

## 병렬형 하이브리드 동력전달계의 성능 민감도 해석

### Performance Sensitivity Analysis of the Parallel Type Hybrid Drivetrain System for the Transit Bus

조성태\*, 전순일\*, 이장무\*, 박영일\*\*, 조한상\*\*\*  
Sung Tae Cho, Sun Il Jun, Jang Moo Lee, Yeong Il Park, Han Sang Jo

#### ABSTRACT

To analyze the correlation between drivetrain systems and to optimize the vehicle design with satisfying of the initial design objects, the performance sensitivity analysis through the iterative design procedure must be carried out. In this study, effects of the design parameters for the main components of the parallel type hybrid drivetrain system are analyzed by using the developed method of the vehicle performance simulation, and the basis of the optimal selection of the design parameters from the relation of design constraints and required performances is suggested.

In driving control of the parallel hybrid vehicle, power split ratio is the most important factor, and the improved drivetrain system can be constructed through the only change of the algorithm for determination of the power split ratio, which is strongly applicable to the driving patterns and the environments. Therefore, various techniques, such as the change of the weighting factors and the range extended algorithm, are suggested and evaluated in this paper.

주요기술용어 : Vehicle Performance Simulation Program(차량 성능 시뮬레이션 프로그램), Hybrid Drivetrain System(하이브리드 동력 전달계), Performance Sensitivity(성능 민감도), Power Split Ratio(동력 분배비)

#### 1. 서론

시스템간의 상호 작용을 분석하고 초기 설계 범위를 만족시키면서 차량의 설계를 최적화 하는 방향으로 유도하기 위해서는 설계 반복 과정을 통한 성능 민감도 해석이 반드시

시 병행되어야 한다. 엔진과 같은 전통적인 동력원과 비교하여 배터리와 전동기 등의 시스템들은 이러한 최적화 과정 중 종종 상반된 여러 특성들을 보여주는데, 설계자는 이러한 민감도 해석을 통하여 각각의 최적화된 특성 중 상대적인 중요성들을 비교하여 이들을 판단해야 한다. 즉 배기가스 배출량을 최소화하는데 초점을 맞춘 설계 차량의 성능은 배터리 수명을 극대화한 차량의 성능과는 매우 다른 차량이 될 것이다. 따라서 하이브리드 차량 동력전달계의 기본적인 동

\* 정회원, 서울대학교

\*\* 정회원, 서울산업대학교

\*\*\* 정회원, 현대자동차

력 선정과 설계 윤곽이 결정되면, 설계자는 각 성능들간의 우선권(priority)을 제시하여 설계하고자 하는 시스템의 특징을 결정지은 후, 성능 민감도 해석을 통하여 그 타당성을 검증해 보아야 한다. [1,4]

이를 위하여 본 논문에서는 차량에 대한 주행 성능 해석 기법[7,8]을 이용하여 하이브리드 동력전달계의 여러 설계요소들에 대한 성능 민감도를 해석하고, 주어진 설계 제약 조건들과 목표 요구 성능과의 관계로부터 가장 적합한 설계 파라미터들을 선정할 수 있는 근거를 제시하고자 한다. 본 연구대상 차량과 같은 중대형 차량용 하이브리드 동력전달계는 초기 설계 시 배터리와 전동기의 용량이 가장 큰 설계 제약 조건이 되므로 우선 배터리의 용량에 따른 성능 민감도를 먼저 수행한 후 전동기와 엔진의 용량에 따른 차량의 전체 성능 변화를 분석한다. 또한 엔진 온도에 따른 발진 시 클러치 결합 시점의 영향 분석을 통하여 하이브리드 주행 제어 알고리즘의 변화에 대한 민감도 해석을 수행하였다.

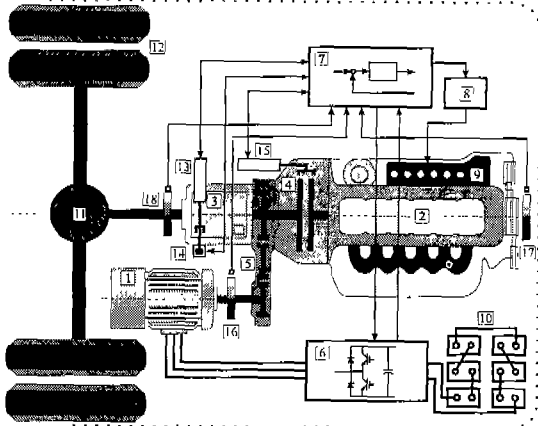
병렬형 하이브리드 차량의 주행 제어 알고리즘에 있어서 가장 핵심이 되는 것은 동력 분배비 결정 알고리즘이다. 이전 연구를 통해 제시된 동력 분배비 알고리즘[8,10]에서는 항상 동력원이 최대 효율인 상태에서 차량이 운행하는 것에 중점을 두고 개발된 결과 정상 주행 중의 엔진에 의한 내부 충전은 고려가 되지 않았으므로, 배터리 사용량이 비교적 많다는 단점이 있었다. 따라서 본 논문에서는 이를 개선하여 주행거리 연장에 중점을 둔 동력 분배비 알고리즘을 제시하고, 개발된 주행 성능 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 그 영향을 역시 평가해 보았다. 한편 하이브리드 차량에 있어서 엔진의 연료사용량

과 배터리 사용량은 일반적으로 반비례 관계를 나타낸다. 따라서 이들을 동일한 기준으로 비교하여 전체 차량의 효율성을 판단하려면 결국 주행 비용(cost)의 개념이 포함되어야 하며, 이는 공학 외적인 요인들에 의해 좌우된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 개념을 배제하고 순수하게 차량 성능 면에서 해석 결과의 분석을 수행하였다.

## 2. 성능 해석을 위한 연구 대상 차량의 모델링

본 연구에 적용된 대상차량은 6기통 디젤엔진과 벡터제어를 통한 교류 전동기를 동력원으로 하는 35인승 중형버스급 병렬형 하이브리드 차량이다. 본 차량 동력전달계의 구성도는 Fig.1에서 나타낸 바와 같이 동력원으로써 기존의 엔진과, 배터리로 구동되는 전동기를 동시에 사용하며, 변속 장치로는 공압을 이용한 자동화 변속기가 적용되었다. 하이브리드 동력전달계의 각 요소들과 연결되어 있는 하이브리드 전자제어기(HECU : Hybrid Electric Control Unit)는 고성능 DSP(Digital Signal Processor) 칩을 사용하여, 전동기의 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. 이에 따라 본 시스템에서는 병렬형 하이브리드 차량이 구현할 수 있는 전동기에 의한 엔진 시동과 발진, 전동기만의 단독 주행 모드, 엔진만의 단독 주행 모드, 엔진과 전동기의 동력을 동시에 사용하는 하이브리드 모드, 정지 시 배터리 충전을 위한 배터리 충전 모드 그리고 내리막길 주행과 제동

시 발생하는 에너지의 회수를 위한 에너지 재생 모드 등의 모든 주행 모드들을 구현할 수 있도록 하였다. [10]



- 1: induction machine 2: diesel engine 3: transmission
- 4: clutch 5: inlet gearing 6: inverter
- 7: main controller 8: throttle actuator
- 9: electric fuel injector 10: battery 11: differential gear
- 12: wheels 13: x-axis pneumatic actuator 14: y-axis pneumatic actuator 15: clutch pneumatic actuator
- 16: saw-tooth wheel for  $\omega_{mot}$
- 17: saw-tooth wheel for  $\omega_{eng}$
- 18: saw-tooth wheel for  $\omega_{veh}$

Fig.1 Schematic diagram for parallel type hybrid drivetrain

하이브리드 동력전달계에 대한 구성요소들의 성능해석을 위한 모델링은 배터리와 전동기를 제외한다면 대부분 일반 내연기관 차량에 대한 성능 모델링과 동일하다. [1,9] 즉 엔진은 각 부하량별로 미리 얻어진 여러가지의 정상상태 성능곡선들을 이용하였으며, 엔진의 가속과 온도에 의한 영향을 보정하였다. 또한 각종 보조장치(accessory device), 기어 열 및 최종감속 기구등에서 발생하는 동력 전달 손실들도 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 사용하였으며, 전

동기의 성능과 전류의 과도 현상 등의 내부 동역학은 전동기의 효율 곡선에 포함시켜 고려하였다. 마지막으로 배터리 모델은 일반적으로 가장 많이 적용되는 전류 적산에 의한 Ah(Ampere-hour) 방식과 단일 푸커트식(single peukert's equation)을 조합하여 적용하였다. [1]

본 연구를 위한 차량의 성능 해석은 크게 기동성능과 연비 효율 해석의 두가지로 구분되어진다. 기동성능 해석은 동력원들의 최대 출력 조건에 대하여 차량의 가속 능력을 평가하는 것이며, 연비효율 해석은 역으로 주어진 차량의 주행조건에 대하여 연비, 배기가스 배출량, 배터리 사용량 등 동력원들의 효율을 분석하는 것이다. Fig.2는 이러한 하이브리드 차량의 성능 해석을 위한 프로그램의 개요도이다. [10]

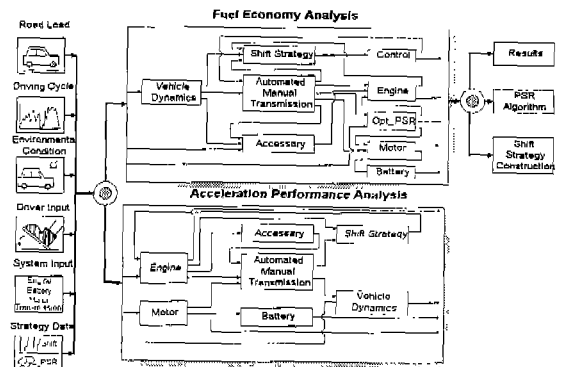


Fig.2 Schematic diagram for performance analysis

이러한 하이브리드 동력전달계에 대한 본절에서의 모든 해석 결과들은 이전 연구에서 수행된 성능 해석시 사용된 하이브리드 차량의 입력 자료를 기준으로 하였으며, 이들을 요약하면 Table 1과 같다.[7,8] 또한 동력 분배비 결정 알고리즘은 준-최적화 방법과 극면 근사법을 적용한 분배비 선도를 적용하였으며, 자동화 변속기의 각 주행 모드 변속 전략도 이전 연구에서 얻어진 변속 선도를

그대로 적용하였다. 한편 연비 효율 평가를 위한 주행사이클은 중/대형 버스용 도심주행 사이클인 UTMA ABD Cycle을 선택하였다. 이는 발진/제동이 잦은 도심형 주행인 CBD, 중속 구간인 ART, 고속/고토크 주행 구간인 COM 등으로 이루어져 있어 주행 제어 알고리즘의 성능평가에 적절하다.

Table 1 Input data for hybrid powertrain and vehicle

Components	Spec.	Data
Engine	Diesel	120HP
	Max. vel.	3000 rpm
	Max tor.	30 kgm
	Idle rpm	500 rpm
Battery	Lead Acid	12V 70Ah
	Charge efficiency	87%
	Number of battery	25
	Total weight	750kg
Vehicle Data	Tire radius	0.518
ETC	Frontal area	6.021
	Drag coeffi.	0.55
	Longitudinal coeffi.	0.015
	Total vehicle weight	7744kg
	Ambient temp.	15C
	Daylight driving	
	E/G start vel.	800 rpm
T/M	Shift duration	3.0 sec
	1st	8.19
	2nd	4.285
	3rd.	2.444
	4th	1.443
	5th	1.000
	Final Gear	4.100
	Max. efficiency	0.98
Motor/Inverter	Pole	4
	Total mass	200kg
	Max. power	39kw
	Max. vel.	6000rpm
	Max. tor.	207Nm
	Max. effi.	0.905
	Connection gear ratio	15

이들을 이용하여 얻어진 연비 효율/배기가스 분석 결과와 기동성능 분석 결과를 모두 정리하면 다음 Table 2와 같으며, 이들 결과들은 성능 영향도 평가를 위한 기준 자료로 사

용되었다. 이때 차량의 제동에 의한 에너지 재생 모드는 주행 시물레이션시 모두 고려되었으나, 동일한 주행 조건에서의 성능 비교를 위하여 주행중 발생할 수도 있는 내부적인 배터리 충전 모드나 외부 충전은 제외되었다. 한편 다음 장부터 제시될 모든 영향도 해석 결과들은 Table 2의 기준 성능 해석 결과에 대한 백분율로 나타냄으로써, 그 영향도를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

Table 2 Results of the performance analysis by using original input data

	Spec.	Result	Condition
Fuel Economy and Emission Analysis	F/E (Km/L)	4.97	Hybrid Mode Driving
	NOx (g/Km)	5.21	UMTA ADB 1 Cycle
	CO (g/Km)	4.56	2880 sec, 22.54Km
	HC (g/Km)	2.79	PSR
DOC Used (%)	DOC Used (%)	60.6	Sub-optimal+LSCF Include Shift Strategy -Economy Mode
	Max. Vel (Km/h)	113.43	Hybrid Mode Driving 100% Accel Pedal Stroke Power Mode Shift Map Not Include Shift Transient Effects
Acceleration Performance Analysis	Max. Accel (m/sec <sup>2</sup> )	3.30	
	Time at 30Km (sec)	4.04	
Time at 80Km (sec)	29.27		
Max.Vel at 8% Grade (Km/h)	49.75		
Max.Vel at 20% Grade (Km/h)	18.55		

### 3. 설계 인자에 대한 성능 영향도 평가

#### 3.1. 배터리 시스템의 크기에 따른 성능 영향도

대상 차량의 배터리 시스템은 1셀 당의 전압이 12V, 무게가 30 Kg인 납축전지 25개를 직렬로 연결한 것으로서, 전체 사용 전압은 300V, 무게는 750 Kg이다. 이는 차량 전체 무게의 약 10%정도를 차지한다. 이러한 납축전지는 그 에너지 밀도가 다른 에너지원에

비하여 상대적으로 작은 값을 가지므로, 배터리 시스템 전체의 충방전효율을 높이려면 배터리를 많이 사용하여 최대 동력 밀도의 손실(excursion)을 제한해야 한다. 그러나 배터리 시스템의 크기가 커지면 차량의 총 질량이 증가하게 되고 이는 다시 차량의 성능을 저하시키는 요인이 되므로, 차량의 설계 시 적절한 크기의 배터리 시스템의 선정이 필요하게 된다. 따라서 배터리 시스템의 크기의 변화에 따른 차량 성능의 영향을 해석해보고 그 결과를 Fig.3에 나타내었다. 여기서 가로축은 전체 차량 무게에 대한 배터리 시스템의 무게이며, 세로축은 1 Kg의 배터리 당 주행할 수 있는 거리를 나타낸다. 그 결과로 배터리 시스템 크기와 차량 주행 성능과의 상관관계는 이차함수 형태임을 알 수 있다. 이러한 결과가 나오는 이유는 배터리 시스템의 크기가 증가하게 되면 배터리 시스템의 무게도 늘어가게 되므로 일정 수준 이상으로 배터리 시스템이 커지게 되면 늘어난 배터리 에너지는 차량을 주행하는데 사용되기 보다는 늘어난 배터리 무게를 부담하는데 쓰이기 때문이다. 따라서 본 연구 대상 하이브리드 차량은 납축전지가 사용될 경우 배터리 시스템의 크기가 전체 차량 무게에 대하여 약 12% 정도면 가장 적절하다고 판단되

었다.

### 3.2 동력원들의 용량에 따른 성능 영향도

하이브리드 차량의 성능들을 극대화하기 위해서는 각각이 최적의 효율을 가지도록 두 동력원이 제어되어야 한다. 이를 위해서는 주어진 주행 조건에 대한 두 동력원들의 용량들이 여러 차량 성능들에 어떠한 영향을 주는지를 먼저 분석해 보아야 한다. 우선 전동기의 용량은 동일하게 유지하고 엔진의 용량만을 변경시켜 그 성능 영향도를 분석해 보기로 한다. 이전의 연구결과[7]를 바탕으로 선정된 120마력 엔진을 기준으로 하여, 터보차저를 부착한 140 마력 엔진, 그리고 기존 내연기관 차량에 장착된 엔진을 그대로 적용한 168 마력 엔진의 경우에 대하여 성능 시뮬레이션을 수행하였으며, Table 3은 그 결과를 나타낸 것이다. 이때 각각의 엔진 특성 자료 입력 시 아이들 상태는 동일하다고 가정하였으며, 역시 BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) 등의 특성도 동일하다고 가정하였다. 엔진의 용량이 증가할수록 차량의 전체 가속 성능 향상은 쉽게 예상할 수 있지만, 연비 효율이나 배기가스 배출량 그리고 배터리 사용량은 이것과 비례하지는 않는다는 것을 결과에서 알 수 있다. 특히 배출 가스 량들은 대부분 크게 증가했으며, 연비 효율과 배터리 사용량은 반비례 관계를 유지하지만 역시 그 경향이 일정하지는 않다. 그 이유는 엔진의 연비 효율 특성과 배기가스 특성 등이 매우 불균일한 분포를 가지고 있고, 주어진 동력 분배비 결정 알고리즘이나 변속 전략을 적용 시 하나의 동력원에 대한 효율이 아니라 두 동력원의 조합인 시스템 전체의 효율을 극대화하는 방향으로 주행 제어를 수행하기 때문에 두 동

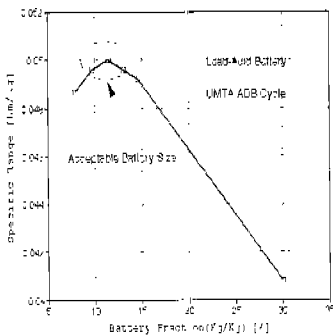


Fig.3 Battery size fraction vs specific range

력원의 사용량이 역시 동력원 각각의 용량과 비례하지 않기 때문이다.

Table 3 Effects of the engine size (%) - relative to the 120 HP base engine

Size (HP)	F/E	NOx	CO	HC	DOC Used
140	-4.36	+4.50	+10.70	+10.62	-12.25
168	+2.61	-2.59	+30.48	+26.67	+4.49

다음으로 엔진의 용량을 120마력으로 고정시키고 전동기의 용량만을 변경해가며 이것이 차량의 성능에 미치는 영향도를 분석하였다. 기준이 되는 전동기의 용량은 53 마력으로 정하였으며 이를 65 마력과 75 마력으로 증가시켰을 때의 결과를 Table 4에 나타내었다. 이때 역시 전동기의 용량이 바뀌더라도 그의 효율 특성은 엔진의 경우와 마찬가지로 그대로 유지된다고 가정하고 해석을 수행하였다. 그 결과로 전동기의 용량 증가는 전반적으로 차량의 가속 성능 증가와 함께 엔진의 연비와 배기가스 특성을 개선시킨다는 것을 알 수 있다. 그러나 역시 마찬가지로 이러한 성능 개선을 위해서는 배터리 사용량이 그만큼 더 늘어나야만 한다.

Table 4 Effects of the motor size (%) - relative to the 53 HP motor

Size (HP)	F/E	NOx	CO	HC	DOC Used
65	+2.43	-2.96	-0.17	-0.36	+7.23
75	+5.22	-6.01	-2.45	-2.58	+16.23

(a) fuel economy and emission performance

Size (HP)	Max. Vel	Max. Accel	30Km T	80Km T	8% Grade	20% Grade
65	+4.83	+32.12	-11.88	-11.17	+12.76	+20.38
75	+8.35	+43.64	-17.33	-19.03	+16.74	+34.39

(b) acceleration performance

마지막으로 두 동력원의 전체 출력량을 일정

하게 고정시키고 엔진과 전동기 용량의 비를 변화 시켜가며 성능 영향도를 분석해 보았다. 현재의 엔진 용량은 120 마력이며 전동기의 용량은 53 마력이므로 용량비는 0.442가 된다. 이를 변경시켜가며 시뮬레이션한 결과를 Table 5에 나타내었다. 그 결과를 보면 동력원들의 용량비가 약 0.15 이하인 경우에는 전동기의 출력만으로는 더 이상 차량을 출발시킬 수 없기 때문에 이 값이 용량비의 최저값이 된다. 또한 용량비가 0.7 이상이 되는 경우 배터리 소모량이 지나치게 늘어나서 정상적으로는 주어진 주행 사이클을 종료하지 못하게 된다. 용량비가 0.15에서 0.7 사이의 경우에 대해서는, 용량 비의 증가에 따라 전동기의 용량이 증가하므로 엔진의 연비 효율과 배기 가스 특성은 비례하여 향상되고 있으나, 역시 마찬가지로 배터리 사용량도 증가됨을 알 수 있다. 가속 성능은 초반 가속 성능을 좌우하는 전동기의 용량이 증가할 수록 역시 증가되는 경향을 가지고 있다. 본 대상차량에 선정된 엔진과 전동기의 용량비는 전반적인 차량 성능에 대하여 균형 있는 값으로 선정되었다는 것을 알 수 있다. 위와 같이 주어진 설계 제약 조건상에서 두 동력원의 용량을 선정 시 동일한 주행 조건상에서 여러 가지 동력원의 용량에 따른 전체 차량의 성능 해석이 선행된다면, 차량 목표 성능을 만족하는 적절한 동력 전달계를 설계할 수 있을 것이다.

Table 5 Effects of the ratio of motor/engine size (%)

(a) fuel economy and emission performance

E/G (HP)	Mo (HP)	Ratio	F/E	NOx	CO	HC	DOC Used
153	20	0.131	Vehicle Start Impossible				
140	33	0.236	-9.15	+10.86	+10.48	+11.56	-27.99
120	53	0.442	-	-	-	-	-
100	73	0.730	+3.26	-14.43	-9.44	-13.24	+46.90

(b) acceleration performance

E/C (HP)	Mot (HP)	Ratio	Max. Vel	Max. Accel	30Km T	80K m:T	8% Grade	20% Grade
153	20	0.131						
Vehicle Start Impossible								
140	33	0.236	-1.68	+3.64	+12.62	+6.56	-4.54	-8.79
120	53	0.442	-	-	-	-	-	-
100	73	0.730	+1.36	+31.06	-9.16	-5.40	-2.33	+12.45

3.3 차량 발진 시 주행 조건에 따른 클러치 결합 시점의 성능 영향도

디젤 엔진을 사용하는 등급의 내연기관 차량은 차량 발진 시 가장 많은 배기가스가 배출된다. 하이브리드 차량의 주행 제어 알고리즘에서는 이러한 상태 시 전동기를 사용하여 배기가스의 절감 효과를 얻도록 하였으며, 변속기 입력축 속도가 어느 범위 이상이 되면 발진 시의 전동기 모드는 운전자가 선택한 원래의 주행 모드로 변경되게 된다. 이때 선택된 주행 모드가 전동기 모드이면 주행 모드의 변환이 필요없으나 그 이외의 모드일 경우에는 반드시 클러치의 결합을 수반한 주행 모드 변경이 수행되어야 한다. 이러한 시점이 바로 클러치 결합 시점이 되며, 이들의 영향도를 연비 효율과 배기가스 측면에서 분석해 보았다. 우선 클러치 결합시점이 800 rpm으로 동일한 경우에 대하여 엔진이 정상적인 연소과정을 거칠 수 있는 출발 시(Hot Start)와 차량 초기 출발 시(Cold Start) 그리고 차량 초기 출발하면서 주위 온도가 기준 온도(15℃)에 대하여 10℃ 정도 낮을 경우에 대하여 그 영향을 분석한 결과가 Table 6에 나타나 있다. 이때 차량의 초기 출발 시의 엔진의 특성 변화와 함께, 주위 온도 변화에 따른 추가되는 엔진의 주변장치 손실과 배터리 특성들은 실험에서 얻어진 근사식들을 이용하였다.[1,9] 이러한 주행 조건의 경우 연료의 불완전 연소로 인하여 연비가 약 27% 정도, 배기가스 배출량이

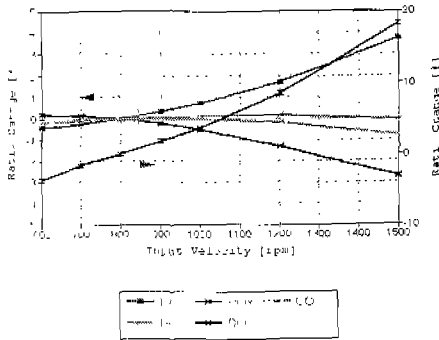
NOx는 약 31%, CO와 HC는 약 37% 정도 증가되는 것을 알 수 있으며, 이러한 성능 악화 정도는 엔진의 상태나 주행 환경에 따라 더욱 차이가 날 수 있다. 또한 주위 온도가 10℃ 정도 낮으면 여기에 약 3~5% 정도의 성능이 더 차이가 날 수 있다는 것을 보여주고 있다.

Table 6 Effects of the engine and the environmental condition

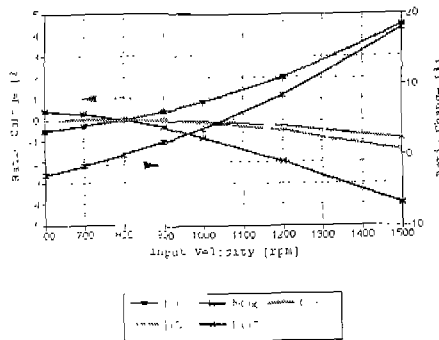
	F/E Km/L	NOx g/Km	CO g/Km	HC g/Km	DOC Used (%)
Hot Start, Base Condition	4.97	5.21	4.56	2.79	60.6
Cold Start	3.65	6.80	6.23	3.82	60.6
Cold Start, Ambient Temp = 5 °C	3.56	6.95	6.44	3.92	66.1

빈번한 출발이 많은 버스 등의 도심 주행에서는 전체 차량 성능에서 발진 시의 성능이 차지하는 범위가 더욱 커지며, 또한 노후한 엔진을 사용하는 경우나 불완전 연소가 많이 발생하는 차량 초기 운행 시, 혹은 주행 시의 주위 온도가 낮은 경우 등 비정상적인 엔진의 경우일 때에는 배출되는 배기가스 량의 대부분이 차량 출발 시에 나타나게 된다. 따라서 클러치 결합시점 즉 전동기 모드 발진이 종료되는 시점도 하이브리드 차량의 주행 제어 알고리즘의 중요한 선정 요소가 될 수 있다. Fig.4는 정상 주행 조건인 경우와 주위 온도가 낮고 차량 초기 출발인 경우 두 가지에 대하여 클러치 결합시점의 영향을 분석한 결과를 상대오차로 나타낸 것들이다. 전반적으로 두 가지 경우 모두 결합시점이 높아질수록 연비가 개선되며 배기가스 배출량은 줄어든다. 배터리 소모량이 늘어나는 정도가 약간 더 큰 경향을 보인다. 그러므로 배기가스 배출량 억제를 위하여 지나치게 결합시점을 높이면 오히려 전체적인 에너지 효율 면에서 손실이 늘어날 수도 있음을 알 수 있다. 따

다. 본 연구에서 선정된 클러치 결합시점은 엔진의 비정상 상태 시나 차량 출발시의 배기가스 배출을 제거하면서도 전체 시스템의 효율을 적절하게 유지시키는 값이 선택되었다.



(a) hot start, base condition



(b) cold start, ambient temp = 5 °C

Fig.4 Effects of the clutch engagement point (%)

#### 4. 동력분배비 결정 기법에 대한 성능 영향도 해석

##### 4.1 동력원 효율함수의 가중치에 대한 성능 영향도

운전자가 입력한 가속 페달량에 따라 동력원들이 그에 상응하는 동력원을 발생시키는 것이 하이브리드 모드 주행의 가장 기본적인 목표이며, 차량 성능이 가장 최적인 상태로 이러한 목표를 달성하며 주행하기 위하여 다

음과 같은 동력분배비 결정 기법 개념을 도입하였다. 이는 두 동력원의 효율에 대해 무차원화된 효율함수들의 합으로 표현된 목적함수를 최소화하는 상태에서의 동력비를 나타내는 것으로서 Fig.5와 같은 최적화 과정을 거쳐서 결정된다.

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \rho_i \Phi_i = \Phi_{Cur}(\omega_{in}, T_{TOT}) \quad (1)$$

이때 들은 엔진과 전동기의 효율지표에 대한 함수이며, 는 각 효율함수에 대한 가중치를 나타낸다. 결국 동력분배비는 전체 요구 토크에 대한 비로 정의되며, 위 식에서 목적함수가 최소값을 가질 때의 이 결정된다면, 결국 엔진과 전동기의 출력 토크는 다음 식으로부터 계산될 수 있으며, 이에 대한 상세한 정의는 참고문헌을 참조한다.[10]

$$T_{ENG} = T_{TOT} \times \lambda_{PSR} \quad (2)$$

$$T_{MOT} = T_{TOT} - T_{ENG} = T_{Tot} \times (1 - \lambda_{PSR}) \quad (3)$$

지금까지 하이브리드 주행에 대한 성능 해석 시 두 동력원의 효율함수 지표로서 엔진에 대해서는 연비효율(BSFC), 전동기에 대해서는 전동기 출력 효율을 선택하였으며, 각 효율함수의 정의는 식(4), (5)와 같다. 또한 이들 함수에 대한 가중치의 비는 1:1로 하였다.

$$\Phi_{ENG} = \left( \frac{\Psi_{Current} - \Psi_{min}}{\Psi_{max} - \Psi_{min}} \right)^2 \quad (4)$$

( $\psi_i$ : Efficiency Parameters of BSFC)

$$\Phi_{MOT} = \left( \frac{\Psi_{max} - \Psi_{Current}}{\Psi_{max} - \Psi_{min}} \right)^2 \quad (5)$$

( $\psi_i$ : Efficiency Parameters of Motor)

본 절에서는 이러한 가중치의 비에 대한 성능 영향도를 역시 주행 시물레이션에 의해 평가해 보았다. Fig.6는 그 결과를 나타낸 것으로서, 이러한 가중치에 따라 하이브리드



모드로 주행하는 방식도 다음과 같이 달라질 수 있음을 나타내고 있다.

■  $\rho_{MOT} / \rho_{ENG} = 0.0 \sim 0.25$  : 순수 엔진 모드와 유사, 장거리 고속주행 시

■  $\rho_{MOT} / \rho_{ENG} = 0.25 \sim 0.5$  : 에너지 절약형 하이브리드 모드, 전동기에 의한 배터리 사용을 최소화, 동력 보조용 하이브리드 차량(power assisted hybrid vehicle)

■  $\rho_{MOT} / \rho_{ENG} = 0.5 \sim 1.2$  : 석유 연료 대체형 하이브리드 모드, 엔진의 연료 소비를 최소화, 긴 도심 주행 시

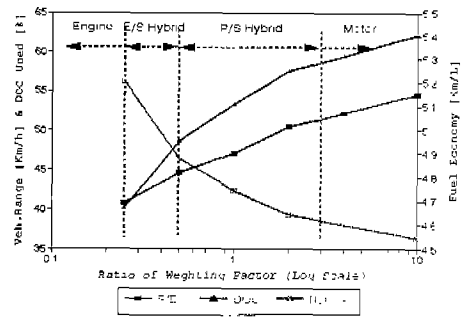


Fig.6 Effects of the weighting factor ratio (UMTA urban driving cycle)

■  $\rho_{MOT} / \rho_{ENG} = 1.2 \sim \infty$  : 순수 전동기 모드와 유사, 짧은 도심 주행 시

결국 동력원의 용량이 결정된 후의 세부 설계 단계로서 동력 분배비 상의 가중치를 변화시키면, 엔진의 연비 효율이나 배기가스 특성을 더욱 향상시키거나, 반대로 전동기의 배터리 사용량을 더욱 감소시킬 수 있다. 이는 제어 알고리즘의 변경으로도 차량의 주행 목적과 환경에 적응할 수 있는 하이브리드 동력전달계를 구성할 수 있음을 보여주는 것이다.

#### 4.2 주행거리 연장을 위한 동력분배비 결정기법

기존에 개발된 동력 분배비 결정 알고리즘 (Conventional Power Split Ratio : 이하 C-PSR, [8])의 경우, 항상 최대 효율로 차량이 운행하는 것에 중점을 두고 개발된 결과 주행중의 충전은 고려가 되지 않았다. 즉 미리 입력된 두 동력원의 효율을 주행중 비교하여 현재의 주행속도와 요구 토크에서 두 효율이 최적이 되도록 동력원의 분배비를 결정한다. 또한 제동시 에너지 회생을 통하여 소비된 배터리를 충전하도록 하였다. 그러나 제동 에너지 회생시의 손실, 회생에너지의

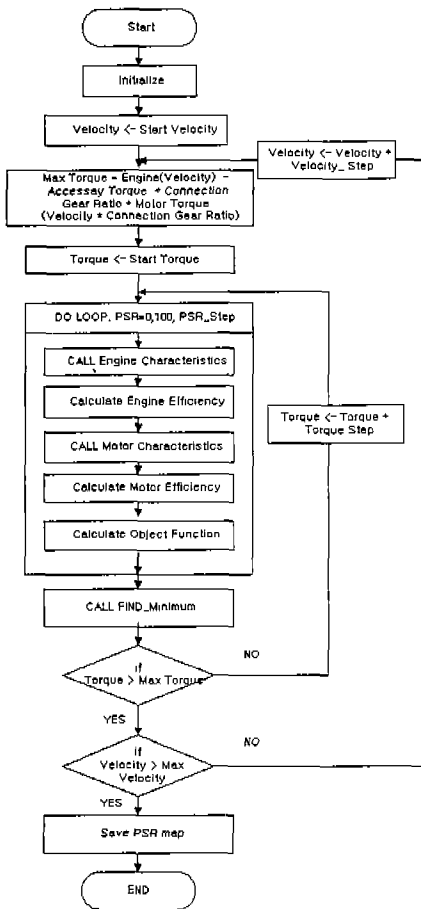


Fig.5 Flow chart for the calculation of the power split ratio - conventional method

제한조건 그리고 주행경로상의 특성 등에 의하여 배터리 사용이 지나치게 커질 가능성이 있다. 따라서 이러한 단점을 개선함으로써 주행거리를 확장하기 위하여 본 논문에서는 엔진의 여유 동력을 이용하여 효율적으로 배터리를 충전하는 알고리즘을 추가하였다. 단 이러한 주행중의 내부 충전은 현재의 요구 동력에 대해 엔진의 최대 동력이 더 큰 상태에서만 판단이 시작되며, 이때 각 동력원의 효율을 비교하여 내부 충전 작동이 전체 에너지 효율면에서 이익이라고 판단되는 경우로 제한된다. 이것을 주행거리 연장을 위한 동력분배비 결정 알고리즘(Range extended Power Split Ratio : 이하 R-PSR)이라고 한다. 이러한 경우 비록 주행중 충전이라도 엔진의 여유 동력을 이용하는 것이므로, 운전자는 주행성능의 저하를 전혀 느끼지 못한다. 특히 차량의 가속이 크게 필요한 구간에는 충전을 중지하고 엔진의 최대 동력과, 필요 시 전동기의 동력까지도 사용하여 요구되는 가속력을 낼 수 있도록 고려하였다. Fig.7은 R-PSR을 구성하는 순서도를 나타낸 것이며, 이것도 역시 Fig.5의 C-PSR에 대한 순서도와 동일하게 시스템 효율과 관계된 목적함수를 선정하여 이를 최소화하는 최적화 과정을 밟도록 하여 얻어진 것이다.

Fig. 8은 입력 속도와 요구 토크에 따라 얻어진 이들 두가지의 동력 분배비를 나타낸 것이다. C-PSR을 나타내는 (a)의 경우 입력 축의 속도가 1000rpm 이하이거나 요구 토크가 낮을 경우 동력분배비가 0으로, 이러한 경우 전동기만으로 동작하는 것을 알 수 있다. 또한 고속/고토크 영역으로 갈수록 엔진의 효율이 좋아지므로 동력분배비가 커짐을 알 수 있으나, 충전의 개념이 없으므로 전체적으로 100이상의 동력 분배비를 가지는 영역

은 없음을 알 수 있다.

그러나 R-PSR을 나타내는 (b)의 경우 입력 축의 속도가 1000rpm 이하이거나 요구동력이 낮을 경우는 역시 전동기의 동력만으로 운영을 하나, 중속/중토크 영역에서는 엔진의 여유 동력이 충분하므로 이 영역에서는 엔진의 동력으로 배터리를 충전하여 동력분배비가 상당히 높게 올라가는 것을 알 수 있다. 고속/고토크 영역에서는 운전자의 요구 토크가 크므로 충전이 중지되고 따라서 동력분배비도 다시 낮아지게 된다.

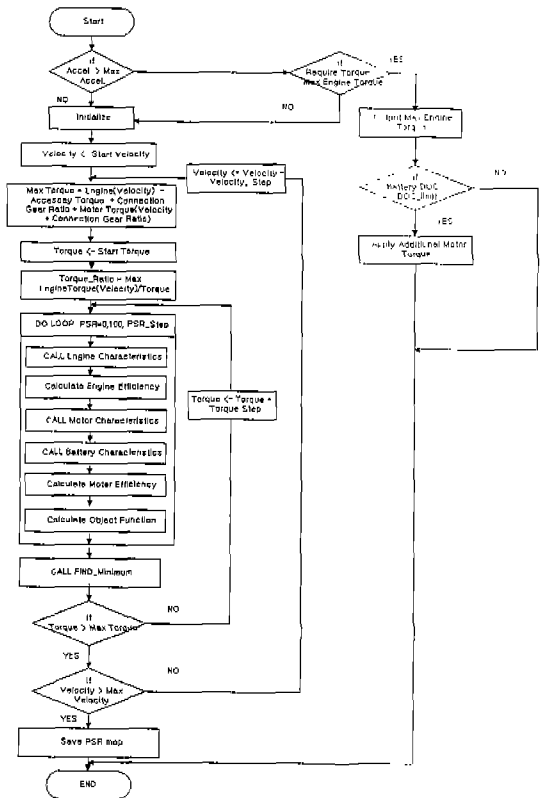


Fig.7 Flow chart for the calculation of the power split ratio - range extended

두 동력분배비 결정 알고리즘에 대한 성능 비교를 위하여 역시 연비 효율에 대한 주행 시뮬레이션을 수행하였다. Fig.9 Fig.10은 C-PSR과 R-PSR을 적용한 시뮬레이션 결과

를 나타낸 것이다. CBD 주행 시 C-PSR을 사용한 경우 엔진 사용률이 60%이하였으나, R-PSR을 사용한 경우 여유 동력으로 배터리 충전도 하므로 이것이 300%까지 도달하는 것을 볼 수가 있다. 즉 요구토크가 적은 구간에서 급가속 시가 아니면 배터리의 DOC양을 일정하게 유지하고 있음을 알 수가 있다. 좀 더 큰 토크와 가속력이 요구되는 ART에서는 엔진의 여유 동력이 적으므로 CBD보다는 동력분배비가 작게 된다. 배터리 DOC도 전체적으로는 1로 유지가 되나 급가속 중에는 어느 정도 저하 되는 것을 볼 수가 있다. COM 주행 시에는 요구 토크가

엔진의 최대 토크보다 크므로 엔진의 전체 동력을 이용하고, 또한 전동기의 동력까지 보조를 받아서 가속력을 유지하므로 동력분배비는 100이하로 내려가는 것을 볼 수 있다. 또한 가속을 위해 충전을 하지 않으므로 배터리 DOC가 감소하는 것을 알 수 있다. 전체 배터리 DOC의 변화량을 보면 C-PSR의 경우 재생제동을 제외하면 주행중 충전이 없으므로 계속 DOC가 감소한다. 따라서 주어진 사이클을 주행하고 난후 재주행을 위해서는 외부 충전이나 배터리 충전 모드(정지한 상태에서 엔진의 동력을 이용해 충전을 하는 모드) 등의 방법이 필요하다. 그러나

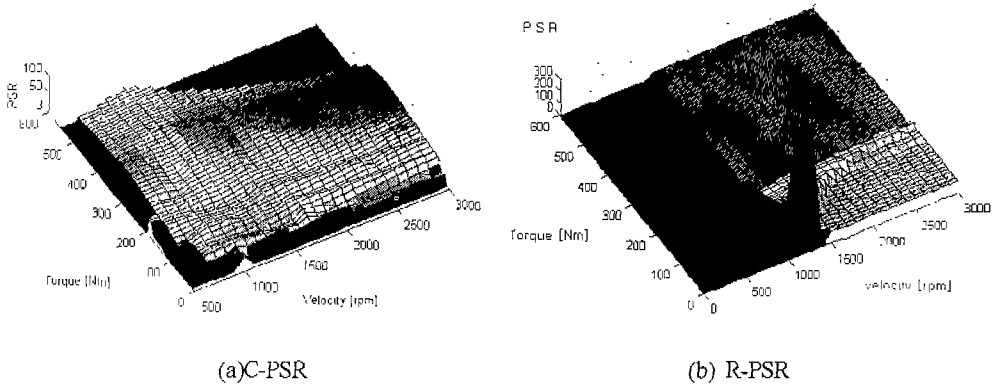


Fig.8 Power split ratio map

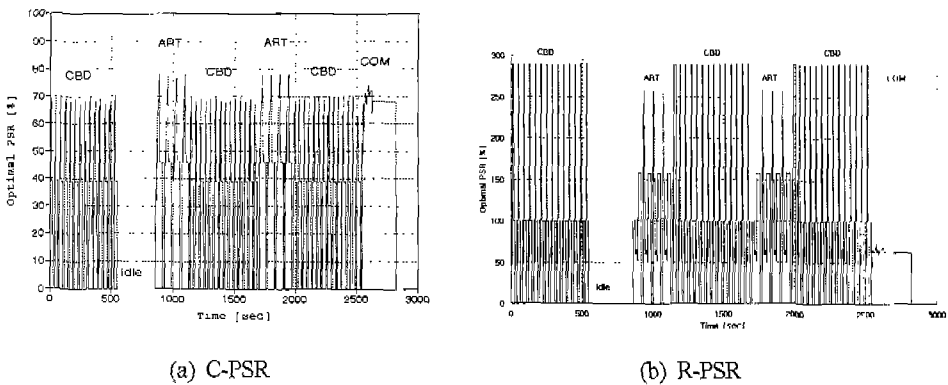
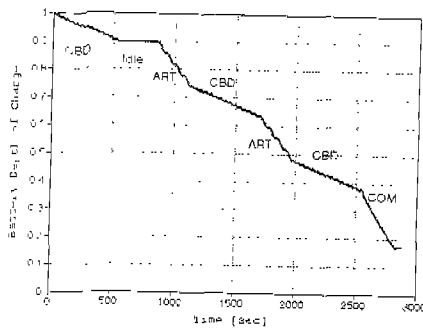
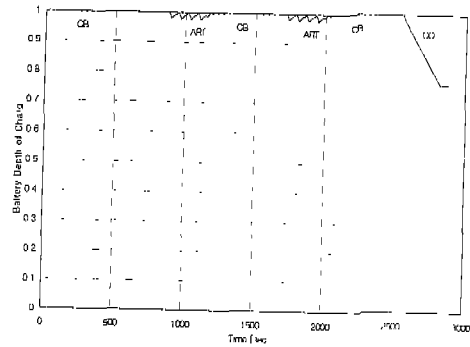


Fig.9 Simulation results - power split ratio in UTMA cycle



(a) C-PSR



(b) R-PSR

Fig.10 Simulation results - battery DOC in UTMA cycle

R-PSR의 경우 전체적으로 배터리의 DOC가 충분히 남아 있음으로써 외부 충전의 필요성이 많이 줄어들게 된다는 것을 알 수 있다.

용량은 61% 정도 향상된 것을 볼 수 있다. 결국 외부충전을 하지 않고 차량이 최대 주행할 수 있는 주행 가능 거리가 연장되었음을 나타낸다.

Table 7은 168마력의 엔진을 장착한 기존 내연기관 차량과 함께, 본 연구대상 하이브리드 차량에 대하여 각각 C-PSR과 R-PSR을 적용하여 얻은 성능 해석 결과들을 비교한 것이다. C-PSR을 적용한 하이브리드 차량의 경우 엔진 사용량이 적으므로 연비 및 배기가스 특성이 우수하나, DOC 면에서는 R-PSR의 경우가 우수함을 알 수 있다. 특히 C-PSR의 배터리 소모가 심한 점을 개선하기 위해 제시되었던 준 최적화 기법을 적용한 동력 분배비 알고리즘의 결과[8,10]와도 비교해 보면, 연비와 배기가스 배출특성도 크게 차이가 나지 않는데 비해 배터리 잔존

## 5. 결론

본 연구에서는 병렬형 하이브리드 동력 전달계를 이루는 주요 설계 요소들의 성능 민감도 해석을 통하여 전반적인 차량 성능을 극대화 할 수 있음을 보이고, 주행 성능 시뮬레이션을 이용하여 그 효과를 검증하였다. 이들을 통해 얻어진 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

하이브리드 동력전달계의 설계시 배터리 시스템의 크기는 적용 차량의 특성에 따라 최적의 값이 존재한다. 그 이유로서 한계값 이상의 배터리 시스템은 차량의 구동력에 이용되지 못하고, 자신을 가속하는데 모두 소모되기 때문이다.

하이브리드 차량의 기동 성능과 연비, 배기가스 특성 그리고 배터리 사용량 등 다양한 성능들은 동력원들의 특성과 용량에 따라 다양하게 변하였다. 따라서 차량의 초기 개념 설계부터 이러한 성능 해석을 통해 동력원들이 가장 적절한 값들로 선정되어야 함을 보

Table 7 Results of the fuel economy and the emission analysis

	F/E Km/L	NOx g/Km	CO g/Km	HC g/Km	DOC Used (%)
168HP Conv.	3.62	6.18	6.16	3.73	-
C-PSR	5.15	4.44	4.65	2.75	17.4
Sub-Opt.P.S.R	4.35	5.24	4.76	2.96	47.4
R-PSR	4.70	5.80	4.46	2.72	76.5

여 주었다.

클러치 결합시점은 엔진의 비정상 상태 시나 차량 출발시의 배기가스 배출을 제거하면서도 전체 시스템의 효율을 적절하게 유지시키는 값이 선택되었다.

동력원의 용량이 결정된 후의 세부 설계 단계로서 동력 분배비 상의 가중치를 변화시키거나, 본 연구에서 제시된 주행거리 연장을 위한 주행중 배터리 충전 알고리즘 등을 적용해 보았다. 그 결과로서 엔진의 연비 효율이나 배기가스 특성을 더욱 향상시키거나, 전동기의 배터리 사용량을 더욱 감소시킬 수 있었다. 이는 제어 알고리즘의 변경으로도 차량의 주행 목적과 환경에 적응할 수 있는 하이브리드 동력전달계를 구성할 수 있음을 보여주는 것이다.

### 참 고 문 헌

1. J. R. Bumby, et al, "Computer Modeling of the Automotive Energy Requirements for Internal Combustion Engine and Battery Electric-powered Vehicles", IEEE Proceeding, Vol. 132, No. 5, pp. 265-279, 1985.
2. 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.
3. M. Cuddy, "A Comparison of Modeled and Measured Energy Use in Hybrid Electric Vehicles", SAE Technical Paper SP-1089, No. 950959, pp.119-128, 1995.
4. 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.
5. K. B. Wipke, M. R. Cuddy, "Analysis of the Fuel Economy Benefit of Drivetrain Hybridization", SAE Technical Paper No. 970289, 1997.
6. 조한상, 이장무, 박영일, 임원식, "연비 효율과 기동성 해석을 위한 차량 동력전달계의 성능 시뮬레이션", 한국자동차공학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 408-423, 1999.
7. 조한상, 이장무, 박영일, "버스용 병렬형 하이브리드 동력전달계의 개발 (I), 제 1편 기동성능과 영향도 분석", 한국자동차공학회 논문집, 제7권, 제7호, pp. 136~148, 1999.
8. 조한상, 이장무, 박영일, "버스용 병렬형 하이브리드 동력전달계의 개발 (III), 제 3편 최적 주행 제어 알고리즘", 한국자동차공학회 논문집, 제 7권, 제 6호, 1999.
9. J. Paterson, T. Lenoid and P. Drozd, "Hybrid Electric Vehicles - Final Reports", Efficiency and Alternative Energy Technology Branch, Natural Resources Canada, 1993.
10. 조한상, "하이브리드 차량 동력전달계의 설계와 주행 제어 알고리즘 개발", 서울대학교 공학박사 학위논문, 1998.
11. Internet Data, "Hybrid Electric Vehicle Program", U. S. Department of Energy, <http://www.hev.doe.gov>, 1997.