

단일 성능지수를 이용한 하이브리드 차량의 연비 성능 최적화

조성태*, 전순일*, 공진형*, 박영일**, 이장무***

Fuel Economy Optimization of Hybrid Vehicle Using Single Performance Index

Cho Sungtae, Jun Soonil, Kong Jin Hyung, Park Yeong Il, Lee Jang Moo

Key Words : Hybrid vehicle(하이브리드 자동차), Fuel Economy(연비), Equivalent BSFC(등가 BSFC), Single Performance Index(단일 성능지수)

Abstract

To minimize the fuel consumption in the hybrid vehicle, the single performance index, which can express the fuel consumption in engine and electric energy consumption in battery system at the same time, is required. In this study we proposed a single performance index with equivalent BSFC concept, and with this, we constructed driving control algorithm, which can determine optimal gear ratio and power split ratio of the engine and the motor, for the parallel hybrid vehicle. Additionally, to verify the validity of this algorithm, driving simulation is performed.

1. 서론

기존 하이브리드 차량의 연비 성능 최적화를 위한 주행제어 알고리즘에서 사용되어지는 동력 분배비 결정법에서는 일반적으로 엔진의 연비와 전동기의 효율을 정규화 하여 각각에 가중치를 주어서 목적함수를 구성하는 방법을 사용하거나¹⁾ 연료의 열당량을 고려하여 엔진의 BSFC(Brake Specific Fuel Consumption)을 효율로 환산하여 전동기의 효율과 가중치를 고려하여 결합한 값으로 목적함수를 정하는 방법을 사용하고 있다.²⁾ 그러나 이러한 경우 정규화 된 각각의 목적함수에 가중치를 어떻게 결정하는가 하는 문제가 또 다른 최적화 문제가 되어 결국 복합 최적화(compound optimization) 문제 또는 다목적함수 최적화(multi-objective optimization) 문제를 풀어야 한다. 그러나 이러한 문제를 풀기에는 상당한 어려움이 있으므로 현재까지는 각각의 가중치를 경험적으로 지정하거나, 모두

1로 지정하는 방식 등을 사용하고 있다.

이러한 방법의 또 다른 문제는 남은 연료와 배터리의 전기에너지 잔량을 연결시킬 수 없다는 점이다. 만약 하이브리드 차량에 외부 충전포트가 없거나 비상 시 외에는 외부 충전이 불가능하다면 기존의 알고리즘의 경우, 별도의 비상 충전 알고리즘을 도입하지 않는다면 배터리의 에너지 충전수준(SOC : State Of Charge)이 위험수준 이하로 내려갈 가능성이 생기게 된다. 따라서 전동기-배터리 시스템의 에너지 사용량과 엔진의 연료 사용량을 하나로 생각할 수 있는 단일 성능지수의 개발이 필요하게 된다. 만약 엔진의 연비와 전동기-배터리의 전기시스템의 에너지 소모량을 단일 성능지수로 표현할 수 있다면, 하이브리드 차량의 연비 최적화 문제는 배기가스 제한을 제한 조건(constraint)으로 하는 최적화 문제로 단순화 시킬 수 있다. 본 논문에서는 이를 위하여 전동기-배터리의 에너지 소모량을 등가 BSFC(Equivalent Brake Specific Fuel Consumption)으로 정의하여 하이브리드 시스템 전체의 에너지 소모를 표현할 수 있는 단일 성능 지수를 개발하였다.

2. 등가 BSFC를 사용한 하이브리드 등

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울산업대학교 기계설계학과

*** 서울대학교 기계항공공학부

력전달계통의 단일 성능지수의 정의

하이브리드 동력전달계에서의 연비 성능 최적화는 시스템의 연료소모를 표시할 수 있는 목적함수를 최소화하도록 엔진/전동기의 작동점과 동력분배비를 결정하는 것이다. 하이브리드 동력전달계는 엔진, 전동기-배터리의 두 가지의 서로 다른 동력원을 사용하므로 일반 내연기관에서처럼 단순히 엔진의 연료소모(Fuel Consumption)를 최소화하는 것 만으로는 최적의 해를 찾아 낼 수 없다. 따라서 본 논문에서는 하이브리드 동력 전달계의 연료 소모를 표현할 수 있는 성능 지수를 다음과 같이 정의하였다.

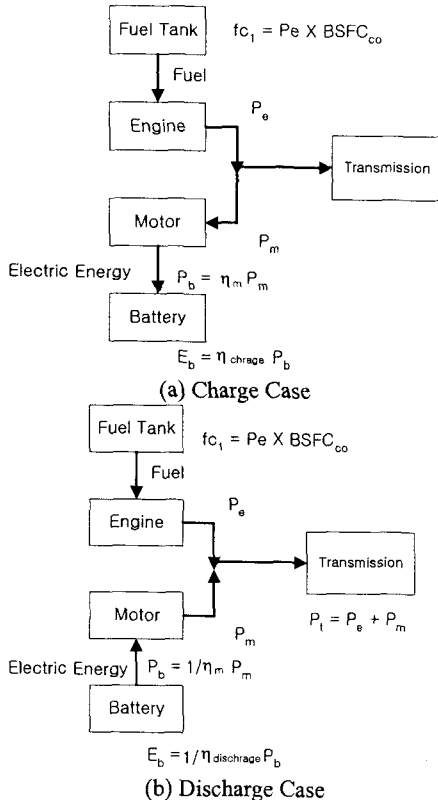


Fig. 1 Power Flow of Hybrid System

우선 엔진에서의 소모되는 연료량은 식 1과 같이 간단하게 정의할 수 있다.

$$fc_1 = \text{required engine power} \times \text{BSFC at the operating point} \quad (1)$$

전동기에서 소모되는 전기 에너지 또한 식 2와 같이 정의할 수 있다.

Charge state:

$$\text{energy consumption in electric system} = \text{required motor power} \times \text{motor efficiency at the operating point} \times \text{battery charge efficiency at the operating point} \quad (2)$$

Discharge state:

$$\text{energy consumption in electric system} = \text{required}$$

$$\text{motor power} \times 1/\text{motor efficiency at the operating point} \times 1/\text{battery discharge efficiency at the operating point} \quad (3)$$

식 (2)의 경우 충전 시 전동기에서 요구되는 동력(required motor power)의 부호는 -의 값을 가지기 때문에 전기 시스템의 에너지 소비는 전체적으로 - 부호를 가지게 되고 이는 에너지가 배터리에 저장된다는 의미를 의미한다.

여기서 엔진의 연료와 배터리에 저장된 전기 에너지는 본질적으로 다른 연료이기 때문에 하나의 개념으로 표현할 수 있는 절대적인 기준은 존재하지 않으나, 외부 충전 개념을 배제한다면 배터리에서 사용되어지는 전기 에너지는 결국 엔진의 연료를 소모하여 만들어진다. 따라서 소모 또는 충전되어지는 전기 에너지를 등가 BSFC 개념을 사용하여 표현함으로써 엔진에서의 연료 소모량(fc_1)과 전동기-배터리의 전기 시스템에서의 에너지 소모량(energy consumption in electric system)을 하나의 성능지수로 표현할 수 있다.

등가 BSFC 개념은 전동기-배터리의 전기 시스템에서 사용되어지는 에너지를 등가의 엔진의 연료 소모량으로 표현하기 위한 개념이며 다음과 같이 정의되어진다.

가정 1:

비상 시를 제외하고는 전기시스템(전동기-배터리)의 에너지는 엔진의 연료로부터 생성되며 주행 중 가능한 일정 수준을 계속 유지하여야 한다.

가정 2:

전동기-배터리에서 사용된 전기 에너지는 추후에 반드시 엔진의 연료를 이용하여 충전을 하여야 한다. 또한 배터리에 충전된 전기 에너지는 배터리의 충전 수준이 일정 값 이상이 되지 않도록 방전하여 사용하여야 한다.

2.1 등가 BSFC(Equivalent Brake Specific Fuel Consumption)의 정의

앞 절에서의 가정을 바탕으로 전기 에너지를 등가의 연료 소모량으로 표현할 수 있는 등가 BSFC를 다음과 같이 정의하였다.

충전 시

- 현재 상태에서 충전한 전동기의 에너지는 추후 방전 시 절약되는 엔진의 연료소모량으로 정의한다.

방전 시

- 현재 상태에서 방전한 전동기의 에너지는 추후 충전 시 소모되는 엔진의 연료소모량으로 정의한다.

정의에 따라 식 (2), (3)을 다시 쓰면

Charge state:

$$fc_2 = \text{required motor power} \times \text{motor efficiency at present time} \times \text{battery charge efficiency at present time} \times \text{motor efficiency at the discharge}$$

time × battery discharge efficiency at the discharge time × engine BSFC at the corresponding operating condition (4)

식 (4)를 다시 쓰면

fc_2 = energy consumption in electric system × equivalent BSFC at charge

where,

energy consumption in electric system = required motor power × motor efficiency at present time × battery charge efficiency at present time

equivalent BSFC at charge = motor efficiency at the discharge time × battery discharge efficiency at the discharge time × engine BSFC at the corresponding operating condition (5)

Discharge state:

fc_2 = required motor power × 1/motor efficiency at present time × 1/battery discharge efficiency at present time × 1/motor efficiency at the charge time × 1/battery charge efficiency at the discharge time × engine BSFC at the corresponding operating condition (6)

식(6)을 다시 쓰면

fc_2 = energy consumption in electric system × equivalent BSFC at discharge

where,

energy consumption in electric system = required motor power × 1/motor efficiency at present time × 1/battery discharge efficiency at present time

equivalent BSFC at discharge = 1/motor efficiency at the charge time × 1/battery charge efficiency at the discharge time × engine BSFC at the corresponding operating condition (7)

식 (5), (7)의 등가 BSFC계수의 정의에 사용된 전 동기 효율(motor efficiency), 배터리 충/방전 효율(battery charge/discharge efficiency), 엔진 BSFC의 항 들은 추후 충전/방전 시의 동력원의 작동 조건에 의해 결정되는 값들로 동력원의 작동 점이 결정되면 유일하게 결정되는 값들이므로 이들의 계산 값을 전동기-배터리의 전기 시스템의 에너지 변화 량을 연료 변화량으로 표현할 수 있는 등가 BSFC 계수로 정의한다. 따라서 등가 BSFC계수는 식(8), (9)과 같이 정의되며, 개념적으로는 식 (10)과 같 은 함수로 정의 된다.

Equivalent BSFC at charge = motor efficiency at the discharge time × battery discharge efficiency at the discharge time × engine BSFC at the corresponding operating condition (8)

Equivalent BSFC at discharge = 1/motor efficiency at the charge time × 1/battery charge efficiency at the discharge time × engine BSFC at the corresponding operating condition (9)

Equivalent BSFC = f(motor efficiency, battery efficiency, engine BSFC, operating condition) (10)

여기서 motor efficiency, battery efficiency, engine BSFC는 결국 동력원의 작동 조건에서 결정되는

값들이고, 동력원의 작동 조건은 주행 상황과 배 터리의 충전 수준에 의해 결정되므로 식(10)은 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

Equivalent BSFC

= f(battery condition, driving condition)

= f(operating point of power sources)

= f(T_e , ω_e , T_m , ω_m) (11)

where, T_e : required torque of engine, ω_e : required velocity of engine, T_m : required torque of motor, ω_m : required velocity of motor

여기서

$T_{req} = T_e + mps_gear_ratio \times T_m$ (12)

$\omega_e = 1/mps_gear_ratio \times \omega_m$ (13)

where, T_{req} : required torque from drivetrain, ω_{req} : required velocity from the drivetrain, mps_gear_ratio : gear ratio of mechanical power split unit

이므로 식 (11)식은 식(12), (13)을 고려하면 다음과 같이 표현된다.

Equivalent BSFC = f(T_{req} , ω_{req} , power split ratio)

where, power split ratio : power split ratio between engine and motor

즉 등가 BSFC계수는 추후 방전/충전 시점에서의 엔진/전동기간의 동력분배비율, 충전/방전 시점의 동력원의 작동 점에 의해서 결정되게 된다. 그러나 일정한 도로 상을 주행하는 노선 버스 등의 특수한 상황이 아닌 일반적인 승용차등의 주행 상황에서는 추후 주행 상황이 미리 지정되지 않으므로 추후 충전/방전 시점을 결정할 수 없으므로 등가 BSFC계수를 결정할 수 없는 문제점이 있다. 또한 노선 버스 등의 경우라 할 지라도 운전자의 성향 등으로 인한 오차로 인해 추후의 주행 상황을 미리 예측하기는 힘든 일이다. 따라서 추후 충전/방 전 시점이 어떻게 결정될 것인가 하기 위해서는 과거의 주행 상태를 기준으로 하여 예측을 하는 수 밖에 없으며, 이는 대부분의 차량의 경우 일정 운행구간을 반복 운행한다는 점에서 타당한 예측 이 될 것이다.^{3),4)} 그러나 본 절에서는 과거의 주행 상황을 기준으로 한 예측을 쓰지 않고 현재의 상태를 기준으로 추후 충전/방전 시점을 결정하는 방법을 사용하였다.

추후 어떤 조건에서 충/방전이 이루어 지는가는 식 (11)에서 '배터리의 충전수준(battery condition = battery SOC)'과 '주행 상황'에 의해 좌우되게 된다. 따라서 미래의 주행 상황을 미리 예측할 수 없다면 Equivalent BSFC는 배터리 SOC에 의해서 결정 되게 된다.

배터리 SOC와 Equivalent BSFC과의 상관 관계는 다음과 같은 가정 하에서 정의될 수 있다.

방전 시 등가 BSFC계수의 결정을 위한 가정 : 현재 배터리의 충전 수준에 여유가 있다면 현 시점에서 소모한 전기 에너지를 추후 엔진의 효율이 좋은 곳에서 충전하여 회복할 가능성이 높다. 따라서 등가 BSFC 계수 중 작은 값(best equivalent BSFC)을 이 때의 등가 BSFC계수로 사용한다. 반면, 현재의 배터리 충전 수준이 충분하지 못하다면 현재의 방전량을 곧 충전을 하여 충전 수준을 회복하기 위해서 등가 BSFC계수가 좋지 않은 곳에서도 충전을 할 수 밖에 없다. 이러한 상황을 막기 위하여 배터리 충전 수준이 낮을수록 등가 BSFC계수를 큰 값(worst equivalent BSFC)을 사용한다.

충전 시 등가 BSFC계수의 결정을 위한 가정 : 현재의 배터리의 충전 수준이 낮다면 현 시점에서 충전을 하여 배터리의 충전 수준을 올려야 하고, 현재의 배터리 충전 수준이 높다면 가급적 충전을 하지 않는다.

이상의 가정에 의하면 현재 배터리 충전 수준에 여유가 없다면 가급적 충전을 하게 되고 충전 수준이 낮을수록 충전량이 커지게 된다. 반대로 충전 수준에 여유가 있다면 충전을 줄이게 되고, 일정 수준 이상으로 충전 수준이 올라가면 충전을 중지하거나 방전을 하게 된다. 따라서 이상의 가정에 의해 정의된 등가 BSFC계수는 현재 배터리 시스템의 충전 상황에 따라 충/방전을 수행함으로써 별도의 충전 전략을 필요로 하지 않는다. 위의 가정에서 등가 BSFC계수는 다음과 같은 인자들의 함수로 표현된다.

$$\text{Equivalent BSFC} = f(\text{battery SOC, low SOC, high SOC, best equivalent BSFC, worst equivalent BSFC}) \quad (14)$$

여기서

battery SOC : 현재 배터리의 충전 수준

low SOC : 기준이 되는 낮은 배터리의 충전 수준으로 현 배터리의 충전 수준이 낮은가를 판단하는 기준

high SOC : 기준이 되는 높은 배터리의 충전 수준으로 현 배터리의 충전 수준이 높은가를 판단하는 기준

best equivalent BSFC : 가능한 모든 등가 BSFC계수 중 기준이 되는 최소값

worst equivalent BSFC : 가능한 모든 등가 BSFC계수 중 기준이 되는 최대값

여기서 best equivalent BSFC, worst equivalent BSFC 값은 동력원의 가능한 운전영역에서 모든 equivalent BSFC계수를 구한 후 그 중 일정 값을 최소값과 최대값으로 결정하여 사용하게 되고, low SOC 및 high SOC 값들은 배터리의 수명 특성을 고려하여 그 상한과 하한이 결정되어 지게 된다. 그

러나 자동차의 경우 그 주행 상황이 특별하게 정해지지 않는 것이 일반적이므로 모든 주행상황에 대해서 최적의 성능을 나타내는 특정 값은 존재하지 않는다.

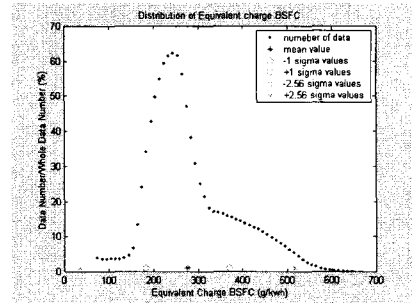


Fig. 2 Distribution of Equivalent BSFC
 등가 BSFC계수는 best equivalent BSFC와 worst equivalent BSFC사이의 값을 현재의 충전 수준에 의해서 갖게 되며 그 상관 관계는 위에서 정의된 가정에 의해 결정되게 된다. 그러나 특정 운전 패턴이 지정되지 않는 한 보편적으로 최적의 연비 효율을 보장하는 함수의 형태는 결정될 수 없다. 즉, 어느 한 운전 패턴에 대해서 최적화된 함수 형태는 다른 운전 패턴에 대해서는 좋지 않은 결과를 나타낼 수 있으므로 등가 BSFC계수의 결정을 위한 가정을 만족하면서 가장 일반적이고 단순한 형태의 함수를 취하는 것이 좋다.

본 논문에서는 식 (15)의 logsigmiod 함수를 사용하였다. 이러한 형태의 함수는 차량의 SOC가 일정 수준 이하로 감소하게 되면 급격하게 충전에 유리한 쪽으로 등가 BSFC계수를 선택하게 됨으로써 배터리 시스템의 충전 수준을 회복하게 되며 배터리 SOC가 일정 수준 이하로 감소하기 전까지는 엔진의 효율이 좋은 영역에서 운영을 하게 함으로써 일반적인 선형함수 보다는 좋은 결과를 나타낸다.

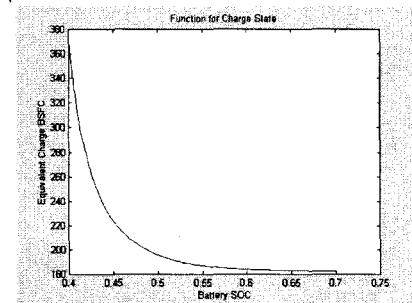


Fig. 3 Variation of Equivalent BSFC with Battery SOC
 $equiv_charge_BSFC(soc)$

$$= \frac{a_charge}{b_charge + \exp(-20 * (soc - lo_soc))}$$

$$\text{equiv_discharge_BSFC}(soc) = \frac{a_discharge}{b_discharge + \exp(-20 * (soc - lo_soc))} \quad (15)$$

여기서 a_charge, b_charge, a_discharge, b_discharge 등의 계수는 등가 BSFC 계수들의 최고값, 최저값을 기준으로 정해지게 된다.

이상의 결론으로 식(16)과 같이 하이브리드 동력 전달계의 연료 사용량을 정의할 수 있는 단일 성능지수를 정의할 수 있다.

Fuel consumption
 = fuel consumption in engine + energy consumption in motor
 = $fc_1 + fc_2$
 = required engine power × BSFC at the operating point + energy consumption in electric system × equivalent BSFC (16)

이는 또한 식 (17)와 같은 함수 식으로 표현이 가능하다.

Fuel consumption
 = f(required engine power, required motor power, operation velocity of power source)
 = f(required power from drivetrain, power split ratio between engine and motor, gear ratio of transmission) (17)

따라서 위의 식 (15)를 최소화하도록 엔진과 전동기의 동력분배비와 변속기의 기어비를 결정함으로써 전체 하이브리드 동력전달계의 연비를 최소화할 수 있다.

3. 단일 성능 지수를 이용한 하이브리드 차량의 연비 최적화

본 절에서는 2절에서 정의된 단일 성능지수를 사용하여 CVT를 장착한 병렬형 하이브리드 승용차의 연비를 최적화할 수 있는 주행 제어 알고리즘을 개발 하였다. 연구 대상 하이브리드 차량의 구조 및 제원은 Fig.4와 Table 1에 각각 표시되어 있다.

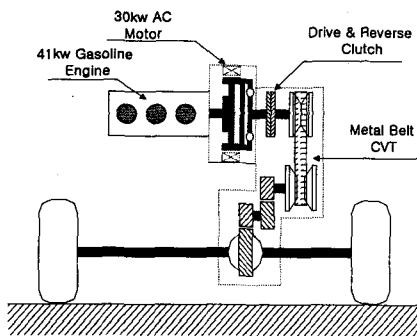


Fig. 4 Configuration of a CVT Equipped Parallel Hybrid Vehicle

Table 1. Spec. of Each Component of Hybrid Vehicle

	Spec. of each module
Engine	Geo Metro 1.0L SI engine
Motor	Siemens electric motor 30 kW
Battery	12V Ni-MH, 25 Cell
Transmission	Metal Belt CVT
	Gear Ratio [2.416~0.443]
Vehicle Mass	1483 kg

차량의 주행 제어 알고리즘은 다음과 같은 순서로 주어진 주행상황에서 연비를 최적화하는 CVT의 기어비와 엔진/전동기의 동력분배비를 결정하게 된다.

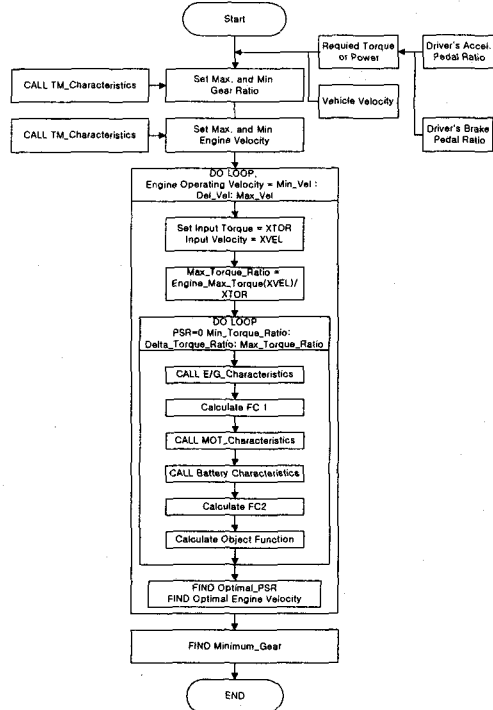


Fig. 5 Flow Chart of Algorithm for Finding Optimal Gear ratio and Power Split Ratio

1. 운전자의 가속 페달 개도값을 입력 토크/파워 요구량으로 환산하여 입력받고, 속도 센서로부터 차량의 현재 속도 값을 입력으로 받는다. 입력 받은 측정값을 기준으로 현재 동력원의 작동조건을 설정한다.
2. 내장된 변속기 자료와 차량의 현재속도에서 변속기의 현재 구현 가능한 기어비의 범위를 구한다.
3. 가능한 기어비 범위에서 변속기 입력축의 속도와 토크 값을 계산한다.
4. 내장된 엔진과 전동기의 자료를 이용하여 구현 가능한 최대의 동력 분배비를 계산한다.
5. 동력분배비를 최소값에서 최대값까지 변화시키면서 각각의 동력분배비에 대한 엔진의 동력 요구량과 전동기의 동력 요구량을 구한다.
6. 동력원들의 각 작동 조건에서의 연료소모량을 단일 성능지수를 이용하여 하나의 목적함수로 표

시한다.

7. 기어비와 동력분배비에 대해 2변수 최적화 문제를 풀어서 목적함수인 단일 성능지수를 최소화 하는 기어비와 동력분배비를 결정한다.

이상의 최적화 과정을 통하여 구성된 주행 제어 알고리즘의 FUDS모드에서의 주행 시물레이션 결과를 Fig.6,7에 나타내었다.

Simulation Results	
Fuel Economy (km/l)	35.1756
Initial SOC	0.6
Final SOC	0.568267
HC (g/km)	0.302696
CO (g/km)	2.2591
NOx (g/km)	0.744162

Fig. 6 Driving Simulation Result of FUDS Road Cycle

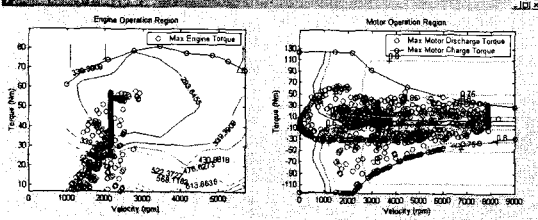


Fig. 7 Operation Region of Engine/Motor

Fig. 7에서 엔진의 작동영역이 엔진의 효율이 높은 점에 집중되어 있음을 알 수 있다. 초기 SOC(State of Charge)가 높은 상태에서 시물레이션을 행하였으므로 전동기의 효율 보다는 엔진의 효율이 높은 지점에서 작동하게 된다.

4. 시물레이션을 통한 단일 성능지수와 기존 알고리즘의 결과 비교

본 연구에서 개발된 단일 성능지수의 유효성을 평가하기 위해서 CVT를 장착한 동급의 내연기관 차량 및 기존의 알고리즘(2)을 사용한 하이브리드 차량과의 주행 시물레이션을 수행하였다. 시물레이션에 사용된 하이브리드 차량의 제원은 Table1과 동일하며, 내연기관 차량의 제원은 Table 2에 표시되어 있다.

Table 2. Spec. of Each Component of Hybrid Vehicle

	Spec. of each module
Engine	1.9L Saturn SOHC SI engine
Transmission	Metal Belt CVT
Vehicle Mass	Gear Ratio [2.416~0.443] 1053 kg

Table 3에서 보여지듯 단일 성능 지수를 이용한 최적화 알고리즘이 적용된 주행제어 알고리즘을 장

착한 하이브리드 차량은 기존 하이브리드 차량에 비해 34%, 일반 내연기관 차량에 비해서 133%의 연비 향상 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 엔진 차량에 비해 하이브리드 차량은 소모하는 전기 에너지량이 추가 되므로 실제의 연비 향상 효과는 두 차량의 연비를 비교해 볼 수 있는 공정한 지표를 기준으로 평가되어야 한다.

Table 3. Simulation Results of FUDS Road Cycle

	Fuel Economy (km/l)	HC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	End SOC
HEV 1	35.2	0.3023	2.2591	0.7441	0.568
HEV 2	26.3	0.3480	2.004	0.3940	0.566
Engined Vehicle	15.1	0.4111	4.1939	0.6448	N/A

HEV1 : Parallel HEV using single performance index

HEV2 : Parallel HEV using conventional algorithm

5. 결론

1. 하이브리드 차량에서 엔진의 연료 소모와 전기 에너지 소모량을 하나의 목적함수로 표현할 수 있도록 단일 성능지수를 개발하였다.
2. 단일 성능 지수를 이용하여 연료 소모를 최소화 하도록 변속비와 엔진/전동기의 동력분배비를 결정하는 주행제어 알고리즘을 개발하였다.
3. 제시된 단일 성능 지수를 적용한 주행 제어 알고리즘은 기존의 엔진 차량이나 기존의 하이브리드 차량용 주행제어 알고리즘을 채택한 차량에 비해 개선된 성능을 보임을 시물레이션을 통하여 알 수 있다.

후기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음

참고문헌

- (1) J.R. Bumby, Forster, November 1987, "IEE PROCEEDINGS, Vol. 134, Pt. D, No. 6
- (2) National Renewable Energy Laboratory, USA, 2001, Advanced Vehicle Simulator ADVISOR ver 3.1
- (3) C.Bourne, P.Faithfull, C.Quigley, 1996, "Implementing control of a parallel hybrid vehicle", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 17, No. 5/6 (Special Issue)
- (4) 전순일, 조성태, 박영일, 이장무, 2000년도 추계학술대회, "무단변속기 장착 병렬형 하이브리드 차량의 다중모드 주행제어 알고리즘", 자동차공학회