

# 버스용 병렬형 하이브리드 동력전달계의 개발 (III) 제 3 편 : 최적 주행 제어 알고리즘

## A Development of Parallel Type Hybrid Drivetrain System for Transit Bus Part 3 : Optimal Driving Control Algorithm

조 한 상\*, 이 장 무\*, 박 영 일\*\*  
Hansang Jo, Jangmoo Lee, Yeongil Park

### ABSTRACT

Described in this paper is an optimal driving control algorithm which was focused on the improvement of fuel economy and the minimization of pollutant emissions in the parallel type hybrid drivetrain system for transit bus. For the energy balance among components such as engine, induction machine and battery, the algorithm for power split ratio determination is proposed. When it is implemented in the hybrid electric control unit(HECU), using the sub-optimal method and the approximate technique, it is possible to save the memory, to shorten the calculation time, and to achieve the efficient driving actually. A Shift strategy for automated manual transmission is the other side of the driving control algorithm. It enables to select the optimal gear by using several shift maps which were predefined from the proposed method in this paper. As a results of driving simulation, it is proved that these algorithms make the hybrid drivetrain system to reduce the fuel consumption and emissions considerably and to have the ability to the efficient use of battery.

주요기술용어 : Optimal driving control algorithm(최적 주행 제어 알고리즘), Hybrid drivetrain system(하이브리드 동력전달계), Power split ratio(동력분배비), Shift strategy(변속전략), Driving simulation(주행 시뮬레이션)

### Nomenclature

$C_{real}$  : available capacity of battery, Ah

DOC : depth of charge

$Q_e$  : used capacity of battery, Ah

T : transmitted torque

$\lambda_{PSR}$  : power split ratio

$\rho_i$  : weighting factor

$\omega$  : velocity of rotating shaft

\* 정회원, 서울대학교 기계설계학과

\*\* 정회원, 서울산업대학교 기계설계학과

## 1. 서 론

하이브리드 차량과 같은 이중 동력 공급 시스템의 가장 큰 이점은 두 동력원들 간의 동력 분배에 대해 유연성(flexibility)을 부여할 수 있다는 것이다. 이러한 융통성은 목표 차량의 동력전달계에 대하여 그 특성들을 가장 최적화할 수 있도록 한다. 특히 본 연구 대상 차량과 같은 병렬형 하이브리드 차량은 각 구성 요소들을 통합하여 제어함으로써 시스템 전체의 최대 효율을 얻을 수 있는 지능적인 제어 전략(control strategy)이 반드시 필요하게 된다.<sup>1~4)</sup> 이러한 제어 전략이란 여러 파라미터들(요구 출력, 주행 조건, 배터리 잔존 용량, 주변장치들로의 공급 동력 등)과 각 요소들의 특성에 대한 함수로서, 동력원들로부터 동력전달계에 어떻게 동력들이 적절히 분배되어 공급되는지를 결정해 주는 알고리즘이라 말할 수 있다. 또한 자동화 변속기(AMT : Automated Manual Transmission)나 자동 변속기(A/T : Automatic Transmission) 등을 사용하는 동력전달계의 경우 언제 어떻게 변속할지에 관한 변속 제어 전략도 여기에 모두 포함된다.<sup>4~7)</sup> 따라서 개발 대상 차량은 설계 초기부터 이러한 전략들을 세밀하게 구성해야만이 하나의 완전한 시스템으로서 그 임무를 수행할 수 있다.

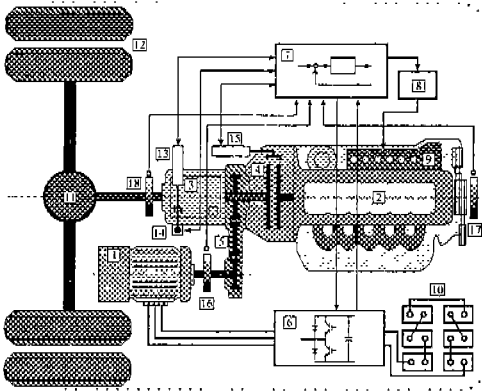
하이브리드 차량 동력전달계의 기본적인 동력 선정과 설계 윤곽이 결정되면, 설계자는 각 성능들간의 우선권(priority)을 제시하여 설계하고자 하는 시스템의 특징을 결정 짓게 된다. 본 연구는 연비 효율 향상과 배기가스 최소화에 초점을 맞춘 하이브리드 모드 주행 제어 알고리즘 개발을 목표로 한다. 이를 위하여 여러 성능 목표에 대한 상대적인 중요성을 결정하며, 연비 효율, 전동기 효율, 배터리 사용량 그리고 배기가스

특성들의 균형점을 선택하기 위하여 하이브리드 모드로 주행시 두 동력원들의 최적 동력 분배비 결정 알고리즘을 개발하였다. 또한 대상 차량의 주행 특성을 위한 변속 시점을 결정하여, 주행 상황과 조건에 따라 성능 목표들이 최적화된 단수를 선택할 수 있게 해줄 수 있는 자동화 변속기의 변속 전략을 구성하였다. 마지막으로 이미 개발된 차량 성능 해석 프로그램인 POTAS-VPS (Powertrain Transmission Analysis Software for Vehicle Performance Simulation)<sup>8)</sup>에 전동기와 배터리 등의 성능 모델링과 해석 모듈을 추가하여, 주어진 주행 조건에 대한 성능 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해서 개발된 주행 제어 알고리즘의 타당성을 검증해 보았다.

## 2. 하이브리드 동력전달계의 성능 모델링

### 2.1 병렬형 하이브리드 동력전달계의 구성

병렬형 하이브리드 차량의 구성도는 Fig.1에서 나타낸 바와 같이 동력원으로써 기존의 엔진과, 배터리로 구동되는 전동기를 동시에 사용하며, 변속 장치로는 공압을 이용한 자동화 변속기가 적용되었다. Table 1은 이러한 하이브리드 차량이 구현할 수 있는 주행 모드를 나타낸 것이다. 하이브리드 동력전달계의 각 요소들과 연결되어 있는 하이브리드 전자제어기(HECU : Hybrid Electric Control Unit)는 고성능 DSP(Digital Signal Processor) 칩을 사용하여, 인버터 제어 이외에 자동화 변속기에 장착된 공압 솔레노이드 밸브와 엔진 부하량 제어를 직접 제어하게 된다. 따라서 HECU는 궁극적으로 차량 주행상태와 운전자의 명령에 대하여 차량 전체를 최적의 성능과 효율을 나타내게끔 통합적으로 제어한다.



- 1: induction machine 2: diesel engine
- 3: manual transmission 4: clutch
- 5: connection gear 6: inverter
- 7: main controller 8: engine load actuator
- 9: fuel injector 10: battery pack
- 11: differential gear 12: wheels
- 13: select cylinder 14: shift cylinder
- 15: clutch actuator 16: tooth(motor)
- 17: tooth(engine) 18: tooth(vehicle)

Fig.1 Schematic diagram for parallel hybrid drivetrain

## 2.2 구성요소들의 성능 모델링

하이브리드 동력전달계에 대한 구성요소들의 성능 모델링은 배터리와 전동기를 제외한다면 대

부분 일반 내연기관 차량에 대한 성능 모델링과 동일하다.<sup>4,8,9)</sup> 즉 엔진은 각 부하량별로 미리 얻어진 여러가지의 정상상태 성능곡선들을 이용하였으며, 엔진의 가속과 온도에 의한 영향을 보정하였다. 또한 각종 보조장치(accessory device), 기어열 및 최종감속 기구등에서 발생하는 동력전달손실들도 각각의 특성을 고려하였으며, 차량의 휠에 작용하는 부하들도 관성저항, 구름저항, 공기저항 그리고 등판저항 등으로 구분하여 적용하였다. 한편 전동기의 성능 모델은 그의 입출력 동력, 토크 그리고 효율로 표시된 에너지 모델을 사용하였다. 전동기의 성능, 즉 토크와 회전속도 특성(전자기적인 효과, 자기 플럭스 특성)과 전류의 과도 현상 등의 내부 동역학은 전동기의 효율 곡선에 포함시켜 고려하였다. 따라서 본 해석에 사용된 효율 선도는 배터리에서 공급된 전기 에너지를 전동기 출력축의 기계적 일로 변환하는 효율 전체를 대표하게 된다.<sup>3,4,9)</sup>

그러나 배터리의 거동을 정확히 예측하는 것은 다음과 같은 이유로 비교적 상세한 모델링이 요구된다. 첫째로 차량이 배터리로만 주행할 시와 같이 매우 높은 방전율이 요구될 때, 혹은 차량이 급제동시와 같은 매우 높은 충전율을 나타낼 때 등과 같이 배터리의 작동 조건이 매우 심하게 변하기

Table 1 Driving mode of parallel hybrid vehicle

Dr. Mode	Application Region	Clutch	I/M Range	Motor Torque	Ref.
Engine Start	• Engine starts	Engaged	N	$\geq 0$	by Motor
Engine Mode	• High speed (Engine high Eff.)	Engaged	D	$= 0$	
Motor Mode	• Vehicle start, Low speed • High speed/Low torque	Disengaged	D	$\geq 0$	
Hybrid Mode	• Middle/High speed • High torque, Max Eff	Engaged	D	$\geq 0$	
Energy Regeneration	• Downhill drive • Braking	Engaged Disengaged	D	$\leq 0$	Small Large
Battery Charge	• Low Battery	Engaged	N	$\leq 0$	by Engine

Table 2 Several calculation methods of battery DOC

	Characteristics
Shepherd model	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Expressed the relation between battery voltage and current directly</li> <li>▶ Difficult to measure coefficients of battery characteristic equation</li> </ul>
Peukert SOC model	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Must be used with the A-h method</li> <li>▶ Calculate the available A-h from the average discharge current</li> </ul>
Fractional Discharge model	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Experimental equation from the power density and discharge time</li> <li>▶ Extract coefficients using quadratic curve fit from the result of each battery test</li> </ul>
National Logarithm model	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Must be used with the A-h method</li> <li>▶ Calculate the available A-h from the average discharge current</li> </ul>
Energy-SOC model	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Basic A-h method</li> <li>▶ Low precision level if it is applied to the electric car or hybrid car of which discharge currents are change frequently</li> </ul>

때문이다. 다음으로 배터리 내부에서 일어나는 전기 화학적 반응(electrochemical process)들은 충전상태(Depth of Charge : DOC), 충전전율, 온도, 사용기간, 크기 그리고 사용 기술등 매우 많은 변수들과 관계되기 때문이다. 따라서 동력전달계의 시뮬레이션시 정확한 수학적, 전기 화학적 모델링을 사용하지 않으면서도, 근사적으로 주행시의 배터리 거동을 예측하는 모델들이 많이 개발되어 왔으며, 이들을 요약하면 Table 2와 같다.<sup>3,10~12)</sup> 이들은 대부분 전류 적산에 의한 Ah(Ampere-hour) 방식과 같이 사용하며, 이때 Ah 방식의 원리는 배터리의 전체 사용 가능 Ah 용량  $C_{Real}$  과, 출력 전류를 시간에 대해 적분한 사용된 Ah 용량  $Q_e$  와의 비를 배터리 사용량으로 정의하고 있다. 따라서 배터리의 잔존용량 DOC는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C_{Real}} = 1 - \frac{\int i_{current} dt}{C_{Real}} \quad (1)$$

이때  $C_{Real}$  은 미래의 배터리 방전 전류의 거동에도 관계되는 변수가 되므로, 실제 해석에는 이를 보완해 줄 수 있는 모델 혹은

실험적인 근사식 등과 병행해서 쓰고 있다. 본 연구의 주행성능 해석기법에서는 배터리 종류와 용량에 따라 사용자가 Table 2의 5 가지 배터리 모델중 하나를 선택해서 사용하고, 배터리의 온도에 의한 영향을 스스로 보상할 수 있도록 하였으며, 노후와 자기방전에 의한 효과는 사용자가 입력할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 이들 중 전기자동차와 하이브리드 차량의 성능 해석 등에 가장 널리 사용되어지는 Peukert SOC Model을 식 (1)과 함께 사용하였다.

### 2.3 연비 성능 해석 프로그램의 개요와 흐름도

하이브리드 차량의 연비 성능 해석 방법은 차량의 주행조건, 즉 차량의 요구속도와 요구가속도가 미리 주어진 시간간격마다 입력되면, 이를 엔진에 매핑(mapping)시켜 각종 파라미터들을 계산하는 것이다. 이때 동력전달계의 손실들은 주행저항, 관성손실, 변속기 손실, 엔진 주변장치들의 사용동력, 엔진 내부손실들을 모두 포함한다. 10분 혹은 그 이상의 주행 사이클 해석시 변속과도 상태에 의한 연료소비율의 영향은 전체의 3% 이하로 작으므로 본 해석에서는 이

들의 효과를 무시하였다.<sup>5)</sup> 또한 전동기의 작동점에도 차량의 주행조건을 매핑시켜 배터리 사용량 등도 계산할 수 있으며 이때 전동기 손실, 배터리 충전전 손실 등도 모두 포함된다.

한편 본 해석에 사용된 프로그램은 다양한 변속기(자동변속기, 무단변속기, 수동변속기 등)를 사용한 동력전달계와 특수한 동력전달계(하이브리드 등)들을 장착한 차량에 대하여 전반적인 성능을 예측할 수 있는 시뮬레이션 패키지인 POTAS-VPS Version 2.0이다.<sup>4,8)</sup> 이것의 특징으로는 동력전달계의 각 구성요소들이 모듈별로 구분되어 입력될 수 있도록 하여 여러가지 조합에 대한 성능 예측을 손쉽게 처리할 수 있다는 점이다. 또한 자동변속기나 무단변속기에 대한 변속전략 수립이 가능하며, 하이브리드나 전기 자동차의 경우는 주행제어 알고리즘 수립 등에 적용할 수 있다는 점이 그 장점이다. Fig.2는 본 프로그램의 흐름도이며, 이 중 기동성능과 관계된 부분은 이미 전편을 통해 설명되었으므로 본 연구에서는

생략하기로 한다.<sup>9)</sup>

연비 효율에 관한 성능 해석은 차량 휠에서부터 동력원들 쪽으로 계산이 진행되며, 연료 소비량, 배기가스와 배터리 사용량 등이 최종 결과로 출력된다. 이때 자동화 변속기의 변속 전략과 하이브리드 모드 주행시의 동력 분배비 결정 알고리즘이 적용되며, 이를 매순간 확인하도록 한다. 한편 후에 설명될 최적 주행을 위한 동력 분배비 선도나 변속 선도들도 위의 계산과정을 그대로 이용하여 얻을 수 있도록 하였다.

## 2.4 주행 사이클

현재 주행 사이클은 주행 환경, 차량의 종류, 차량의 임무 그리고 사용 국가 등에 대해서 매우 다양하게 개발되어 있다. 이 중 전기자동차와 하이브리드 차량의 연비 및 배기가스 특성을 평가하기 위해 주로 사용되는 주행 사이클은 중·대형 내연기관 차량의 연비와 배기가스 측정을 위한 FUDS(Federal Urban Driving Schedule)와 FHTS(Federal Highway Test Schedule),

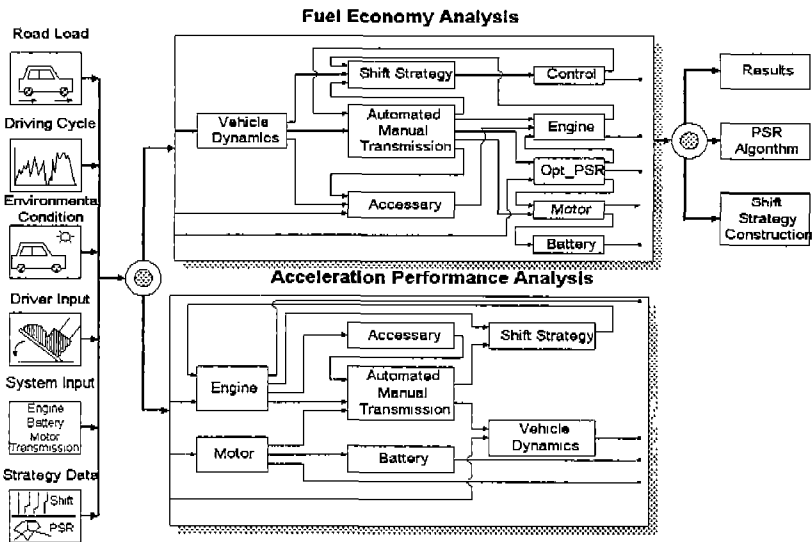


Fig.2 Overall system modeling for performance analysis

이들을 보완하고 단순화한 SFUDS (Simplified FUDS) 등이 있으며, 이들과는 별도로 전기 자동차의 시험을 위해 개발된 것으로 SAE J227, 버스와 관련된 주행 사이클로서 미국 도시 대중 교통청(UMTA: Urban Mass Transportation Administration)에서 정한 ADB(Advanced Design Bus) 사이클 등이 있다.<sup>3,13)</sup>

본 연구대상 차량은 시내버사이므로 UMTA ADB 사이클을 선택하였으며, 이는 도심 주행 형태에 따라 다시 Central Business District(CBD), Arterial Cruising (ART) 그리고 Suburban Commuter (COM) 의 세 가지 부분으로 나뉜다. 여기에는 1 마일당 7번 정지의 CBD 사이클, 1 마일당 2번 정지의 ART 사이클 그리고 최대 속도 구간인 1번의 COM 사이클의 조합으로 구성되어 있다.

### 3. 하이브리드 동력전달계의 주행제어 알고리즘 개발

#### 3.1 하이브리드 모드 주행 제어 기법 - 최적 동력 분배비 결정 알고리즘

본 연구대상 동력전달계의 주행 방식 중 하이브리드 모드 주행은 다음과 같은 여러 단계의 과정을 거쳐 주행 동력을 발생한다.

① 현재 운전자의 의지인 가속 페달량 (accel pedal stroke)과 상태량(엔진, 전동기, 차량속도)들이 센서로부터 입력된다.

② 입력된 가속 페달량으로부터 변속기 입력축에서 요구되는 동력들의 합을 계산한다.

③ 변속기 입력축 속도와 요구 동력량으로부터 각 동력원들이 분담해야 할 동력의 비(power split ratio)  $\lambda_{PSR}$  을 계산한다.

☞ 동력원으로 엔진만을 사용시 :

$$\lambda_{PSR} = 100\%$$

☞ 동력원으로 전동기만을 사용시 :

$$\lambda_{PSR} = 0\%$$

☞ 두 동력원을 모두 사용시 : 동력 분배비 결정 알고리즘을 선도를 이용하여 주어진 주행조건상에서  $\lambda_{PSR}$  을 계산

④  $\lambda_{PSR}$  에 의해 엔진의 동력 분담량이 결정되면 엔진 성능곡선을 통하여 실제의 엔진 부하량 계산

☞ 엔진의 과도상태 보정과 주변장치 손실을 계산

☞ 엔진 부하량 제어기로 입력하여, 요구되는 엔진 동력이 출력되게 함

⑤  $\lambda_{PSR}$  에 의한 전동기의 동력 분담량이 결정되면, 연결기어비를 고려하여 요구되는 전동기 출력 토크를 계산

☞ 전동기 제어기로 입력하여 정확한 전동기 요구 토크를 출력

⑥ 결과적으로 주어진 운전자의 가속 페달량과 변속기 입력축 속도에 대해 정확한 요구동력이 동력 분배비에 의해 출력됨

두 동력원의 동력 분배비를 결정하기 위한 기법은 Bumby, Somuah 및 Sutherland<sup>14,15)</sup> 등에 의하여 보고된 바가 있다. 그러나 이들은 모두 승용차용 하이브리드 동력전달계에 적용된 것이다. 따라서 본 연구대상 차량과는 동력전달계, 주행 개념 그리고 주행 방식 등에 많은 차이가 있으므로, 이들과는 다른 새로운 동력 분배비 결정 기법이 필요하다. 운전자가 입력한 가속 페달량에 따라 두 동력원이 그에 상응하는 동력원을 발생시키는 것이 본 하이브리드 모드 주행의 가장 근본적인 목표이며, 동일한 가속 페달량이 입력되었는데도 불구하고 주행조건에 의하여 차량 출력이 다르게 나타난다면 주행 제어에 대한 의미가 달라진다. 따라서 본 연구에서는 운전자가 요구하는 차량의 출력을 가능한 한 충실히 반영하기 위하여 변속기의 현재단수를 입력자료로 사용하지 않았으며, 또한 동력전달계 출력축에

서 요구되는 토크와 주행부하 등 차량 조건이 동력 분배비를 결정하는데 고려되지 않는다. 또한 자동화 변속기의 변속 시점은 다음 절에서 설명될 변속 전략 수립 과정을 통하여 역시 결정되기 때문에, 동력 분배비 결정 알고리즘과 변속 전략은 서로 독립적으로 구성된다.

동력 분배비  $\lambda_{PSR}$ 이 각 동력원들의 효율을 가장 최적화하는 값으로 결정되기 위하여, 다음과 같은 목적함수를 선정하여 이를 최소화하는 방법을 선택하였다.

*Minimize Object Function*

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \rho_i \Phi_i = \Phi_{Current}(\omega_m, T_{in}) \quad (2)$$

where

$$i = BSx, motor\_eff$$

$$\Phi_{BSx} = \left( \frac{\Psi_{current} - \Psi_{min}}{\Psi_{max} - \Psi_{min}} \right)^2 \text{ and}$$

$$\Phi_{motor\_eff} = \left( \frac{\Psi_{max} - \Psi_{current}}{\Psi_{max} - \Psi_{min}} \right)^2 \quad (3)$$

- ▶  $BSx$  :  $BSFC, BSNO_x, BSCO, BSHC$  etc
- ▶  $\Psi$  : Efficiency Parameters
- $\rho_i$  : Weighting Factors

이때 엔진의 효율 지표  $\Psi$ 로 선정된 연비 효율  $BSFC$  (Brake Specific Fuel Consumption,  $g/kw \cdot h$ )는 단위시간, 단위 출력당 사용되는 연료 소비량을 나타내며, 대표적인 유해 배기가스인  $NO_x, CO, HC$  등에 대한 특성들을 나타내는  $BSNO_x, BSCO, BSHC$  등도 이와 유사하게 단위시간, 단위 출력당 배출되는 배기가스량을 나타낸다. 또한 전동기에 대해서는 그 동력전달 효율을 그대로 효율 지표로 이용하였다. 따라서 엔진에 대한 목적함수  $\Phi_{BSx}$ 들에 사용된 현재 주행 조건에서의 효율지표  $\Psi_{current}$ 는 가능한 한 전체 효율지표의 최소값  $\Psi_{min}$ 에 가까워지고, 반대로 전동기에 대한 목적함

수  $\Phi_{motor\_eff}$ 에 대해서는  $\Psi_{current}$ 가 최대값  $\Psi_{max}$ 에 가까워지도록 동력분배비  $\lambda_{PSR}$ 이 선정되어야 함을 알 수 있다. 또한 목적함수들은 모두 무차원화하여 물리량이 서로 다른 시스템 효율들을 비교할 수 있도록 하였으며, 각각에 대한 가중치를 서로 다르게 부여함으로써 최적화 대상들에 대한 차별화가 가능하도록 하였다. 그러나, 배기가스 효율에 대한 목적함수는 동력계(dynamometer) 실험 등으로 여러 매칭들을 수행하여 배기가스 특성을 최적화한 후 적용이 가능하므로, 현재 본 연구에서는 이들을 포함시키지 않았다. Fig.3은  $\lambda_{PSR}$ 를 결정하는 과정을 나타내는 흐름도이다.

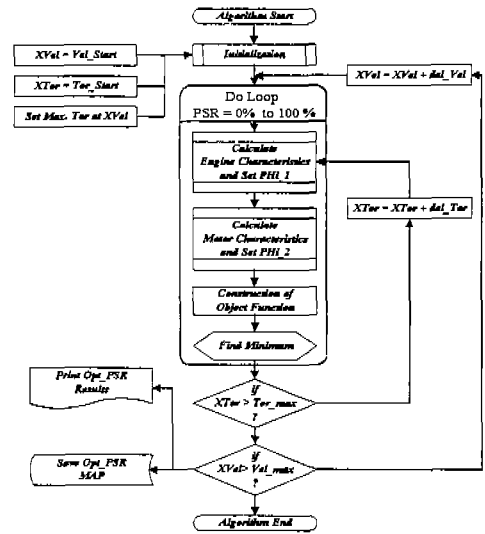


Fig.3 Flowchart for calculation of optimal power split ratio

이때  $\lambda_{PSR}$ 은 전체 요구 토크  $T_{Tot}$ 에 대한 엔진 토크  $T_{Eng}$ 의 비로 정의되며, 전동기에서의 요구 출력 토크를  $T_{Mot}$ 라 할때,  $\lambda_{PSR}$ 이 결정되면 두 동력원에서 출력되어야 할 토크들은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$T_{Eng} = T_{Tot} \times \lambda_{PSR} \quad (4)$$

$$T_{Mot} = T_{Tot} - T_{Eng} = (1 - \lambda_{PSR}) \times T_{Tot} \quad (5)$$

그 결과로 Fig.4는 변속기 입력축에서의 속도 영역과 토크 영역 내에서  $\lambda_{PSR}$ 을 구한 결과를 나타낸 것이며, Fig.5는 이때의 엔진 부하량을 나타낸 것이다. 이들을 본다면 고속, 고토크 영역은 엔진의 부담이 높으며, 반대로 저/중속 저토크 영역은 전동기의 부담이 상대적으로 커진다는 것을 알 수 있다.

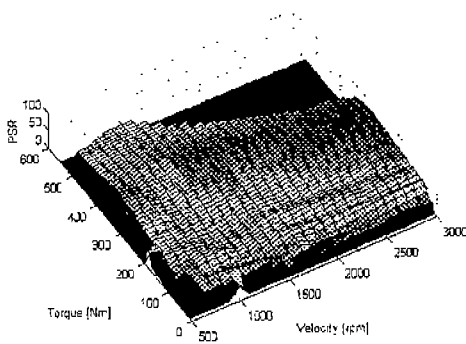


Fig.4 Optimal power split ratio map ( $\rho_2 / \rho_1 = 1.0$ )

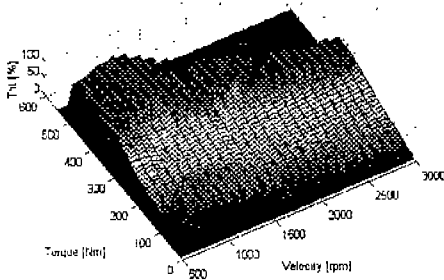


Fig.5 Engine load(throttle) from optimal power split ratio ( $\rho_2 / \rho_1 = 1.0$ )

한편 하이브리드 차량 설계시 거쳐야 할 초기 성능해석은 전편들에서 언급했듯이 기

동성능 해석과 연비 효율/배기가스 분석 단계이다.<sup>9)</sup> 본 절에서는 기동성능 분석에 사용되었던 입력자료들을 그대로 사용하여 연구 대상에 대한 연비 효율과 배기가스 분석 시뮬레이션을 수행해 보았으며, 역시 동급 내연기관 차량의 성능과 비교하였다. 본 해석에 사용된 기본 가정은 다음과 같으며, 더욱 상세한 나머지 입력 자료들은 참고문헌들을 참조하였다.<sup>4,8,9)</sup>

▶ 하이브리드 모드, 최적 동력 분배비 결정 알고리즘 이용

☞ 매 순간마다 동력 분배비를 직접 계산

▶ 내연기관 차량 전체 중량 : 6794 kg

☞ 순수 차량 중량 6739kg, 운전자 55kg

하이브리드 차량 전체 중량 : 7744 kg

☞ 배터리 무게 : 750 kg, 전동기+제어기 무게 : 200 kg

▶ 자동화 변속기의 변속시점 결정 : 우선 엔진의 최대 출력시점에서 변속

☞  $We = 2980$  rpm (단 1→2단 변속시는 2900 rpm)

☞ 아직 최적 변속 전략을 사용하지 않음

▶ 일정 등판 경사도 - 평지 주행 조건

▶ 배터리 사용량 계산 - Single Peukert's Model을 사용

▶ 주행 환경 - 주간 주행, 고정 승객부하(seated passenger load), 충분히 예열된 엔진

▶ 주변장치 손실 - 발전기, 파워 스티어링, 기타 손실 등을 고려,

☞ 에어컨, 팬 등의 손실은 고려하지 않았음

▶ 전동기 결합장치의 기어비는 1.500으로 감속

▶ 하이브리드 모드시의 엔진 결합 시점 : 800 rpm

☞ 엔진의 불완전 연소구간을 피하기 위하여 발전시 전동기만 사용

Table 3은 두 비교 대상 차량에 대한 연



Table 3 Results of fuel economy and emission analysis (UMTA urban driving cycle)

	F/E (Km/L)	NOx (g/Km)	CO (g/Km)	HC (g/Km)	DOC (%)
Case 1: Base E/G (168 HP)	3.62	6.18	6.16	3.73	-
Case 2: Hybrid (120HP+53HP)	5.15	4.44	4.65	2.75	82.6
Error (%)	+42.3	-28.2	-24.5	-26.3	-

비 효율/배기가스 분석을 수행한 결과이다. 이때 엔진 자료중 입자 배출 가스(particulates)에 관한 정보는 입수하지 못하였으므로 본 해석에서는 제외하였다.

위 결과에서 알 수 있듯이 주행거리 약 22.54km인 UMTA ADB Cycle을 동일한 조건에 대하여 주행하였을 경우, 기존의 내연기관 차량에 대하여 하이브리드 차량의 연비 효율은 약 42% 증가하였고, 각종 배기가스 배출량은 약 24~28% 정도 감소된 것으로 계산되었다. Fig.6~Fig.11은 각 주행상태를 나타내는 것들로서, 우선 Fig.6은 두 차량의 속도와 그때의 자동화변속기 단수를 나타낸 것이다. 각 차량과 시스템에 대한 최적 변속 전략과 이코노미 모드(economy mode) 변속 선도들은 다음절에서 적용되었고, 본 절에서는 우선 임시로 선정된 파워 모드(power mode) 선도를 두 차량 모두 동일하게 적용하였으므로 그 결과는 당연히 같게 계산된다. 주행 패턴은 빈번한 출발과 정지를 반복하는 CBD에서 3단까지 주행하며, ART에서는 4단까지 그리고 최대 속도 구간인 COM에서 5단까지 변속하며 주행한다는 것을 알 수 있었다. Fig.7은 두 차량에 대하여 각각 엔진 회전수와 그때의 엔진 부하량을 나타낸 것이다. 하이브리드 차량에 장착된 엔진이 내연기관 차량의 엔진보다 상당히 작은 용량을 갖고 있음에도 불구하고, 대체로 동일하거나 다소 낮은 엔진 부하량을 사용하여 주행한다. 따라서 이들로 인하여 연비 특성 등이 개선되었음을 알 수 있다. 한편 Fig.8은 엔진과

전동기에서 출력되는 토크들의 경향을 비교한 결과를 나타낸 것이며, Fig.9는 하이브리드 차량의 출력 토크들을 각 주행 구간별로 구분하여 확대한 결과들이다. 내연기관 차량은 상당히 높은 토크들을 출력하여 본 사이클을 주행하므로 엔진에 대한 부담이 높고, 따라서 연비 효율이나 배기가스 특성도 낮아질 수밖에 없다. 그러나 하이브리드 차량의 경우 이러한 엔진의 부담을 전동기가 분담하여 동시에 출력을 발생시키기 때문에 엔진의 출력 토크가 그만큼 줄어들어지며, 따라서 엔진에 대한 특성들이 개선되는 것을 알 수 있다. 또한 차량의 제동시 전동기 토크가 큰 음의 값을 가지는 것은 전동기 제어가 이때의 제동력을 회생하여 배터리에 전달해 주는 과정을 보여주고 있다. 그러나 본 계산 과정중 배터리에 대한 안전을 위하여 제동력 회생 동력을 모두 충전하지 않고 일정량 이상을 저항기 등으로 소산(dissipate)시킨다고 가정하였으며, 이 제한값을 상당히 엄격하게 적용하였기 때문에 Fig.10에서 보는 바와 같이 제동시의 배터리 DOC 양이 크게 증가하지는 않았다. 배터리 DOC 사용량은 요구 차량 가속도의 크기에 비례하여 COM 주행일 경우 가장 급격한 배터리 DOC 감소가 발생되며, CBD의 경우가 가장 완만한 경향을 나타낸다. 마지막으로 Fig.11은 동력 분배비를 나타낸 것으로서 초기 발진시는 전동기만을 사용하므로 0의 값을 갖고 나머지 대부분의 경우 엔진의 동력 분담이 40~50% 이내에서 바뀌면서 주행하는 것을 알 수 있으며, 차량

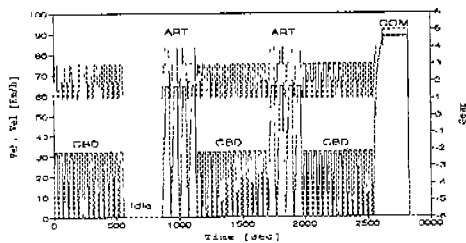
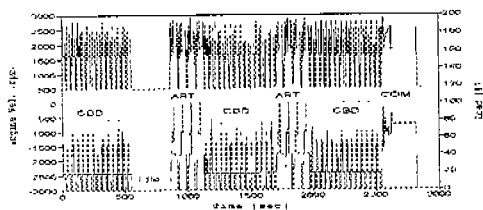
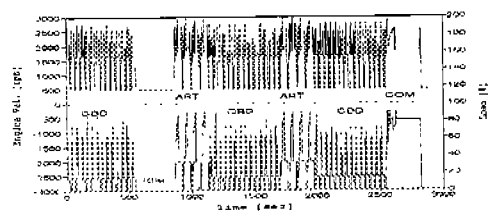


Fig.6 Simulation result - vehicle velocity & gear for UMTA urban driving cycle

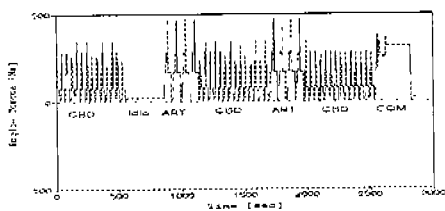


(a) engine vehicle

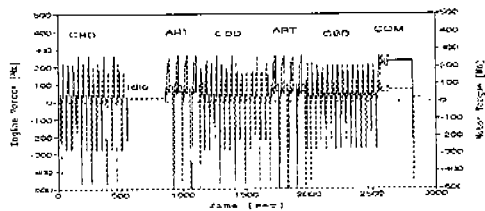


(b) hybrid vehicle

Fig.7 Simulation result - engine velocity & load

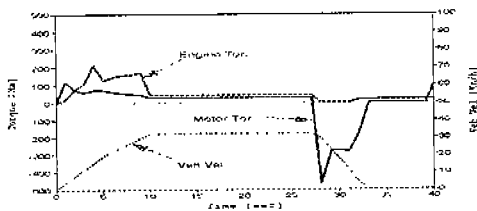


(a) engine vehicle

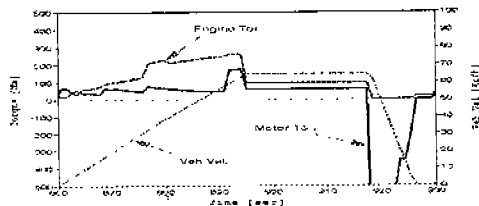


(b) hybrid vehicle

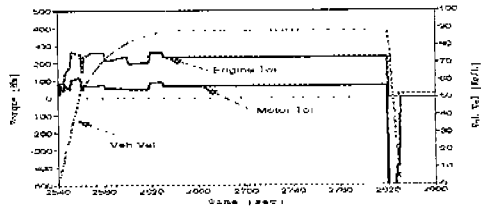
Fig.8 Simulation result - engine & motor torque



(a) CBD



(b) ART



(c) COM

Fig.9 Simulation result - engine & motor torque of hybrid vehicle

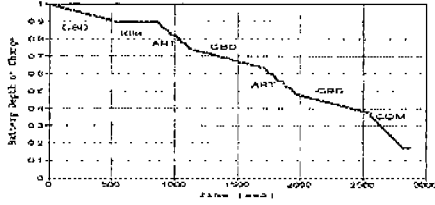


Fig.10 Simulation result - battery DOC

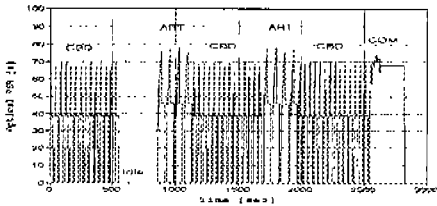


Fig.11 Simulation result - optimal PSR

가속도가 비교적 큰 COM의 경우는 70% 동력 분배비를 일정하게 유지하여 요구되는 차량 속도를 만족시킴을 알 수 있다.

### 3.2 최적 동력 분배비 결정 알고리즘의 구현

앞절과 같은 최적화 방법을 이용한다면 변속기 입력축 동력에 대한 동력 분배비를 매 순간마다 구할 수 있다. 그러나 이를 실차의 HECU에 구현하기 위해서는 많은 기억장소와 계산시간이 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이를 실제로 구현할 수 있도록 다음과 같은 준-최적화 기법(sub-optimal technique)<sup>15)</sup>과, 최소자승 오차법(least square error method)을 이용하여 얻어진 곡면을 복합적으로 사용하는 방법을 제시하였다.

우선 준-최적화 기법은 엔진과 전동기의 최대 효율 영역과 가용영역을 고려하고 동력원의 특성 등의 부가요소를 포함한 작동 범위를 선정하는 것이다. Fig.12는 변속기

입력축에서의 속도와 토크에 대하여 이와 같은 작동 범위를 나타낸 것이다. 이때 영역 구분을 위한 경계값들은 동력 분배비 선도인 Fig.4와 Fig.5를 참고로 선정된다.

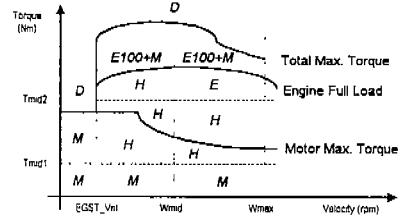


Fig.12 Sub-optimal control operating regions

① M 영역 : 전동기만 사용됨, 엔진 부하량은 0 %

▶ 차량 출발과 저속/중속/고속 구간 중 배터리에 무리가 없고, 엔진 사용시 낮은 연료소비 효율과 함께 배기가스 배출이 많은 저토크 구간

② E 영역 : 엔진만 사용됨, 전동기 요구토크는 0 Nm

▶ 고속 고토크 구간, 엔진의 전부하 성능곡선 이하 구간

③ H 영역 : 엔진과 전동기를 동시에 사용하는 하이브리드 구간

▶ 중/고속, 중토크 구간 - 최적 동력 분배비 알고리즘을 적용

④ E100+M 영역 : 엔진 최대 출력과 전동기를 사용하는 구간

▶ 엔진은 전부하 출력으로 고정되며, 전동기로 부가적인 토크를 추가

▶ 전동기가 동력을 보조하는 하이브리드 구간 (power assisted hybrid)

⑤ D 영역 : 작동할 수 없는 구간

한편 구간 경계값들과 H영역에서의 동력 분배비들은 고정된 것이 아니라, 차량 상태 특히 배터리 용량 변화에 대처할 수 있도록 하였다. 즉 배터리 충전량이 보통일 때는 기존의 가중치를 사용함으로써, 원래의 기능인 주행거리 연장 기능(range extender

operation)을 갖도록 한다. 또한 과충전 시에는 전동기에 대한 가중치를 크게 하여 엔진의 연료 대체 기능(petroleum substituting operation)을 강화하는 방향으로 동력 분배비를 선정하게끔 하였다. 배터리 상태가 다소 부족한 경우에는  $\omega_{mid}$  나  $T_{mid1}$ ,  $T_{mid2}$  등이 작아짐으로써, 하이브리드 구간을 축소하여 전동기에 대한 부담을 줄이도록 하였다. 마지막으로 배터리 상태가 한계값 이하로 줄어들었을 때는 더이상 하이브리드 모드로 주행하지 않고 엔진 모드로 주행하며 배터리를 충전하게 된다.

한편 하이브리드 구간에서 사용되게 될 최적 동력 분배비도 실시간 계산과 기억용량 절약을 위하여 다음과 같은 3차원 곡면으로 근사시켜 사용되었다. 근사 방법은 최소 자승 오차법을 사용하였으며, 여러 다양한 함수들을 적용하여 그 오차를 비교해 본 결과 다음과 같이 2차 다항식(quadratic polynomial)으로 표현된 곡면이 가장 적절한 것으로 판단되었다. 사용된 곡면은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\lambda_{PSR} = a\omega^2 + bT^2 + c\omega T + d\omega + eT + f \quad (6)$$

위 곡면에 사용된 계수 a~f 들은 동력 분배비 결정시 목적함수의 가중치에 따라 모두 다른 값을 가지며, 최적 동력 분배비들의 실제 값들과의 표준편차는 6% 이내의 값을 가진다. Table 4는 최적 동력 분배비를 직접 계산하여 주행하는 방법과 준 최적

화 과정, 곡면 근사법등을 사용한 경우에 대한 차량 성능 영향도를 시뮬레이션을 통해 얻은 결과이다. 이때 모든 오차들은 동급 내연기관 차량의 성능에 대한 것이나, 배터리 사용량에 대한 오차들은 최적 동력 분배비를 그대로 사용하였을 때와 비교하여 얻은 것이다.

그 결과로 연비 효율이나 배기가스 특성의 개선 효과는 최적의 경우보다 다소 감소되었으나, 배터리 사용량을 약 30% 정도 줄이는 효과를 얻었다. 이는 앞절의 알고리즘이 고속 고토크가 요구되는 구간에서도 엔진의 연료 소비를 줄이기 위하여 무리하게 전동기를 사용한다는 것을 나타내고 있다. 따라서 정상 주행시 어느 한 순간에서는 엔진과 전동기 효율이 가장 최적인 점에서 차량을 주행시키는 것이 가장 이상적이라 볼 수 있으나, 차량의 전체 주행 성능면에서는 오히려 준-최적화 방법과 H영역에서의 곡면 근사법을 동시에 사용하여 동력 분배비를 결정하는 것이 더 합리적이라고 판단된다. 따라서 전구간에 대한 최적 동력 분배비를 적용한 것과 비교하여 이러한 근사 기법들과 구간 분할 등을 사용한다면, 큰 시스템의 효율 변화 없이 원활한 하이브리드 모드 주행을 수행할 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 최적 주행을 위한 변속전략 수립

자동화변속기의 변속 전략은 근본적으로 자동

Table 4 Effects of algorithm for optimal power split ratio

	Base IIC	Optimal		Sub-optimal Only		Sub-optimal + LSCE	
	engine vel.	Result	Error (%)	Result	Error (%)	Result	Error (%)
E/F (Km/h)	3.62	5.15	+42.3	4.90	+35.4	4.35	-20.2
NOx (g/Km)	6.18	4.44	-28.2	5.19	+16.0	5.24	-15.2
CO (g/Km)	6.16	4.65	-24.5	4.80	-22.1	4.76	-22.7
HC (g/Km)	3.73	2.75	-26.3	2.90	-22.3	2.91	-22.0
DOC (%)	-	82.6	0	53.2	-35.6	52.6	-36.3

변속기와 동일하게 구현될 수 있다. 즉 변속 전략을 수립하고 이를 HECU에 저장시켜서 정해진 변속시점이 되면 변속 신호를 각 변속 작동기(shift actuator: pneumatic cylinders)들에게 공급하여 변속을 수행하게 된다. 다만 하이브리드 동력전달계는 동력원으로 엔진 이외에 전동기도 사용하기 때문에, 변속 전략 수립시 엔진과 전동기 모두의 효율을 고려한 변속 선도가 작성되어야 한다는 것이 그 차이점이 된다. 따라서 앞절의 동력 분배비 결정 알고리즘과 마찬가지로, 변속 전략 수립시에도 다음과 같은 최적화 기법을 사용하기로 한다.

Minimize

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \rho_i \Phi_i = \Phi_{Current}(\omega_{vehicle}, \theta_{tht, driver}) \quad (7)$$

where

$$i = BSx, motor\_eff$$

$$\Phi_{BSx} = \zeta_i \left( \frac{\Psi_{t,n} - \Psi_{t+\Delta t, n+1}}{\Psi_{max} - \Psi_{min}} \right)^2 \quad \text{and}$$

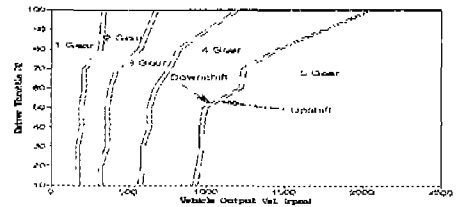
$$\Phi_{motor\_eff} = \zeta_i \left( \frac{\Psi_{t,n} - \Psi_{t+\Delta t, n+1}}{\Psi_{max} - \Psi_{min}} \right)^2 \quad (8)$$

- ▶  $\Psi$ : Efficiency Parameters ,  
BSx : BSFC, BSNOx, BSCO, BSHC etc
- ▶  $\Delta t$ : Shift Time,
- $\zeta_i$ : Compensation Factor ,
- $\rho_i$ : Weighting Factor

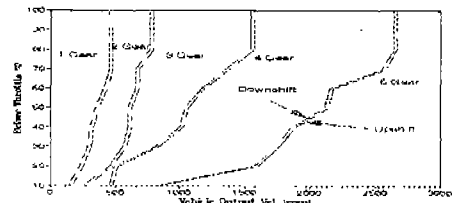
이때  $\zeta_i$ 는 무차원화시의 단위 보정계수이며,  $\rho_i$ 는 설계자가 제시하는 가중치이다. 이들의 비에 따라 엔진 파라미터들과 전동기의 효율의 비가 결정된다. 현재의 부하량과 차량 속도가 입력되면 본 알고리즘은 우선 현재 시간  $t$ 에서 현재 단수  $n$ 에 대한 효율 지표  $\Psi_{t,n}$ 들을 계산한 다음, 변속에 소요되는 시간  $\Delta t$ 가 경과된 후 다음 단수에서의 효율지표  $\Psi_{t+\Delta t, n+1}$ 들을 다시 계산해 낸다. 이들을 이용하여 무차원화된 목적함수를 구성해 나가며, 이것이 최소가 되는 점을 변속 시점이라고 판단하게 된다. 한편 주행 모드에 따

라 구해진 변속 선도가 모두 다르며, 이들을 모두 구분하여 HECU의 기억장소에 각각 저장해야 한다. 따라서 변속 전략 구성시 엔진 모드에 대한 목적함수는 전동기 효율에 관한 가중치를 0으로 선택하며, 전동기 모드시는 이와 반대로 입력한다. 그리고 하이브리드 모드 주행시 변속 선도는 모든 가중치들을 모두 고려해야 한다. 이러한 모든 과정은 앞절에서 설명된 최적 동력 분배비가 결정된 후 수행하였다.

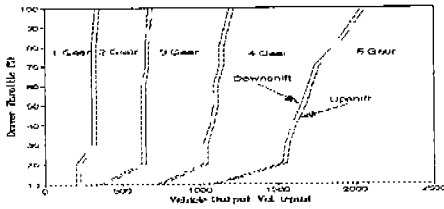
Fig.13은 이러한 과정을 통해 얻은 변속 선도를 나타낸다. 이들을 비교해 보면 엔진 모드시의 변속점들이 가장 낮고, 전동기 모드의 변속점들이 가장 높은 것을 알 수 있다. 그 이유로 엔진의 최대 효율점은 비교적 낮은 회전수에서 존재하는 반면, 전동기는 상대적으로 높은 회전수에 존재하기 때문이다. 하이브리드 모드시는 이들의 최대 효율점들을 절충하여 변속점들을 계산하였기 때문에, 엔진 모드와 전동기 모드의 변속점들의 중간 정도에 존재함을 알 수 있다. 한편 운전자가 80% 이상 가속 페달량을 입력한 경우는 시



(a) Engine mode



(b) Motor mode



(c) Hybrid mode

Fig.13 Economy mode shift maps

스텝 효율보다 차량의 가속 성능을 더 요구하는 의미로 해석할 수 있으므로, 이때에는 두 동력원들의 최대 출력점에서 변속하도록 하였다.

Table 5는 앞절에서 해석되었던 차량과 주행조건을 동일하게 적용시키고, 위에서 구한 변속 전략을 사용하였을 경우, 전체 시스템 효율의 개선 효과를 나타낸 것이다. 이들 결과에서 알 수 있듯이 최적 변속 전략을 적용한 경우, 동력 분배비를 근사화함으로써 줄어들었던 여러 시스템 효율들을 거의 대부분 복구할 수 있음을 나타낸다. 또한 최적 동력 분배비를 그대로 사용한 것과 비교하여 배터리 사용량은 여전히 감소하였음에도 불구하고, 연비 효율은 거의 유사한 값까지 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 변속 전략이 엔진과 전동기 모두의 효율을 가장 적절하게 작동시키고 있을

을 나타내는 것이다.

#### 4. 결 론

지능적인 제어전략은 병렬형 하이브리드 동력전달계에 있어서 그 성능을 결정짓는 중요한 요소이다. 이러한 제어전략중 동력 분배비 결정과 변속 전략 이 두가지가 전체 시스템 성능에 가장 지배적이다. 본 연구에서는 이를 위하여 이미 개발된 차량 성능 해석 프로그램인 POTAS-VPS에 전동기와 배터리의 성능 모델링과 해석 모듈을 추가하여, 주어진 주행조건에 따른 성능 시뮬레이션을 수행할 수 있게 하였다. 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

① 본 주행 제어 알고리즘에서 결정된, 운전자의 의지를 충실히 반영한 동력분배비는 각 동력원들의 효율들을 가장 최적화할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그 결과로 본 연구대상 차량은 하이브리드 모드로 주행시 기존의 내연기관 차량에 대해 40% 이상의 연비효율 향상과, 24~28% 정도의 배기가스 감소가 예상되었다.

② 동력분배비 결정 알고리즘을 실차의 HECU에 현실적으로 구현하기 위한 방안으로서, 구간 분할을 통한 준-최적화 기법과 근사기법 등을 제시하였다. 이들을 적용한

Table 5 Effect of shift strategy

	Base (IC engine veh.)	Optimal without shift strategy		Sub-optimal + LSCF without shift strategy		Sub-optimal + LSCF with shift strategy	
		Result	Error (%)	Result	Error (%)	Result	Error (%)
F/E (Km/L)	3.62	5.15	+42.3	4.35	+20.2	4.97	+37.3
NOx (g/Km)	6.18	4.44	-28.2	5.24	-15.2	5.21	-15.7
CO (g/Km)	6.16	4.65	-24.5	4.76	-22.7	4.56	-26.0
HC (g/Km)	3.73	2.75	-26.3	2.91	-22.0	2.79	-25.2
DOC (%)	-	82.6	0	52.6	-36.3	60.6	-26.6

결과 배터리 사용량을 많이 줄일 수 있으며, 시스템의 큰 효율 변화없이 원활한 하이브리드 모드 주행을 할 수 있음을 알았다.

③ 독립적인 자동화변속기의 변속전략 수립 기법을 개발하였으며, 그 결과로 하이브리드 차량의 각 주행모드에 따라 동력원들의 효율 특성이 최적화된 변속선도들을 제시하였다. 이를 이용한 주행 시뮬레이션 결과 배터리 사용량을 줄임과 동시에, 동력분배비의 근사화로 인한 시스템 효율 감소를 대부분 복구할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. C. Anderson and E. Pettit, "The Effects of APU Characteristics on the Design of Hybrid Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles", SAE Technical Paper SP-1089., No. 950493, pp.65-71, 1995.
2. L. Küng, A. Veyyini and K. Reichert, "Performance Optimization for the Electrical Drive System of the Hybrid III Passenger Car", Electrical-Vehicle-Symposium 12, Anaheim, USA, 1994.
3. J. Paterson, T. Lenoid and P. Drozd, "Hybrid Electric Vehicles - Final Reports", Efficiency and Alternative Energy Technology Branch, Natural Resources Canada, 1993.
4. 조한상, "하이브리드 차량 동력전달계의 설계와 주행 제어 알고리즘 개발", 서울대학교 공학박사 학위논문, 1998.
5. D. M. Kuzak, B. D. Shields, et al., "Powertrain Control Strategy Determination for Computer-Controlled Transmissions", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 8, No. 1, 1987.
6. 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, "자동변속기 기반기술에 관한 연구 - 2단계 2차년도 보고서", G7 차세대 자동차기술 개발, 통상산업부, 과학기술처, 1997.
7. 服部俊雄, "いすつアスカ用イ-シット'' 라이프`システム(EDS)の制御ロシ`ック", いすつ技報, 第72 号, pp.27-35.
8. 조한상, 임원식, 박영일, 이장무, "연비 효율과 기동성 해석을 위한 차량 동력전달계의 성능 시뮬레이션", 한국자동차공학회 논문집, Vol.7, No. 2, pp.408-423, 1999.
9. 조한상, 박영일, 이장무, "버스용 병렬형 하이브리드 동력전달계의 개발 (I) - 제 1 편 : 기동 성능과 영향도 분석", 한국자동차공학회 논문집, Vol.7, No. 4, 1999.
10. P. Chapman, M. Aston, "A Generic Battery Model for Electric and Hybrid Vehicle Simulation Performance Prediction", Special Publications SP2, Electric and Hybrid Vehicles, Int. J. Vehicle Design, 1982, pp. 82-95.
11. L. A. M. Donegan, R. Graaf, W. A. M. Visscher, "Theoretical Prediction of Electric Vehicle Energy Consumption and Battery State-of-charge during Arbitrary Driving Cycles", EVC Paper No. 8115, EVC Symposium VI, 1981.
12. C. M. Shepherd, "Design of Primary and Secondary Cells II. An Equation describing Battery Discharge", J. of Electrochem. Soc., 1965, pp. 644-657.
13. R. W. Zub, "Transit Bus Fuel Economy and Performance Simulation", SAE Paper No. 841691, 1984.
14. B. K. Bose, C. B. Somuah and H. A. Sutherland, "A Microcomputer-Based

- Propulsion Control System of a Hybrid Electric Vehicle", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. IE-31, No. 1, 1984.
15. I. Forster and J. R. Bumby, "Optimisation and Control of a Hybrid Electric Car", IEEE Proceedings, Vol. 134, No. 6, 1987, pp.373-387.
  16. G. H. Cole, "SIMPLEV : A Simple Electric Vehicle Simulation Program Version 2.0", DOE/ID-10293-2, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, Idaho, 1993.
  17. S. M. Aceves and J. R. Smith, "A Hybrid Vehicle Evaluation Code and Its Application to Vehicle Design", SAE Technical Paper SP-1089, No. 950491, pp.43-52, 1995.
  18. 윤대호, 설승기, 조한상 외, "하이브리드 차량 시스템 설계 기술 개발 - 2차년도 보고서", G7 차세대 자동차기술 개발, 통상산업부, 과학기술처, 1997.
  19. 조한상, 조성태, 박영일, 이장무, "동력 분배비 결정 알고리즘을 이용한 하이브리드 모드 주행 제어 알고리즘 개발", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp.707~711, 1997.