

<논문> SAE NO. 2000-03-0118

하이브리드 전기차량 동력부의 모델링 및 성능평가 프로그램 제작

Modeling of Hybrid Electric Vehicle Drivetrain and Development of Simulation Program

김도형*, 박영진**
Doh-Hyoung Kim, Youngjin Park

ABSTRACT

This paper describes a hybrid dynamic system (HDS) modeling method and result for the drivetrain of a parallel hybrid electric vehicle (PHEV) which consists of a gasoline engine, an electric machine, and a continuous variable transmission (CVT) and proposes a drivetrain control system. The control system has an engine controller, a motor controller, a CVT controller and a supervisory controller for the coordination of all system. The controllers keep the speed of engine wheel and the output torque within the optimal operation range based on the experimental data.

We also developed a MATLAB / SIMULINK program for the performance simulation of PHEV drivetrain model and controllers and compared the simulation result with the experiment result in the recent literatures.

주요기술용어 : Parallel hybrid electric vehicle (병렬 하이브리드 전기 자동차), Drivetrain modeling (구동부 모델링), Simulation (모의실험)

Nomenclature

J : inertia, $kg \cdot m^2$
 T : torque, Nm
 n : gear ratio
 ω : angular speed, rad/sec

Subscripts

c : Clutch
e : Engine
g : Gear
m : Motor
w : Wheel

1. 서론

연료절감과 배기가스 배출감소를 위해 가솔린 엔진과 전기 모터, 두 종류의 동력원을 가지는 차량인 하이브리드 전기 자동차 (Hybrid Electric Vehicle)의 연구 및 개발이 현재 활발히 이루어지고 있다.^{1,3)} 하이브리드 전기 자동차는 주행상황에 대응하여 엔진의 연비가 가장 높게 운전되도록 제어되고 감속시에 운동에너지를 전기에너지로 회수함으로써 기존 가솔린 엔진에 비해 연비 향상을 이룰 수 있으며 배기가스 배출도 줄일 수 있다. 하이브리드 전기 자동차 개발의 핵심기술은 동력 시스템 개발과 이의 제어 알고리즘이다. 그러나 제어하려는 구동시스템이 비선형적 거동과 다양한 형태의 제약조건을 지니므로

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

로 구동 시스템의 설계와 제어 알고리즘 개발의 전 단계로 시스템의 동력학적 모델링과 시스템의 설계 사양들의 변화에 따른 성능 변화를 예측할 수 있는 모의실험 프로그램(Simulation Program)의 개발이 하이브리드 전기자동차의 설계에 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 무단변속기(continuously variable transmission, CVT)를 장착한 병렬형 하이브리드 전기차량(parallel hybrid electric vehicle, PHEV) 시스템의 정확한 동력 성능을 예측하기 위해 부품들의 비선형성을 고려한 하이브리드 동적시스템(hybrid dynamic system) 모델링을 실시하였으며 제어 구조를 결정하고 모델링 결과와 제어기 설계 결과를 통합하여 PC 상에서 실행 가능한 동력성능 예측 프로그램을 MATLAB/Simulink 를 이용, 제작하였다.

2. 동력부 모델링

2.1 전체 시스템 구조

본 연구에서 모의 실험의 대상으로 삼은 병렬 하이브리드 전기자동차는 Fig. 1 에서 나타난 것과 같이 엔진, 모터, 클러치, 무단 변속기 등으로 이루어진 병렬형 구조의 하이브리드 전기자동차 구동 시스템이다. 이 구동시스템은 박형으

로 제작된 소용량 모터를 엔진 축에 직결하여 모터 내부에 베어링이 필요 없고 구조가 단순하며 경량이라는 장점이 있다. 또한 클러치가 엔진과 모터 이후에 있기 때문에 정차나 주행 시에 관계없이 축전지의 에너지를 조절할 수 있으나 모터의 출력이 작아 모터만의 단독주행이 불가능하고 감속 시 엔진 브레이크로 인해 회생제동 에너지의 일부가 소실되므로 연비향상에 불리하다.

2.2 전체 구동부 모델링

전체 구동부는 Fig. 2 에 나와있는 바와 같이 엔진, 모터, 클러치, 무단변속기, 종감속 기어, 차륜, 차량 모델의 조합으로 모델링 할 수 있으며 클러치가 연결되어 있을 경우에는 차량의 주행속도 v 와 차륜의 회전속도 ω_{wheel} 을 상태변수로 가지는 시스템이고 클러치가 연결되어있지 않을 경우에는 여기에 독립적인 엔진축의 회전속도 ω_{engine} 을 추가적인 상태변수로 가지는 시스템이 된다. 전체 구동부의 거동은 클러치의 연결 상태에 따라 분리(disengaged), 미끄러짐(slip), 연결(engaged or locked) 상태로 나뉘어진다. 각각의 클러치 상태에 따른 거동식은 아래의 식과 같은 미분 방정식으로 나타나며 클러치 상태

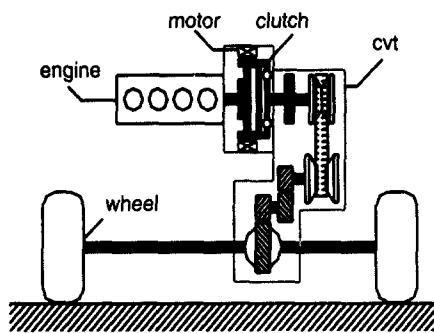


Fig. 1 Parallel Hybrid Electric Vehicle Drivetrain

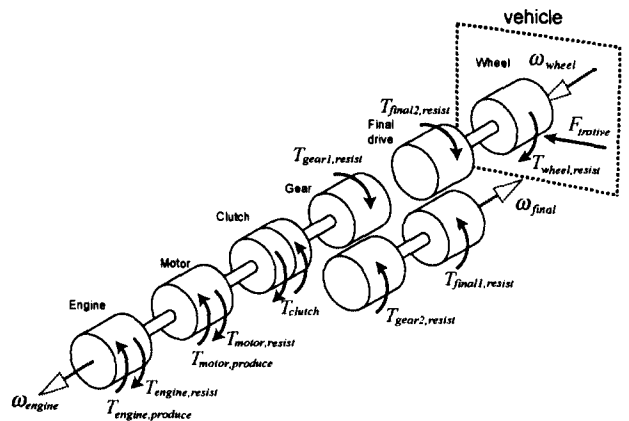


Fig. 2 Drivetrain Modeling

가 변할 때 마다 거동식이 변하는 하이브리드 동적 시스템 (hybrid dynamic system) 이 된다.

$$J_{w,e} \dot{\omega}_w = T_{w,e} \quad (\text{engaged}) \quad (1)$$

$$\omega_w = \omega_e$$

$$J_{w,d} \dot{\omega}_w = T_{w,d} \quad (\text{disengaged}) \quad (2)$$

$$J_{e,d} \dot{\omega}_e = T_{e,d}$$

$$J_{w,s} \dot{\omega}_w = T_{w,s} \quad (\text{slip}) \quad (3)$$

$$J_{e,s} \dot{\omega}_e = T_{e,s}$$

윗 식에서 첫번째 첨자 e, w 는 엔진과 휠을 나타내며 두 번째 첨자 e, d, s 는 각각 연결 (engaged), 분리(disengaged), 미끄러짐(slip), 상태를 나타낸다. 각 거동모드에서의 관성 및 토크는 아래와 같다.

$$J_{w,e} = n_g^2 n_f^2 (J_e + J_m + J_{g1}) + n_f^2 (J_{g2} + J_{f1}) + (J_{f2} + J_w)$$

$$T_{w,e} = n_g n_f \left\{ (T_{e,p} - T_{e,r}) + (T_{m,p} - T_{m,r}) - T_{g1,r} \right\} - n_f (T_{g2,r} - T_{f1,r}) - (T_{f2,r} + T_{w,r} + r_w F_t)$$

$$J_{w,d} = n_g^2 n_f^2 J_{g1} + n_f^2 (J_{g2} + J_{f1}) + (J_{f2} + J_w)$$

$$T_{w,d} = n_g n_f (-T_{g1,r}) - n_f (T_{g2,r} + T_{f1,r}) - (T_{f2,r} + T_{w,r} + r_w F_t)$$

$$J_{e,d} = J_e + J_m + J_{g1}$$

$$T_{e,d} = (T_{e,p} - T_{e,r}) + (T_{m,p} + T_{m,r})$$

$$J_{w,s} = J_{w,d}$$

$$T_{w,s} = T_{w,d} + n_g n_f T_{clutch}$$

$$J_{e,s} = J_{e,d}$$

$$T_{e,s} = T_{e,d} - T_{clutch}$$

2.3 세부 구성품 모델링

구동부 시스템을 구성하는 엔진, 모터, 기어, 차량 동력학 등의 세부 구성품 모델링은 기존의 연구결과를^{4,6)} 참조하였다. 각 부품들에 대해서 실험결과에 의존하는 비선형적인 토크 발생 특성 및 마찰 저항 특성을 가정하였으며 동적거동을 가지는 시스템의 경우, 특징적인 시정수를 가지는 1차 시스템으로 가정하였다. 엔진의 경우 스로틀 개도각과 회전수에 따라 출력 토크 및 연료 소모량이 결정되며 모터의 경우 회전수에 따른 최대 토크 포화를 가정하였다.

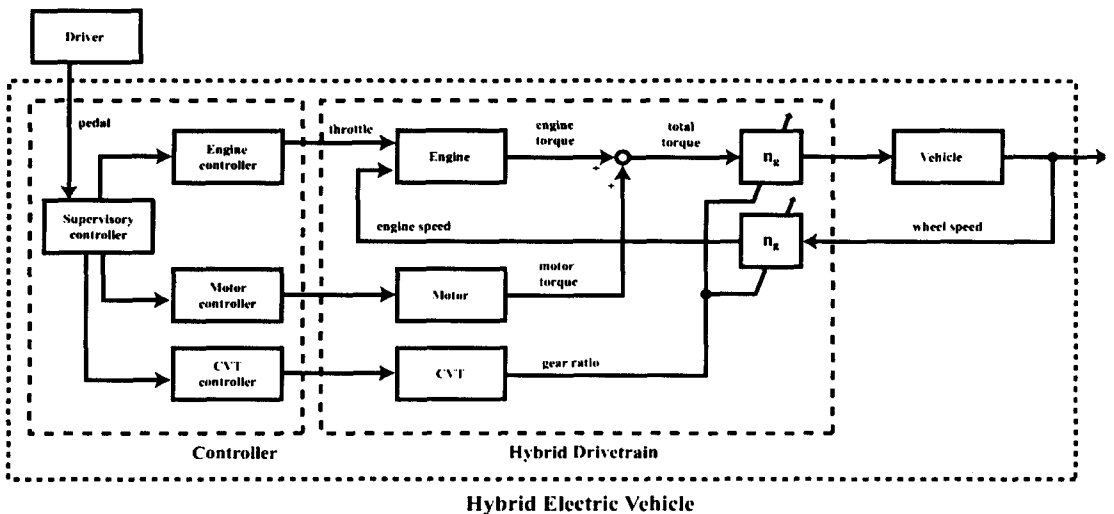


Fig. 3 Controller structure

3. 제어구조

3.1 제어 목표 및 제어기 구조

본 연구에서는 주어진 시스템을 제어하기 위해 Fig. 3과 같은 제어 구조를 제안하였다. 하이브리드 전기자동차 구동부의 기본적인 제어 목표는 기존 자동차의 동력 성능을 유지하면서 주행 시 연료소모를 최소화하는 것이다. 이 제어기는 관리 제어기(Supervisory controller)와 하위의 엔진 제어기, 모터 토크 제어기, 무단변속기 제어기로 이루어져 있다.

관리제어기는 주행자의 페달 입력과 축전량 등 차량의 각종 상태 입력으로부터 엔진의 출력 파워와 모터의 출력 파워를 계산하여 이를 엔진 제어기와 모터 제어기로 출력한다. 엔진 제어기는 주어진 엔진 출력 파워로부터 적절한 스로틀 밸브 개도각을 찾아내어 엔진 토크를 조절한다. 모터 제어기는 모터가 주어진 토크명령을 추종하도록 하며 무단변속기 제어기는 차량 속도 및 스로틀 밸브 입력 등으로부터 무단변속기의 변속비를 계산하고 이를 추종하도록 무단변속기를 제어한다.

제안된 제어기의 가장 핵심적인 내용은 무단변속기의 변속비 제어와 모터 토크 제어이다.

무단변속기의 변속비 제어는 엔진의 운전 상태를 출력 파워에 따른 최적속도 및 토크를 내도록 하여 연비를 향상시키기 위함이며 모터의 토크 제어는 엔진 운전점 제어를 통한 연비 향상, 차량 속도 감속시 에너지 재생을 통한 연비 향상, 축전지의 충전량 제어 등의 목적을 가진다.

3.2 변속비 제어

무단변속기의 변속비 제어의 기본 목적은 엔진의 파워출력이 정해질 경우 엔진 회전수와 휠 회전수와의 변속비를 조절함으로써 엔진의 회전수와 출력토크를 최적 운전 곡선에 가깝도록 하여 동력성능과 연비를 향상시키는 것이다.

엔진과 차량의 거동을 고려하여 무단변속기 제어를 설계하는 방법에 대한 연구결과⁷⁾가 있으나 엔진 및 차량 거동은 파라미터 등이 불확실한 비선형 시변시스템이므로 성능과 안정성을 확실히 보장할 수 있는 제어기를 설계하는 것이 힘들다. 따라서 본 연구에서는 이러한 불안정성을 피하기 위해 Fig. 5와 같이 고정된 함수를 사용하는 제어 방법을 제시하였다. 이는 엔진과 무단변속기의 거동이 매우 빨라 시간상수를 무시할 정도이고 이에 비해 차량의 거동은 매우 느려 차속이 엔진 회전수나 변속비에 비해 느리

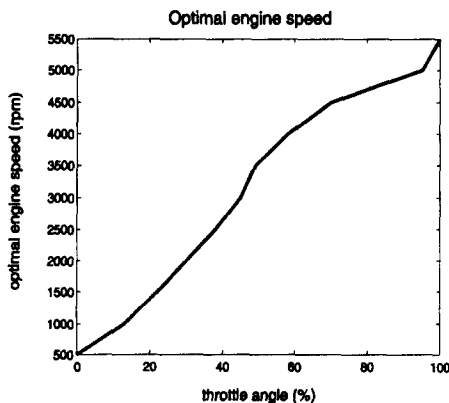


Fig. 4 Optimal engine speed vs. throttle angle

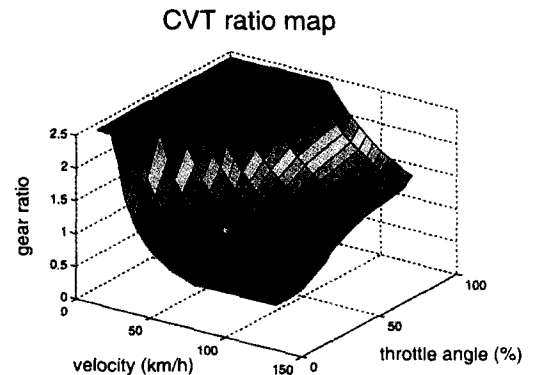


Fig. 5 CVT ratio map (gear ratio vs. throttle angle and vehicle velocity)

게 변화한다는 가정하에 정상상태에서 최적의 변속비로 운행되도록 제어하는 방법이다. 정상상태에서는 엔진의 최적 회전수가 Fig.4와 같이 스로틀 밸브의 개도각의 함수가 된다. 엔진의 최적 회전수와 현재 차량 속도를 알 경우 변속비는

$$\begin{aligned} \omega_e^* &= \omega_e^*(\theta) \\ n^* &= \frac{\omega_e^*}{\omega_w} \\ (n_{\min} \leq n \leq n_{\max}) \end{aligned} \quad (4)$$

가 되며 결과적으로 스로틀 밸브 개도각과 현재 차량의 속도의 함수가 된다. 계산결과로 나타난 변속비 관계가 Fig. 5에 나타나 있다.

3.3 모터 토크 제어

모터 토크는 다음과 같이 모드별로 제어된다.

에너지 회수(regenerative) 모드

에너지 회수 모드는 차량 속도 감속시, 즉 차량의 주행에 필요한 파워가 음(negative)이 될 경우 기존 차량에서 브레이크 발열로 소모되는 에너지를 발전을 통해 회수하는 모드이다. 이때 운전자의 페달입력에 비례하는 브레이크 토크를 계산하고 이 브레이크 토크를 넘지 않는 한 최대의 브레이크 토크를 모터에서 발생시키며 모자라는 토크는 브레이크로 발생시킨다.

엔진 운전점 및 충전량 제어 모드

엔진이 최적 운전점에서 작동되도록 하는 것은 기본적으로 무단변속비의 제어를 통해 이루어지지만 무단변속비가 최대 혹은 최소치에 도달하였을 경우 엔진의 최적 운전 제어는 불가능해진다. 이를 Fig. 6의 엔진 성능 곡선에서 살펴보면 저속에서 P_1 의 파워를 필요로 하는 경우 최적의 운전점은 O_1^* 이지만 최고변속비가 제한되어 있으므로 엔진의 회전수는 ω_{O_1} 을 넘지 못하고 O_1^* 보다 낮은 효율로 O_1 에서 작동한다.

모터 토크를 이용한 엔진 운전점 제어는 차량이 저속이고 무단변속비가 변속비 최고 제한에 걸려 엔진이 O_1 점 등에서 작동 중일 때 모터의 토크를 추가로 발생시킴으로써 엔진에서 출력되어야 할 파워를 P_1 에서 P_1' 으로 감소시키고 나머지 파워 $P_1 - P_1'$ 을 모터에서 발생시키는 방법으로 엔진의 효율을 향상시키고자 하는 방법이다. 이 제어 방법은 고속에서는 엔진의 파워를 축전지에 저장시키고 저속에서는 축전지의 전기에너지를 이용하는 방법으로 축전지의 충전량을 제어하는 데에도 동시에 사용될 수 있다. 이 두 가지 목적을 위해 Fig. 7과 같은 기어 변속비에 따른 모터 토크맵을 정의하고 이에 따라

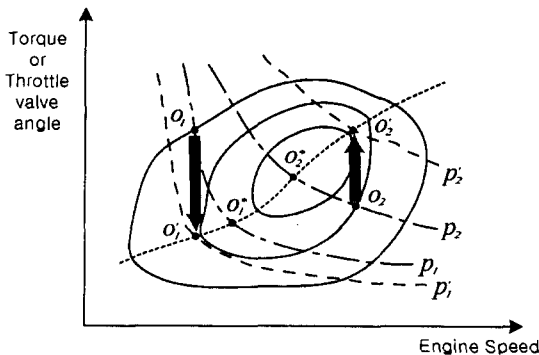


Fig. 6 Engine operation under the CVT ratio limit

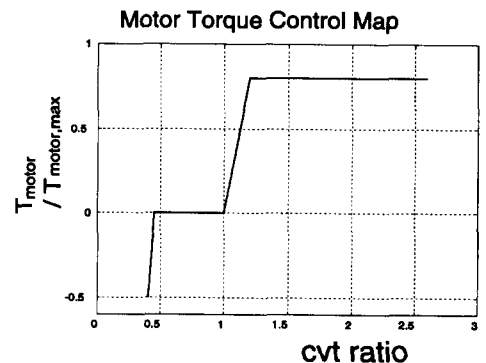


Fig. 7 Motor torque control map

모터 토크를 발생시키는 제어방법을 채택하였다. 또한 모터의 최대 토크 제한이 속도에 대한 함수로 나타나므로 토크맵도 모터의 발생 토크를 정의하지 않고 최대 토크에 대한 비로써 정의하였다. 본 모의 실험에서 사용된 고정 모터 토크맵은 저속에서 가속시에는 무단변속기의 기어비가 낮아지고 고속 정속 주행시에는 무단 변속기의 기어비가 증가하는 것을 이용한 것으로 실제 이 모터 토크맵을 구성하는 각종 파라미터는 차량과 주행 특성에 따라 최적화될 수 있다.

4. 모의 실험 결과

4.1 주행 패턴

본 연구에서 제작된 모의 실험 프로그램을 이용하여 특정 주행 패턴으로 주행하였을 경우를 모의 실험하여 보았다. 모의 실험에 사용한 주행 패턴은 Federal Urban Driving Schedule (FUDS)으로 Fig. 9와 같으며 주행 시간은 1380 초이고 주행거리는 12 km 이다.

4.2 에너지 사용 결과

주행 후 각 구성 부품의 에너지 사용 실적은

Fig. 8과 같다. 항목에서 엔진 에너지는 엔진에서 발생된 모든 에너지의 총합이고 브레이크는 브레이크 시스템에서 발열로 없어진 에너지, 마찰 저항은 엔진, 모터, 무단변속기 등의 동력 전달계에서 저항 토크로 인해 손실되는 에너지들을 합한 것이며 기타로 표시된 항목은 클러치에서 소모되는 에너지와, 엔진 idling 중의 엔진 에너지, 모터에서 발열되는 에너지 등의 항목들을 합한 값이다. 또한 마지막 항목에서 전체 에너지의 약 19%에 해당하는 에너지가 회생제동 브레이크 시스템에 의해 회수되었으며 이 중 약 40%가 축전지로 저장되었고 나머지는 모터 토크로 다시 사용되었음을 알 수 있다.

4.3 무단변속기 및 모터 토크 제어 결과

앞 절에서 제한한 무단변속기 제어맵을 사용하였을 경우의 모의 실험 결과가 Fig. 9에 나타나 있다. 또한 모터 토크 제어의 경우에도 모터 토크 제어를 추가한 하이브리드 동력부 제어방법의 효율성을 검증하기 위해 엔진과 무단변속기만을 사용한 주행과 모터의 토크 제어를 추가한 주행을 모의 실험으로 비교하였다. 모의 실험

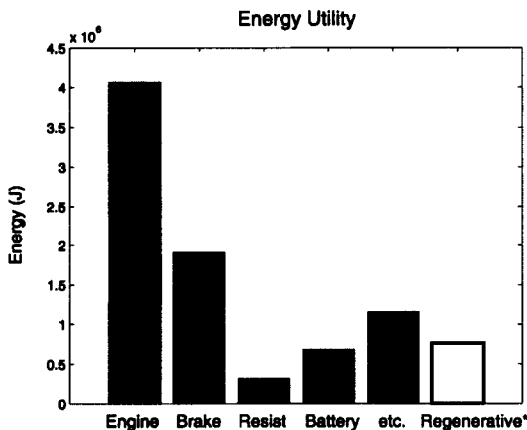


Fig. 8 Energy utility diagram

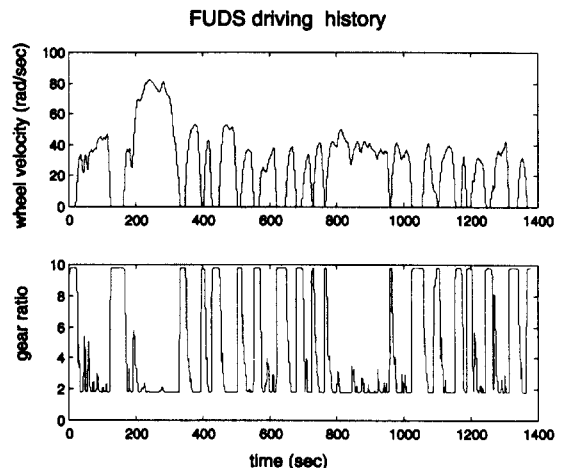


Fig. 9 Simulation result : vehicle velocity and CVT ratio

험 결과를 나타낸 Table.1 및 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 모터 토크 제어를 사용하는 경우 전체 에너지 효율이 크게 증가하였다. 이는 모터의 회생제어 에너지에 크게 기인한 것이지만 Table.1의 단위 연료 당 평균 에너지 발생량에서 나타난 것처럼 엔진의 작동 효율 자체도 증가하였으며 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 저속에서 엔진의 운전점이 모터 토크 제어가 있을 경우가 없을 때보다 더 효율이 높은 점을 운영하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 CVT를 장착한 병렬 하이브리드 전기자동차 동력부를 하이브리드 동적 시스템으로 모델링 하였으며 차량 구동부 제어 구조를 결정하고 엔진의 성능 자료를 이용하여 전체 시스템의 안정성을 보장하며 엔진이 최적 운전점을 추종하여 운행하도록 하는 무단변속기 제어 방법과 감속시 에너지를 회수하고 엔진 연비를 향상시키도록 하는 모터 토크 제어 방법을 제안함으로써 전체 하이브리드 구동시스템의 제어를

를 설계하였다. 또한 이상에서 실시한 시스템 모델링 결과와 제어기 설계 결과를 통합하여 PC상에서 실행 가능한 동력 성능 예측 프로그램을 MATLAB/Simulink를 이용하여 제작하였다.

후 기

본 연구는 차세대 자동차 기술 연구 사업의 지원과 현대자동차의 자료 협조로 이루어졌습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) S.Sasaki, et al., Toyota's newly developed electric-gasoline engine hybrid powertrain system. Proceeding of the 14th International Electric Vehicle Symposium, 1998.
- 2) Gregory A. Hubbard. Modeling and control of a hybrid-electric vehicle drivetrain. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1996.

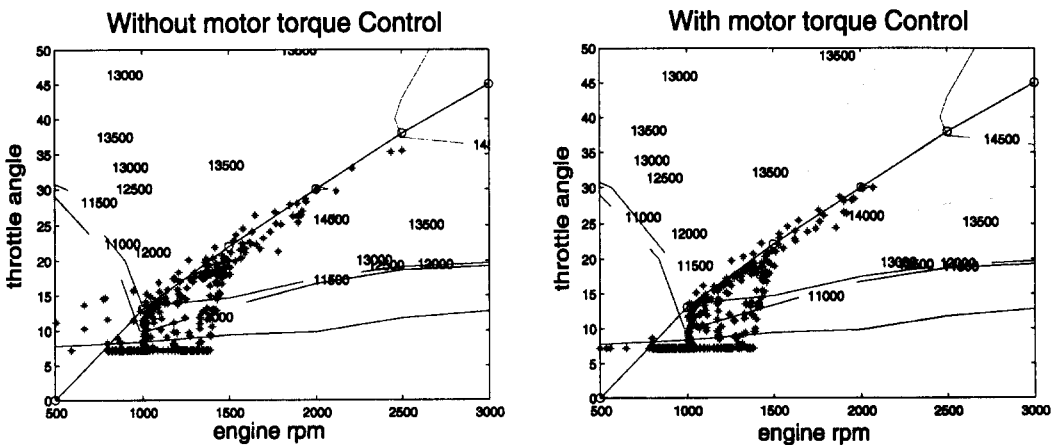


Fig. 10 Comparison of engine operation (with and without motor torque control)

- 3) Kozo Yamaguchi et al., Development of a new hybrid system - dual system. SAE Technical paper, (960231), 1996.
- 4) Thomas.D.Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics. SAE, 1992.
- 5) 김도형, 박영진, 하이브리드 전기차량 동력부의 모델링 및 성능평가 프로그램 제작, 제 7 회 차세대자동차기술논문집, 1999.
- 6) D. H. McMahon, J. K. Hendrick, and S. E. Shladover. Vehicle modeling and control for automated highway systems. American Control Conference, pages 297–303, 1990.
- 7) Lino Guzzella and Andres Michael Schmid,

Table 1 모의실험 결과 비교

	모터 토크제어 사용시	모터 토크제어 가 없을시
연료소모량 (g)	499.0349	543.0679
단위연료당 에너지 (J/g)	7.0631×10^3	5.9160×10^3

Feedback linearization of spark-ignition engines with continuously variable transmissions. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 3(1):54–60, March 1995.