec동안 AT와 DCT가 장착된 차량 모델링을 시뮬레이션하여 얻은 SOC와 연비에 대한 비교 결과이다.

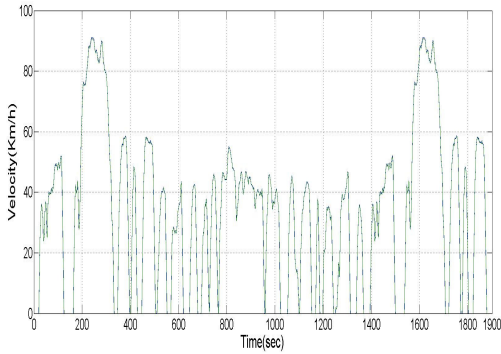


Fig. 11 FPT75 driving cycle simulation result

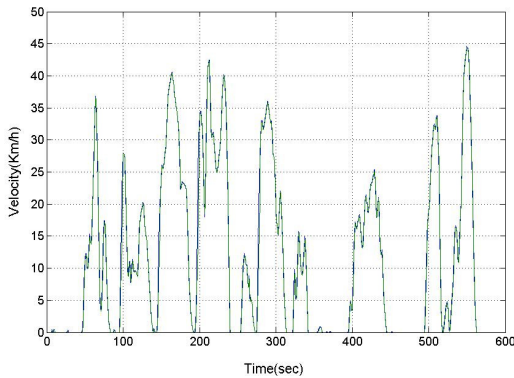


Fig. 12 NYCC driving cycle simulation result

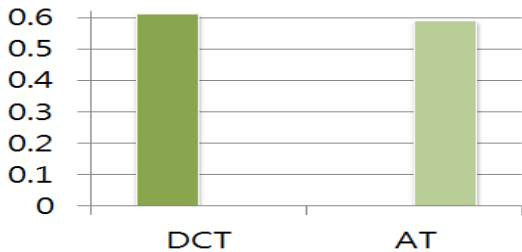


Fig. 13 SOC(Normalized value) result according to FTP75 driving cycle

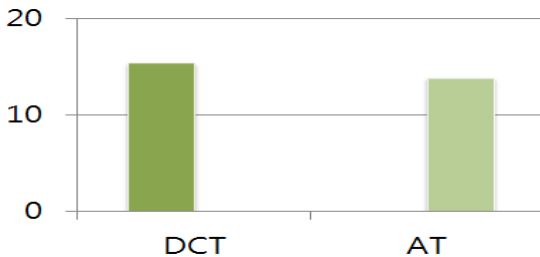


Fig. 14 Fuel economy(km/L) result according to FTP75 driving cycle

Fig. 15와 Fig. 16은 AT와 DCT가 장착된 각각의 차량을 대상으로 NYCC주행모드를 598sec동안 시뮬레이션하여 얻은 SOC와 연비 비교 결과이다.

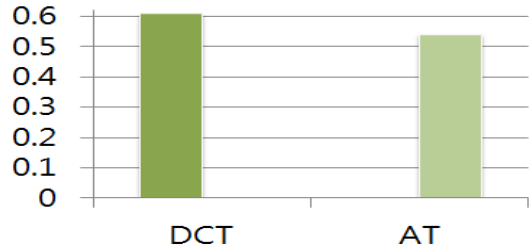


Fig. 15 SOC(Normalized value) result according to NYCC driving cycle

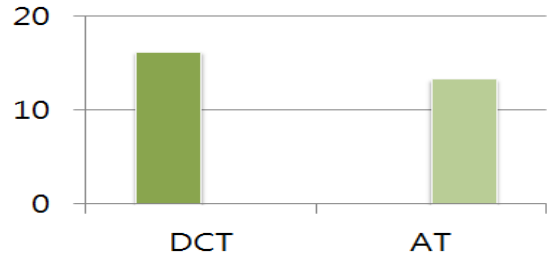


Fig. 16 Fuel economy(km/L) result according to NYCC driving cycle

결과 그림으로부터 동일 주행 모드의 경우, DCT가 장착된 차량이 AT가 장착된 차량보다 연비가 더 높게 나옴을 알 수 있다. 이는 AT의 경우, 토크 컨버터 및 유압 변속 메커니즘의 효율에 따른 영향으로 판단된다.

표 1은 AT와 DCT 차량에 대한 연비성능 비교 결과를 보여준다. 이를 통해 DCT 장착 차량 모델이 AT 장착 차량보다 약 12% 정도 연비가 높게 나옴을 알 수 있다.

Table 1 SOC and fuel economy results according to transmission types and driving cycles

	Driving Cycle	Driving Time [sec]	AT	DCT
SOC [Normalized value]	FTP75	1900	0.5897	0.6129
	NYCC	598	0.5391	0.6060
Fuel Economy [km/L]	FTP75	1900	13.7900	15.3200
	NYCC	598	13.3200	15.5200

#### 4. 결 론

6속 DCT기반 디젤 HEV 모델링을 구현하였으며, 동일한 디젤 HEV에 변속기를 AT와 DCT로 변경하여 FTP75와 NYCC 주행모드에 따른 SOC 및 연비

결과를 비교하였다. 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 6속 DCT기반 HEV 성능 시뮬레이터를 개발하였으며, FTP75와 NYCC 주행모드를 통해 시뮬레이션 결과를 확인하였다.

- 디젤 HEV에 변속기로 AT와 DCT를 각각 장착한 차량 모델링을 수행하였으며, 시뮬레이션을 통해 얻어진 SOC 변화량과 연비를 비교하였다.

- AT기반 디젤 HEV의 경우, 토크 컨버터로 인한 동력손실로 인해 DCT기반 디젤 HEV의 SOC 및 연비 효율이 약 12% 정도 향상됨을 확인하였다.

- 현재 AT모델은 락업(lockup) 상태를 고려하지 않았으며, 이를 고려한 AT 모델로 보완하여 비교한다면 연비효율 향상 정도가 현재의 결과보다는 다소 감소될 것으로 예측된다.

향후, AT 모델링 보완과 DCT 모델에 클러치 액추에이터 모델을 추가함으로써 액추에이터 제어에 따른 클러치 제어 성능을 확인할 예정이다. 이를 통해 본 성능 시뮬레이터는 6속 DCT기반 HEV의 최적화된 연비 및 동력 성능 알고리즘 개발에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.(NRF-2013R1A1A2005594)

## 참고 문헌

- 1) Min-Seok Cho, "Dynamic Analysis of the vehicle equipped with a Dual Clutch Transmission", Hanyang University, 2007.
- 2) Sungwha Hong, Sunghyun Ahn, Beakyou Kim, Heera Lee and Hyunsoo Kim, "Development a Motor Control Algorithm to Improve Shift Quality for Electric Vehicle with 2-speed Dual Clutch Transmission," 2012 KSAE Conference, pp.1487~1490, 2012.
- 3) Gaeun Lee, "A study on Shift Control Algorithm and Launching Performance for Transmission Mounted Electric Device Type Dual Clutch Transmission-based Hybrid Electric Vehicle", Sungkyunkwan University, 2012.
- 4) Seungsam Baek, Youngmin Yoon, Sunghyun Cho, Jungchul Kim and Sepung Oh, "Identification of Torque Transfer Characteristics and Development of a Torque Transfer Control Model for Dual Dry Clutch", 2012 KSAE Conference, pp.99~104, 2012.
- 5) Kitae Yeom, Jaesik Yang, Choongsik Bae, and Hyunok Kim, "Optimization of the Parallel Diesel Hybrid Vehicle", 2008 Transactions of KSAE, Vol.16, No.6, pp.26~32, 2008.
- 6) J. K. Ahn, K. H. Jung, D. H. Kim, H. B. Jin, H. S. Kim, and S. H. Hwang, "Analysis of the Regenerative Braking System for a Hybrid Electric Vehicle using Electro-Mechanical Brakes", Int. J. of Automotive Technology, Vol.10, No.2, pp.229~234, 2009.
- 7) Zhang Song, Wu Guangqiang, and Zheng Songlin, "Study on the Energy Management Strategy of DCT-based Series-Parallel PHEV", 2010 International Conference on CCIE, Vol.1, pp.25~29, 2010.
- 8) Jaeho Youn, Sangmoon Lee, and Hyunsoo Kim, "Analysis of Shift Performance for a Wet Type Dual Clutch Transmission", 2005 KSAE Conference, pp.860~865, 2005.
- 9) H. S. Hwang, D. H. Yang, H. K. Choi, H. S. Kim and S. H. Hwang, "Torque Control of Engine Clutch to Improve the Driving Quality of Hybrid Electric Vehicles", Int. J. of Automotive Technology, Vol.12, No.5, pp.763~768, 2011.