

하이브리드 차량의 SOC 유지전략 방법

변상민*, 김범수, 차석원**

SOC Sustaining Strategy for HEV through State-machine Control

Sangmin Byun*, Beomsoo Kim and Suk-Won Cha**

Abstract

Considering the world's environmental problem, HEVs are projected as one of the solution. The keys of the HEV cruise control are expanding the use of electric motor and operating the internal combustion engine in the efficient region. This paper presents a new structure of SOC sustaining model where state-machine control is used. The proposed model defines battery charging and discharging as states and SOC of the battery as control variables. In this paper, we introduce various methods in deterministic rule-based control for HEV and describe a new SOC sustaining controller used by state-machine.

Key words

SOC(State of charge : 배터리충전상태), HEV(Hybrid Electric Vehicle : 하이브리드차량), RBC(Rule-based control : 룰 기반제어), state-machine

(접수일 2008. 11. 10, 수정일 2008. 12. 1, 게재확정일 2008. 12. 10)

* 서울대학교 기계항공공학부

■ E-mail : bluemetal7@snu.ac.kr ■ Tel : (02)880-8050 ■ Fax : (02)880-1969

** 서울대학교 기계항공공학부

■ E-mail : swcha@snu.ac.kr ■ Tel : (02)880-1700 ■ Fax : (02)880-1969

1. 서론

최근, 유가에 대한 관심이 늘어나면서, 점차 환경 친화적이고 효율이 우수한 하이브리드 차량에 대한 관심이 높아지고 있다. 하이브리드 차량은 2가지 이상의 동력원(엔진, 모터)을 사용하며, 배터리(혹은 울트라 캐패시터)와 같은 전기 에너지 저장시스템을 사용한다.

하이브리드 차량의 제어 핵심은 주행 간, 모터구동을 최대화 하면서, 가급적 엔진을 끄거나, 효율이 좋은 영역에서 엔진을 작동시키면서, 연비를 향상시키는 것이다. 오늘날, 하이브리드 차량의 연비를 향상시키기 위해, 다양한 제어방법

들이 등장하고 있다. 본 논문에서는 하이브리드 차량에 사용되는 제어 중 결정적 룰 기반 제어에 대해서 설명하고, 이 중, 스테이트 머신 제어를 이용하여 최적화된 SOC 경로를 추적하는 새로운 SOC 유지전략 방법에 대해서 연구를 수행하였다.

2. HEV 상위 제어

HEV 상위제어는 크게 룰 기반 제어와 최적화 기반 제어로 나눌 수 있다. 룰 기반 제어는 정해진 룰을 바탕으로, 하이브리드 파워 트레인 내 파워를 모터와 엔진에 효과적으로 분배

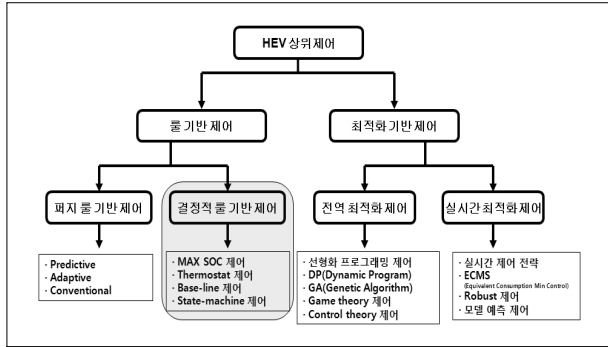


Fig. 1 HEV supervisory control.

하여, 엔진의 작동점과 차량의 주행모드를 결정하는 제어방법이다. 대표적인 제어방법으로는 결정적 룰 기반 제어와 퍼지 이론을 기반으로 한 제어가 있다. 최적화 이론을 바탕으로 한 최적화 기반 제어는 연료소비량이나 배기 가스량 등을 목적함수로 하고, 최적화 이론을 통해 목적함수를 최소화 하도록 제어하는 방법이다.

대표적인 제어방법으로 실시간 최적화 제어와 전역 최적화 제어가 있다. Fig. 1은 HEV 상위제어를 분류한 것이며, 이 논문에서는 결정적 룰 기반 제어에 대해서 중점적으로 연구를 수행하였다.

3. 결정적 룰 기반 제어

결정적 룰 기반 제어는 MAX SOC 제어, Thermostat 제어, Base-line 제어, 스테이트 머신 제어로 구분한다. 룰 기반 제어는 엔진이 주 동력원이고, 모터가 보조 동력원의 개념으로 사용되는 병렬형 하이브리드 구조에 많이 적용되는 제어전략이다.

3.1 MAX SOC 제어

HEV 차량이 정체상태의 도심구간을 주행할 경우, 모터 사용 비중이 높기 때문에, 배터리를 빨리 방전시키는 경향이 있다. 이와 같이, 배터리가 빨리 방전되는 도심주행에서는 배터리 SOC를 가능한 높게 유지하는 제어전략이 유리하다. Fig. 2는 차량의 요구파워에 따라 엔진 작동점과 HEV 작동모드를 결정하는 그림이다. Fig. 3은 MAX SOC 제어의 알고리즘을 나타낸 그림이다.

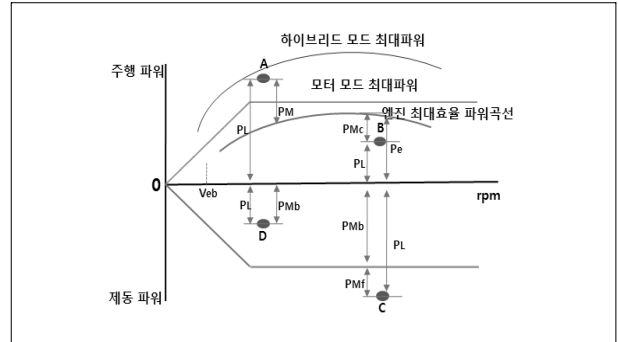


Fig. 2 HEV modes based on power demand.

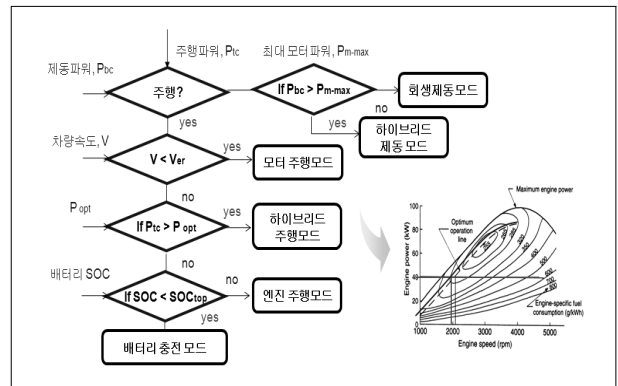


Fig. 3 MAX SOC control algorithm.

모터 주행모드 : Fig. 2에서 차량 속도가 V_{eb} (엔진시동속도)보다 작으면, 엔진이 최대효율선상에서 작동할 수 없으므로, 이 구간에서는 모터로 주행한다. 모터 주행모드는 모터 단독으로 차량에 구동파워를 전달하고, 엔진은 멈춰있거나, 공회전한다.

$$P_e = 0 \tag{1}$$

$$P_m = \frac{P_L}{\eta_{t,m}} \tag{2}$$

하이브리드 주행모드 : Fig. 2에서 요구파워가 A점에 있는 경우, 모터와 엔진이 동시에 작동해서 요구파워를 만족한다. 이 때, 엔진은 최대효율선상에서 작동하며, 부족한 파워는 모터를 구동하여 충족한다.

$$P_m = \frac{P_L - P_e \eta_{t,e}}{\eta_{t,m}} \tag{3}$$

배터리 충전모드 : Fig. 2에서 요구파워가 B점에 있는 경우, 엔진의 최대효율선보다 낮은 곳에 있다. 따라서, SOC가 상한

선보다 낮은 부분에 있다면, 엔진의 남은 파워를 이용하여, 배터리를 충전하여, SOC를 항상 상한선 가까이 유지한다.

$$P_m = (P_e - \frac{P_L}{\eta_{t,e}}) \times \eta_{t,e,m} \eta_{m'} \quad (4)$$

엔진 주행모드 : 배터리 충전모드와 마찬가지로, 요구파워가 B점에 있고, SOC가 상한선에 이른 경우, 엔진만 이용하여 주행한다.

$$P_e = \frac{P_L}{\eta_{t,e}} \quad (5)$$

$$P_m = 0 \quad (6)$$

회생 제동모드 : 차량이 제동하는 경우 요구파워가 D점과 같이 모터의 최대 회생파워 곡선보다 작으면, 발전기를 이용하여, 배터리를 충전한다.

$$P_{mb} = P_L \eta_{t,m} \eta_{m'} \quad (7)$$

하이브리드 제동모드 : 요구제동파워가 발전기의 최대 회생파워보다 크면, 발전기가 충전할 수 있는 최대파워만큼 충전하고, 남은 요구제동파워는 기계적인 브레이킹을 통해 차량을 제동한다.

$$P_{mb} = P_{mb,max} \eta_{m'} \quad (8)$$

3.2 Thermostat 제어

Thermostat 제어는 배터리의 SOC에 따라서, 엔진의 작동을 결정하는 제어방법이다. 배터리의 온도와 충전 효율 등을 고려하여, SOC의 작동범위인 상한선과 하한선을 정한다.

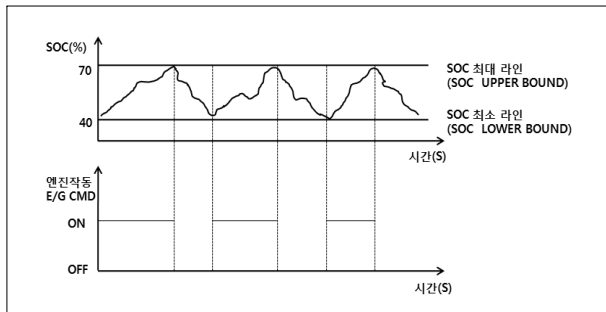


Fig. 4 Thermostat control.

그리고 SOC가 하한선에 도달하면, 엔진을 작동시키고, 상한선에 도달하면, 엔진은 정지하거나 공회전 상태로 작동한다. Fig. 4는 SOC에 따른 엔진의 작동명령을 그림으로 나타낸 것이다. 이 제어전략은 가속상황 없는 일정속도, 낮은 토크로 계속 주행하는 경우, 엔진에 의해 SOC가 쉽게 충전될 수 있는 상황에서 적용하는 것이 유리하다.

3.3 Base-line 제어

Base-line 제어는 SOC에 따라 엔진 작동점을 결정하여, 엔진을 효율이 좋은 영역에서 작동시키는 동시에, 균형 있는 SOC를 유지하게 하는 제어전략이다. 배터리 SOC가 낮을 경우, 배터리 충전모드로 작동하고, SOC가 높을 경우, 차량의 요구 토크에 따라, 주행모드를 결정한다. Toyota Prius와 Honda Insight에서 적용하는 대표적인 제어전략으로 복합형 하이브리드 차량 구조에 적용된다. Fig. 5는 SOC와 차량의 요구토크에 따른 엔진의 작동점을 나타낸 그림이다.

모터주행모드 : Fig. 5에서 요구 엔진 속도가 V_e (엔진시동 속도)보다 작으면, 모터로 주행한다. 요구토크가 엔진 OFF 토크보다 작은 경우에도, 모터로 주행한다.

하이브리드 주행모드 : Fig. 5에서 차량의 요구토크가 엔진의 최대토크 보다 큰 경우, 부족한 토크는 모터로 보충한다.

회생 제동모드 : 회생제동을 통해서 외부에서 전달되는 토크를 통해 배터리를 충전한다.

배터리 충전모드 : Fig. 5에서 배터리 SOC가 낮을 경우, 엔진은 차량 요구토크보다 더 큰 토크를 발생시키면서, 잉여 토크를 이용해서, 배터리를 충전한다.

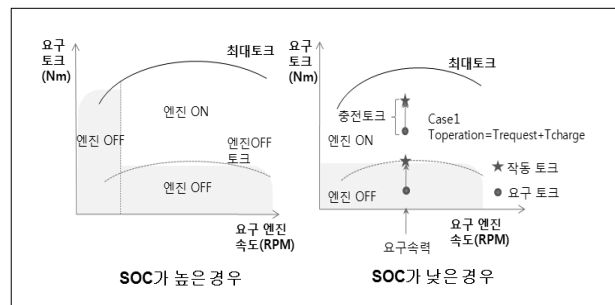


Fig. 5 Base-line control.

3.4 State-machine 제어

스테이트 머신 제어는 현재 상태에서 어떤 임의의 조건을 반영하여, 천이상태로 이동하는 제어방식이다. Fig. 6은 스테이트 머신 제어를 이용하여 엔진시동 상태를 제어한 예이다.

엔진이 정지해 있는 상태에서 배터리 SOC가 낮거나, 엔진 시동속도보다 차량의 속도가 큰 경우, 차량의 요구 파워가 모터가 감당할 수 있는 파워보다 크면, 엔진이 시동 상태로 상태 천이가 이루어진다. HEV에서 스테이트 머신을 이용하면, HEV의 주행모드 뿐 아니라, 배터리, 모터, 엔진 등 서브시스템을 포함한 서브시스템의 상태를 정의하거나 제어하기에도 유용하다.

4. State-machine 제어 모델

본 논문에서는 HEV에 사용되는 룰 기반 제어 중 스테이트 머신을 이용한 타겟 SOC를 추적하는 방식의 제어기를 구성하여, 결과를 분석하였다. 배터리의 충전전 상황을 상태로 정의하고, 타겟 SOC와 현재 차량의 SOC를 비교하여, 현재 차량의 SOC가 타겟 SOC보다 작으면, 충전이 이루어지고, 크면, 방전이 이루어지도록 천이조건을 정의하였다. 이때, 타겟 SOC는 DP(Dynamic programming)를 이용해서, 병렬형 하이브리드 차량 모델과 FTP-72, US-SC03, HIGHWAY와 같은 대표 주행 사이클을 적용하여 산출하였으며, DP로 얻어진 SOC 궤적은 차량이 어떤 주행 사이클을 주행할 때, 최대의 연비효과를 얻을 수 있는 최적의 SOC 궤적이라고 가정하였다.

4.1 배터리 내부저항 모델

배터리 내부 저항 모델은 배터리를 전압소스와 내부저항을 직렬로 연결한 형태로 모델링 한 것이다. 실제로 배터리 충

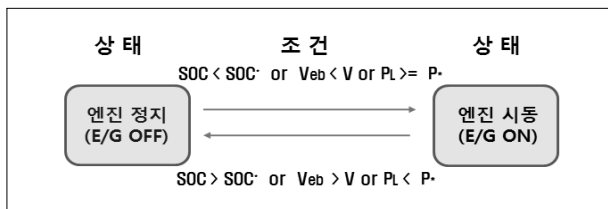


Fig. 6 State of engine through state-machine.

방전 효율은 SOC와 온도에 따라서 달라지지만, 본 제어 모델에서는 하이브리드 차량의 작동상태를 고려하여, NIMH 배터리의 특성을 바탕으로 모두 상수화 하였다. Fig. 7은 배터리 내부저항 모델을 그림으로 나타낸 것이다. 배터리 내부 저항 모델을 이용하면, 배터리의 파워, 전류, SOC를 아래의 식을 이용하여, 간단히 구할 수 있다.

$$I^2 R_i - V_{oc} I + P_{bat} = 0 \tag{9}$$

$$I = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_i \times P_b}}{2R_i} \tag{10}$$

$$SoC_f = SoC_i - \frac{\int Idt}{Q_{max}} \tag{11}$$

4.2 State-machine control model

스테이트 머신 컨트롤 모델은 크게 3가지 블록으로 구성된다. 먼저, SOC 추적 블록에서는 DP를 통해 얻어진 타겟 SOC를 현재 차량의 SOC와 비교한다. 다음으로, SOC 추적 블록

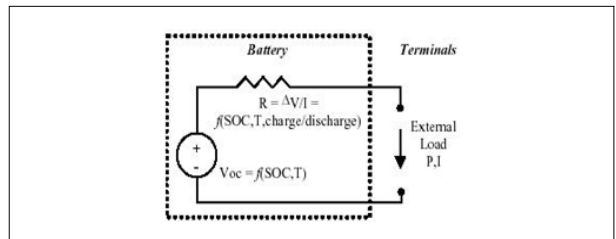


Fig. 7 Battery internal resistance model.

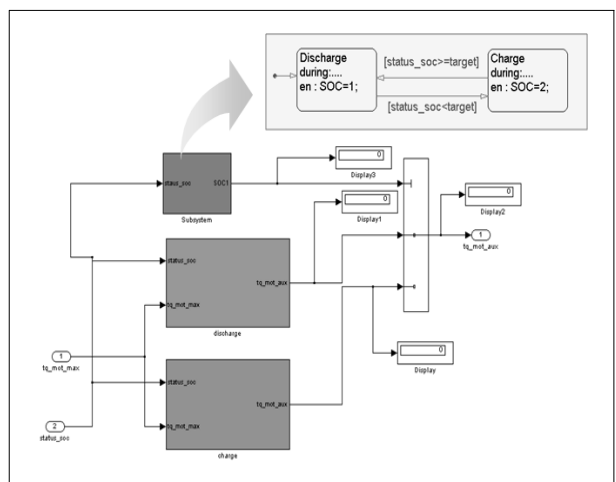


Fig. 8 State-machine control model.

을 통해 얻어지는 신호로, 모터구동을 통한 방전을 일으킬지, 발전기를 통한 충전을 일으킬지 여부를 결정한다. Fig. 8은 MATLAB SIMULINK를 이용한 배터리 제어 모델이고, Fig.

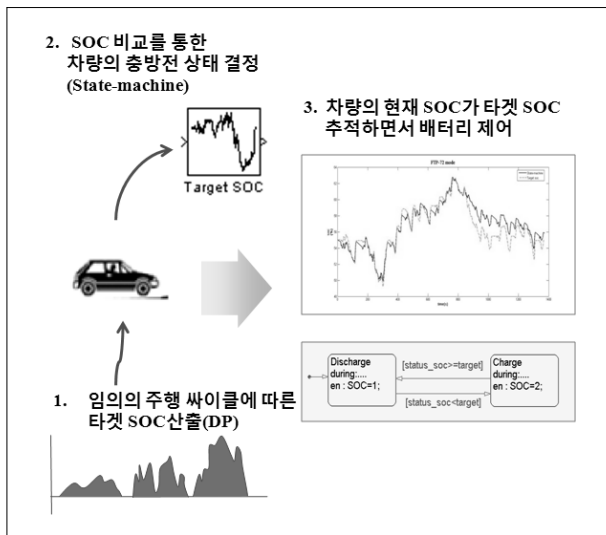


Fig. 9 SOC sustaining strategy through state machine control.

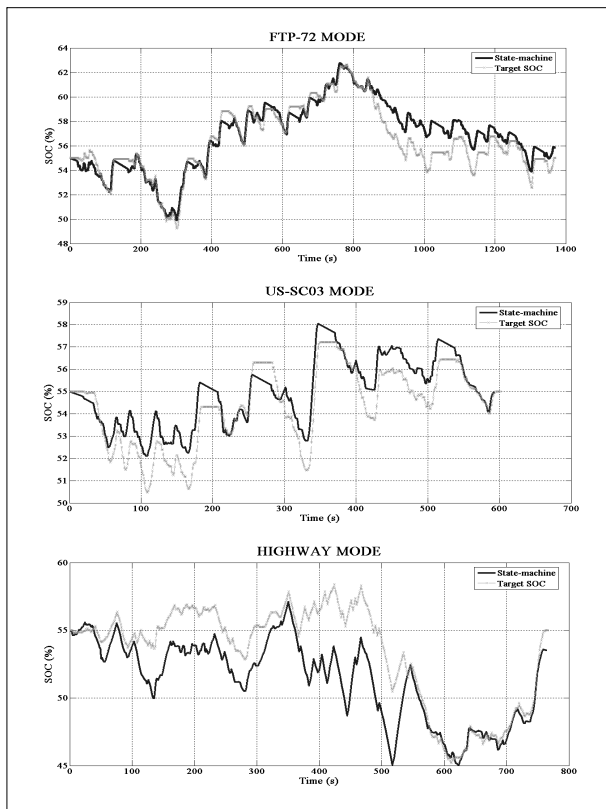


Fig. 10 The SOC in battery and target SOC after AVL CRUISE simulation.

9와 Fig. 10은 SOC 제어방법과 실제 각각의 주행 사이클에 따른 AVL CRUISE 시뮬레이션 후의 실제 차량의 SOC와 타겟 SOC의 결과를 나타낸 그래프이다.

4.3 시뮬레이션 결과 및 분석

본 연구에서는 구성된 제어기의 성능을 분석평가하기 위하여, AVL CRUISE 프로그램을 이용하였다. 차량모델은 병렬형 하이브리드 타입으로 구성하였으며, 주행 사이클은 FTP-72, US-SC03, HIGHWAY 모드를 적용하였다. 또한, 제어로직의 효과를 분석하기 위하여, SOC를 일정범위에서만 유지시키는 기본제어기를 적용한 차량과 본 제어기를 적용한 차량의 연비도 시뮬레이션으로 분석하였다.

RESULT 1 : FTP-72 mode

시뮬레이션 결과, 기본 제어기를 적용한 차량의 경우, 21.01 km/l의 연비를 보여준 반면, 스테이트 머신 제어기를 적용한 차량은 22.70km/l의 연비 결과를 얻었다. 스테이트 머신을 이용한 제어기는 DP를 통해서 얻어진 타겟 SOC를 추종하는 방식이므로, 도심모드에서 모터주행 모드가 많음을 감안하여 전체적인 SOC를 높게 유지하려는 것을 볼 수 있다. 반면, 기본제어기의 경우, 스테이트 머신을 이용한 방식보다 작지만, 전체적으로 충전이 적게 이루어짐을 관찰할 수 있었다.

RESULT 2 : US-SC03 mode

US-SC03 주행 사이클에 대해서, 시뮬레이션 결과를 비교

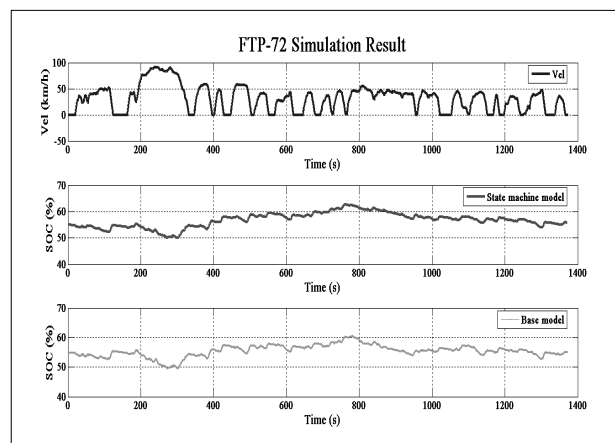


Fig. 11 Simulation Results (FTP-72).

한 결과, 기본 제어를 적용한 차량의 경우, 20.08km/l의 연비를 보여준 반면, 스테이트 머신 제어를 적용한 차량은 21.76km/l의 연비 향상을 보여주었다. Fig. 12에서 SOC 그래프를 분석하면, 스테이트 머신을 이용한 제어의 경우 SOC가 55% 수준에서 제어가 이루어지는 반면, 기본제어의 경우, 주행 후반부로 갈수록 SOC의 충전비율이 높아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 스테이트 머신을 이용한 제어의 경우, DP를 통해 얻어진 타겟 SOC값이 시작점과 끝점을 항상 55%로 동일하게 맞추기 때문에, 주행 후에도 SOC를 항상 55% 부분에 맞추어서 유지하려는 특징을 가지고 있다.

RESULT 3 : HIGHWAY mode

HIGHWAY 주행 사이클의 경우, 연비를 분석해보면, 기본 제어기는 22.83km/l의 연비를 보여준 반면, 스테이트 머신

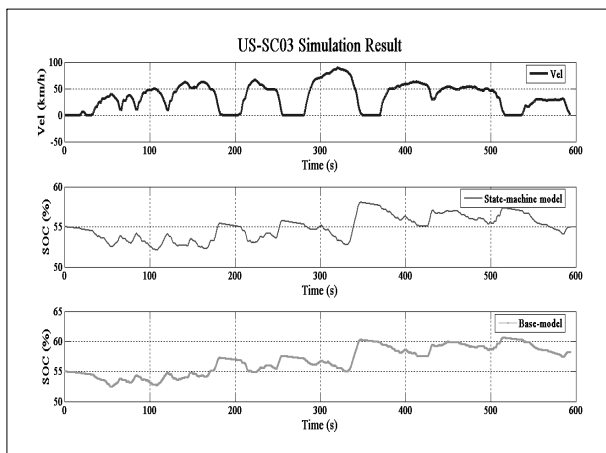


Fig. 12 Simulation Results (US-SC03).

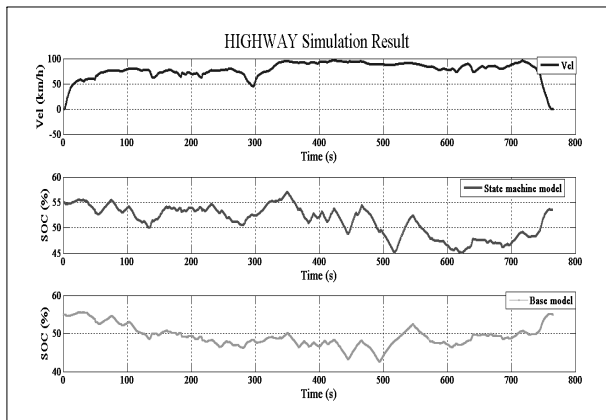


Fig. 13 Simulation Results (HIGHWAY).

을 이용한 타겟 SOC를 추적하는 제어기는 20.50km/l의 오히려 낮은 연비를 보여주었다. 시뮬레이션 결과분석을 통해서, 스테이트 머신 제어기에서 방전상태와 충전상태를 언제 결정하는지도 중요한 요인이지만, 제어기 내에서 충방전의 기준점이 되는 SOC값이 중요하다는 사실을 알 수 있었다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이, 스테이트 머신 제어기의 경우, 전체적으로 SOC를 높게 유지하다가 방전을 하는 반면, 기본제어의 경우 전체적으로 균형 있게 모터 방전이 이루어지고 있음을 관찰할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 HEV에 사용되는 제어 중 결정적 룰 기반 제어에 대한 연구를 수행하였다. 결정적 룰 기반 제어의 경우, 간단하고 적용이 용이한 장점이 있지만, 차량의 현재 작동상태와 미래의 주행상황을 고려하지 않고, 현재의 배터리 충방전량의 한계영역 내에서의 운전만 고려한, 엔진의 OOL(Optimum Operation Line) 라인에서의 운전 작동점에 대한 운전전략으로, 엄밀히 말해서, 하이브리드 차량의 파워트레인 전체를 고려한 최적의 제어전략이라고 하기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 전역 최적화 방법인 DP를 통해서 얻어진 타겟 SOC를 룰 기반 제어 중 하나인 스테이트 머신 제어를 통해서, 목표값을 추종하는 방식의 제어기를 구성하여 결과를 분석하였다. 시뮬레이션 결과, US-SC03과 같은 국도 주행 사이클의 경우, 스테이트 머신을 이용한 제어기는 기본제어기에 비해서, SOC의 끝점을 55%로 맞추는 동시에, 균형 있는 모터 방전을 통해서, 연비를 향상시키는 것을 관찰할 수 있었다. 반면, HIGHWAY와 같이 많은 요구 파워가 요구되는 주행 사이클에서는, SOC의 범위만 조정하는 기본제어기가 모터를 많이 사용하여 연비를 향상시키는 것을 관찰할 수 있었다.

이는 타겟 SOC와 현재 차량의 SOC의 상태를 비교하여 단순히 충방전 상태를 정의하는 것에 부가하여, 다양한 주행상황에 따라서 충방전의 양을 조절할 수 있는 SOC의 기준점이 조정되어야만 연비향상의 효과를 얻을 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 이를 개선하기 위해서는, 다양한 주행상황에 따라서, 충전과 방전이 나눠지는 SOC의 기준점이 조정되어야 한다는 것이다. 차후 연구에서는 충방전의 기준이 되는 SOC

의 기준점을 다양한 주행 상황에 고려하여, 연비개선이 이루어지는 방향으로 제어를 개선하는 것으로 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 BK21 사업과 신재생에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] "Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles", Mehrdad sani...[et al], 2005.
- [2] Valerie H. Johnson, 2000, "HEV control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions".
- [3] S. Burch, M. Cuddy, and T. Markel, ADVISOR 2.1 Documentation. Nat. Renewable Lab., 1999.
- [4] Arun Rajagopalan, and Gregory Washington, 2002, "Intelligent Control of Hybrid Electric Vehicles Using GPS Information", SAE Technical paper series.
- [5] Chan-Chiao Lin, Huei Peng and Jessy W. Grizzle, 2003, "Control System Development for an Advanced-Technology Medium-Duty Hybrid Electric Truck", SAE Technical paper series.
- [6] Gerald D. Conover, 2006, "ITS Technology in Automotive - Who's on First?", SAE Technical paper series.

변 상 민



2006년 해군사관학교 기계공학과 공학사

현재 서울대학교 기계·항공공학부 석사 과정
(E-mail : bluemetal7@snu.ac.kr)

김 범 수



2003년 서울대학교 기계공학과 공학사
2006년 서울대학교 석박통합과정 수료

현재 서울대학교 기계공학과 박사과정 연구원
(E-mail : zepplin9@snu.ac.kr)

차 석 원



1994년 서울대학교 조선공학과 공학사
1999년 스탠포드 대학교 기계공학과 공학석사
2004년 스탠포드 대학교 기계공학과 공학박사

현재 서울대학교 기계·항공공학부 조교수
(E-mail : swcha@snu.ac.kr)