

직렬형 하이브리드 전기버스에서의 발전 시스템 최적화에 관한 연구[§]

정대봉* · 민경덕[†] · 조용래^{**} · 임용수^{**}

* 서울대학교 기계항공공학부, ** ㈜대우버스

Study on Optimization of Generation System in Series HEV Bus

Daebong Jung^{*}, Kyoungdoug Min[†], Yongrae Jo^{**} and Yongsoo Lim^{**}

^{*} School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

^{**} Daewoo Bus Corporation

(Received December 13, 2010 ; Revised May 23, 2011; Accepted June 1, 2011)

Key Words : Series HEV Bus(직렬형 하이브리드 전기 버스), Engine(엔진), Generator(발전기), Fuel Economy(연비), Optimization(최적화)

초록: 차량의 연비를 향상시키고 배기가스를 저감하기 위하여 하이브리드 자동차에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 이런 연구들은 병렬형이나 동력분기식 하이브리드 자동차에 집중되어 있다. 상대적으로 직렬형 하이브리드 자동차에 대한 연구는 부족한 실정이다. 직렬형 하이브리드 자동차의 경우 엔진이 차축과 분리되어 있으므로 엔진을 최적의 효율 지점에서 작동 시킬 수 있는 장점이 있다. 이런 장점을 최대한으로 이용하기 위하여 발전 시스템을 최적화 하는 연구가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 엔진을 Optimal Operating Line 상에서 작동시키면서 발전기 또한 최적 효율 지점에서 사용할 수 있는 최적화 방법을 제안하였다. 또한 기존의 발전시스템을 갖는 직렬형 하이브리드 버스와 최적화 된 발전 시스템을 갖는 직렬형 하이브리드 버스의 연비를 시뮬레이션을 이용하여 비교, 연비 향상도를 평가하였다.

Abstract: In order to improve fuel economy and emissions, many studies of HEV have been conducted. However, most of these studies concentrate on parallel or power-split HEVs. Series-type HEVs have some advantages over parallel and power-split HEVs. One is that the engine is operated at high efficiency since the engine and the driveshaft are decoupled. Nevertheless, the optimization of the powertrain system of series HEV has not been specifically addressed. We conduct an optimization of the generation system of a series HEV based on the series HEV bus. The main objectives are to simulate the system and to compare the fuel economies of conventional and optimized generation systems.

- 기호설명 -

- T_r : 무차원화 토크
- T_{max} : 최대 토크
- ω_r : 무차원화 속도
- ω_{max} : 최대 속도

1. 서 론

최근 화석 연료 고갈 문제와 배기 가스에 의한 환경 오염 문제가 대두됨에 따라 이에 대응하기 위한

대안으로 하이브리드 전기 자동차(HEV)가 주목 받고 있다. HEV는 엔진과 모터를 동시에 이용하는 자동차로써 연비 향상과 배기 가스 저감을 동시에 달성할 수 있다. 특히 일정 구간을 반복 운행하는 버스의 경우 일반 승용차에 비하여 일정한 주행 패턴을 보이므로 하이브리드화를 통하여 더 높은 연비 향상과 배기 가스 저감을 이룰 수 있다. HEV 중에서도 엔진을 전기를 발전시키는 용도로만 사용하고 차량 구동은 모터만을 이용하는 직렬형 HEV는 엔진을 최적의 효율을 보이는 작동 영역에서 동작 시킬 수 있다는 장점이 있다. 이런 장점에도 불구하고 현재 직렬형 HEV는 병렬형 또는 동력 분기형 HEV에 비하여 연구가 미비한 실정이다. 직렬형 HEV의 경우 엔진을 이용하여 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환한 후, 다시 이를 기계적 에너지로 변환하여

[§] 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010.

11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

[†] Corresponding Author, kadmin@snu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

차량을 구동시키는 복잡한 에너지 변환 과정을 거친다. 에너지 변환 과정이 많을수록 변환 효율에 의하여 시스템 전체 효율이 감소하게 되므로 이는 다른 형식의 HEV와 비교하였을 때, 직렬형 HEV의 단점이라 할 수 있다. 하지만 엔진을 최적의 효율을 보이는 작동 영역에서 사용할 수 있다는 점을 이용하여 이런 단점을 충분히 극복 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 직렬형 하이브리드 전기 버스의 엔진/발전기 시스템의 작동 효율을 최적화 할 수 있는 방법을 제안하였다. 특히 버스같이 큰 에너지를 요구하는 대형 차량의 경우 발전 시스템 또한 대용량이 되므로 발전 시스템의 최적화가 연비 향상에 큰 도움이 될 수 있다. 본 연구에서는 발전 시스템의 최적화를 통한 연비 향상 효과를 비교하기 위하여 차량의 이론적 최대 연비를 계산 할 수 있는 시뮬레이션 방법인 Dynamic Programming을 이용하였다.

2. 발전 시스템 최적화

직렬형 HEV의 발전 시스템은 엔진과 발전기로 구성되어 있다. 기존 연구에서 다루어진 직렬형 HEV의 발전 시스템은 대부분 엔진과 발전기가 직결된 구조를 보이고 있다. 또한 발전 시스템의 작동 영역을 설정 할 때, 발전기의 효율은 고려하지 않고 엔진의 효율만을 고려하는 경우가 대부분이었다. 따라서 본 연구에서는 엔진과 발전기의 작동 영역에 따른 효율을 동시에 고려함으로써 기존 발전 시스템을 최적화하여 연비를 향상시키고자 한다.

2.1 직렬형 하이브리드 전기 버스 제원

본 연구에서 연구 대상으로 삼고있는 직렬형 하이브리드 전기 버스의 제원을 Table 1에 나타내었다. 엔진의 경우 하이브리드화가 진행됨에 따라 기존 일반 버스의 엔진 용량인 11,000cc에 비하여 Down Sizing된 8,000cc급 엔진을 사용하였다. 직렬형 하이브리드 전기 버스에 적용된 구동 모터의 용량은 가속 성능, 등판 성능, 최대 속도 등을 고려하여 설정되었다. 또한 배터리 및 기타 동력원의 용량은 본 연구에서 기준으로 삼고 있는 주행 사이클과 차량 동력원의 구성에 대하여 최적화가 이루어진 것임을 밝혀둔다.^(1,2)

2.2 일반적인 직렬형 하이브리드 전기 버스 동력 시스템

기존의 직렬형 하이브리드 전기 버스의 동력 시스템은 Fig. 1과 같이 엔진, 발전기(이상 발전시스

Table 1 Specifications of series hybrid electric bus

항목	수치
차량 중량(정원 탑승)	15,500kg
엔진	8,000cc CNG
발전기	180 kW
모터	120 kW × 2
배터리	40 kWh

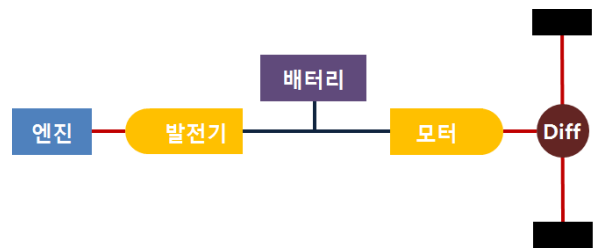


Fig. 1 Powertrain system of conventional series hybrid electric bus

템), 배터리, 모터로 이루어져 있다. 배터리 SOC 및 차량의 요구 동력에 따라 발전 시스템에서 공급하는 전기 에너지는 바로 모터에 인가되어 차량을 구동하는데 사용되거나 배터리에 인가되어 배터리를 충전시키는데 이용된다. 일반적인 발전 시스템은 보통 엔진과 발전기가 직결되어 있거나 공간상의 배치를 위하여 기어비가 1인 Step-up 기어를 이용하여 연결되어 있다. 기존 연구들의 경우 용량 매칭 단계부터 주행 전략 개발 단계까지의 전 과정에서 발전 시스템은 엔진을 중심으로 이루어져왔다. 즉, 발전기의 용량은 엔진에 맞춰 결정되었으며, 발전 시스템의 작동 영역 또한 엔진의 효율만을 고려하여 결정되었다. 물론 차량 제원에 최적화된 엔진 용량을 선정하고 엔진을 발전 요구 동력에 따라 OOL(Optimal Operating Line)상에서 작동시키는 것은 직렬형 HEV에서 매우 중요하다.⁽¹⁾ 하지만 앞서도 언급했듯이 직렬형 HEV의 경우 에너지 변환 과정이 많으므로 이때에 손실되는 에너지가 다른 형식의 HEV에 비하여 많으므로 직렬형 HEV의 발전 시스템을 구성하는 엔진과 발전기가 모두 최적의 효율을 보이는 지점에서 작동할 수 있도록 해주어야 에너지 변환 과정에서 발생하는 에너지 손실을 최소화 할 수 있다

2.3 발전 시스템 최적화 방안

먼저 발전 시스템을 이루고 있는 엔진과 모터의 효율맵을 살펴보자. Fig. 2와 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 엔진에서 동일한 출력에 대하여 가장 적은 연료를 소모하는 지점을 연결한 OOL은 가장 효율이 좋은 지점이며, 그 중에서도 상대 속도가 약 0.55, 상대 토크가 1인 구간이 가장 효율이 좋은 구간이다. 발전기에서 가장 좋은 효율을 보이는 구간은 상대 속도가 약 0.8, 상대 토크가 약 0.5~1인 구간이다. 상대 속도와 상대 토크의 정의는 아래 식과 같으며, 최대 토크와 최대 속도는 엔진과 모터를 고려하여 선정하였다.

$$T_r = \frac{T}{T_{max}}$$

$$\omega_r = \frac{\omega}{\omega_{max}}$$

기존의 직렬형 HEV 구조에서는 엔진과 모터가 직결되거나 기어비가 1인 Step-up 기어로 연결되므로 작동점이 두 기기에서 동시에 최적 효율 구간에서 작동하는 것이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 두 기기 사이에 일정 기어비를 고려함으로써 엔진의 최적 효율 구간과 발전기의 최적 효율 구간을 겹치게 하는 방법을 제안한다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 엔진과 발전기의 최적 효율 구간을 가장 많이 겹치게 하는 기어비는 1.5이다. 앞에서 언급한 바와 같이 발전기의 최대 효율 지점은 상대 속도가 0.8, 상대 토크가 0.5~1인 구간이며, 엔진의 경우 가장 효율이 좋은 지점은 상대속도가 0.55, 상대 토크가 1인 지점이다. 따라서 엔진과 발전기의 가장 효율은 좋은 지점의 상대 토크와 상대 속도를 고려하게 되면 1.5가 가장 최적의 기어비임을 알 수 있다. 기어비가 1.5보다 크거나 작게 되면 발전기의 작동영역이 가장 효율이 좋은 지점을 벗어나게 된다. 따라서 기어비를 1.5로 정함으로써 엔진과 발전기가 각각 가장 효율이 높은 지점에서 동시에 작동하게 되므로 기존 발전 시스템에 비하여 에너지 변환 효율이 높아지게 되고, 이로 인하여 연비가 향상될 것이다. 이와 같이 엔진과 발전기가 모두 최적 효율 구간에서 작동할 수 있도록 기어비를 고려하여 구성한 발전 시스템을 본 연구에서는 최적 발전 시스템이라 하겠으며 기존의 직결 또는 Step up 기어로 연결된 시스템을 일반 발전 시스템이라 하겠다.

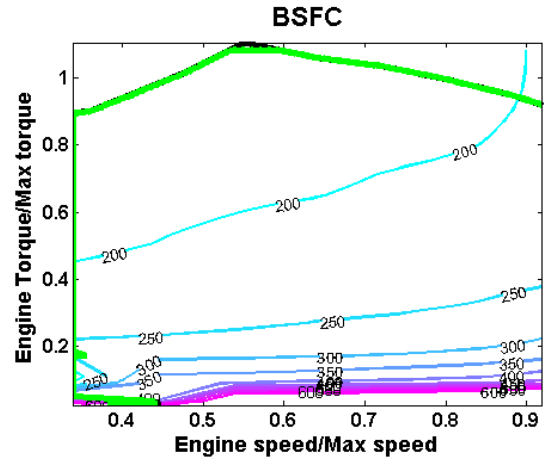


Fig. 2 BSFC of engine

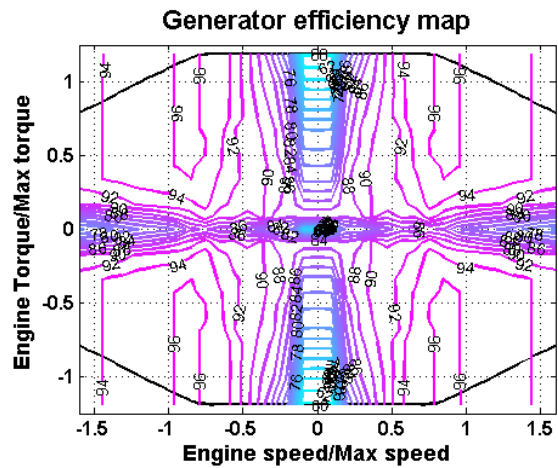


Fig. 3 Efficiency of generator

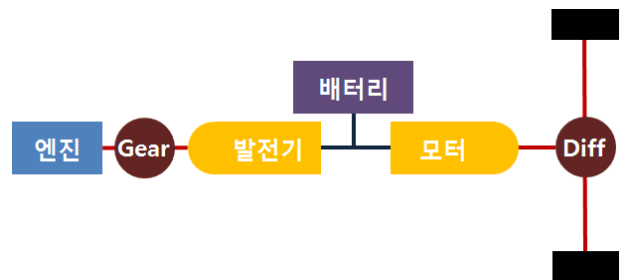


Fig. 4 Optimized generation system of series hybrid electric bus

3. 최적 발전 시스템 시뮬레이션

본 장에서는 Dynamic Programming 을 이용한 Backward 형식의 시뮬레이션을 통하여 일반 발전 시스템과 최적 발전 시스템을 적용한 버스의 연비 차이를 직접 비교해 본다.

Table 2 Problem set of dynamic programming

State	Battery SOC
Control	Battery Power
Cost	Fuel Consumption
Constrain	Final SOC

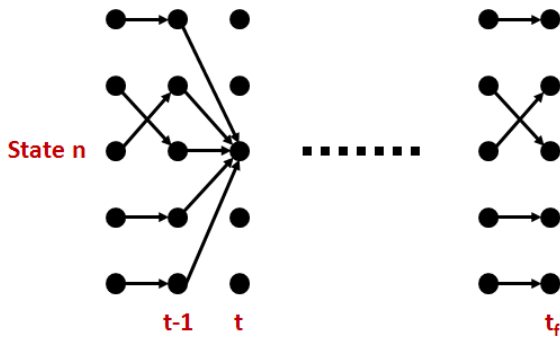


Fig. 5 Example of problem which finds out optimal trajectory using Bellman's optimality principle

3.1 Dynamic Programming⁽³⁾

Dynamic Programming 은 Bellman's Optimality Principle 를 이용한 최적제어 기법이다. 일반적으로 Dynamic Programming 을 이용하면 주행 전략에 관계없이 이론적으로 특정 구조와 특정 주행 사이클에서 얻을 수 있는 최대 연비 성능을 계산할 수 있다. Fig. 5 는 Dynamic Programming 에서 최적 경로, 즉, 최소의 연료 소모율을 보이는 경로를 찾는 방법을 간략히 모사하고 있다. Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 시간 t 의 n 상태로 올 수 있는 시간 $t-1$ 에서의 모든 가능한 경우의 수를 계산한다. 본 연구와 같이 연비 성능을 최우선으로 고려한 문제에서 목적 함수는 연료 소모율이 되며 시간 $t-1$ 의 각 상태까지 오기 위한 연료 소모율에 시간 t 의 n 상태에 도달하기 위해 필요한 연료 소모율을 더해 주어 가장 적은 연료 소모율을 보이는 경로를 선택한다. 이런 과정이 전 시간, 전 상태에 대하여 반복되며 결과적으로 최종 목적 상태에 도달하기 위한 최적 경로가 구해진다. 본 연구에서 구성한 Dynamic Programming 의 문제는 Table 2 에 정리하였다. 각 시간에서 상태는 배터리 SOC 가 되며, 이전 시간의 상태에서 다음 시간의 상태가 되기 위해 변화하는 제어신호는 배터리 출력으로 하였다. 각 상태에서 이동할 때 고려하는 비용은 누적 연료 소모량으로 결정하였으며 제한 조건은 최종 SOC 를 지정하여 문제를 구성하였다.

Table 3 Characteristic of test cycle

지속시간(sec)	1150
주행거리(km)	6.18
평균 속도(km/h)	19.32
최대 속도(km/h)	72.00
최대 가속도(m/s^2)	2.1

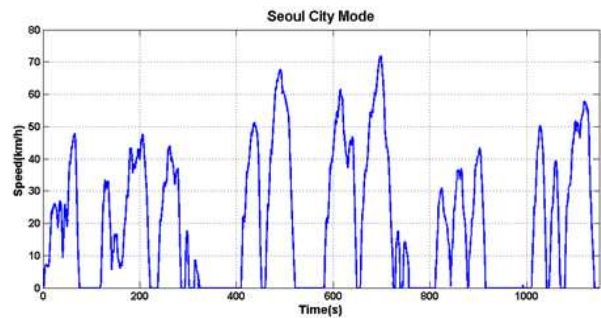


Fig. 6 Fuel economy test cycle(Seoul city mode)

3.2 연비 평가 기준 모드

본 연구에서 이용한 연비 평가 기준모드의 속도 프로파일은 Fig. 6 과 같다. 이 연비 평가 모드는 서울 시내를 운행하는 버스에서 직접 취득한 데이터로 위 주행 모드의 특징은 Table 3 과 같다. 기준모드의 지속 시간은 1150 초이며 주행거리는 6.18 km 이다. 주로 시내를 주행하는 버스의 특성상 평균 속도는 19.32 km/h 이다. 최대 속도는 72km/h 이며 최대 가속도는 $2.1m/s^2$ 이다. 또한 모드 시작 시 차량이 충분히 warming-up 이 된 상태를 가정하였기 때문에 냉시동 상태 출발은 고려하지 않았다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 직렬형 하이브리드 전기 버스의 경우 서울 시내에서 주행하는 것을 목표로 하고 있다. Newyork Bus, Manhattan Bus Cycle 등의 국외 기준 연비 평가 모드를 시뮬레이션에 적용하였을 경우 실제 서울 시내를 주행하였을 때의 연비 성능을 예측하기 어렵다. 따라서 실제 서울 시내에서 주행하는 버스에서 얻은 데이터가 연비 평가 모드로 더 적합할 것이라는 가정 하에 이 모드를 사용하게 되었다.⁽⁴⁾ 물론 본 연구에서 사용하는 모드의 경우 공인이 되거나 다양한 연구 기관에서 사용되지는 않지만 서울 시내에서의 버스 운행 패턴을 반영하고 있는 공인된 주행 모드가 아직 없기 때문에 본 연구에서 사용할 수 있는 최선의 선택이라 생각된다. 차후 서울 시내의 버스 주행 패턴을 반영한 공인 모드가 개

발된다면 그 주행 모드를 적용하여 추가 연구를 진행할 예정이다.

3.3 일반 발전 시스템을 적용한 직렬형 하이브리드 전기 버스 시뮬레이션

먼저 일반 발전 시스템을 적용한 직렬형 하이브리드 전기 버스의 시뮬레이션 결과를 아래에 도시하였다. 엔진과 제너레이터의 작동점을 표시하면 Fig. 7, Fig. 8 과 같다. 그래프에서 볼 수 있듯이 엔진은 가장 효율이 좋은 OOL 상에서 움직인다. 이에 반해 발전기의 경우 최고 효율을 나타내는 부분에서 약간 벗어난 부분에서 작동하고 있음을 알 수 있다. 여기서 발견할 수 있는 또 다른 문제는 엔진과 발전기의 작동이 발전기의 최대 토크에 영향을 받는다는 사실이다. 발전 시스템의 속도가 느려지게 되면 엔진이 작동되는 토크가 상승하게 되는데 이때에 작동점은 발전기의 최대 토크를 벗어나게 된다. 발전 시스템의 속도가 증가하는 경우도 앞의 경우와 마찬가지로 작동 토크가 발전기의 최대 토크를 벗어나게 된다. 이와 같은 문제로 인하여 엔진과 발전기의 작동영역이 제한을 받게 되어 아래와 같은 작동점이 형성된 것으로 생각된다. 또한, 발전기의 최대 토크 부분에서 작동점이 형성되게 되면 발전기가 지속적으로 작동하기에도 많은 제약이 따르게 되므로 발전 시스템의 작동점을 설정할 때 최적 작동 영역 및 발전기의 정격 토크를 고려해야 함을 알 수 있다.

3.4 최적 발전 시스템을 적용한 직렬형 하이브리드 전기 버스 시뮬레이션

최적 발전 시스템을 적용한 직렬형 하이브리드 전기 버스의 시뮬레이션 결과를 Fig. 9, Fig. 10 에 도시하였다. Fig. 8 에서 볼 수 있듯이 엔진은 OOL 상에서도 최적의 효율을 보이는 상대 속도가 0.55 인 지점을 중심으로 작동하고 있다. 또한 Fig. 9 에 나타나 있듯이 발전기도 일반 발전 시스템에 비하여 효율이 높은 곳에서 작동하고 있다. 따라서 일반 발전 시스템에 비하여 에너지 변환 효율이 높아 졌음을 예상 할 수 있다. 이러한 최적 발전 시스템의 경우 일반 발전 시스템에 비하여 작동점이 넓게 형성되었음을 확인할 수 있는데 이는 앞에서 언급한 바와 같이 발전 시스템이 발전기의 최대 토크의 제약에서 벗어나 최적 영역에서 작동이 가능하기 때문이다.

4. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 수행한 시뮬레이션에서 연비는 일

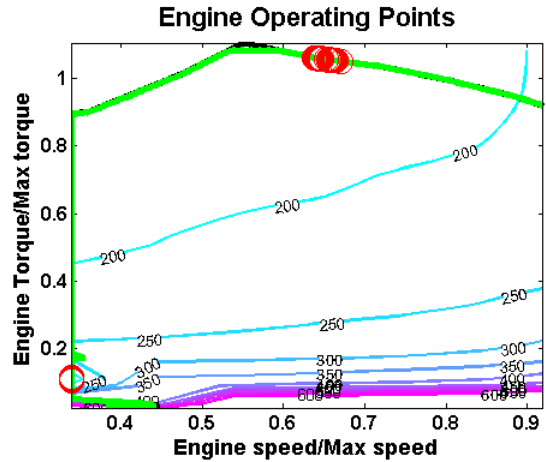


Fig. 7 Engine operating points in conventional generation system

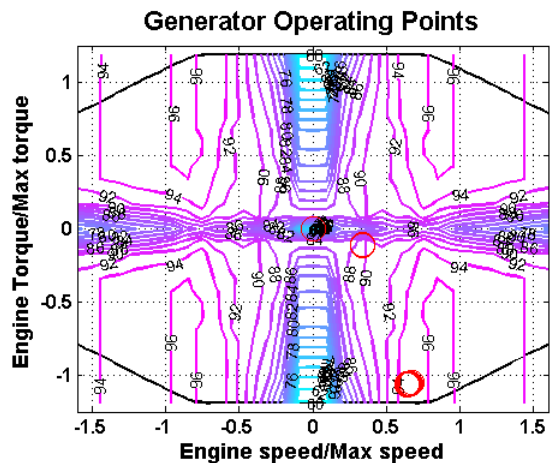


Fig. 8 Generator operating points in conventional generation system

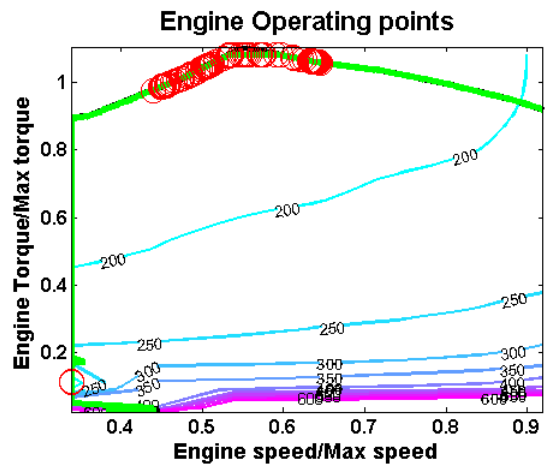


Fig. 9 Engine operating points in optimized generation system

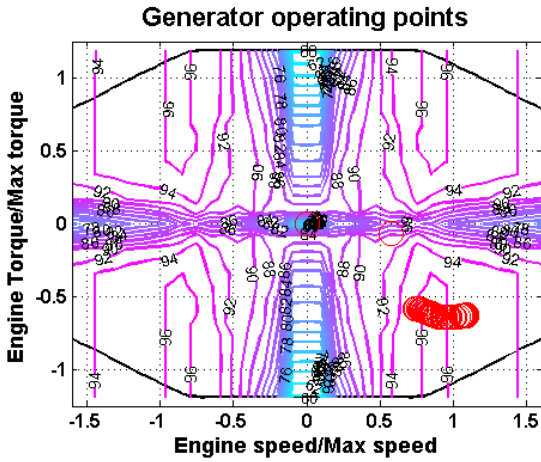


Fig. 10 Generator operating points in optimized generation system

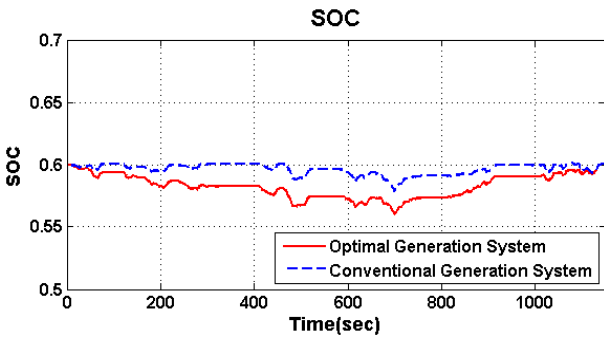


Fig. 11 Variation of SOC in each generation system

반 발전 시스템을 갖는 직렬형 하이브리드 전기 버스보다 최적 발전 시스템을 갖는 직렬형 하이브리드 전기 버스에서 약 2% 정도 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 기존 직렬형 하이브리드 전기 버스와 동일한 용량의 엔진, 발전기를 이용하여 단지 엔진과 발전기의 효율이 모두 좋은 지점에서 작동할 수 있게 최적화 해줌으로써 2% 정도의 연비를 향상 시킬 수 있는 가능성을 확인한 것이 본 연구의 큰 의의라 할 수 있다. 위의 연비 결과가 다른 구성 요소(배터리, 모터 등)를 포함한 전체 시스템이 최적 연비 결과인지를 확인하기 위하여 두 시스템의 배터리 SOC 를 비교하였다. 배터리 SOC 는 Fig. 11 에서 볼 수 있듯이 비슷한 경향을 보이고 있으며 SOC 제한 조건(0.4~0.8)안에서 움직이고 있다. 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 기법인 Dynamic Programming 의 경우 SOC 제한 조건 안에서 시뮬레이션이 수행되어야 시뮬레이션 연비 결과가 최적화된 결과라고 할 수 있다.⁽⁵⁾ 따라서 이와 같은 결과는 기존 발전 시스템을 갖는 직렬형 하이브리드 전기 버스에서 시스템의 다른

구성 요소들의 변화 없이 발전 시스템을 최적화 시킴으로써 연비 향상 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 직렬형 하이브리드 전기 버스 시스템 중 발전 시스템의 최적화를 진행하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기존 직렬형 하이브리드 전기 버스의 발전 시스템은 엔진과 발전기가 기어비가 1 인 Step Up 기어로 연결되어 있는데 작동 영역을 분석한 결과 발전기의 작동점이 정격 영역보다 높고 최고 효율 영역을 벗어난 지점에 형성되어 있었다.

(2) 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 엔진의 최적 작동점과 발전기의 최적 작동점을 분석하였으며 계산을 통하여 기어비를 1 에서 1.5 로 바꾸었을 경우 두 기기의 최적 작동점이 일치한다는 사실을 알 수 있었다.

(3) 최적 제어 기반 후방향 방식의 차량 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 기어비를 1.5 로 설정하면 발전기는 정격 영역 안쪽의 최고 효율 지점에서 작동하고 있음을 확인할 수 있었다.

(4) 이와 같이 발전 시스템의 최적화를 통하여 동력원의 용량 변경없이 직렬형 하이브리드 전기 버스의 연비를 약 2% 정도 향상 시킬 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 (10033110, Heavy Duty Hybrid System 핵심기술 및 시스템 통합 제어기술 개발)의 일환으로 수행 되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ahn, J.-Y., Heo, M.-H., Kang, S.-Y. and Kim, K.-H., 2000, "The Optimal Sizing and Efficient Driving Scheme of Series HEV," *Conference of the Korean Institute of Power Electronics*, pp. 651~656.
- (2) Kim, N., 2009, "Energy Management strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle," Seoul National University, Ph. D thesis, Seoul, Republic of Korea.
- (3) Hellgren, J. and Jacobson, B., 2000, "A Systematic Way of Choosing Driveline Configuration and Sizing

- Components in Hybrid Vehicles,” *2000 Future Transportation Technology Conference*, SP-1560.
- (4) Wang, W., Zeng, X. and Wang, Q., 2003, "Develop Hybrid Transit Buses for Chinese Cities,” 2003 SAE world Congress, SP-1750.
- (5) Jeong, J., Lee, D., Shin, C., Lim, W., Park, Y. and Cha, S., 2010, "Study on Battery Sizing of a Heaby-Duty Hybrid System Using Optimal Control Method,” 2010 Conference of KSAE, KSAE10-B0296.