

상용 병렬형 하이브리드 시스템의 동력원 용량에 따른 연비 및 비용의 상관관계 분석

정 종 열¹⁾ · 이 대 흥¹⁾ · 신 창 우¹⁾ · 임 원 식²⁾ · 박 영 일³⁾ · 차 석 원^{*1)}

서울대학교 기계항공공학부¹⁾ · 서울과학기술대학교 자동차공학과²⁾ · 서울과학기술대학교 기계설계자동차공학부³⁾

Analysis of Correlation of Fuel Efficiency and Cost Depending on Component Size of Heavy-duty Parallel Hybrid System

Jongryeol Jeong¹⁾ · Daeheung Lee¹⁾ · Changwoo Shin¹⁾ · Wonsik Lim²⁾ · Yeongil Park³⁾ · Sukwon Cha^{*1)}

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

²⁾Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

³⁾School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 139-743, Korea

(Received 1 June 2010 / Accepted 29 November 2010)

Abstract : Most of countries start to restrict the emission gases of vehicles especially CO2 because of the global warming. Many vehicle companies including Toyota have launched various HEVs to satisfy the restriction laws and to improve the vehicle's efficiency. However, development for heavy-duty hybrid system is not plentiful rather than the passenger car. In this study, we choose the optimal size of engine, motor and battery for heavy-duty hybrid systems using dynamic programming. Also we analyze the correlation of the system's cost and efficiency because the added cost of vehicle to make the hybrid system is very important factor for the manufacturing companies. Finally, this study suggests a method to choose the appropriate system components size considering its performance and the cost. With this method, it is possible to select the component size for various systems.

Key words : Hybrid electric vehicle(하이브리드 자동차), Heavy-duty vehicle(상용 차량), Dynamic Programming (DP - 동적 계획법), Component sizing(용량 선정), Hybrid system cost(하이브리드 시스템 비용)

1. 서론

20세기의 급격한 산업화로 국내를 비롯한 세계는 에너지 다 소비와 고 탄소 배출의 경제구조로 발전하게 되었다. 그러나 석유 매장량의 한계로 인해 2030년경에는 상당량의 원유 고갈이 예상되고 있다. 석유 매장량의 한계와 다양한 경제·정치적 원인으로 인한 석유 가격의 잦은 변동은 석유 의존적인 국내 경제에 큰 위협 요소가 되고 있다. 뿐만 아니라 석유 연료의 사용은 지구 온난화 가속화의 큰 원인

이다. 세계 각국에서는 지구 온난화의 주요한 원인인 이산화탄소의 발생을 억제하기 위해 1997년 온실가스 감축에 강제성을 갖는 ‘교토 의정서’를 채택하기도 했으며, 2009년 말 코펜하겐에서 새로운 의정서에 대한 회의가 진행되었다. 이러한 국제적 상황의 변화에 따라 여러 국가에서는 차량의 이산화탄소 발생량과 연비에 대한 규제를 확대·강화하고 있다. 이에 발맞춰 토요타를 비롯한 세계 굴지의 자동차 기업에서는 차량의 연비 개선에 효과적인 하이브리드 전기 자동차(HEV)의 개발 및 출시에 많은 노력을 기울이고 있다.^{1,2)} 그러나 현재 상용 하이브

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

리드 차량 시스템에 대한 연구보다는 승용 하이브리드 차량에 대한 연구가 많이 진행되고 있는 상황이다. 상용 차량, 특히 버스의 경우 고정된 노선에서 일정한 주기로 주행하는 경우가 많기 때문에 주행 패턴이 승용 차량에 비해 일정한 편이다. 따라서 상용 하이브리드 차량 시스템은 주행 패턴이 다양한 승용 차량보다 제어 전략 구성이 용이하고 더 큰 연비 개선을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 최적 제어이론 중 하나인 최적 계획법(Dynamic Programming, 이하 DP)을 적용하여 상용 병렬형 하이브리드 시스템의 최적 동력원 용량을 선정하는 방법을 다양한 동력원 조합에 적용하고, 이 때 각 조합 시뮬레이션 결과에서의 연비와 비용의 상관관계를 비교 분석하여 가격 대 성능을 고려한 병렬형 버스 하이브리드 시스템의 최적 엔진, 모터 및 배터리 용량을 제안한다.

먼저 2절에서는 DP를 적용하여 최적의 엔진 및 모터 용량을 선정하는 방법을 소개하고³⁾ 단품 비용을 고려하여 최적의 배터리 용량을 선정하는 내용을 다루었다.⁴⁾ 3절에서는 이러한 방법을 다양한 모터 및 배터리 조합에 적용함으로써 각 조합의 연비와 비용 결과를 도출하고 이를 비교 분석하여 최종적으로 단품 비용이 고려된 하이브리드 시스템의 동력원 용량을 선정하는 과정을 제안하였다.

2. 최적화 기법을 이용한 용량 선정

2.1 용량 후보군 선정 및 DP를 이용한 연비 분석

본 논문의 해석 대상 차량은 병렬형 하이브리드 파워트레인인 적용된 대형 버스이다. 병렬형 하이브리드 시스템은 엔진의 동력과 모터의 동력을 각각 또는 동시에 사용할 수 있는 구조로서, 차량의 주행 상태에 따라 구동모터는 제너레이터로 이용하여 감속 시 역토크에 따른 회생에너지를 배터리에 저장할 수 있다.

본 논문에서 적용한 시스템 구성은 Fig. 1과 같다. 엔진과 모터가 클러치로 연결되어 있고 이는 다시 클러치를 통해 트랜스미션과 연결되어 바퀴에 엔진과 모터의 동력을 전달하는 구조이다. 클러치의 연결 상태 및 엔진과 모터의 구동상태에 따라 다양한

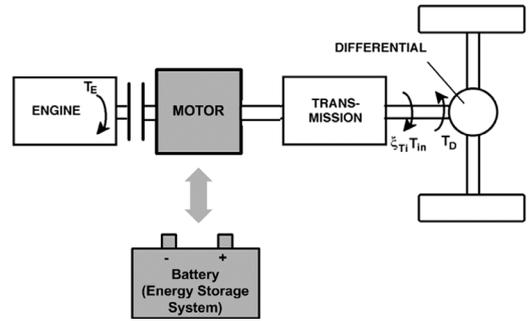


Fig. 1 Composition of the HEV system

주행 모드가 적용 가능하다.

2.1.1 차량 용량 선정을 위한 후보군 영역

상용 하이브리드 차량의 구성 요소 중 가장 핵심적인 부품인 엔진과 모터의 용량은 차량 조건 및 요구 성능에 따라 결정될 수 있다. 본 논문에서 적용한 상용 차량 모델의 세부 사양은 Table 1과 같다.

후보군 영역(feasible region)은 차량의 요구 성능을 바탕으로 한 기초 차량 동역학 이론 및 시뮬레이션을 통해 결정된다.⁵⁾ 본 논문에서 적용한 차량 요구 성능은 최대 주행 속도(100km/h), 등판 성능(15%, 20km/h), 가속 성능(30s, 70km/h) 및 가격과 같은 기타 사항을 고려하여 Fig. 2와 같은 결과를 산출하였다.

Table 1 Properties of the vehicle

공기밀도 (kg/m^3)	1.204 (20°C, 1기압)
Frontal area, A_f (m^2)	7.5
Air drag, C_d (-)	0.6
Rolling resistance (-)	0.0067
중량 (kg)	15000
최대 경사각, α (%)	15
차동기어 효율, η_d	0.9
변속기 효율, η_t	0.85

2.1.2 DP를 이용한 엔진 및 모터 용량 설계

DP 이론은 다양한 경로의 시스템에 대한 글로벌 최적화의 한 방법으로 단계적 과정의 문제 또는 단계적 과정으로 변환할 수 있는 연속 함수 문제에 적용 가능하다. 일반적인 글로벌 최적화를 하기 위해서는 모든 경우의 수를 고려하기 때문에 스텝 수가 많아짐에 따라 계산 양이 기하 급수적으로 늘어나

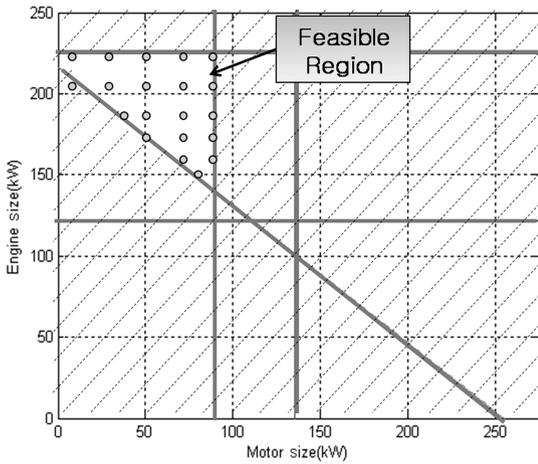


Fig. 2 Feasible region and the simulation points

게 된다. 하지만 동적 프로그래밍의 계산 양은 스텝 수에 비례하게 증가하므로 계산 양이 많은 연비 해석과 같은 문제에서 보다 효율적인 계산이 가능하다. 아래 식 (1)-(3)은 동적 프로그래밍의 수식을 표현한 것이다.

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

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \quad (2)$$

$$J^{*k,N}(x(k)) = \min L(x(k), u(k)) + J^{*k,N+1}(x(k+1)) \quad (3)$$

k 스텝에서 x(k)와 u(k)의 제어 변수를 가졌을 경우 최적의 비용 J*를 찾는 방법을 표현한 식이다. k+1 스텝에서 최적의 비용과 두 스텝 사이의 경로 비용(L(x(k),u(k)))의 합의 최소 점을 찾는 방식이며, k+1 스텝에서의 최소 비용을 알고 있을 경우 k 스텝에서의 최소 비용을 구할 수 있게 되는 것이다. 이는 후방향 시뮬레이션 방식으로 진행된다.^{3,6)}

Fig. 2와 같이 후보군 영역 내 20개 조합을 선정 한 후, 이를 DP를 이용한 시뮬레이션을 통해 최적의 연비 성능을 보이는 엔진, 모터 조합을 선정하는 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 3과 같다.

본 시뮬레이션의 결과 엔진 용량 160kW-170kW, 모터 용량 80kW-90kW 조합이 가장 효율이 높은 것을 확인할 수 있었다.³⁾

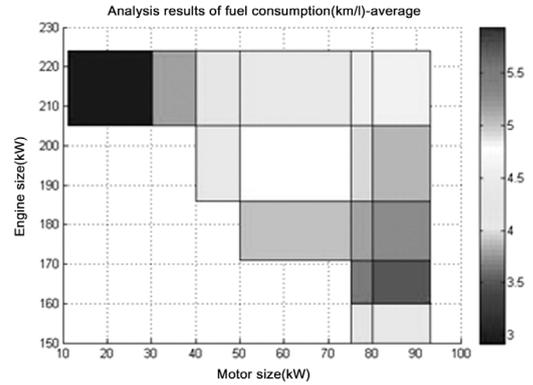


Fig. 3 Engine & motor sizing result

2.2 DP를 이용한 배터리 용량 설계

2.1절에서 차량 동력원 후보군 영역 선정과 엔진 및 모터 용량 선정 시 연비 성능만을 고려하게 되므로 적용된 배터리 출력과 용량은 일반적인 배터리 보다 높은 성능으로 가정하여 시뮬레이션 결과를 도출하였다. 하지만 현실적으로 배터리는 하이브리드 시스템에서 가격 비중이 매우 크기 때문에 적정 용량 보다 큰 용량의 배터리를 시스템에 적용할 경우 불필요한 비용의 발생을 초래하게 된다. 또한 단품비용의 문제 때문에 적정 용량보다 작은 용량의 배터리를 이용할 경우 안전 및 효율 상의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 절에서는 엔진 및 모터의 출력이 정해진 상태에서 DP를 적용하여 최적의 배터리 용량을 선정하는 방법을 소개하였다.⁴⁾

DP는 글로벌 최적화의 한 방법으로서 본 기법을 통해 얻은 결과는 해당 조건에서 가장 최적의 효율을 갖는 결과이다.⁶⁻⁸⁾ 따라서 DP를 통해 얻은 시뮬레이션의 배터리 SOC(State of Charge) 경로는 해당 조건에서 글로벌 최적의 연비 결과를 보이는 배터리 사용 경로로 생각할 수 있다. 시뮬레이션 결과로 구한 SOC 경로가 정해진 적정 SOC 경로를 벗어나지 않을 경우 해당 시스템은 주어진 배터리를 이용해 최적의 연비 결과를 얻을 수 있는 경로를 따라 운전이 가능한 것을 의미한다. 반대로 DP를 이용해 계산한 SOC 경로가 적정 SOC 범위를 벗어난다면, 이는 해당 용량의 배터리를 이용할 경우 최적의 연비 결과보다 비효율적인 결과만을 구할 수 있는 것을 의미한다.

본 이론의 적용을 위해 2.1절의 최적 결과(엔진 용량 171kW, 모터 용량 93kW)를 이용하여 다음 1)~3)의 과정을 반복하였다.³⁾ 배터리는 모터에 충분한 전기 동력을 공급해 줄 수 있어야 하기 때문에 배터리 최대 출력량은 모터 최대 출력보다 높아야 한다. 실제 연구에서 일반적으로 정해지는 배터리의 최대 출력은 모터 최대 출력의 100% 내외이며, 필요에 따라서는 그 이상의 출력량을 갖는 배터리를 사용하기도 한다.⁹⁻¹¹⁾ 본 논문에서는 배터리의 안정적인 운전을 위해 배터리 출력을 모터 출력의 약 130%로 선정하였다. 또한 배터리의 과 충·방전에 의한 배터리 손상을 방지하고, 연비 및 동력 향상을 도모하기 위해 적정한 SOC 범위 내에서 운전할 필요가 있다. 이러한 SOC 범위는 상황에 따라 다양하게 선정할 수 있으나, SOC 변화로 인한 배터리 전압 및 내부저항의 변화를 줄이고 과 충·방전을 줄이기 위해 0.45~0.75로 선정하였다.¹²⁾

1) 먼저 예상되는 최적의 배터리 용량(3.0kWh)을 선정해 Fig. 4와 같이 시뮬레이션을 수행한다. Fig. 4와 같이 최적 경로를 따라 운전할 경우, 붉은 색으로 굵게 표시한 부분의 SOC 경로가 적정 SOC 작동 범위(0.45~0.75)를 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 이 경우 배터리의 용량이 부족한 것으로 판단되므로 배터리 용량을 증가(3.5kWh)시켜 시뮬레이션을 재수행한다. 용량 3.5kWh~4.5kWh의 배터리를 이용한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다. 배터리용량 3.0kWh를 이용한 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 적정 SOC 영역을 벗어나는 것을 확인할 수 있으나, 배터

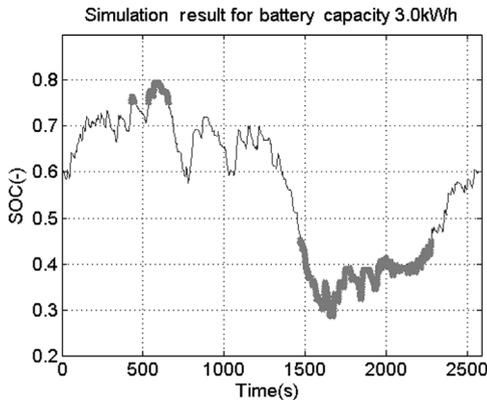
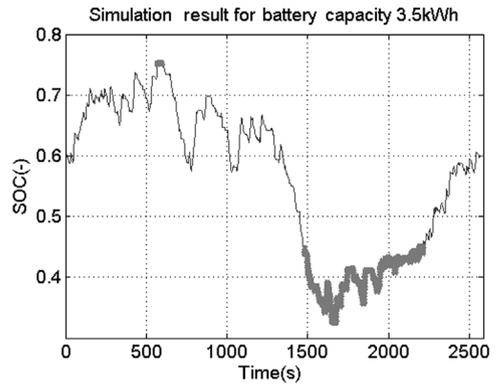
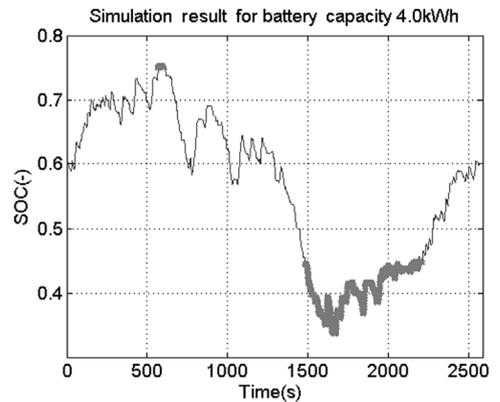


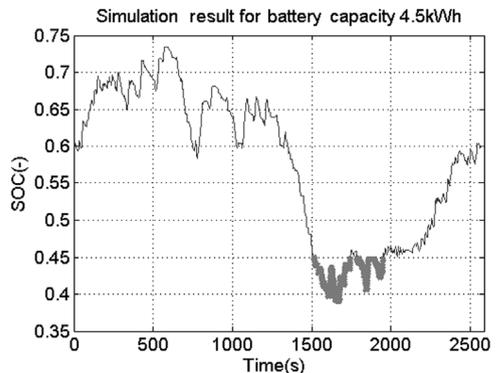
Fig. 4 SOC history of battery capacity 3.0 kWh



(a) SOC history of battery capacity 3.5kWh



(b) SOC history of battery capacity 4.0kWh



(c) SOC history of battery capacity 4.5kWh

Fig. 5 SOC history of battery capacity

리 용량이 증가함에 따라 적정 SOC 영역을 벗어나는 전체 시간이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

2) Fig. 6은 배터리 용량 5.0kWh를 이용한 시뮬레이션 결과이다. SOC가 0.45 이하로 떨어지는 경우가 있으나, 이는 지속 시간이 100초 미만으로 지속

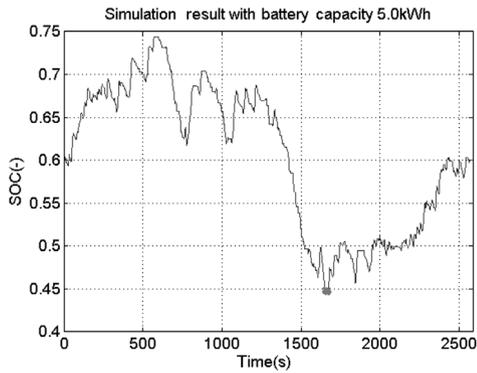


Fig. 6 SOC history of battery capacity 5.0kWh

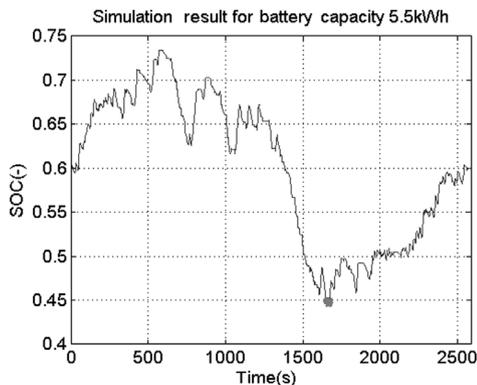


Fig. 7 SOC history of battery capacity 5.5kWh

되기 때문에 적정 영역 내에서의 운전으로 간주하였다. 따라서 적정 배터리 용량은 5.0kWh로 선정할 수 있다.

3) 만일 시뮬레이션을 배터리 용량 5.0kWh 이상에서 시작하였다면 1)과 다르게 첫 시뮬레이션 결과부터 이용 가능한 배터리 결과가 출력되게 된다. 이러한 경우 배터리 용량을 줄여서 시뮬레이션을 수행한다. 예를 들어 배터리 용량 5.5kWh에서 처음 시뮬레이션을 수행할 경우 그 결과가 이미 이용 가능한 배터리 용량이기 때문에, 더 작은 용량의 배터리의 이용 가능성을 확인해 보는 작업을 반복해서 수행한다. 다음 시뮬레이션에서 배터리 용량 5.0kWh의 시뮬레이션을 수행하여야 한다. 5.5kWh 용량의 배터리를 이용한 시뮬레이션 결과는 Fig. 7과 같다.

3. 비용을 고려한 모터 및 배터리 용량 선정

하이브리드 시스템은 기존의 엔진에 모터와 배터

리가 추가되는 구조이므로, 하이브리드 차량의 생산을 위해서는 모터와 배터리의 비용이 추가되며 이는 전체 시스템의 생산 비용에서 높은 비율을 차지한다. 따라서 본 절에서는 2절에서 소개한 방법을 다양한 모터와 배터리 조합에 적용하여 모터와 배터리의 가격을 고려한 비용과 연비의 상관성에 대한 내용을 다루었다.

3.1 모터 및 배터리 용량에 따른 연비

3.1.1 모터 및 배터리 용량 선정

본 절에서는 2절에서 소개된 모터에 따른 배터리의 용량 선정 과정을 다양한 범위의 모터 용량과 배터리의 용량에 적용하였으며 최종 연비 결과를 비교 분석하였다. 시뮬레이션을 위해 2절에서 최적의 엔진 용량으로 선정되었던 7300cc급(171kW) 용량의 엔진 데이터를 이용하였으며, 모터 및 배터리 출력 조합과 적용된 주행 사이클은 Table 2와 같다. 배터리의 출력은 모터 출력의 약 130%로 선정하였다.⁹⁻¹¹⁾

Table 2와 같이 총 12개의 조합에 각 3개 주행 사이클을 적용하여 총 36회의 시뮬레이션을 수행하였으며 적용된 주행 사이클 및 데이터는 PSAT(PHGV System Analysis Toolkit) 데이터를 이용하였다. PSAT이란 미국의 Argonne 연구소에서 포드, GM과 크라

Table 2 Components for simulation

	Motor	Mot. Max. power (kW)	Bat. Max. power (kW)
#1	pm_10_10_insight	10.0	13.0
#2	pm_7_15_prius	15.0	19.5
#3	pm_14_20_UQM_DR156S	20.0	26.0
#4	pm_15_30_prius	30.0	39.0
#5	id_21_40_HPDG_40_4A	40.0	52.0
#6	pm_49_49_Honda	49.0	63.7
#7	pm_25_50_prius	50.0	65.0
#8	pm_58_58	58.0	75.4
#9	pm_30_75_UQM_intets	75.0	97.5
#10	id_83_83_GE	83.0	107.9
#11	id_93_93_UQM	93.0	120.9
#12	id_75_110_Westinghouse	110.0	143.0
Cycle	VITO_RW_BUS_VH_Turnhou_Full_1		
	VITO_RW_BUS_VH_Brussels_Full_1		
	VITO_RW_BUS_VH_Brussels_Medium_1		

이슬러의 차세대 자동차 파트너십(PNGV)과정에서 제작된 툴 프로그램이다. 전방향 모델을 통해 현실적이 시뮬레이션을 가능하도록 한 차량 전용 해석 프로그램으로서 연료 소모량, 가스 배출량 및 성능, 등을 시뮬레이션 할 수 있다.¹⁵⁾

3.1.2 시뮬레이션 결과

Table 3은 엔진의 출력이 결정된 상태에서 모터 및 배터리의 용량을 선정하기 위한 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

Table 3과 같이 모터의 출력이 증가함에 따라 배터리 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 모터의 최대 출력이 증가할 경우 가속이나 감속 시 차량의 운동에너지를 배터리의 전기에너지로 변환하거나 또는 그 반대로 변환되는 에너지의 양이 상대적으로 증가하기 때문이다. 모터 사용량이 많아지게 됨에 따라 배터리로의 충·방전량이 많아지고, SOC 경로가 적정 SOC 경로 안에서 안정적으로 작동되기 위해서는 더 큰 용량의 배터리가 필요하게 된다. 하지만 모터를 통해 충·방전되는 에너지는 도로 상황에 따라 특정 출력 이상부터 해당 고 출력에 대한 사용 정도가 낮아지게 되고, 이로 인해 특정 모터 용량 이상에서는 배터리 용량의 증가가 둔화되는 것을 확인할 수 있었다. 위의 결과를 Fig. 8, 9에 도시하였다.

Fig. 8은 모터 최대 출력에 따른 배터리 용량 변화

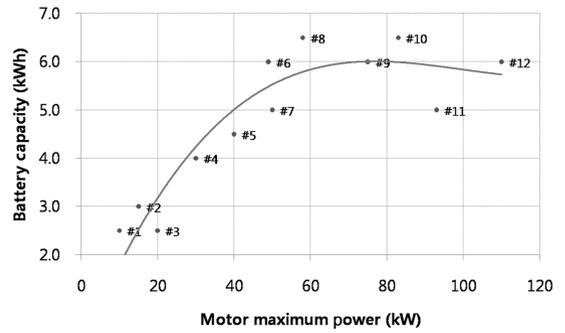
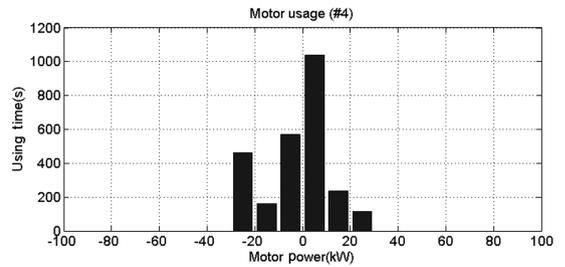
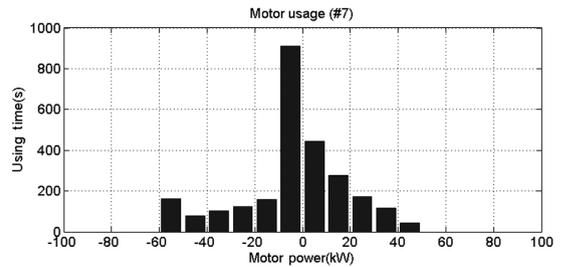


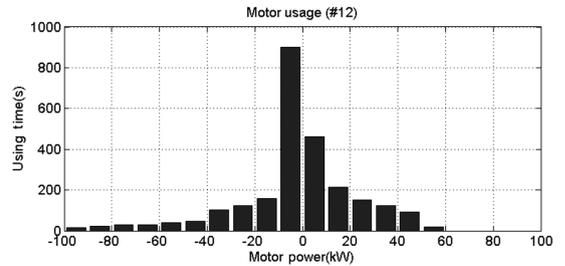
Fig. 8 Result graph of Bat. capacity Vs. Mot. Max. power



(a) Frequency of motor power use (#4)



(b) Frequency of motor power use (#7)



(c) Frequency of motor power use (#12)

Fig. 9 Frequency of each motor power uses

를 나타낸 것이다. 이러한 결과는 모터의 효율, 최대 토크, 등에 따라 매우 다양하게 나타나며 특히 큰 출력의 모터를 이용한 시뮬레이션 결과는 추세선으로부터의 분산 정도가 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한

Table 3 Results of the simulation

	Mot. Max. power (kW)	Bat. Max. power (kW)	Bat. capacity (kWh)	Avg. fuel efficiency (km/l)
#1	10.0	13.0	2.50	4.29
#2	15.0	19.5	3.00	4.41
#3	20.0	26.0	2.50	4.23
#4	30.0	39.0	4.00	4.93
#5	40.0	52.0	4.50	5.38
#6	49.0	63.7	6.00	5.64
#7	50.0	65.0	5.00	5.60
#8	58.0	75.4	6.50	5.64
#9	75.0	97.5	6.00	5.70
#10	83.0	107.9	6.50	5.48
#11	93.0	120.9	5.00	6.03
#12	110.0	143.0	6.00	6.00

추세선을 통해 배터리 용량 변화의 경향성을 분석하면 모터 용량이 증가함에 따라 배터리 용량이 함께 증가하다가 약 50kW 부근에서 배터리 용량의 증가가 둔화되는 경향을 확인할 수 있다. 이는 앞서 주행 사이클의 상황에 따라 상용 하이브리드 차량에서 모터를 이용한 운전 또는 배터리의 충전은 50kW 수준이 한계가 되고 그 이상의 모터를 이용해도 50kW 이상의 모터 출력을 주행 또는 배터리의 충전에 이용하는 빈도가 떨어지는 것을 파악할 수 있다.

Fig. 9는 조합 #4, #7, 그리고 #12의 주행 사이클 1에서의 각 모터 출력량 별 작동 시간 분포도이다. 모터의 출력 0kW를 기준으로 10kW 단위로 구분하여 각 출력 범위별 모터 작동 시간을 그래프로 나타내었다. Fig. 9의 (a)에서 출력 0kW~10kW 범위의 출력으로 모터가 작동한 시간은 약 1000초가 조금 넘는다. Fig. 9의 (a)는 모터 최대 출력 용량이 30kW인 조합 #4의 모터 출력량 별 작동 시간 분포도이다. 이를 살펴보면 약 500초 정도를 -30kW~-20kW 범위의 출력으로 모터가 작동된 것을 확인할 수 있다. 이는 전체 2500초 정도의 사이클에서 약 20%에 해당하는 범위이다. 이 경우, 더 큰 출력량으로 모터가 작동해 보다 많은 에너지를 배터리에 충전할 수 있으나 모터 출력량의 한계로 인해 더 이상의 에너지를 배터리에 저장하지 못하고 많은 시간을 모터의 최대 용량인 -30kW~-20kW 범위에서 작동한 것으로 판단할 수 있다. Fig. 9(b)는 50kW급 모터의 사용 빈도를 나타낸 것으로서 모터의 최대 입·출력 범위인 ±50kW 부근에서 오랜 시간 작동하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 (a)의 그래프에 비해 작동 시간이 상대적으로 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 모터 용량의 부족으로 인해 충전하지 못하는 에너지의 양이 상대적으로 적은 것을 의미하며, 추후 모터 용량이 증가하더라도 충전 가능량 개선으로 인한 연비 개선의 효과가 둔화되는 것을 말해주고 있다. 특히 모터 최대 출력이 110kW인 그래프 (c)의 경우를 살펴보면 모터는 저 출력 범위에서 사용량이 많고 고 출력 범위로 갈수록 총·방전량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히 충전의 경우 -40kW 이상의 작동 시간이 그보다 작은 출력의 작동 시간에 비해 빈도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 모터 최

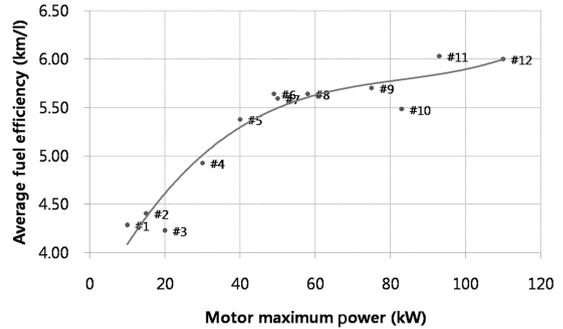


Fig. 10 Result graph of Avg. fuel efficiency Vs. Mot. Max. power

대 출력량 50kW 이상에서는 모터 용량 증가에 따른 연비 개선율이 감소하는 것을 설명할 수 있다.

Fig. 10은 모터 용량 증가에 따른 각 조합의 평균 연비를 나타낸 것이다. 이 역시 같은 이유로 초반 모터의 용량이 증가함에 따라 각 조합의 평균 연비가 증가하지만 모터 용량이 약 50kW 이후부터는 연비의 증가율이 둔화되는 것을 확인할 수 있다.

3.2 비용과 연비의 상관관계

본 절에서는 3.1절의 시뮬레이션 결과에 각 모터와 배터리 가격을 적용하여 모터와 배터리로 인한 비용과 연비를 비교했다. 모터와 배터리의 비용을 결정하는 여러 요인이 있을 수 있으나 본 논문에서는 모터 비용 12,000원/kW, 배터리 비용 1,300,000원/kWh 으로 가정하였으며 결과는 Table 4와 같다.

3.1절에서 확인한 바와 같이 모터 용량이 증가함에 따라 배터리 용량도 동시에 증가하기 때문에 비용 또한 상승하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 모터 용량 약 50kW 부근에서 배터리 용량의 증가가 둔화되기 때문에 총 비용의 상승폭이 함께 감소한다. 현재 총 비용은 모터와 배터리 비용의 합으로 구성되어 있으며, 모터의 비용보다 배터리의 비용이 상대적으로 많은 양을 차지하고 있다. 따라서 배터리 용량의 증가가 둔화되는 모터 용량 50kW 이후부터 총 비용이 거의 상승하지 않는다. 이를 Fig. 11과 같이 그래프로 나타내었다.

앞서 설명하였듯이 모터 용량 50kW 이후부터는 비용이 거의 상승하지 않거나 상황에 따라서 감소하는 것도 확인할 수 있다. 이러한 자료를 바탕으로

Table 4 Cost applied results

	Mot. Max. power (kW)	Mot. cost (만원)	Bat. capacity (kWh)	Bat. cost (만원)	Total cost (만원)	Avg. F/E (km/l)
#1	10.00	12.0	2.50	325	337.0	4.29
#2	15.00	18.0	3.00	390	408.0	4.41
#3	20.00	24.0	2.50	325	349.0	4.23
#4	30.00	36.0	4.00	520	556.0	4.93
#5	40.00	48.0	4.50	585	633.0	5.38
#6	49.00	58.8	6.00	780	838.8	5.64
#7	50.00	60.0	5.00	650	710.0	5.60
#8	58.00	69.6	6.50	845	914.6	5.64
#9	75.00	90.0	6.00	780	870.0	5.70
#10	83.00	99.6	6.50	845	944.6	5.48
#11	93.00	111.6	5.00	650	761.6	6.03
#12	110.00	132.0	6.00	780	912.0	6.00

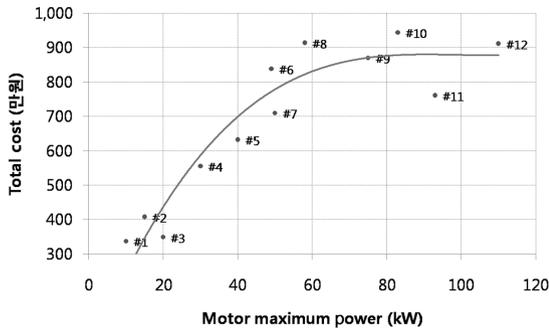


Fig. 11 Result graph of total cost Vs. Mot. Max. power

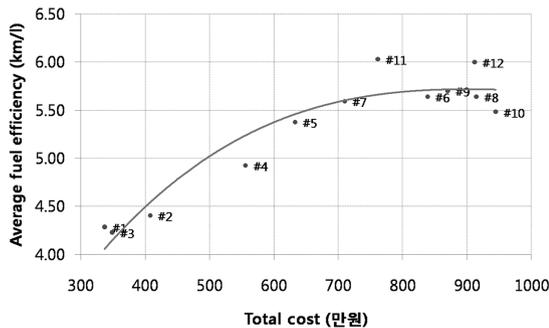


Fig. 12 Result graph of Avg. fuel efficiency Vs. total cost

Fig. 12와 같이 가로축 총 비용에 대한 연비를 그래프로 나타내었다.

모터 용량이 50kW 이상이 되는 조합 #7~#12에서 비용 상승과 연비 상승의 관계는 상대적으로 작기

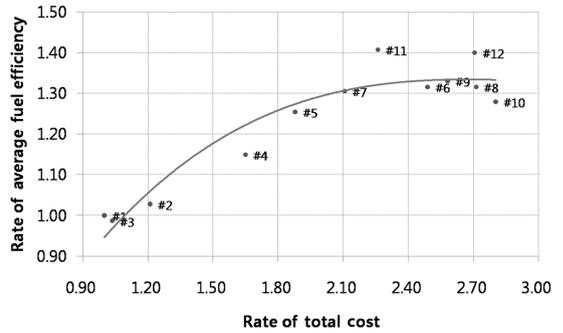


Fig. 13 Normalized graph of Avg. fuel efficiency Vs. total cost

때문에 그래프 상 해당 조합들의 연비 결과 포인트들은 약 5.5~6km/L 부근에서 분포하는 것을 볼 수 있다. 이는 비용은 조금씩 상승하고 있음에도 불구하고 연비가 증가하지 않는 것을 의미한다. 반면 모터 용량이 50kW 이하가 되는 조합의 점(#1~#7)에서는 비용 상승과 함께 연비가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 특히 조합 #4~#7까지는 비용 상승에 거의 정비례하게 연비가 상승하는 것을 볼 수 있으므로, 추가 비용에 대한 큰 연비 개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 모터와 배터리의 비용 상승으로 인해 특정 비용까지는 큰 연비 개선을 기대할 수 있지만 특정 비용 이후로는 비용이 증가해도 연비가 증가하지 않는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 13은 Fig. 12의 각 축을 조합 #1의 값을 기준으로 정규화한 그래프이다.

Fig. 13을 통해 비용 상승분에 대한 연비 개선율을 보다 명확하게 분석할 수 있다. 예를 들어 조합 #7의 경우, 비용은 조합 #1의 약 2.1배 정도의 비용이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 때, 연비는 약 30% 정도 증가한다. 하지만 조합 #12의 경우 비용은 조합 #1의 약 2.7배 정도 발생하지만 연비 증가율은 약 40% 수준인 것을 알 수 있다.

또한 본 시뮬레이션 결과를 바탕으로 주행 거리와 시간에 따른 투자비용의 회수 가능성을 계산하였다. 본 계산에는 일 주행 거리를 236.4km/day로 가정하였으며,¹³⁾ 연료 가격은 1523.96원/l로 가정하였다.¹⁴⁾ 또한 앞서 수행했던 계산과 마찬가지로 조합 #1의 연비를 기준으로 그에 따른 연비 이득에 대한 계산을 수행하였다. 따라서 연비가 오히려 감소하

Table 5 Return time calculation results

	Mot. Max. Power (kW)	Bat. Capacity (kWh)	Total Cost (만원)	Avg. F/E (km/l)	Return Time (Day)	Return Distance (만km)
#1	10.00	2.50	337.0	4.29	-	-
#2	15.00	3.00	408.0	4.41	1783.0	42.15
#3	20.00	2.50	349.0	4.23	-	-
#4	30.00	4.00	556.0	4.93	508.65	12.02
#5	40.00	4.50	633.0	5.38	371.33	8.78
#6	49.00	6.00	838.8	5.64	415.56	9.82
#7	50.00	5.00	710.0	5.60	361.14	8.53
#8	58.00	6.50	914.6	5.64	453.12	10.71
#9	75.00	6.00	870.0	5.70	416.64	9.85
#10	83.00	6.50	944.6	5.48	514.41	12.16
#11	93.00	5.00	761.6	6.03	313.05	7.40
#12	110.00	6.00	912.0	6.00	379.73	8.98

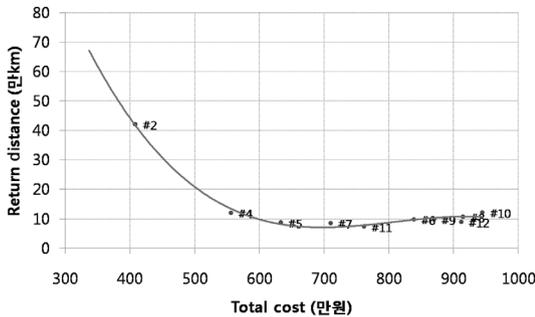


Fig. 14 Graph of return distance & total cost

는 결과가 나온 조합 #3은 결과에 포함하지 않았으며 해석 결과는 Table 5와 같다.

모터 용량이 상대적으로 작은 조합에서는 매우 긴 회수 기간 및 거리를 보이는 반면 모터 용량이 증가함에 따라 비용 회수 기간 및 거리가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 모터 용량이 약 50kW 이후에는 앞서 확인했던 것처럼 연비 증가는 둔화되는 반면 비용은 계속 증가하기 때문에 오히려 비용 회수 기간과 거리가 크게 변하지 않거나 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이는 물론 적용된 모터 및 배터리의 효율이 달라질 경우 다른 결과가 나올 수 있으며, 모터와 배터리 이외에 인버터/컨버터 등의 추가 비용으로 인한 실제 비용 회수 기간 및 거리에는 차이가 있을 수 있다.

그러나 모터 용량이 증가함에 따라 비용과 함께

연비가 증가하지만, 특정 모터 용량 이후로는 연비 증가율의 감소로 인해 비용 회수 기간과 총 주행 거리가 증가하는 경향성은 명확하게 확인할 수 있다.

Fig. 14는 총 단품 비용에 대한 주행 거리를 나타낸다. 모터 및 배터리 비용이 약 600만원까지 증가함에 따라 비용 회수 거리가 감소하는 것을 볼 수 있으며 total cost가 600만원 이상인 경우 비용 회수 거리가 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 엔진 및 모터의 최적 용량 선정 방법과 배터리 최적 용량 선정 방법을 다양한 모터 및 배터리 조합에 적용하여 각 조합의 최적 연비 결과를 산출하였다. 또한 각 조합에 따른 비용을 고려하여 이를 연비 결과와 비교 분석하였다.

- 1) 분석 결과 모터 용량이 증가함에 따라 배터리 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 그에 따라 각 조합의 연비 역시 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 9의 (c)와 같이 모터 출력 40 kW 이상에서의 배터리 충전을 위한 모터 이용 빈도가 감소함에 따라 모터 용량 약 50kW 이상 조합에서 연비 증가가 둔화되었다. 따라서 각 조합에 비용 데이터를 적용할 경우 모터 용량 50kW 이후 모터 출력량이 증가함에 따라 각 조합의 비용은 증가하지만 그에 따른 연비 증가가 크지 않은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 자료를 바탕으로 각 조합 별 비용 회수를 위한 주행 거리를 분석한 결과, 모터 용량이 작은 저 비용 조합에서는 비용 회수를 위한 주행 거리가 상대적으로 높았지만, 비용이 증가함에 따라 비용 회수 거리가 크게 감소하였다. 또한 비용이 높을 경우 비용 증가에도 불구하고 비용 회수 거리는 크게 변화하지 않거나 오히려 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 1)의 분석 결과를 바탕으로 Table 6과 같은 최적의 연비 조합을 선정하였다. 이는 각 조합의 연비, 비용 및 비용 회수를 고려하여 선정한 결과이다.
- 3) 본 논문에서 주행 사이클의 경우 실제 버스의 주행 모드와 유사하다고 판단되는 Table 2의 세 가지 사이클을 적용하였다. 추후 실제 도로 상황을 좀 더 현실적으로 반영할 수 있는 주행 모드가 개

Table 6 Final results

Engine Max. power (kW)	Mot. Max. power (kW)	Bat. capacity (kWh)	Total cost (만원)	Avg. F/E (km/l)	Return distance (만km)
171.0	50.00	5.00	710.0	5.60	8.53

발되어 이를 본 논문의 방법에 적용한다면 더욱 신뢰할 수 있는 결과가 도출 가능할 것으로 생각한다.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업(10033110) 및 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2009-0083495)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) H. Ohn and K. Min, "Combustion Stability Analysis during Engine Stop and Restart in a Hybrid Powertrain," Int. J. Automotive Technology, Vol.10, No.2, pp.241-249, 2009.
- 2) Y. Yan, G. Liu and J. Chen, "Integrated Modeling and Optimization of a Parallel Hydraulic Hybrid Bus," Int. J. Automotive Technology, Vol.11, No.1, pp.97-104, 2010.
- 3) D. H. Lee, J. R. Jeong, C. W. Shin, Y. I. Park and S. K. Cha, "Component Sizing of a Heavy-Duty Hybrid System Using Optimal Control Method," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.2992-2996, 2009.
- 4) J. R. Jeong, D. H. Lee, C. W. Shin, W. S. Lim, Y. I. Park and S. K. Cha, "Study on Battery Sizing of a Heavy-duty Hybrid System Using Optimal Control Method," Spring Conference Proceedings, KSAE, Hybrid and Fuelcell Vehicle, pp.47-51, 2010.
- 5) S. I. Jeon, S. T. Jo, Y. I. Park and J. M. Lee, "The Engine/Motor/Battery Sizing of a Parallel Hybrid Electric Vehicle Based on Energy Balance Relation," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.1149-1154, 2001.
- 6) D. E. Kirk, Optimal Control Theory. An Introduction, Prentice Hall, New Jersey, 1970.
- 7) 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, KSAE, pp.1498-1503, 2009.
- 8) N. W. Kim, D. H. Lee, S. Yang, Y.-I. Park and S. W. Cha, "Optimization for Analyzing Fuel Consumption of HEVs," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.2042-2047, 2008.
- 9) H. S. Jo, J. M. Lee and Y. I. Park, "A Development of the Parallel Type Hybrid Drivetrain System for the Transit Bus Part1: Driveability and Sensitivity Analysis," Transactions of KSAE, Vol.7, No.4, pp.135-147, 1999.
- 10) K. H. Lee, S. Y. Shin, J.-W. Yoon, Y.-K. Choi and C.-S. Kim, "Development of Hyundai 'COUNTY' Hybrid Electric Bus," The 19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, pp.1181-1193, 2002.
- 11) Y. Horii, J. Takeo, Y. Susuki, Y. Kono, S. Ruppert and E. Holl, "A Hybrid Electric Drive System for Low-floor City Bus," The 19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, pp.35-46, 2002.
- 12) H. G. Kim, S. J. Heo and G. B. Kang, "Modeling and Characteristic Analysis of HEV Li-ion Battery Using Recursive Least Square Estimation," Transactions of KSAE, Vol.17, pp.130-136, 2009.
- 13) J. H. Song, D. J. Kim, C. H. Lee and C. B. Lee, "The Study of Analytic Methodologies for the Driving Cycle Development of City Bus," Spring Conference Proceedings, KSAE, Emissions and Environments, pp.173-181, 2010.
- 14) Korea National Oil Corporation, <http://www.opinet.co.kr/>, 10/05/03.
- 15) A. Rousseau, P. Sharer and M. Pasquier, "Validation Process of a HEV System Analysis Model: PSAT," SAE 2001 World Congress, March 2001.