

직렬형 HEV의 최적 용량산정과 효율적 운전방안

안재영, 허민호, 강신영, 김광현
전남대 전기공학과

The Optimal Sizing and Efficient Driving Scheme of Series HEV

Jae-Young Ahn, Min-Ho Heo, Sin-Young Kang, Kwang-Heon Kim
Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University

Abstract

This paper describes the optimal sizing of each component using computer simulation and presents the efficient operating scheme of series HEV using hardware simulator, the equivalent system. As the sizing method of components have been experimental and empirical, it is needed to spend much time and development cost. however, the results of computer simulation will set the optimal sizing of components in short time. There are two type of driving control, power-tracking mode and load-levelling mode, in series HEV. This paper presents that series HEV be operated in the load-levelling mode which is more efficient than power-tracking mode.

1. 서론

자동차 산업이 발달하면서 자동차의 배출가스는 환경오염 문제를 야기시키고 있으며, 그 심각성이 점차 증대됨에 따라 선진국들을 비롯한 각국은 환경규제 강화와 더불어 배기가스가 없는 전기자동차(Electric Vehicles)의 개발에 노력을 기울이고 있다[1]. 그러나 전기자동차는 실제 전기에너지를 저장하는 전지모듈의 무거운 중량과 한정된 에너지원 때문에 주행거리 제약뿐만 아니라 자동차의 구조설계에도 영향을 미치는 단점을 가지고 있어서 그 응용 범위가 매우 좁은 실정이다.

전기자동차의 한정된 에너지 저장량과 전지 중량에 대한 문제점을 극복하기 위한 방법으로서 전지와 엔진, 두 에너지원을 갖는 혼합형 전기 자동차(Hybrid Electric Vehicle : HEV)가 제시되었다[2].

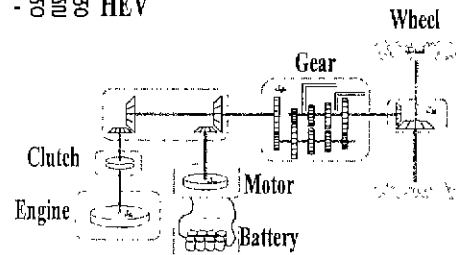
본 논문에서는 HEV의 설계 및 개발시 소요되는 막대한 비용과 장기간의 제작으로 인한 시간적 경제적 손실을 줄이기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 각 구성요소

의 물레이터를 이용하여 에너지의 효율적인 사용을 위한 운전방안을 제안하였다.

2. HEV의 종류와 특징

HEV는 엔진과 전지 두 동력원의 결합구조에 따라 직렬형과 병렬형으로 분류된다. 병렬형에서 내연기관은 부하에서 요구하는 에너지의 대부분을 담당하는 반면 보조 에너지원(Auxiliary Power Unit)으로서의 전지는 전기에너지를 발생하여 전동기를 구동하고, 전동기는 이것을 운동에너지로 변환시켜서 토크 커플러(Torque coupler)와 같은 결합장치에 의해 보조적인 역할을 담당한다 [3][4]. 직렬형에서 두 동력원은 전기적으로 직렬 결합되어 있는 구조를 가지고 있으며 엔진은 발전기를 통해 전기 에너지로 변환되고 전지로부터의 전기 에너지와 합쳐져서 전동기를 구동시킨다.

- 병렬형 HEV



- 직렬형 HEV

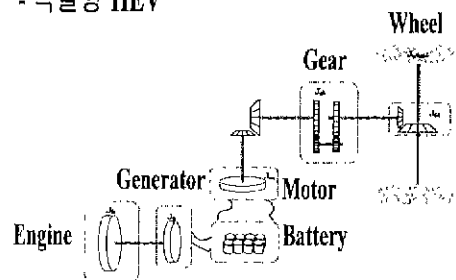


그림 1. 병렬형 HEV와 직렬형 HEV의 내부구조

병렬형과 직렬형은 각기 장단점을 가지고 있으나 본 논문에서는 직렬형이 순수 전기자동차와 비슷한 구조를 가지고 있다는 점에서 직렬형 HEV를 연구대상으로 선정하였다.

그림 1은 병렬형 HEV와 직렬형 HEV의 구조를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 병렬형의 경우 토크 커플러와 같은 장치가 필요하며 직렬형은 엔진이 발생하는 토크를 전기에너지로 변환할 수 있는 발전기를 필요로 한다.

3. HEV의 최적용량 산정

새로운 차량을 개발하고자 할 때, 차량의 전반적인 동력, 연비, 배기가스 등의 성능이 설계 목표에 도달하도록 동력시스템을 해석하고 설계하는 작업은 필수적이다. 그러나 실제 차량실험을 통한 동력시스템의 성능 해석이나 구성요소의 최적용량 판별은 많은 비용과 시간이 소요될 뿐만 아니라 prototype 차량이 존재하기 전에는 불가능하다. 따라서, PC를 이용한 시뮬레이터를 이용하여 HEV의 최적 용량을 선정할 경우 경제성을 높일 수 있고, HEV를 설계하고 개발하는데 걸리는 기간도 단축할 수 있을 것이다.

그러나, 시뮬레이터의 개발은 전기공학을 하는 입장에서 엔진, 클러치, 토크 커플러와 같은 기계적인 요소의 모델링에 필요한 기계공학적인 관련지식이 부족한 형편이다. 특히, 여러 종류의 엔진에 대한 성능실험을 통해 모델링에 필요한 자료를 얻는다는 것도 어려울뿐더러 국내 자동차사의 엔진 맵 자료도 얻는다는 것도 쉬운 일은 아니다. 이러한 이유로 부득이 인터넷을 통해 얻어진 ADVISOR 2.1 (ADvanced VehIcle SimulatOR)이라는 차량 시뮬레이터를 이용하여 최적 용량 산정에 관한 시뮬레이션을 수행하게 되었다.

이 시뮬레이터는 여러 종류의 차량 시뮬레이션이 가능하며, HEV를 설계, 제작하고자 하는 사용자가 수정, 보완이 용이하도록 Matlab Simulink를 이용하였다. 엔진, 전지, 그리고 전동기와 같은 HEV의 구성요소들의 최적 용량 산정에 필요한 입력변수로는 설계자가 목표하는 차량의 평균주행속도(km/h), 등판 능력(%), 속도별 도달시간(s), 적재량(kg) 등이 있다.

3-1. 일반적인 용량 산정 방법

직렬형 HEV는 일반적으로 작은 용량 엔진을 장착하는 특징을 가지며 엔진크기는 차량의 평균 부하를 담당할 정도로 선정한다. 일반 승합차의 경우 80 km/h의 속도를 유지하기 위해 요구되는 출력은 11kW 정도이다. 차량이 평지를 달릴 경우 차량을 움직이기 위한 충분한 전력을 공급하기 위해서 APU(Auxiliary Power Unit)는 15kW급 정도의 용량을 갖추어야 한다. 만약 차량이 전지의 전력을 소모하지 않고 시속 104 km/h 속도로 6%

의 경사로를 오를 수 있도록 설계되려면 APU 정격은 30kW 이상이 필요하다.

이를 정리하면,

$$P_{av} \approx 11 \text{ kW (@ 80 km/h, 0\%)}$$

$$P_{av} \leq P_{apu} \approx 15 \text{ kW (@ 80 km/h, 0\%)}$$

$$P_{apu} = 30 \text{ kW (@ 104 km/h, 6\%)}$$

3-2. 시뮬레이터를 이용한 HEV 용량산정 방법

HEV의 시뮬레이터는 각 구성요소별 모델링과 통합 모델링으로 구성되었으며, 전체 시스템의 제어는 별도의 제어전략 모델로 수행되었다.

3-2-1. 엔진 모델링

엔진의 모델링은 흡입연료량, 공연비, 스로틀개도, 공기압, 연료분사 시간지연, 점화시기, 주위온도, 등과 같은 변수들을 고려하여 동적으로 모델링한 것이다. 시뮬레이션에 사용된 엔진은 Geo Metro 1.0L 불꽃점화방식의 가솔린 기관이고, 최대출력은 5700 rpm에서 41kW이고 피크 토크는 3477rpm에서 81Nm이다. 엔진은 ICEV, EV, HEV의 시뮬레이션에 사용되며 9단계의 속도와 12단계의 토크로 9×12 Matrix를 작성한 다음 속도와 토크에 대응하는 연료소모량과 HC, CO, NOx 등 배기가스량을 입력한다. 목표하는 속도와 토크가 결정되면 차량 모델의 나머지로 이 값들을 돌려보낸다. 이 값들은 또한 시간별로 연료소모와 배기가스를 결정하는데 사용된다. 연료소모와 엔진의 배기 가스 배출량의 수치들은 엔진 속도와 토크의 9×12 Matrix의 형태로 저장된다.

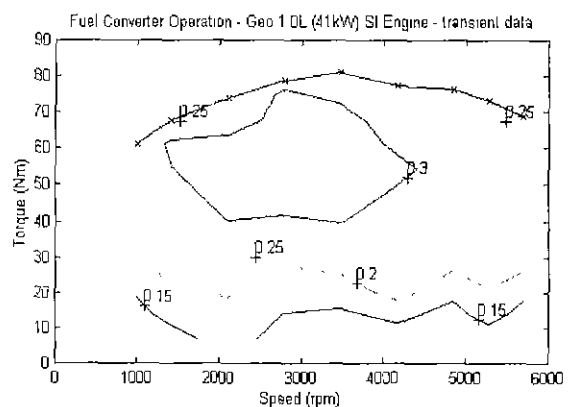


그림 2. 엔진의 회전속도(rpm)와 토크(Nm)에 따른 효율(%)

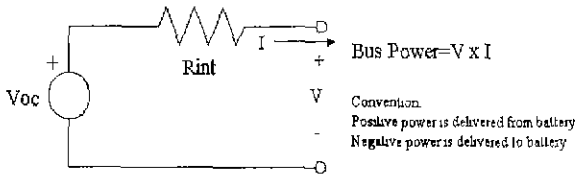
3-2-2. 발전기 모델링

발전기/제어기 Model은 발전기와 제어기에서의 손실, 발전기 관성, 발전기의 토크 속도에 따르는 토크 용량, 그리고 제어기의 전류 제한 등의 영향까지 고려하고 있다. 이것 또한, 엔진 Model에서처럼 회전자의 속도와 입력 토크의 Matrix 형태의 룩업 테이블로 저장되어 사용된다. 발전기/제어기 Block은 엔진으로부터 입력된 토크

와 속도를 전력 버스로 공급할 수 있도록 전력으로 변환시킨다.

3-2-3. 전지 모델링

전지의 충전상태(State of Charge)는 하이브리드 전기 자동차의 제어에 있어서 가장 먼저 파악해야 할 중요한 것 중의 하나이다. 실제로 전지의 충전효과는 충전상태, 충전전시의 온도, 충전전량의 변화율, 충전전 전압, 전류의 크기 등에 따라서 민감한 반응을 보인다[5]. 전지 Block은 전하의 저장소인 전지모듈로서 저장소에 남아있는 전하의 함수인 매개변수를 포함한 등가회로를 모델링하고 있다. 등가회로에서는 내부저항이 직렬로 연결된 완전개방 회로의 전압원처럼 전지모듈을 표현하고 있다.



부하에 따라 전류가 결정되면, 전력은 $P=VI$, 또는 $V=PI$ 로 구할 수 있다. 전력 방정식을 KVL에 적용하면 $P/I = Voc - (R \times I)$ 이 된다. 식의 양변에 I 를 곱하면 $P = (Voc \times I) - RI^2$ 이 된다. 결과적으로 다음 식을 얻는다.

$$RI^2 - (Voc \times I) + P = 0$$

또한, 최대 충전전류는 $I = (Voc - Vmax) / R$ 의 식에서 구할 수 있다

전지 Model에서는 부하에서 요구하는 만큼의 전력을 출력하고 전력 버스에서 필요로 하는 만큼의 전력을 충족시키기 위해 충전상태(SOC : state of charge)를 계산하여야 한다. 전력 손실은 I^2R 손실과 coulombic 효율에서 기인한 손실을 합한 것이다. 전체충전전류와 전체방전전류의 합은 시뮬레이션이 시작되면 전지에서 Ah의 변화에 해당한다. SOC는 다음 식을 사용하여 계산한다.

$$SOC = (\text{최대용량} - \text{사용한 Ah}) / \text{최대용량}$$

3-2-4. 전동기 모델링

전동기는 엔진의 연료소비량과 마찬가지로 각 회전수별로 출력토크에 따라 다른 효율을 갖는다. 전동기/제어기 Model은 전동기와 제어기 내에서 발생하는 손실, 회전자의 관성, 전동기의 토크 속도에 따르는 토크 용량 등의 영향까지 포함하고 있다.

3-2-5. 제어 전략

각 차량의 제어전략은 여러 가지가 있을 수 있다. 실제 기관에서는 배기가스, 냉각손실, 기계적 마찰손실 등에 의하여 열효율은 30%를 넘지 못하며, 발전기의 효율은 95% 정도이고, 일반적인 전동기의 효율은 90% 이상에서 운전이 가능하다. 그림 3은 직렬형 HEV의 전체 모델을 보여주고 있다.

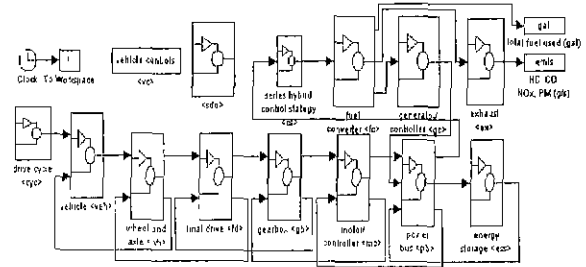


그림 3. 직렬형 HEV의 전체 시스템 Model

제어전략은 차량의 속도와 요구하는 토크가 어떤 값을 가질 때 엔진이 동작해야 하는 시점, 발전기 출력을 내보낼 시점을 엔진 자체나 전지모듈, 그리고 전동기의 조건에 따라 결정한다. 보통 이러한 전략은 연료소모와 배기가스 배출량을 최소화하고 전지의 수명을 극대화시키기 위한 방법이다.

- 엔진동작시점
 - 전지의 SOC가 너무 클 때 엔진은 꺼진다.
 - 버스에서 요구하는 전력이 충분히 높을 때 엔진은 다시 켜진다.
 - 전지의 SOC가 너무 낮을 때 다시 엔진은 동작한다.
- 전지의 SOC와 엔진과의 관계
 - 전지의 SOC 80% 일 때 : 엔진 꺼짐
 - 전지의 SOC 40% 일 때 : 엔진 켜짐

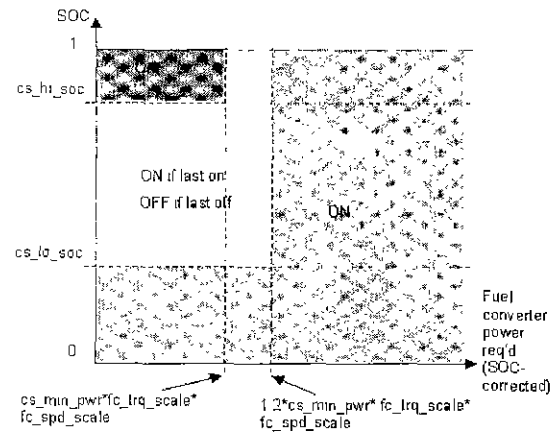


그림 4. 엔진의 동작 결정

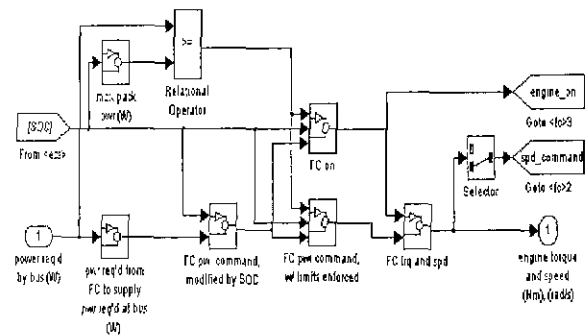
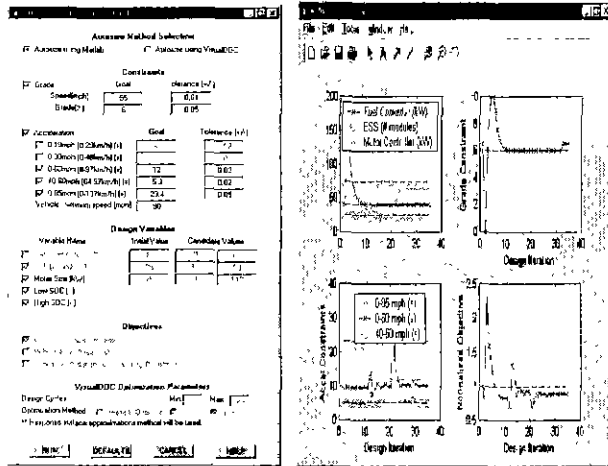


그림 5. 직렬형 HEV의 제어전략 Model

3-3. 시뮬레이션 결과

각 구성요소를 모델링한 후 통합한 시뮬레이터를 이용해 HEV의 용량 최적점을 찾아보았다. 그림 9 (a)에서 보여 주듯이 사용자 입력변수로는 경사도(%), 구간별 소요 가속시간(s), 엔진과 전지의 초기 용량값 설정, 전동기의 초기용량, 전지의 제어전략 등이 있다. 그림 9 (b)는 실행 결과를 나타내고 있으며 Matlab 내부에서 반복적으로 사용자가 입력한 값을 초기값으로 하여 35회 정도까지 여러 종류의 엔진, 전지, 발전기, 전동기 등을 바꿔가면서 최적 용량을 찾는다.



(a) 목표값 설정 (b) 시뮬레이션 결과
그림 6. 용량산정을 위한 시뮬레이션 결과 파형

```

*****
*** Autosizing Results Summary ***
*****
Grade test ... SUCCESSFUL!
Acceleration test ... SUCCESSFUL!
Fuel converter set to minimum size!!
Fuel converter ==> 40 kW
Generator/controller ==> 50 kW
Motor/controller ==> 64 kW
Energy storage system number of modules
==> 21
Control strategy - cs_lo_soc ==> 0.6
Control strategy - cs_hi_soc ==> 0.957
Total vehicle mass ==> 1282 kg.
    
```

이상과 같은 시뮬레이션 결과를 검토해보면, 경사로 시험을 수행하였으며 엔진 용량은 40 kW, 발전기/제어기는 50 kW, 전동기/제어기는 64 kW, 전지 모듈의 개수는 21개, 제어전략으로 전지의 SOC가 0.6이하일 때 엔진은 켜지고, 0.957일 때 엔진을 끄는 방법이 최적임을 보여주고 있다. 또한, 전체 중량은 1,282kg이 된다.

이러한 결과에서도 알 수 있듯이 기존의 실험적인 방법에 의한 용량 산정은 극히 제한적이며 세밀한 부분까지 알지 못하는 반면 시뮬레이터를 이용할 경우 실제 실험을 거치지 않고 단시간에 각 구성요소의 용량을 알아낼 수 있었다.

4. 직렬형 HEV의 효율적인 운전방안

4-1. 엔진의 효율

그림 7은 엔진의 속도 대 토크 및 효율을 3차원으로 표현한 것이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 속도는 2500~3500[rpm], 토크는 50~60[Nm]에서 효율이 가장 좋게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 8의 속도 대 효율곡선을 보면 확실히 그 구간에서 효율이 높게 나타남을 볼 수 있다.

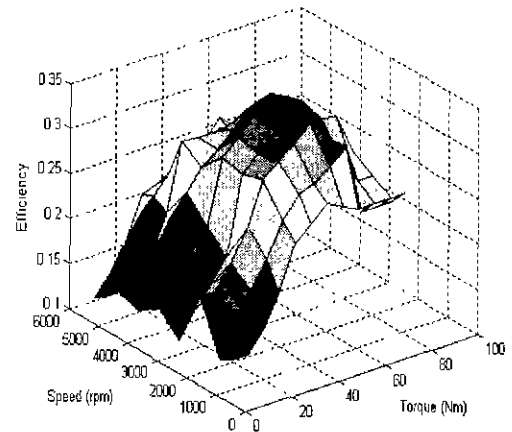


그림 7. 내연기관의 토크, 속도 대 효율

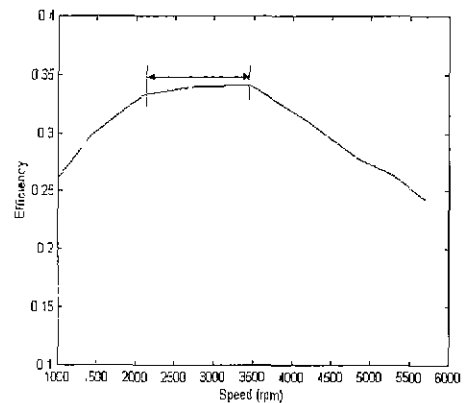


그림 8. 엔진의 속도 대 효율곡선

4-2. 엔진의 배기가스

그림 9는 내연기관의 CO, NOx, HC의 배출량을 나타내는 곡선이다. 내연기관 배기가스를 보면 효율이 가장 좋은 구간인 2500~3500rpm에서 모든 배기가스의 배출량이 비교적 적다는 것을 볼 수 있다. 즉, 엔진마다 효율이 좋고, 배기가스 배출량이 적은 구간이 존재하는데, 이와 같은 시뮬레이션 결과에서 엔진 가동시 배기가스의 배출량이 많다는 것을 감안하면 엔진/발전기로부터의 출력을 일정하게 유지할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

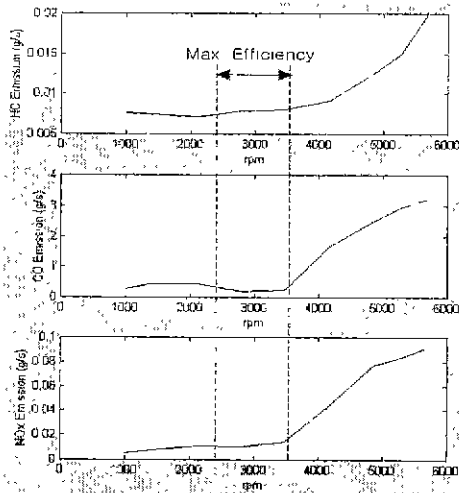


그림 9. 일반적인 엔진 속도에 대한 HC, CO, NO_x 배출량

4-3. 등가 시뮬레이터 구성

그림 10은 엔진/발전기 출력이 일정한 직렬형 HEV의 등가 시스템으로, 크게 나누어서 엔진/발전기, 전지, 전동기 3부분으로 나눌 수 있다. 엔진 대신 AC 서보 전동기를 사용하였고, 발전기는 BLDC 발전기를 사용하여 서로 결합시켰다.

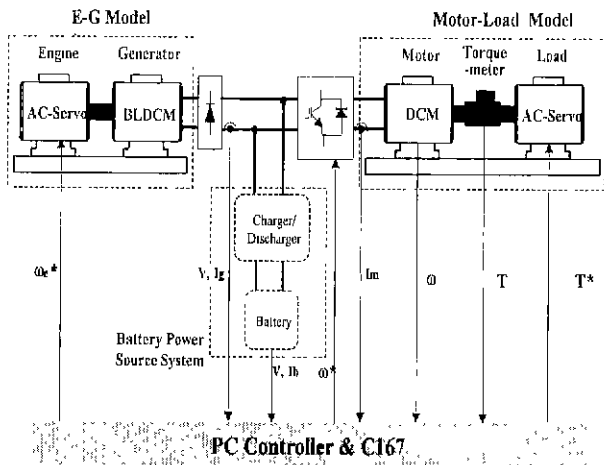


그림 10. 직렬형 HEV의 시뮬레이터 구성

표 1은 하드웨어 시뮬레이터에서 사용되는 각 구성요소들의 사양을 보여주고 있다. 엔진과 발전기의 등가 시스템으로는 AC 서보전동기와 BLDC 발전기를 사용하였으며 Test Bench 위에서 서로를 결합시켰다. 여기서 발생된 3상 교류전력을 정류기를 통해 DC로 만들고 충전기와 초퍼를 거쳐 전지와 DC전동기로 전력을 공급하게 된다. DC전동기는 토크미터와 결합시키고, 부하로는 AC 서보 Motor와 결합시켜서 부하토크를 제어하게 된다. 전동기 제어기는 C167을 사용하였고, 전지와 전체적인 운전 제어는 IBM-PC를 사용하였다.

표 1. 실험장치의 사양

BLDC Generator		DC Motor	
Output Power	200 W	Rated Power	175 W
Output Voltage	110 V	Rated Voltage	120 V
Speed	2000 rpm	Speed	1800 rpm

Battery		Dynamometer	
Type	Ni-MH	Power	250 w
Voltage	12 V	Speed	290~3000 rpm
Capacity	2400 mAh	Torque	3 Nm

4-3-1. 전지부

전지의 충방전기는 승/강압을 통해 충·방전이 일어나는 2상한 초퍼회로를 사용한다. 전지는 Ni-MH 단일전지 1.2V, 3500mAh 10개를 직렬로 연결하고, 3조를 병렬로 연결하여 12V, 10.5Ah의 용량을 가지게 되었다.

4-3-2 전동기부

전동기부의 시스템 구성도를 그림 11에 나타내었다. 속도 명령은 A/D를 통하여 디지털 값으로 변환되고 이 디지털 값은 엔코더를 통하여 피드백된 현재 전동기의 속도와 비교되어 속도 오차 E와 속도 오차의 변화량 ΔE를 만들어낸다. 두 값은 퍼지 로직으로 입력되고, 이미 작성되어 있는 룩업테이블에서 속도오차와 속도 오차의 변화량에 대응하는 속도지령 전압 명령의 변화량 ΔV가 출력된다.

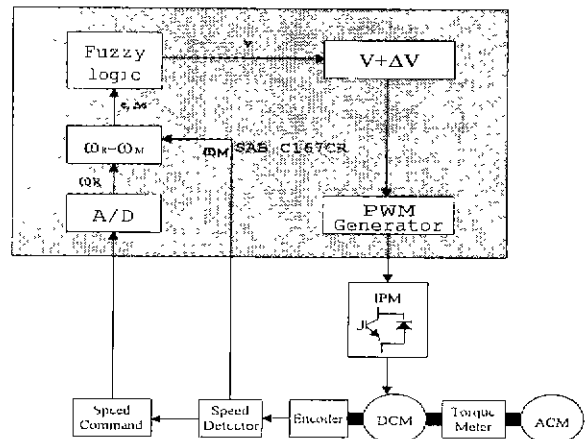
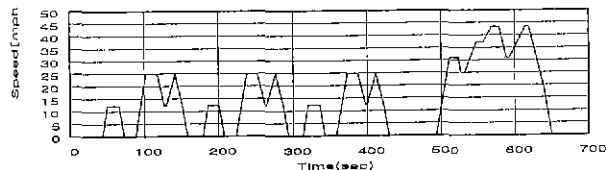


그림 11. 퍼지 로직을 이용한 직류전동기의 제어도

이것은 현재의 전압 명령과 합산되어 실제 전동기를 구동시킬 속도 지령 전압 V가 된다. 전압 명령에 해당하는 PWM파형의 듀티비가 계산되어 저장된 룩업테이블에서 이 속도지령 전압 V에 해당하는 듀티비를 선택하게 된다[6]. 선택된 듀티비는 PWM 포트를 이용하여 스위칭 신호로 출력된다. 마이크로컨트롤러에서 출력된 PWM 신호는 포토커플러를 거쳐 절연된후 IPM으로 입력되고 IPM에서는 PWM에 따른 전력을 전동기에 공급한다.

4-4 실험결과

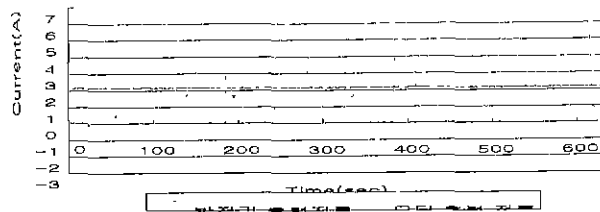
이 논문에서 직렬형 HEV의 연계운전 타당성을 실험하기 위해 그림 12(a)와 같은 10-15모드 운전 프로파일을 이용하였다. 10-15모드 운전 프로파일은 전체가 10모드와 15모드로 구성되어있고 가속, 정속, 감속 등의 운전 구간을 가지고 있다. HEV의 도심주행시 발전기, 전지, 전동기의 연계운전 특성을 평가하기 위해서 이 모드를 사용하였다. 그림 12(b)의 토크 프로파일은 다음과 같은 식에 의해 구하였다.



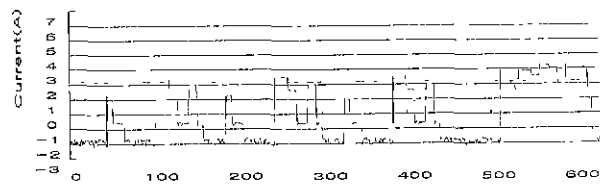
(a) 속도 프로파일



(b) 토크 프로파일



(c) 발전기와 전동기 출력 전류



(d) 전지 출력 전류

그림 12. 10-15모드 연계운전 제어 특성

그림 12(c)는 토크 프로파일에 따른 발전기, 전동기 출력 전류이고, 그림 12(d)는 전지 충·방전 출력 전류이다. 엔진/발전기 출력은 일정 출력으로 구동하고, 전동기에서 요구하는 출력이 발전기의 출력보다 크면, 전지에서 방전을 하고, 전동기에서 요구하는 출력이 발전기 출력보다 작으면 전지에 충전을 하게된다. 전지에 충·방전 전류값은 전동기 출력 전류에서 발전기 출력을 뺀 전류값만큼 충방전을 하게된다.

결론적으로 일정 엔진-발전기 출력/가변 전지 출력을 내는 APU 일정출력 모드 직렬형 HEV가 보다 효율적이라는 것을 알 수 있었다. 일정 출력 모드에서는 엔진/발

전기 출력을 일정하게 유지해서 전동기에서 요구하는 출력이 발전기 출력보다 크면 전지에서 방전을 하고 전동기에서 요구하는 출력이 발전기 출력보다 작으면 전지에 충전을 하게된다. 내연기관 시뮬레이션과 로드 프로파일을 통한 실험결과로부터 적은 배기가스 배출량과 높은 에너지 효율을 갖는 직렬형 HEV 최적인전방식으로 이용됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 실제 차량의 제작 대신 시뮬레이션을 통해 동력시스템의 성능을 해석하고 최적의 용량을 선정함으로써 기존의 실험적인 용량 산정보다 차량의 설계 및 제작, 실험 등의 과정을 최소한으로 줄여서 적은 시간보다 효율적인 HEV의 동력시스템 설계를 할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 직렬형 HEV의 각 구성요소를 동기화한 하드웨어 시뮬레이터를 통하여 HEV의 구동방식 중 부하 추종 모드보다 일정 출력 모드가 더 효율적인 직렬형 HEV의 연계운전방법임을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 EV의 기술과 기존의 내연기관 자동차 기술을 접목시키는 관련 기술의 축적에 매우 중요한 의미를 가질 수 있을 것으로 생각되며 HEV의 대중화를 위한 개발기술과, HEV의 엔진/발전기를 최적 효율범위에서 운전할 수 있는 제어기술의 개발이 예상된다.

참고 문헌

- [1] 한승호, 최병윤, 이학주, 권성철, "국내의 전기자동차 인프라 구축동향", 1999년 수요관리기술 워크샵, 419-430, 1999
- [2] Victor Wouk. "HYBRIDS: THEN AND NOW", IEEE SPECTRUM, 16-21, JULY, 1995
- [3] Kozo Yamaguchi and Yoshinori Mitaishi, "Dual System-Newly Developed Hybrid System", Symposium Proceedings 13th International Electric Power System, 603-610. 1997.
- [4] L. Pelkmans, P. Coenen, F. Vermeulm, "Design and Implementation of a Power Controller for a Hybrid Vehicle Drive" EPE 97
- [5] Stephen T. Hung, Douglas C. Hodins, and Charles R. Mosling. "Extension of battery life via charge equalization control." Transactions on Industries Electronics of IEEE, Vol. 4, No. 1, pp.96-104, February, 1993.
- [6] Katsuhiko IZUMI, Mineko TSUJI, Jun OYAMA and Eiji YAMADA, "Improvement of Fuzzv Auto-Tuning Method of DC Chopper System Using Manipulated Value" 224-229, IEEE. 1993.