

최적용량매칭 및 실시간 제어전략에 의한 직렬형 하이브리드 버스의 연비향상[§]

김민재* · 정대봉* · 강형묵* · 민경덕*[†]

* 서울대학교 기계항공공학부

Series-Type Hybrid Electric Bus Fuel Economy Increase with Optimal Component Sizing and Real-Time Control Strategy

Minjae Kim*, Daebong Jung*, Hyungmook Kang* and Kyoungdoug Min*[†]

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

(Received June 18, 2012 ; Revised December 1, 2012 ; Accepted December 3, 2012)

Key Words: Series Hybrid Electric Vehicle(직렬형 하이브리드 자동차), Optimization(최적화), Dynamic Programming(동적계획법), HILS(하드웨어 인 더 루프 시뮬레이션)

초록: 직렬형 하이브리드 자동차는 구조가 간단하고 부품들의 효율이 높기 때문에 연비성능이 우수하며, 병렬형과 비교하여 배터리, 엔진, 모터의 용량이 상대적으로 고용량인 특징을 가진다. 본 연구에서는 직렬형 하이브리드 자동차의 최적용량매칭을 통해 최적의 연비를 도출하고, 실시간 시뮬레이션 환경에서 사용될 알고리즘을 개발한다. 연구에서 진행된 용량매칭은 모터, 엔진/발전기 및 배터리를 대상으로 13 개 주행 사이클에 대하여 순차적으로 이루어 졌으며, 이를 위해 Matlab 환경에서 최적화 기법인 DP(Dynamic Programming)을 사용하였다. 실시간 성능검증을 위한 차량모델은 Simulink 및 AMESim 을 기반으로 개발되었고 실시간 제어로직이 구현된 RCP(Rapid Control Proto-typing)와 연동하여 그 성능을 확인할 수 있었다.

Abstract: The interest in reducing the emissions and increasing the fuel economy of ICE vehicles has prompted research on hybrid vehicles, which come in the series, parallel, and power-split types. This study focuses on the series-type hybrid electric vehicle, which has a simple structure. Because each component of a series hybrid vehicle is larger than the corresponding component of the parallel type, the sizing of the vehicle is very important. This is because the performance may be greater or less than what is required. Thus, in this research, the optimal fuel economy was determined and simulated in a real-world system. The optimal sizing was achieved based on the motor, engine/generator, and battery for 13 cycles, where DP was used. The model was developed using ASCET or a Simulink-Amisim Co-simulation platform on the rapid controller prototype, ES-1000.

- 기호설명 -

P_{BB} : 최적의 bsfc 에서 생성되는 파워

S_E : 엔진/발전기 유닛 On/Off 여부

SOC : 배터리 충전 퍼센트

SOC_U : SOC 상한

SOC_L : SOC 하한

P_R : 요구파워

P_E : 엔진이 만들어 내는 파워

1. 서론

자동차의 연비증대와 배기물질 저감에 대한 필요성이 대두되면서 내연기관 차량의 한계를 극복하는 기술에 대한 관심이 커지고 있다. 하이브리드 자동차는 해당 관심을 충족시키는 기술로써, 특히 일정한 노선에서 반복 운행되는 버스의 경우, 승용차에 비하여 주행 패턴이 일정하므로 차량 하이브리드화를 통하여 더 높은 연비향상과 배기 가스 저감을 기대할 수 있기 때문에 이목을 끌고 있다.⁽¹⁾

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 에너지 및 동력공학부 춘계학술대회(2012. 5. 17.-18., 재료연구소) 발표논문임

† Corresponding Author, kadmin@snu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

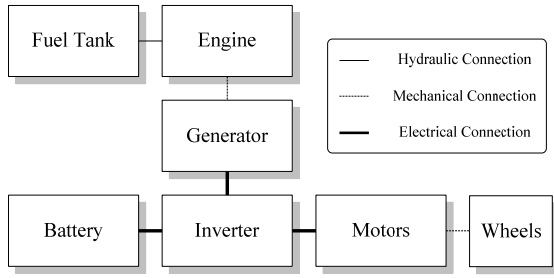


Fig. 1 Series type hybrid vehicle energy flow

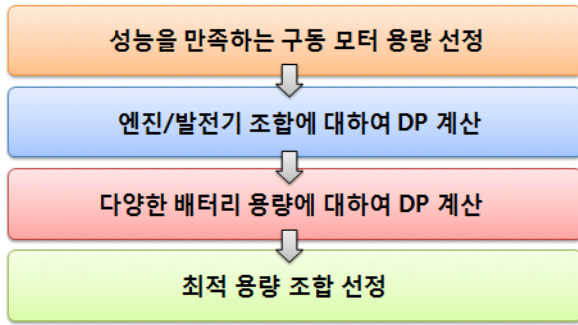


Fig. 2 Optimal component sizing procedure

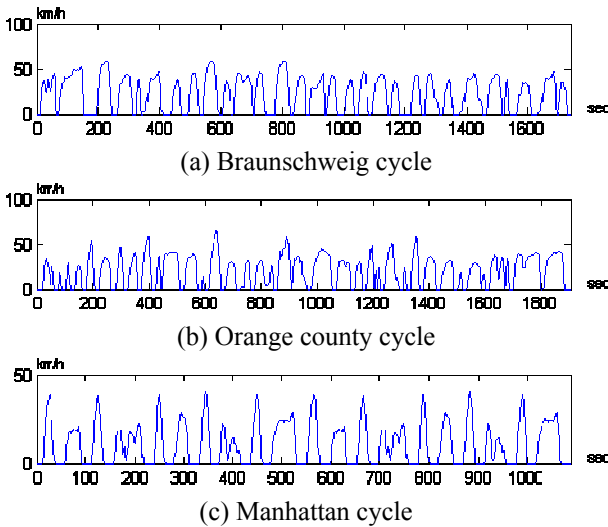


Fig. 3 Test cycle examples

하이브리드 자동차는 기본적으로 직렬, 병렬, 직병렬 타입의 3 가지로 분류된다. 이 중, 직렬형 하이브리드 자동차는 뛰어난 동적인 성능과 간단한 구조를 그 특징으로 한다. 하지만, 합리적인 용량매칭 없이 하이브리드 차량 성능이 실제 요구성을 훨씬 웃돌거나 기대에 못 미칠 수 있다. 특히 직렬형 하이브리드 차량에서는 모터, 엔진 그리고 배터리 용량이 다른 타입의 하이브리드 차량에 비해 상대적으로 크기 때문에 용량선정의 범위가 넓

어 용량매칭의 중요성은 더욱 강조된다.⁽²⁾

하이브리드 자동차의 제어전략은 하이브리드 차량의 연비에 큰 영향을 미치는 중요한 인자이다.⁽³⁾ 하지만 복잡하고 정확한 제어전략이 개발되더라도 해당 전략의 실시간성이 확보되지 않는다면, 우수한 전략과 뛰어난 단품성능에도 불구하고 결과적인 차량 성능이 기대에 미치지 못할 가능성이 높다. 따라서 특정 전략이 개발된 이후 그에 대한 실시간성 확보여부에 대한 검증은 필수적이다.

본 논문에서는 직렬형 하이브리드 버스를 대상으로 백워드 모델에서 DP(Dynamic Programming) 기반 최적용량매칭을 수행하고, 포워드 모델에서 실시간 제어전략을 개발하여, 직렬형 하이브리드 버스의 최적연비를 도출한다. 이 때, 백워드 모델의 용량매칭은 Matlab 을 기반으로 수행되고, 포워드 모델의 실시간 제어전략은 AMESim 과 Simulink 의 Co-simulation 으로 개발된 차량모델과 실시간 제어로직이 구현된 RCP (Rapid Control Proto-typing) 를 연동하여 이루어 진다.⁽⁴⁾

2. 최적용량매칭

Fig. 1 은 직렬형 하이브리드 자동차의 에너지 흐름을 나타낸다.⁽⁵⁾ 직렬형 하이브리드 자동차의 에너지 흐름은 엔진 혹은 배터리로부터 시작되어 모터를 통해 바퀴에 전달되게 된다. 따라서 모터, 엔진, 발전기, 배터리 용량은 최적용량매칭의 가장 중요한 요소로 작용한다. Fig. 2 는 본 연구에서 진행된 최적용량매칭의 순서를 나타내며 특별한 제약이 없는 상태에서 구동모터 → 엔진/발전기 → 배터리 용량매칭을 통해 최적용량조건이 결정되었음을 보여 준다.

2.1 테스트 주행사이클

본 연구는 13 개의 테스트 주행 사이클에 대하여 이루어졌다. 사용된 테스트 주행 사이클은 버스 연비 및 배기물질 평가에 널리 사용되거나 실제 국내 도로사정을 기반으로 한 만들어진 사이클로서 UDDS Truck, Newyork Bus, CBD, Manhattan, Braunschweig, Orange County, JE05 등이 그것이다. Fig. 3 은 해당 사이클 중 Braunschweig Cycle, Orange County Cycle 및 Manhattan Cycle 을 나타내며 x 축은 시간(초), y 축은 속도(km/h)를 보여준다.

2.2 용량매칭기법

본 연구에서는 최적화 기법으로서 DP(Dynamic

Programming)을 사용하였다. DP 는 제어전략과 무관한 이상적인 연비계산이 가능하기 때문에 최적용량매칭에서 널리 사용되고 있다.⁽⁶⁾ Fig. 4 는 개략적인 DP 의 개념을 나타내는 그림이다. 그림에서와 같이 상태 A 에서 B 로 가기 위해서는 여러가지의 경로가 있지만, 가장 비용이 적게 요구되는 방법을 각 단계별로 취하며 C 및 D 에도 동일하게 적용시킨다. 이러한 과정은 최종단계인 단계 n 까지 계속되며 결국 최소비용의 경로를 찾게 된다. 본 문제에서는 각 단계에서는 타임 스텝별로 배터리 SOC 상태를 구분하여 각 상태에 이르는 경우를 계산하였다. 즉 배터리 입출력 파워에 대해서 시간 별로 연료 소모량을 계산하고 최소의 연료 소모율을 보이는 경로를 찾아가게 하였다. 결국 각각의 상태에 이르면서 가장 적은 연료 소모를 보여주는 경로를 선택하고 나머지를 선택하지 않는 과정을 반복하면서 최종 목적 상태에 도달하기 위한 최적 경로가 구해졌으며, 정확한 연비계산을 위해 처음 SOC 와 최후 SOC 가 같게 하였다.

2.3 최적용량매칭

Fig. 2 에서 제시한 바와 같이 첫 번째 용량매칭은 구동모터에 대해서 이루어 졌다. 구동모터는 13% 경사를 32km/h 에 오를 수 있고, 30% 의 경사를 멈춘 상태에서 이겨내야 하기 때문에 식 (1) 및 식 (2)를 만족해야 하며 최소 200kW 가 되어야 함을 확인할 수 있었다.

$$P_m = \frac{1}{\eta_d \eta_m} \times F_g \times v_{veh} \tag{1}$$

$$F_g = (m_{veh} + m_{men}) \times g \times \cos(\alpha) \tag{2}$$

엔진/발전기 용량매칭은 4000cc / 120kW, 6000cc / 180kW, 8000cc / 240kW 및 10000cc / 300kW 을 대상으로 DP 을 통해 평가하였다. 이 때, 각 용량에 맞도록 각각의 경우의 버스무게를 고려하였으며 (15.2ton, 15.3ton, 15.5ton 및 15.6ton) 앞서 선정된 모터 200 kW(Dual)와 배터리 기본용량인 60Ah 에 대해서 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과는 그림 5 와 같다. 그림에서의 x 축은 13 개의 테스트 주행 사이클이며 y 축은 각각의 경우에 최고의 연비를 보여주는 엔진 및 상응하는 발전기 용량을 의미한다. 결과적으로 13 개의 테스트 주행 사이클 중 8 경우에 6000cc 엔진 및 이에 상응하는 180kW 발전기가 최대 연비를 나타내었다.

Table 1 Component capacity before optimal sizing

단품	타입	최적매칭결과
모터	영구자석	120kW(Dual)
엔진	CNG	8000cc
발전기	영구자석	260kW
배터리	NiMH	60Ah

Table 2 Component capacity after optimal sizing

단품	타입	최적매칭결과
모터	영구자석	200kW(Dual)
엔진	CNG	6000cc
발전기	영구자석	180kW
배터리	NiMH	40Ah

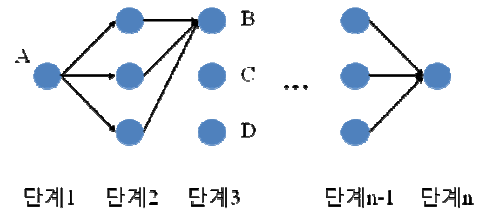


Fig. 4 DP concept

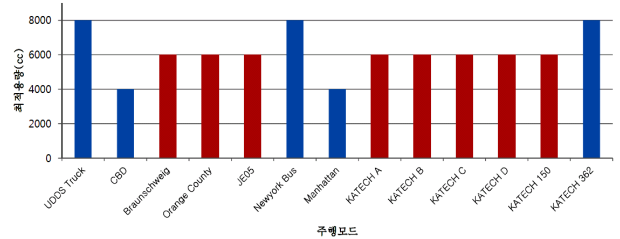


Fig. 5 Engine/generator optimal component sizing

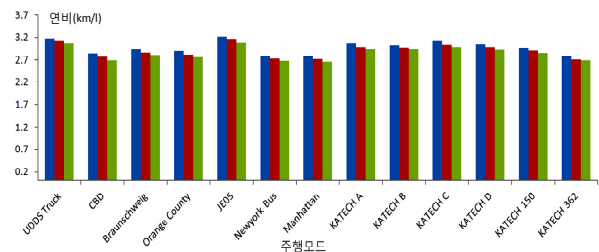


Fig. 6 Battery optimal component sizing

배터리 용량매칭은 NiMH 배터리의 경우에 40, 60, 80 Ah (버스무게 14.9, 15.3, 15.8 ton)의 배터리에 대해서 DP (Dynamic Programming) 을 수행하여 각각의 경우에 최대의 연비를 제공하는 용량을 선정

하였다. Fig. 6 은 배터리 용량매칭 결과를 보여주며, x 축은 13 가지 주행모드를 나타내고, y 축은 세 가지 용량의 배터리 용량에 대한 연비를 보여준다. 결과적으로 그림에서 보는 바와 같이 40Ah 배터리를 사용할 경우가 항상 최적의 연비를 보여주며 이는 배터리 무게에 의한 영향으로 파악된다.

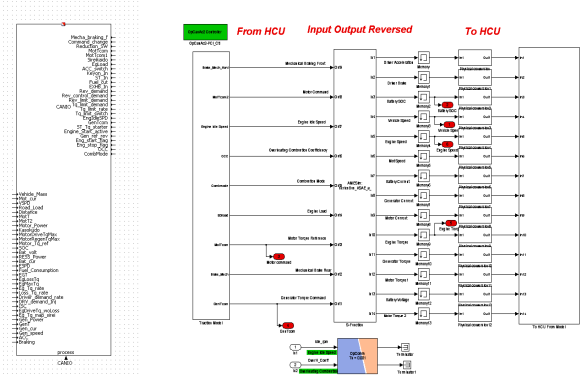
Table 1 과 Table 2 는 최적용량매칭 이전과 이후의 단품용량을 나타낸다. 결과적으로 시리즈 HEV 버스의 용량매칭은 하나의 변수를 변경하면서 전체적인 최적점을 찾는 방법을 사용하였고 모터, 엔진, 발전기, 배터리의 용량에 대한 연비평가를 한 결과 13 개 주행조건에 대해서 용량매칭 이전 대비 평균 49.5% 연비향상을 확인할 수 있었다. 이 때 종감속비는 18 로 버스의 최대속도를 100km/h 로 정하였을 때, 최대속도 10000rpm 모터가 해당 속도를 만들어내기 위한 최소한의 감속비가 되도록 하였다.

3. 실시간 제어 알고리즘

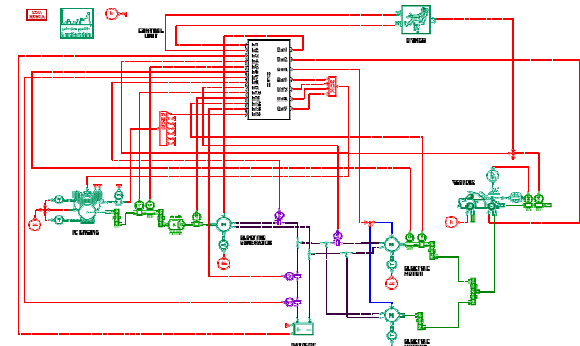
본 연구에서 구현하는 실시간 주행 전략은 DP 를 기반으로 하여 제어 파라미터 및 제어규칙을 설정하는 것을 기반으로 하고 있다. 즉 DP 에 의한 백워드 시뮬레이션 결과의 엔진 작동점 및 SOC 변화를 기준으로, 개발된 실시간 전략이 해당 엔진 작동점 및 SOC 변화를 추종하는 것을 목표로 한다. 따라서 기본적인 전략은 직렬형 하이브리드버스에서 널리 사용되고 있는 Thermostat 전략을 기반으로 하되, 요구되는 동력을 계산하여 그 값이 일정량 이상이 되면, SOC 가 미리 정해진 최저 경계 이상이라도 발전 시스템을 가동시키도록 하였다.

3.1 시리즈 HEV 용 모델개발

개발된 실시간 버스 모델은 표준화된 입출력 신호를 적용하여 그 성능을 확인할 수 있도록 하였다. 입출력 포트는 RCP 에서 ETAS 사의 ASCET 을 통하여 HILS (Hardware in the Loop Simulation) 시스템 장비와 인터페이싱하도록 되어 있으며 Fig. 7 의 (a)는 실제 RCP 를 위한 ASCET 모델을 의미한다. 블록 내 로직은 RCP 의 제어를 담당하고 있으며 (b)는 Plant 모델과 입출력을 인터페이싱하기 위한 RCP 에서 필요한 Simulink 모델을 의미한다. 이를 통해서 RCP 에서 나온 Command 신호가 자동차 모델인 Fig. 7 의 (c)로 들어가게 되어 서로 연동하여 계산이 이루어지게 된다.



(a) ASCET model (b) Simulink model



(c) Plant model

Fig. 7 Controller and plant of real-time model

$$S_E = \begin{cases} 0 & \text{if } \begin{cases} SOC(t^-) \geq SOC_U \\ SOC(t^-) > SOC_L \text{ and } S_E(t^-) = 0 \text{ and } P_R < P_F \end{cases} \\ 1 & \text{if } \begin{cases} SOC(t^-) \leq SOC_L \\ SOC(t^-) < SOC_U \text{ and } S_E(t^-) = 1 \\ P_R \geq P_F \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_E(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } S_E(t) = 0 \\ P_{BB} & \text{if } S_E(t) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$P_B(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } SOC(t) < SOC_L \\ P_R(t) - P_E(t) & \text{if } SOC_L \leq SOC(t) \leq SOC_U \\ P_R(t) & \text{if } SOC(t) \geq SOC_U \end{cases} \quad (5)$$

3.2 실시간 주행 전략 알고리즘 개발

본 연구에서 사용된 시리즈 하이브리드 차량의 제어로직은 식 (3) ~ 식 (5)로 정의된다.⁽²⁾ 식 (3)은 엔진을 언제 운용할 것인가에 대한 조건을 나타낸다. 식 (4)는 운용되는 동작점을 의미하며 Thermostat 전략의 장점인 최대 효율지점인 best bsfc 포인트 동작을 의미한다.

Thermostat 전략의 경우 SOC 경계를 기준으로 엔진 On/Off 를 결정하기 때문에 Fig. 8 의 형태로

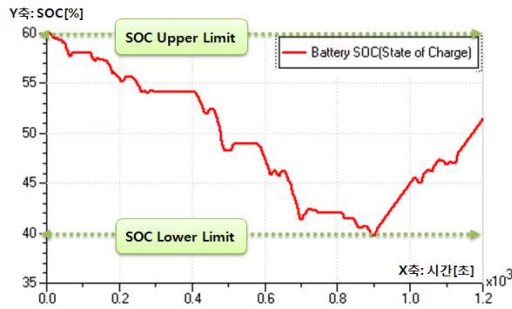
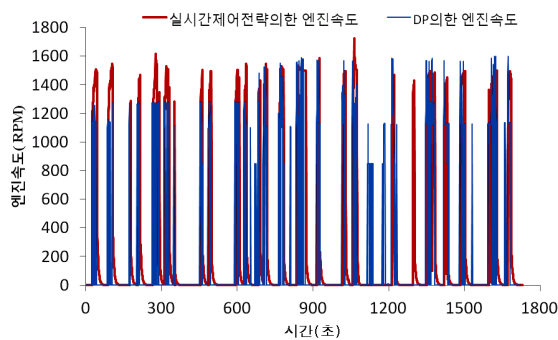
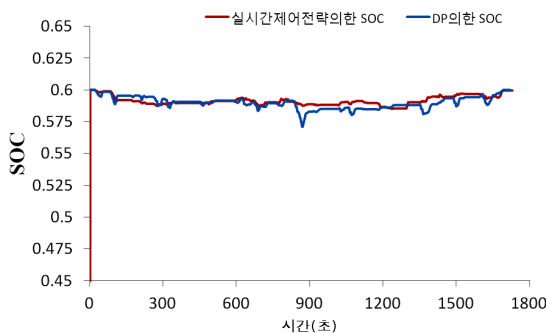


Fig. 8 Thermostat strategy SOC change



(a) Engine RPM comparison between real-time strategy and DP



(b) SOC comparison between real-time strategy and DP

Fig. 9 Comparison between real-time strategy and DP

SOC 가 변화하게 되며 엔진이 꺼진 상태에서는 배터리만 사용하기 때문에 전류가 배터리를 통해 대부분 나가기 때문에 내부저항의 영향으로 인해 효율이 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 식 (5)의 두 번째 부등식이 보여주는 것처럼 특정 부하 이상이 요구되면 엔진이 강제로 발전되게 하였다. Fig. 9 는 제안된 전략을 적용한 모델과 DP 모델의 엔진속도 및 SOC 변화를 보여준다. 해당 시뮬레이션 결과는 실제 서울에서 운용되는 시내버스의 속도를 기록하여 개발한 주행모드를 사용하였으며, 그림의 엔진속도에서 보는 바와 같이, SOC 가 내부저항 증가로 인한 최저 SOC 제한인 0.4 가 되지 않더라도 엔진/발전기는 강제로 동작하게 된다. 또한 엔진이

동작되는 타이밍이 DP 의 경우와 거의 일치하는 점을 Fig. 9 의 (a)에서 확인할 수 있다. 다만 Fig. 9 의 (b)에서 보는 바와 같이 SOC 변화는 약간의 차이를 보이는데 이는 엔진 동작점을 해당 경우에는 단일 동작점으로 사용되었음에 비해 DP 에서는 여러 동작점이 사용되었기 때문이며 DP 의 SOC 단계 이산화 등도 영향을 준 것으로 보인다. 결과적으로 실시간 주행 전략을 적용하여 HILS 에서 구동하였을 경우 DP 대비 89.9% 의 연비 수준을 보여 주었다.

4. 결론

본 연구에서는 시리즈 타입의 하이브리드 버스의 용량매칭을 완성하고 실시간 제어전략 개발하여 연비 향상을 꾀하였다. 최적용량매칭은 각각의 단품의 조합에 대해 그 연비성능을 평가하였으며, 실시간 제어 전략은 발전 시스템을 어느 시기에 작동시켜 주는지 에 따라 연비 성능이 정해지므로 최적의 작동 선도를 보여주는 DP 결과에서 얻은 발전 시스템의 작동 시점 및 작동 영역특성을 분석하여 추종하도록 하였다. 이를 통해 전체 시스템의 연비향상을 꾀할 수 있었다.

후 기

This work was supported by the Industrial Strategic Technology Development Program (Development of Integrated Control and Core Technology for Heavy Duty Hybrid System) under the Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea. We would like to thank BK21 program and IAMD of Seoul National University to support this work, too.

참고문헌

- (1) Jung, D. B., Min, K. D., Jo, Y. R. and Lim, Y. S., 2011, "Study on Optimization of Generation System in Series HEV Bus," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 8, pp.773~779
- (2) Kim, M. J., Jung, D.B. and Min, K.D., 2011, Power Distribution Control Research on Series Hybrid Electric Vehicle Bus, *KSAE 2011*, pp. 2241~2244.
- (3) Kim, M. J., Jung, D.B. and Min, K.D., 2012, Fuel Economy Research on Series-Type HEV Intracity Buses with Different Traction Motor Capacity Combinations, *SAE 2012*, 2012-01-1035
- (4) Kim, N. W., Lee, D. H., Yang, S. U., Park, Y. I. and Cha, S. W., 2008, Optimization for Analyzing Fuel Consumption of HEVs, *KSAE 2008*, pp. 2042~2047
- (5) Ehsani, M., Gao, Y. and Emadi, A., 2010, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*, CRC

Press, USA

- (6) Lee, D. H., Jeong, J. Y., Shin, C. W., Park, Y. I. and Cha, S. W., 2009, Component Sizing of a Heavy-Duty Hybrid System Using Optimal Control Method, *KSAE* 2009, pp. 2893~2898
- (7) Kim, S. C., 2011, Optimal Power Distribution Strategy of Series Hybrid Electric Vehicle, Master Thesis, Hanyang University.