

## 동적 계획법을 이용한 직렬형 및 병렬형 하이브리드 버스 시스템 연비 비교

정 종렬<sup>1)</sup> · 이 대 흥<sup>1)</sup> · 신 창 우<sup>1)</sup> · 정 대 봉<sup>1)</sup> · 민 경 덕<sup>1)</sup> · 차 석 원<sup>\*1)</sup> · 박 영 일<sup>2)</sup>

서울대학교 기계항공공학부<sup>1)</sup> · 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부<sup>2)</sup>

### Comparison of the Fuel Economy of Series and Parallel Hybrid Bus System Using Dynamic Programming

Jongryeol Jeong<sup>1)</sup> · Daeheung Lee<sup>1)</sup> · Changwoo Shin<sup>1)</sup> · Daebong Jeong<sup>1)</sup> · Kyoungdoug Min<sup>1)</sup> · Suk Won Cha<sup>\*1)</sup> · Yeong-il Park<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

<sup>2)</sup>School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 16 February 2012 / Revised 11 July 2012 / Accepted 17 July 2012)

**Abstract** : There are lots of studies about hybrid electric vehicles (HEVs) because of the global warming and energy problems. Series and parallel HEVs are the common types of many developing hybrid vehicle types. Series HEV uses engine only as the generator for the battery but parallel HEV utilizes engine for driving and generating of the vehicle. In this paper, backward simulations based on dynamic programming were conducted for the fuel economy analysis of two different types of hybrid transit buses depending on driving cycles. It is shown that there is a relation between the type of HEV and the characteristics of driving cycles. Regarding the aggressiveness, the series hybrid bus is more efficient than the parallel system on highly aggressive driving cycle. On the other hand, the parallel hybrid bus is more efficient than the series system on low aggressive driving cycle. Based on this results of the paper, it is expected to choose more efficient type of the hybrid buses according to the driving cycle.

**Key words** : Series hybrid electric vehicle(직렬형 하이브리드 전기 차량), Parallel hybrid electric vehicle(병렬형 하이브리드 전기 차량), Dynamic programming(동적 계획법), Backward simulation(후방향 시뮬레이션), Aggressiveness(주행 공격성), Fuel economy analysis(연비 평가)

### 1. 서 론

세계적으로 지구온난화와 석탄자원 고갈 문제에 대한 관심이 높아짐에 따라 이러한 문제의 큰 원인이 되는 자동차의 연비 향상과 배기 가스 감소를 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구는 승용 차량을 비롯하여 여러 상용 차량으로 확대되고 있다. 상용 차량의 경우 승용 차량에 비해 상대적으로

차량 주행 사이클의 예측이 용이하기 때문에 각 차량의 용도에 적합한 차량 시스템 및 제어 전략을 적용하여 보다 높은 연비 향상 및 배기 가스 감소 효과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

본 논문에서는 상용 차량의 일종인 버스의 다양한 주행 사이클을 분석하고 분석된 주행 사이클을 이용하여 직렬형 및 병렬형 하이브리드 버스 차량의 주행 사이클에 따른 연비 결과를 동적 계획법(Dynamic Programming)을 이용한 후방향 시뮬레이

\*Corresponding author, E-mail: swcha@snu.ac.kr

션을 바탕으로 계산하였다. 계산된 주행 사이클 별 연비 결과를 바탕으로 주행 사이클의 특성 및 하이브리드 버스 시스템의 종류에 따른 상관관계를 분석하였다. 분석된 상관관계를 바탕으로 실제 버스 노선 별 연비 개선 효과가 상대적으로 우수한 직렬형 또는 병렬형 하이브리드 버스 시스템의 선정이 가능할 것으로 예상된다.

먼저 2절에서는 시물레이션에 적용된 직렬형 및 병렬형 하이브리드 버스 시스템에 대해서 소개하였다. 3절에서는 동적 계획법의 기본 원리에 대해 소개하고 이를 적용하여 개발한 후방향 시물레이션 프로그램에 대하여 설명하였다. 4절에서는 2절과 3절에서 설명한 차량 시스템 및 시물레이션 프로그램을 바탕으로 수행한 시물레이션 결과에 대하여 분석하고 차량 주행 사이클의 특성 및 하이브리드 버스 시스템 종류에 따른 연비의 상관관계를 도출하였다.

## 2. 하이브리드 버스 시스템

본 연구에서는 각 240kW 급의 동력원을 차량 구동에 이용하는 직렬형 및 병렬형 하이브리드 버스 시스템에 대하여 분석 및 시스템 모델을 구성하였다. 맵 기반의 각 단품 별 모델을 이용하여 엔진의 연료 소모량, 모터의 효율 및 배터리 내부 저항 등을 고려한 모델을 개발하여 적용하였다.

### 2.1 직렬형 하이브리드 버스 시스템

직렬형 하이브리드 버스는 Fig. 1과 같이 엔진과 배터리를 동력원으로 이용하는 차량이다. 기본적인 차량의 추진력은 120kW 급 모터 2기에서 지원하며, 모터의 구동을 위해 배터리에 저장된 에너지를 이용하게 된다. 배터리에 저장된 에너지가 일정 수준

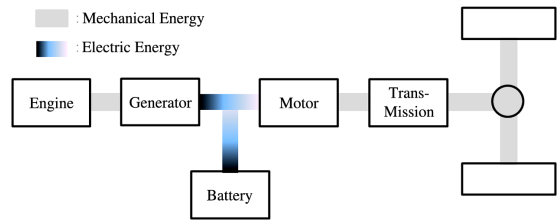


Fig. 1 Configuration of the series hybrid bus system

이하로 떨어지거나 출력이 부족할 경우 엔진을 구동하여 발전을 하는 시스템이다. 특기할 사항으로 본 연구에서는 일반적인 가솔린 또는 디젤 엔진과 다르게 압축 천연 가스(CNG)를 연료로 사용하는 엔진을 적용하였다. 따라서 본 논문에서 명시하는 차량 연비는 기존 가솔린 또는 디젤 엔진 차량의 km/l 와 다르게 km/Nm<sup>3</sup>의 단위를 사용하였다.<sup>1)</sup> 본 연구에 적용된 단품 별 용량 및 차량 사양은 Table 1과 같다.<sup>2)</sup>

### 2.2 병렬형 하이브리드 버스 시스템

병렬형 하이브리드 버스는 Fig. 2와 같이 엔진과 모터를 이용하여 차량을 추진하는 동력전달계 시스템으로 구성되어있다. 모터의 경우 배터리를 통해 전기 동력원을 공급받아 구동된다. 직렬형 하이브리드 버스 시스템은 엔진의 동력원을 발전기를 통해 전기적 에너지로 변환하여 차량 구동에 이용하는 반면 병렬형 하이브리드 버스 시스템은 엔진의 동력원을 직접적으로 차량 구동에 이용할 수 있다는 차이가 있다. 적용된 차량 엔진의 경우 직렬형과 동일한 CNG 연료를 이용하는 엔진을 적용하였다. 병렬형 하이브리드 차량의 사양 및 용량은 Table 1과 같으며 동력전달 시스템을 제외한 모든 차량 사양은 직렬형 하이브리드 버스 시스템과 동일하다.<sup>3)</sup>

Table 1 Specifications of the hybrid bus system

Series hybrid bus system components		Parallel hybrid bus system components	
Engine capacity (CNG)	8000 cc	Engine capacity (CNG)	6000 cc
Battery capacity	60 Ah	Battery capacity	14 Ah
Motor max. power	240 kW	Motor max. power	60 kW
Other vehicle specifications & conditions			
Vehicle weight	12300 kg	Vehicle frontal area	7.5 m <sup>2</sup>
Transmission efficiency	95%	Air drag coefficient	0.6
Differential gear efficiency	95%	Rolling resistance coefficient	0.007

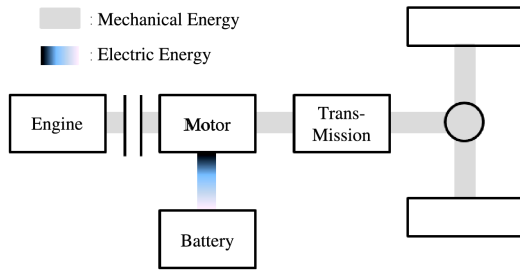


Fig. 2 Configuration of the parallel hybrid bus system

### 3. 후방향 시뮬레이션 프로그램

본 연구에서는 하이브리드 버스 시스템 종류와 주행 사이클에 따른 연비 결과를 분석하기 위하여 후방향 시뮬레이션 프로그램을 이용한 연비 분석을 수행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 동적계획법을 이용한 후방향 시뮬레이션으로서 주어진 주행 사이클에 대해 전 영역 최적화에 따른 최적 운용 상태 및 최소 연료 소모량을 주행 전략에 관계없이 도출해 낼 수 있다.

#### 3.1 동적 계획법

동적 계획법(Dynamic programming)이란 벨만의 최적화(Bellman's optimality) 이론을 바탕으로 한 최적화 방법이다. 초기조건과 말기조건 및 다양한 제한조건이 주어진 최적화 문제에서 이를 만족하는 최적의 경로를 찾는 최적화의 한 방법이다. 이는 주어진 단계적 과정의 문제 혹은 단계적 과정으로 근사화할 수 있는 문제에 적용 가능하다. 일반적인 최적화 문제에서 가능한 모든 영역을 탐색하기 위하여 단계의 개수가 많아짐에 따라 계산량이 기하급수적으로 증가하는 것에 비하여, 동적 계획법을 적용한 최적화의 경우 주어진 단계의 수에 비례적으로 계산량이 증가하기 때문에 상대적으로 적은 계산을 통해 최적 경로를 찾을 수 있다는 장점이 있다.<sup>4,5)</sup>

이와 같이 동적 계획법을 이용한 최적화의 원리는 다음과 같다.

총  $N$ 개의 단계를 가진 최적화 문제는 상태 변수  $x$  와 제어 변수  $u$ 에 따라 경로 비용  $L$ 을 최소화하는 값의 합으로 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\min \sum_1^N L(x(k), u(k)) \quad (1)$$

동적 계획법은 이러한 최적화 문제의 정의를 바탕으로 식 (2)와 같이  $k+1$  단계에서 최종 단계  $N$ 까지의 최소 비용  $J_{k+1,N}^*(x(k+1))$ 을 알고 있을 경우  $k$  단계에서의 최소 비용  $J_{k,N}^*(x(k))$ 을  $k$ 와  $k+1$  단계에서의 비용  $L(x(k), u(k))$ 의 관계를 분석하여 계산하게 된다.

$$J_{k,N}^*(x(k)) = \min \{L(x(k), u(k)) + J_{k+1,N}^*(x(k+1))\} \quad (2)$$

이와 같은 방식으로 초기 단계부터 최종 단계까지의 최소 비용  $J_{1,N}^*$ 을 계산하게 되며, 이러한 계산 방식은 최종 단계  $N$ 부터 1까지 후방향(Backward) 방식으로 이루어지게 된다.<sup>6,7)</sup>

#### 3.2 동적 계획법 적용된 시뮬레이션 프로그램

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 각 차량 시스템이 적용된 주행 사이클에서의 차량의 연비 분석을 위하여 3.1절에서 설명한 이론을 적용하여 자체 개발된 후방향 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다. 본 시뮬레이션 프로그램은 동적 계획법을 바탕으로 주어진 주행 사이클에 따라 차량을 주행하였을 때, 차량의 연비를 최소화하는 SOC 경로 및 동력 분배비를 계산할 수 있는 시뮬레이션 프로그램이다. 직렬형, 병렬형, 동력 분기형 및 연료전지 등 다양한 하이브리드 차량의 차량 시스템 동력 흐름에 맞게 시뮬레이션 프로그램이 구성되어 있으며 각각의 차량 시스템에 따른 주행 사이클에 따른 최적 동력 분배량, SOC 경로 및 연비 결과, 차량 부품의 상태 및 최적 운전점 등의 분석이 가능하게 제작되었다.<sup>8)</sup>

### 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 주행 사이클에 따른 직렬형/병렬형 하이브리드 시스템 별 연비 비교를 위하여 동적 계획법이 적용된 후방향 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 후방향 시뮬레이션의 경우, 초기 배터리 SOC와 말기 배터리 SOC를 동일하게 제한한 후 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시하는 차량 연비의 경우, 차량의 주행 사이클에 따른 주행으로 인한 배터리의 SOC 소모가 없다는 가정을 바탕으로 계산된 연비 결과이다.

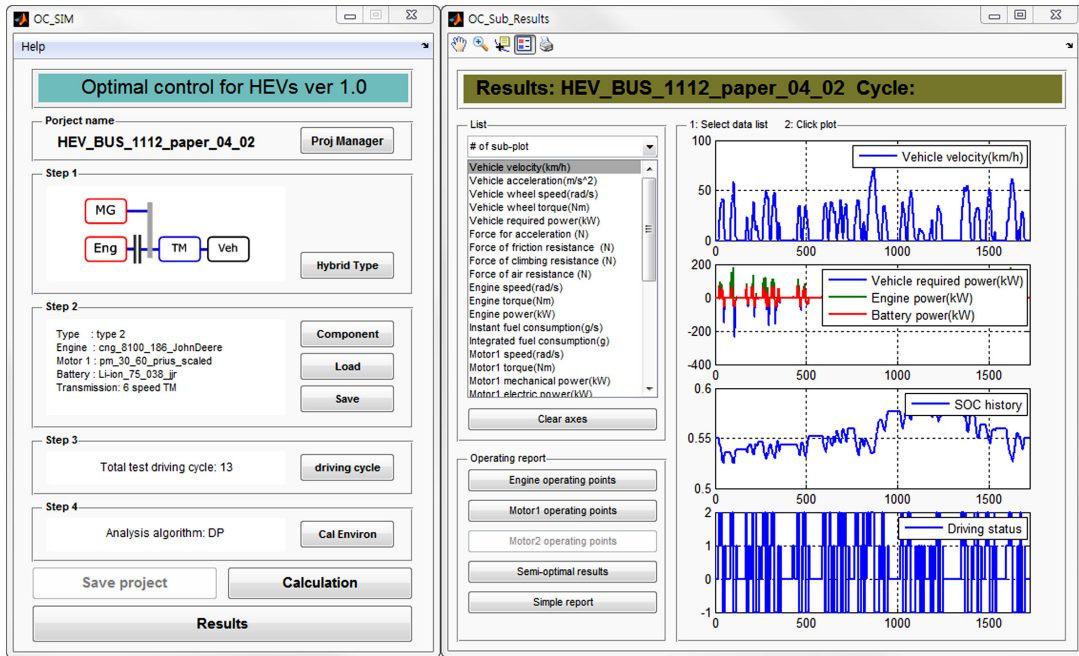


Fig. 3 Backward simulation program based on DP

시뮬레이션은 총 35개 주행 사이클에 대하여 수행되었다. 대상 차량이 버스 차량이기 때문에 최고 속도가 100km/h 이상이거나 고속도로 주행을 가정한 주행 사이클의 경우 시뮬레이션에서 제외하였다. 따라서 기존의 대표 주행 사이클 중에서 최고 속력이 100km/h 미만이고 시내 주행을 기반으로 제작된 주행 사이클 및 국내 도시 및 해외 도시의 시내 버스 주행 상황을 바탕으로 제작된 버스 용 주행 사이클이 시뮬레이션에 적용되었다.

또한 주행 사이클의 특성에 따른 직렬형 및 병렬형 하이브리드 버스의 연비 결과 비교를 위해 각 주행 사이클의 평균 속력 및 평균 가속도를 바탕으로 연비 결과를 비교하였다. 뿐만 아니라 이러한 주행 사이클의 평균 가속도 및 가속 구간, 속도 정보 등을 좀 더 포괄적으로 표현할 수 있는 주행 공격성 (Aggressiveness, *Agg*)을 식 (3)과 같이 정의하여 각 주행 사이클 특성을 분석하였다.<sup>9)</sup>

$$Agg = \frac{\int (a \cdot v)^+ dt}{\int v dt} \quad (3)$$

식 (3)에서 *a*는 주행 사이클에서의 차량 가속도, *v*

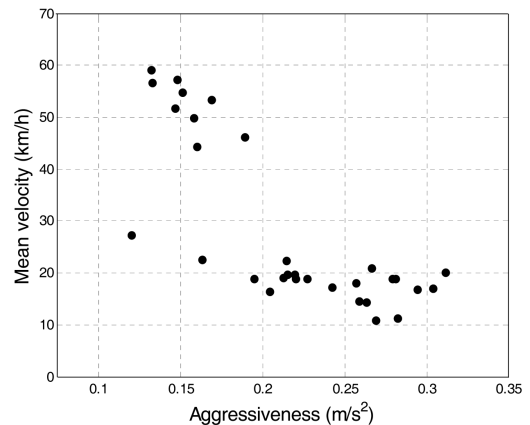


Fig. 4 Mean velocity versus cycle aggressiveness of the simulation results

는 차량의 속도를 의미한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 주행 공격성에 따른 주행 사이클의 평균 속도 및 평균 가속도의 관계를 표시한 것이다. 주행 공격성은 주행 사이클의 평균 속도보다는 상대적으로 평균 가속도와 높은 관련성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

시뮬레이션 대상 주행 사이클의 평균 속도와 연비 결과 관계는 Fig. 6과 같다. 주행 사이클의 평균

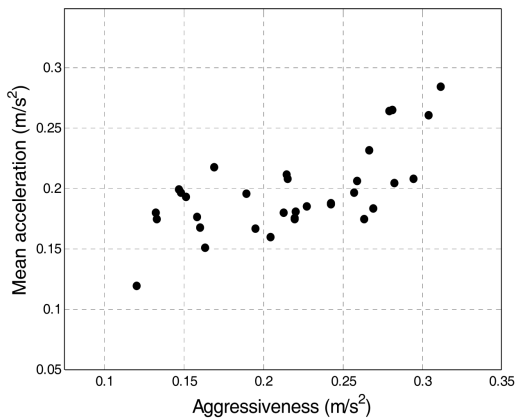


Fig. 5 Mean acceleration versus cycle aggressiveness of the simulation results

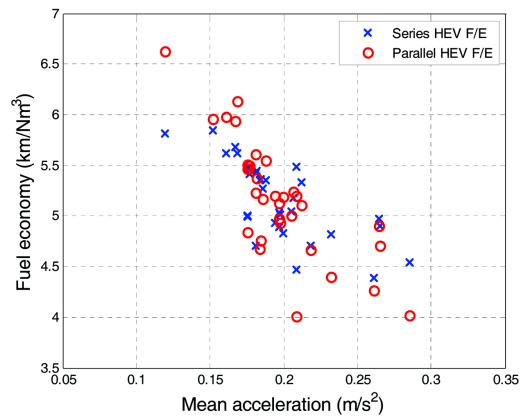


Fig. 7 Fuel economy versus cycle mean acceleration of the simulation results

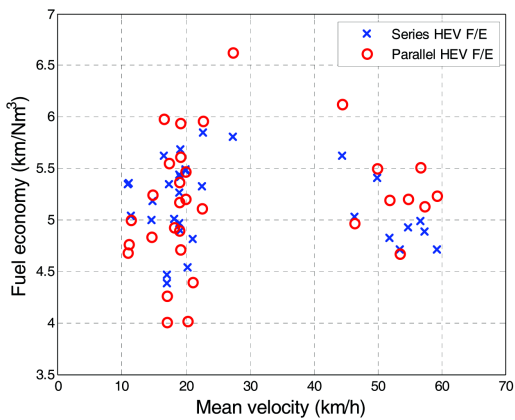


Fig. 6 Fuel economy versus cycle mean velocity of the simulation results

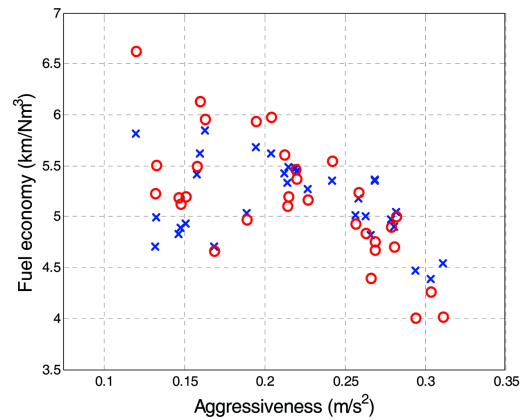


Fig. 8 Fuel economy versus cycle aggressiveness of the simulation results

속도 변화와 차량 연비 결과에 대한 직접적인 상관관계는 없는 것으로 보이나, 동일한 주행 사이클에 대해서 병렬형 하이브리드 버스의 연비 결과의 편차가 직렬형에 비해 큰 것으로 나타났다.

Fig. 7은 주행 사이클의 평균 가속도 변화에 따른 차량 연비 결과를 나타낸 것이다. 주행 사이클의 평균 가속도에 따른 연비 변화에 상관관계가 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 주행 사이클의 평균 가속도가 증가함에 따라 차량의 연비는 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 운전자가 급가속 및 급정거를 많이 할 때 차량의 연비가 감소하는 경향을 보이는 것으로 설명할 수 있다. 하지만 Fig. 7의 결과를 바탕으로 주행 사이클의 평균 가속도 변화에 따른 직렬형 및 병렬형 하이브리드 시스템의 연비 차이를 일정한 상관관계로 설명하는 것에는 어려움이 있었다.

Fig. 8은 식 (3)에서 정의한 주행 공격성에 따른 직렬형 및 병렬형 하이브리드 차량의 연비 결과를 나타낸 것이다. 주행 공격성에 따른 연비 결과 역시 Fig. 7의 주행 사이클의 평균가속도와 같이 상관관계를 보이는 것을 확인할 수 있다. 주행 공격성 수치가 증가함에 따라 차량의 연비가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 5에서 주행 사이클의 주행 공격성 및 평균 가속도의 상관관계가 있기 때문에 나타나는 결과로 생각할 수 있다. 하지만 연비와 평균 가속도의 관계와 유사하게 직렬형 및 병렬형 하이브리드 차량에 따른 연비 특성을 확인하기 어렵다.

따라서 주행 사이클에 따른 직렬형 및 병렬형의 연비 특성 비교를 위하여 각 주행 사이클의 직렬형 및 병렬형의 연비 차이(Fuel economy difference, D)를 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$D = FE_S - FE_P \quad (4)$$

차량 연비 차(D)는 직렬형 하이브리드 버스의 연비 결과( $FE_S$ )와 병렬형 하이브리드 버스의 연비 결과( $FE_P$ )를 계산한 것이다.

Fig. 9와 같이 주행 사이클의 평균 가속도 변화에 따른 직렬형 하이브리드 차량과 병렬형 하이브리드 차량의 시뮬레이션 결과 상 차량 연비 차를 비교하였다. Fig. 9에서와 같이 주행 사이클의 평균 가속도가 증가함에 따라 차량 연비 차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 평균 가속도가 증가함에 따라 직렬형 하이브리드 차량의 연비가 병렬형 하이브리드 차량의 연비 결과에 비해 상대적으로 우수한 것을 의미한다. 반면 평균 가속도가 상대적으로 적은 주행 사이클 상에서는 병렬형 하이브리드 차량의 연비가 직렬형 하이브리드 차량에 비해 우수한 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 직렬형 하이브리드 차량의 경우 병렬형 하이브리드 차량에 비해 구동 및 회생 제동에 이용되는 모터의 용량이 크기 때문에 차량의 급가·감속으로 인한 많은 출력 요구 조건에 상대적으로 효율적인 차량 주행이 가능한 것으로 생각된다.

Fig. 10은 정의된 주행 공격성에 따른 직렬형 및

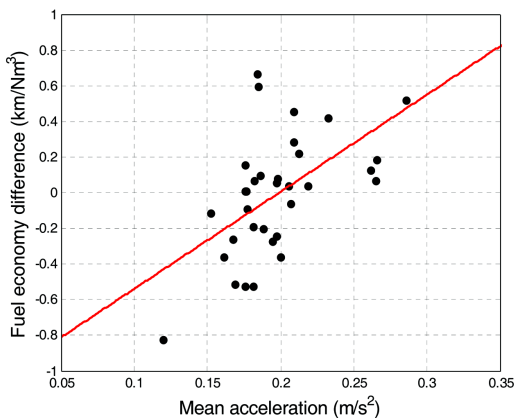


Fig. 9 Fuel economy differences versus cycle mean acceleration of the simulation results

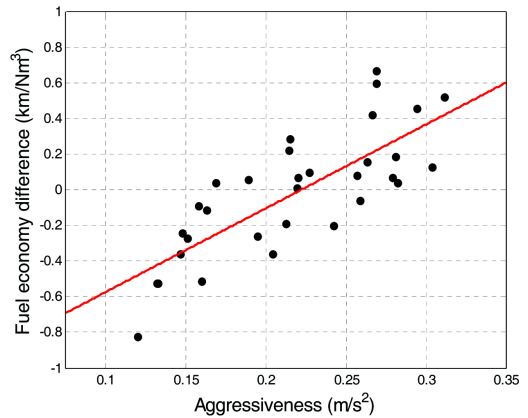


Fig. 10 Fuel economy differences versus cycle aggressiveness of the simulation results

Table 2 Deviation of the result graph

	F/E diff. - mean acceleration (Fig. 9)	F/E diff. - aggressiveness (Fig. 10)
Deviation	0.0756	0.0451

병렬형 하이브리드 차량의 연비 차이를 나타낸 것이다. Fig. 9와 유사하게 주행 공격성과 차량 연비 차에도 상관관계를 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 9의 연비 차이와 평균 가속도의 관계보다 Fig. 10의 연비 차이와 주행 공격성의 관계에서 보다 높은 관련성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. Table 2는 Fig. 9과 Fig. 10의 추세선과 각 데이터의 오차의 분산 정도를 나타낸 것이다.

결론적으로 주행 공격성이 높은 특성을 보이는 주행 사이클에서는 직렬형 하이브리드 버스가 상대적으로 높은 연비 결과를 보였으며, 주행 공격성이 낮은 주행 사이클에서는 병렬형 하이브리드 버스가 상대적으로 높은 연비 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 주행 사이클의 주행 공격성 특성에 따라 직렬형 및 병렬형 하이브리드 차량의 연비 개선 효과에 차이가 발생하게 되며, 각 주행 사이클에 알맞은 종류의 하이브리드 차량을 선택할 경우 좀 더 높은 연비 개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 동적 계획법을 이용한 후방향 시뮬레이션을 통해 주행 사이클에 따른 직렬형 및 병

렬형 하이브리드 차량의 연비 결과를 분석하였다.

- 1) 주행 사이클의 평균 가속도가 증가함에 따라 직렬형 및 병렬형 하이브리드 차량 모두 연비가 감소하는 결과를 확인할 수 있었으며, 두 차량의 연비 차이를 비교한 결과 평균 가속도가 높은 주행 사이클에서는 직렬형 하이브리드 차량의 연비가 상대적으로 우수하며 평균 가속도가 낮은 주행 사이클에서는 병렬형 하이브리드 차량의 연비가 상대적으로 우수한 결과를 확인할 수 있었다.
- 2) 주행 사이클에 따른 직렬형, 병렬형 하이브리드 차량의 연비차의 상관관계 분석을 위하여 주행 공격성(Aggressiveness)을 정의하여 결과를 분석하였다. 하이브리드 차량의 연비차와 주행 공격성의 상관관계를 확인할 수 있었으며, 이는 평균 가속도와의 관계보다 높은 관련성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 주행 공격성에 따른 각 하이브리드 차량의 연비 결과를 분석한 결과, 상대적으로 주행 공격성이 높은 주행 사이클에서는 직렬형 하이브리드 버스의 연비가 높은 것을 확인할 수 있었으며, 반대로 주행 공격성이 낮은 주행 사이클에서는 병렬형 하이브리드 버스의 연비가 높은 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 주행 사이클의 특성에 따른 직렬형 및 병렬형 하이브리드 차량의 연비 개선에 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구 내용을 바탕으로 추후 개발되는 직렬형 및 병렬형 하이브리드 버스 차량의 효율적인 적용이 가능할 것으로 생각된다.

## 후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업(No.10033126) 및 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2012-0000921)의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- 1) K. H. Ryu, J. C. Park and K. H. Choi, "Performance and Emission Characteristics of Dual-fuel (Diesel-CNG) Combustion in a Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.18, No.4, pp.132-139, 2010.
- 2) M. J. Kim, D. B. Jeong and K. D. Min, "Power Distribution Control Research on Series Hybrid Electric Vehicle Bus," Spring Conference Proceedings, KSAE11-B0431, 2011.
- 3) J. R. Jeong, D. H. Lee, C. W. Shin, W. S. Lim, Y. I. Park and S. W. Cha, "Analysis of Correlation of Fuel Efficiency and Cost Depending on Component Size of Heavy-duty Parallel Hybrid System," Transactions of KSAE, Vol.19, No.3, pp.73-82, 2011.
- 4) G. Rousseau, D. Sinoquet and P. Rouchon, "Constrained Optimization of Energy Management for a Mild-hybrid Vehicle," Oil-Gas Sci. Technol., IFP, Vol.62, No.4, pp.623-634, 2007.
- 5) D. H. Lee, J. R. Jeong, C. W. Shin, Y. I. Park and S. W. Cha, "Component Sizing of a Heavy-duty Hybrid System Using Optimal Control Methodm," Annual Conference Proceedings, KSAE09-A0487, 2009.
- 6) D. E. Kirk, Optimal Control Theory. An Introduction, Prentice Hall, New Jersey, pp.53-95, 1970.
- 7) M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press, pp.292-295, 2010.
- 8) N. W. Kim, Y. I. Park, H. W. Seo, D. H. Lee and S. W. Cha, "A Backward Simulator for Calculating Optimal Control Trajectories," Spring Conference Proceedings, KSAE09-B0250, 2009.
- 9) D. H. Lee, H. W. Seo, Y. I. Park, W. S. Lim and S. W. Cha, "System Efficiency Analysis for Next Generation Eco-friendly Vehicles with Aggressiveness of Real-world Driving Schedules," Annual Conference Proceedings, KSAE10-A0569, 2010.