

## 시뮬레이션을 이용한 군용 직렬형 HEV의 주행 전략에 따른 연비 성능 비교에 관한 연구<sup>§</sup>

정대봉\* · 김형준\* · 강형묵\* · 박재만\* · 민경덕\*<sup>†</sup> · 서정일\*\*

\* 서울대학교 기계항공공학부, \*\* 국방과학연구소

### Comparison of Control Strategies for Military Series-Type HEVs in Terms of Fuel Economy Based on Vehicle Simulation

Daebong Jung\*, Hyungjun Kim\*, Hyungmook Kang\*, Jaeman Park\*, Kyoungdoug Min\*<sup>†</sup> and Jung-il Seo\*\*

\* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

\*\* Agency for Defense Development

(Received June 7, 2011; Revised September 15, 2011; Accepted September 22, 2011)

**Key Words** : Control Strategy(주행전략), Fuel Economy(연비), Series Hybrid Electric Vehicle(직렬형 하이브리드 전기 자동차),

**초록**: 군용 차량은 일반 차량에 비하여 높은 기동 성능 및 정숙성을 요구한다. 또한 최소의 연료 보급으로 최대의 작전 수행 능력을 보유하고 있어야 한다. 시리즈 하이브리드 자동차의 경우 모터만을 이용하여 차량을 구동하므로, 정숙성이 뛰어나고 초기 기동 토크가 커 구동 성능이 뛰어나다. 또한 하이브리드화를 통하여 연비 향상 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 시리즈 하이브리드 차량의 경우 배터리 SOC와 차량의 주행 상태에 따라 엔진과 발전기로 이루어진 발전 시스템에서 전기를 생산하여 차량 구동에 이용하거나 배터리를 충전한다. 발전 시스템의 작동 여부와 작동 영역을 결정하는 것이 시리즈 하이브리드 차량의 주행 전략이며 이 주행 전략에 따라 연비 성능에 차이가 난다. 본 연구에서는 Thermostat, Power-Follower, Combined 주행 전략을 비교/평가 하였으며 새롭게 제안한 Combined 주행 전략을 통하여 기존 차량 대비 37%의 연비 향상 효과를 얻을 수 있었다.

**Abstract**: Military vehicles, compared to conventional vehicles, require higher driving performance, quieter operation, and longer driving distances with minimal fuel supplies. The series hybrid electric vehicle can be driven with no noise and has high initial startup performance, because it uses only a traction motor that has a high startup torque to drive the vehicle. Moreover, the fuel economy can be improved if the vehicle is hybridized. In series hybrid electric vehicles, the electric generation system, which consists of an engine and a generator, supplies electric energy to a battery or traction motor depending on the vehicle driving state and battery state of charge (SOC). The control strategy determines the operation of the generation system. Thus, the fuel economy of the series hybrid electric vehicle relies on the control strategy. In this study, thermostat, power-follower, and combined strategies were compared, and a 37% improvement in the fuel economy was implemented using the combined control strategy suggested in this study.

- 기호설명 -

HEV : 하이브리드 전기 자동차  
SOC : State Of Charge  
BSFC : Brake Specific Fuel Consumption  
 $R_b$  : 배터리 내부저항

$P_b$  : 배터리 출력  
 $P_{EG,min}$  : 엔진 최소 출력  
 $P_{EG,max}$  : 엔진 최대 출력  
 $P_{EG,cont}$  : 엔진 실제 출력

### 1. 서론

최근들어 유가 상승 문제와 환경 문제의 대두로 인하여 이에 대응하기 위한 다양한 연구가 활발히

<sup>§</sup> 이 논문은 2011년도 대한기계학회 에너지 및 동력공학부문  
춘계학술대회(2011. 6. 2., 한국발전교육원) 발표논문임  
<sup>†</sup> Corresponding Author, [kadmin@snu.ac.kr](mailto:kadmin@snu.ac.kr)  
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

진행되고 있다. 특히 그 중에서도 하이브리드 전기 자동차(HEV)는 가장 실현 가능한 대안으로 인식되고 있다. HEV는 내연기관과 전기 모터를 이용하여 구동되는 차량으로 동력원 구성에 따라 직렬형, 병렬형, 직병렬형으로 구분된다. 특히 직렬형의 경우 모터만을 이용하여 차량을 구동하므로 차량 구동에 엔진을 필수적으로 사용해야 하는 다른 형식의 HEV보다 정속성 및 초기 기동 성능이 우수하다. 이와같은 특성은 작전 시 높은 정속성을 요구하고 빠른 초기 기동으로 적을 제압해야 하는 군용차량에 매우 적합하다. 또한 하이브리드화를 통하여 연비를 향상시킬 수 있으므로, 기존 차량과 비교하였을 때 같은 연료 보급을 갖고 더 긴 작전 주행 거리를 확보 할 수 있다. 특히, 전장 상황에서 연료 보급이 제한이 될 가능성에 대비하여 기존 차량에 비하여 높은 연비 성능을 확보하는 것은 군용 차량을 하이브리드화 하는데 있어서 매우 중요한 요소이다. 이와 같은 연비 성능은 HEV 차량의 동력원 운용을 제어하는 주행 전략에 의하여 많은 영향을 받는다. 기존 직렬형 HEV에 적용된 주행 전략은 SOC 상태에 따라 엔진을 on/off 하는 Thermostat 전략과 일정 SOC에서 배터리가 운용될 수 있게 하는 Power-Follower 전략이 대표적이다.<sup>(1)</sup> 또한 ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy)<sup>(1)</sup> 등의 최적화 전략이 적용되기도 하였다. 본 연구에서는 이러한 직렬형 HEV 주행전략에 더해 실차에 바로 응용이 가능한 새로운 Rule-Based 주행전략을 제시하였으며 이러한 주행 전략들을 시뮬레이션을 통하여 비교/분석함으로써 최고의 연비 성능을 구현할 수 있는 주행전략을 제시하였다.

## 2. 군용 직렬형 HEV의 제원

### 2.1 각 단품별 제원

본 연구에서 목표로 하고 있는 직렬형 HEV의 기존차량의 사진은 Fig. 1이며 제원은 Table 1에 나타내었다. 연구 대상 차량은 1 1/4 톤의 전술 차량이며 전자전, 병력 수송, 무기 수송 등의 다양한 용도에 사용되는 다목적 전술 차량이다.

군용 직렬형 HEV는 최대 적재 시 차량 중량이 5,500 kg이며, 엔진은 120kW 급의 2500cc 디젤 엔진을 사용한다. 발전기도 120kW 급을 사용하며, 차량 구동에는 120kW 급 모터를 2개 사용하여 총 240kW의 출력성능을 확보하고 있다. 배터리는 LiPB 31Ah 급을 사용하며 급격한 출력 변화를 보

Table 1 Specification of military series HEV

Purpose	Multipurpose Military Vehicle
Vehicle Mass	5500kg
Engine	2500cc Diesel
Generator	120kW
Traction Motor	Max. 120kW × 2
Battery	31Ah LiPB
Ultra Capacitor	6.94F



Fig. 1 Reference vehicle of series HEV

조하기 위하여 6.94F의 Ultra Capacitor도 함께 사용한다.

### 2.2 군용 직렬형 HEV 구조

직렬형 HEV는 일반적으로 엔진과 발전기를 이용하여 전기를 발전한다. 이때에 발생된 전기는 주행 전략에 의하여 배터리나 Ultra Capacitor에 저장되거나 모터에 인가되어 차량을 구동하는데 이용된다. 차량 구동의 경우 병렬형이나 직병렬형과는 다르게 오직 모터에 의하여 이루어진다. 일반적인 직렬형 HEV의 경우 이 구동 모터가 전륜이나 후륜 중 한 곳에 장착되어 있지만 군용 직렬형 HEV의 경우에는 전륜과 후륜 양쪽에 모두 구동 모터가 장착되어 있다. 이는 어떤 주행 조건에서도 작동 성능이 보장되어야 하는 군용 차량으로써 4륜 구동이 가능해야 하기 때문에 이와 같은 구조를 갖고 있다. 또한 구동 모터를 전륜과 후륜에 모두 장착하게 됨으로써 기존에 전륜이나 후륜에서만 가능했던 회생제동이 후륜과 전륜에서 모두 가능하게 된다. 따라서 더 많은 운동 에너지를 전기 에너지로 회생할 수 있게 되어 연비 향상 측면에서 많은 이점이 존재한다. 이와 같은 군용 직렬형 HEV의 시스템 구성을 표현하면 Fig. 2와 같다.

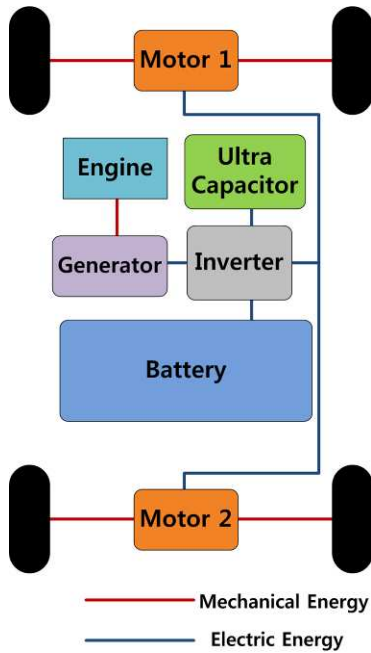


Fig. 2 Configuration of military series HEV

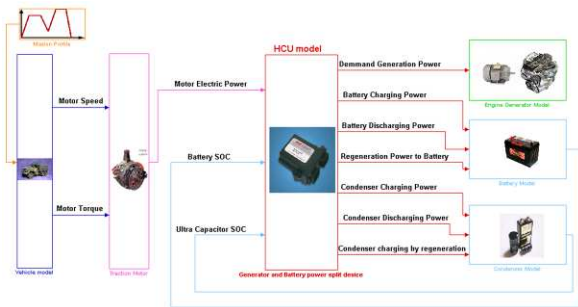


Fig. 3 Developed simulation model for series HEV

### 3. 군용 직렬형 HEV 시뮬레이션 모델

본 연구에서 사용한 시뮬레이션 모델은 Fig. 3과 같이 Matlab/Simulink를 이용하여 자체적으로 개발하였다. 시뮬레이션 방식은 운전자 모델이 없는 Backward 방식이다. 따라서 차량에 필요한 에너지가 차량 모델로부터 계산이 되고 이를 바탕으로 SOC 및 차량 상태에 따라 주행 전략에 의하여 배터리 충/방전 및 엔진의 작동여부가 결정이 된다. 주행전략의 경우 Thermostat, Power Follower, Combined의 3가지를 선택하여 사용 할 수 있도록 모델이 구성되어 있다.

#### 3.1 종방향 차량 동역학 모델

본 연구에서 목표로 하는 것은 최적의 연비 성

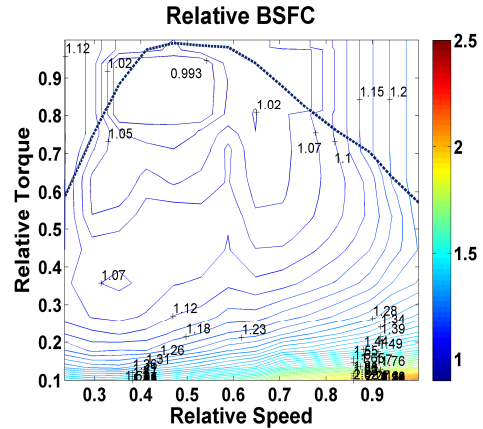


Fig. 4 Relative BSFC map of series HEV

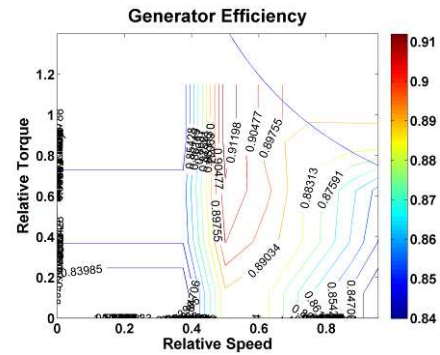


Fig. 5 Efficiency map of generator

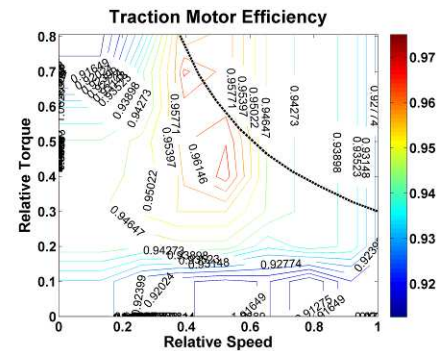


Fig. 6 Efficiency map of traction motor

능을 보이는 주행 전략을 개발하는 것이다. 따라서 차량 동역학 모델은 종방향만 고려하여 개발하였다. 차량 종방향 주행에 의하여 생성되는 주행 부하는 아래 식과 같다.

$$R_{air} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (\text{공기저항})$$

$$R_{friction} = \mu_f mg \cos \theta \quad (\text{마찰저항})$$

$$R_{climb} = mg \sin \theta \quad (\text{등판저항})$$

$$R_{total} = R_{air} + R_{friction} + R_{climb} \quad (\text{전주행저항})$$

### 3.2 엔진 모델

엔진 모델은 엔진의 BSFC 맵을 이용하여 구성하였다. 즉, 주행 전략에서 엔진의 on/off 및 작동점을 결정하면 이에 따라 BSFC 맵을 기반으로 연료 소모량을 계산하였다. 본 연구에서 사용한 무차원화한 BSFC 맵은 Fig. 4 과 같다. BSFC 맵의 속도와 토크, BSFC 값은 각각 기준값에 대하여 무차원화 되었다.

### 3.3 전동기(모터/발전기) 모델

발전기와 모터 모델은 각각 효율맵을 이용하여 구성하였다. 전동기 모델의 경우 발전기로 작동할 때와 구동 모터로 작동할 때의 효율이 서로 역수 관계이므로 기계적 출력과 전기적 출력은 아래 식과 같은 관계를 갖는다.

$$P_{mecha} = \eta_{motor} IV \quad (\text{구동 모터 모드})$$

$$P_{elec} = \eta_{motor} T\omega \quad (\text{발전기 모드})$$

발전기와 모터의 효율맵은 Fig. 5-6 과 같다.

### 3.4 배터리 모델

배터리 모델은 가장 일반적으로 사용되는 내부 저항 모델을 사용하였다. 내부저항 모델의 경우 충전 일 때와 방전 일 때 전류값은 아래와 같은 수식으로 정의된다.<sup>(2)</sup>

$$I_{b,discharge} = \frac{V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4R_b P_b}}{2R_b}$$

$$I_{b,charge} = \frac{-V_{OC} + \sqrt{V_{OC}^2 + 4R_b P_b}}{2R_b}$$

내부 저항 모델의 기본적인 개념은 Fig. 7 과 같다.<sup>(3)</sup>

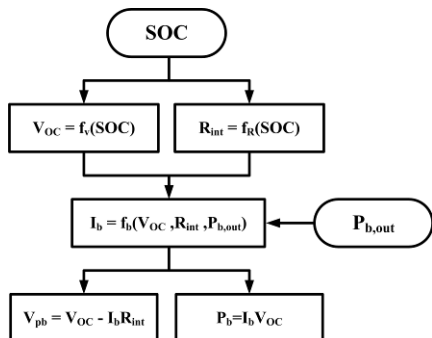


Fig. 7 Schematic of internal resistance battery model

## 4. 주행 전략

### 4.1 회생제동 전략<sup>(4)</sup>

본 연구에서 고려한 회생제동 전략은 기존의 연구와는 약간의 차이가 있다. 일반적인 HEV 의 경우 구동 모터가 전륜이나 후륜에 위치하게 된다. 하지만 앞에서도 언급하였듯이 본 연구에서 연구 대상으로 하고 있는 군용 시리즈 HEV 는 전륜과 후륜에 모두 구동용 모터를 갖고 있다. 따라서 기존에 연구와는 다르게 전륜과 후륜에서 모두 회생 제동이 작동된다. 이를 고려하여 최적 제동 선도를 Fig. 8 과 같이 얻었으며, 차량 속도가 작아지게 되면 모터 제어의 어려움 및 효율 문제로 인하여 일정 속도 한계에 대하여 회생 제동과 마찰 제동 사이에 가중치를 두어 두 제동이 적절히 일어나게 하였다.

### 4.2 Thermostat 주행 전략

본 연구에서 가장 기본으로 삼고 있는 전략이 바로 Thermostat 주행 전략이다. 현재 실차에 적용하기 위하여 연구가 진행되고 있으며 가장 단순하게 직렬형 HEV 를 구동할 수 있다. Thermostat 주행 전략은 배터리 SOC 가 일정 수준 이하가 되면 엔진을 시동하여 발전을 수행하며, SOC 가 일정 수준 이상이 되면 발전을 중지하고 배터리만을 이용하여 차량을 구동한다.

### 4.3 Power Follower 주행 전략

Power Follower 주행 전략에서 엔진의 On/off 를 위한 제어 기준을 Fig. 9 에 나타내었다. Power Follower 주행전략에서 엔진은 기준 SOC 가 유지될 수 있도록 발전량을 제어한다. 엔진 On 의 경우 발전량은 엔진에서 효율이 좋은 구간의 최소 출력과 최대 출력으로 제한된다. 즉, 엔진 On 의 경우 요구 출력이 엔진 최소 출력보다 작으면 엔진 출력은 최소 출력으로, 요구 출력이 엔진 최대 출력보다 크면 엔진 출력을 최대 출력으로 제한한다. 발전량은 아래와 같은 식으로 정의된다.

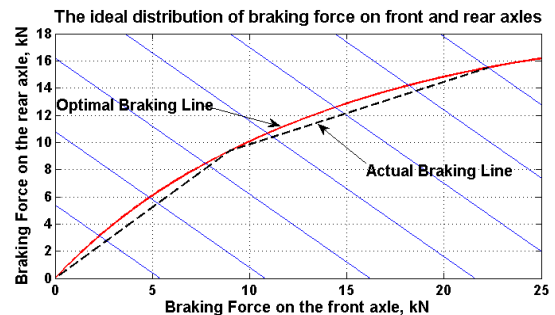


Fig. 8 Distribution line of braking force

$$P_{gen} = \begin{cases} 0 & : \text{if engineoff} \\ P_{EG,min} & : \text{if engineon} \& P_{EG,cont} < P_{EG,min} \\ P_{EG,cont} & : \text{if engineon} \& P_{EG,min} < P_{EG,cont} < P_{EG,max} \\ P_{EG,max} & : \text{if engineon} \& P_{EG,cont} > P_{EG,max} \end{cases}$$

$$P_{EG,cont} = P_{mot,elec} + \alpha_{cont} SOC_{target}$$

#### 4.4 Combined 주행 전략

본 논문에서 새롭게 제안하는 Combined 주행 전략은 위의 두 주행 전략을 차량의 상태와 배터리 SOC에 따라 상황에 맞게 섞어 사용하는 전략이다. 배터리에서 차량을 구동하기 위하여 방전되는 에너지는 차후에 엔진을 통하여 충전이 되어야 한다. 본 연구에서는 차량이 일정 에너지를 요구할 때, 엔진 발전을 통한 직접적인 에너지 공급과 배터리로 에너지 공급 후, 차후 엔진 발전을 통한 배터리 충전을 위한 엔진 발전을 가정하여 더 적은 연료 소모를 보이는 조합을 선정하였다. 예를 들어 차량에서 50kW의 출력을 1초간 요구한다면 엔진은 발전기의 효율을 고려할 때 약 57.6kW의 출력을 1초간 내야하며 이때의 연료는 3.59g을 소모하게 된다. 반면에 배터리를 통하여 50kW의 출력을 충족하기 위해서는 내부저항을 고려하였을 때, 배터리에서 총 51.5kW의 출력을 1초간 내야 한다. 이를 엔진을 이용하여 충전한다 가정하였을 경우, 엔진을 가장 효율이 좋은 지점에서 작동시키게 되면 3.45g의 연료를 소모하고 배터리를 다시 이전 상태로 충전할 수 있다. 발전기의 효율과 엔진의 BSFC를 고려하였을 경우 저출력에서는 48kW, 고출력에서는 72kW에서 전기 에너지를 발전할 때 발전시스템의 효율이 가장 좋다. 따라서 본 논문에서는 차량의 요구 출력 72kW 이하이면

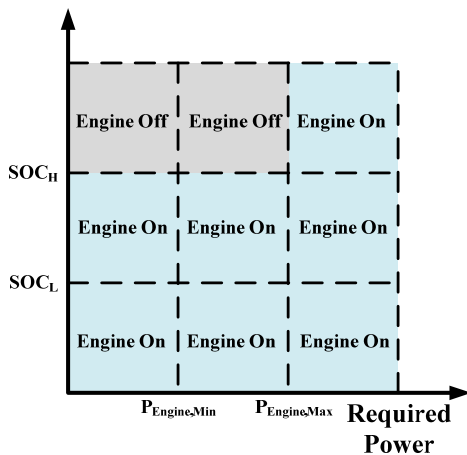


Fig. 9 Power follower control strategy

발전시스템은 48kW로 발전하면서 배터리를 이용하여 남은 출력을 보조하며, 차량 요구 출력이 72kW 이상이면 지속적으로 72kW를 발전하여 차량 구동에 이용하면서 모자란 출력은 배터리를 이용하여 충당한다고 가정하였다. 이와 같은 작동은 배터리 SOC 상태에 따라서 그 작동 여부가 결정되며 충방전 효율이 상대적으로 높은 SOC 영역이 유지될 수 있도록 제어로직을 구성하였다.

### 5. 시뮬레이션 결과

#### 5.1 시뮬레이션 적용 주행 전략 최적화

본 연구에서 제시한 주행 전략 중 Thermostat 주행 전략은 현재 개발 대상 실차에 적용되고 있는 주행 전략으로써 본 연구에서는 이 주행 전략을 적용시킨 경우를 연비의 기준으로 하였다. 또한 일반적인 디젤 차량의 연비 또한 실험을 통하여 획득하여 하이브리드화를 통하여 연비 향상율이 얼마나 될지를 비교하였다. Power Follower 주행 전략의 경우 일반적으로 직렬형 하이브리드 차량에 적용시키는 주행 전략이며 본 연구에서는 주요 변수인 SOC<sub>target</sub>, 엔진의 작동 영역 등에 다양한 조합을 적용하여 최고의 연비를 나타내는 조합을 사용하였다. 이와 유사하게 본 연구에서 새롭게 제시하는 Combined 주행 전략도 주요 변수에 대하여 여러 조합을 선정 한 후 최고의 연비를 보이는 조합을 선택하여 시뮬레이션에 적용하였다.

#### 5.2 시뮬레이션 결과 비교

본 연구에서는 연비 평가를 위한 기준 모드로 FTP-72 모드를 사용하였다. FTP-72 모드를 이용하여 얻은 연비 결과는 아래 표와 같다. 연비는 SOC 변화를 고려하여 선형 보간하여 계산하였다. 연비 결과를 보게 되면 Combined 주행 전략이 Power Follower 주행 전략에 비하여 약 3%정도 연비가 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 Thermostat 주행 전략에 비하여 5% 정도 연비가 더 높은 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 엔진에서 발전

Table 2 Comparison of fuel economy

적용 주행 전략	연비(km/L)
기존 디젤 전술 차량	5.9
Thermostat 주행 전략	7.72
Power Follower 주행 전략	7.82
Combined 주행 전략	8.09

한 에너지의 흐름 효율과 배터리의 충/방전 에너지 흐름 효율을 최적화하여 연료 소모량을 최소화하여 얻은 값이다. 따라서 위의 결과를 통하여 본 연구에서 새롭게 제시한 Combined 주행 전략이 Power Follower 주행 전략이나 Thermostat 주행 전략에 비하여 연비 성능에 있어서 유리하다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 군용 직렬형 HEV 에 적용할 수 있는 주행 전략들에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) Thermostat 주행 전략의 경우, 구현의 용이성이 가장 뛰어났으나 연비는 가장 낮은 수치를 보였다.

(2) Power Follower 주행 전략의 경우, 엔진의 사용 작동점과  $SOC_{target}$  을 최적의 연비를 성능을 보이는 조합을 선정하였으나, Combined 주행 전략에 비하여 낮은 연비 성능을 보였다. 이는 기본적으로 배터리의 사용을 최대한 제한하는 특성에 인하여 나타난 결과이다.

(3) 본 연구에서 새롭게 제안한 Combined 주행 전략의 경우 Thermostat 주행 전략과 Power Follower 주행 전략의 장점을 결합한 형태로 세 주행 전략 중 가장 높은 연비 성능을 보여 주었다. 이는 배터리를 이용하여 출력을 보조하고 엔진을 요구 출력의 크기에 따라 2 개의 포인트에서 작동시킴으

로써 작동 효율을 최대로 끌어 올렸기 때문이다. 이를 통하여 기존 디젤 엔진을 사용하는 전술 차량에 비하여 37% 향상된 연비 성능을 구현해 낼 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 민군 겸용 기술 개발 과제의 “특수임무차량용 고기동 하이브리드 추진 시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kim, S., 2011, "Optimal Power Distribution Strategy of Series Hybrid Electric Vehicle," Master Thesis, Hanyang University.
- (2) Jeon, K., Hwang, H., Choi, S., Kim, D. and Lee, C., 2010, "Development of Simulation Model for Wheel-Motor Driven System of Exchangeable Battery Electric Bus," *KSAE 2010 Annual Conference*, KSAE10-A0538
- (3) Chu, L. and Wang, Q., 2001, "Energy Management Strategy and Parametric Design for Hybrid Electric Transit Bus," *2001 SAE World Congress*, 2001-01-2748.
- (4) Gao, Y., Chen, L. and Ehsani, M., 1999, "Investigation of the Effectiveness of Regeneration Braking for EV and HEV," *1999 SAE World Congress*, 1999-01-2901.