

## 연료전지 하이브리드 차량의 연비향상을 위한 배터리 동력분배 최적화

이 동 섭\*

\* 강원대학교 대학원

### Optimization of Battery Power Distribution to Improve Fuel Consumption of Fuel Cell Hybrid Vehicle

Dong Sup Lee\*

\* Dept. of Mechanical and Biomedical Engineering, Graduate School Kangwon Nat'l Univ.,

(Received September 14, 2012 ; Revised October 4, 2012 ; Accepted October 5, 2012)

**Key Words:** Fuelcell Hybrid(연료전지 하이브리드), Power Distribution(동력분배), Equivalent Fuel(등가연료), Optimization(최적화), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘)

**초록:** 친환경 및 연비에 대한 요구와 제한은 하이브리드 차량과 같은 친환경 고연비 차량기술을 발전시켜왔다. 하이브리드 차량의 연비는 시스템의 특성으로 인해 주행 후 배터리 충전량의 변화를 연비에 반영시키는 등가연료사용량이 연료소비량에 추가되므로 제어전략에서 배터리 사용영역 증가만으로 연비를 향상시킬 수 없었다. 본 논문은 연료전지 하이브리드 차량을 matlab simulink상에서 모델링하고 기존 제어전략에서 연료전지의 사용구간을 분석하여 연료전지 주 사용영역에서의 배터리와 연료전지 간 동력분배를 연비향상을 목표로 최적화하여 등가연료사용량을 포함한 총연비의 향상을 시도하였다.

**Abstract:** The demand for eco-friendly and higher fuel economy vehicles has helped develop eco-friendly and fuel-efficient vehicles such as hybrid vehicles. In a hybrid vehicle, the change in the battery charge after driving should be added to the fuel consumption as the equivalent fuel usage based on its own characteristics. Thus, the fuel efficiency of a hybrid vehicle cannot be improved simply by increasing the battery capacity. In this study, I attempt to improve the total fuel economy of a hybrid vehicle, including the equivalent fuel consumption, by modeling a fuel cell hybrid vehicle using Matlab Simulink, analyzing the usage zone of the fuel cell with the existing control strategy, and optimizing the power distribution of the battery and fuel cell in the main usage zone of the fuel cell.

### 1. 서 론

한정된 화석에너지의 고갈에 대한 각성과 화석 연료의 사용으로 인해 발생하는 환경문제는 각국의 배기가스 및 연비 규제 강화와 함께 친환경, 고효율, 대체에너지 차량 개발에 대한 새로운 패러다임을 제시하였으며 대표적 친환경 대체에너지 자동차인 연료전지 하이브리드 차량은 전기자동차와 함께 미래의 궁극적 친환경 차량기술로 지목되고 있다.<sup>(1)</sup>

연료전지 하이브리드 차량은 순수 연료전지 차량과 달리 배터리를 사용하여 연료전지가 최적 효율구간에서 운전되도록 할 수 있으며 연료전지와 배터리의 동력분배가 이루어지므로 연료전지 하이브리드는 연료전지와 배터리 간의 동력분배를 관리하는 제어전략에 따라 연비의 차이가 크게 발생하게 된다. 또한 배터리의 효율을 고려한 충전 방전 사용 구간으로 인해 배터리의 최저 용량 선정 문제가 발생한다. 이로 인해 연료전지 하이브리드 최적화 연구는 제어전략과 배터리 용량 선정에 집중되어 있다.

연료전지 하이브리드의 제어전략은 크게 파워 어시스트, 로드레벨링, 등가연료제어전략으로 나뉜다.<sup>(2)</sup>

† Corresponding Author, [lds97@hanmail.net](mailto:lds97@hanmail.net)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

정종렬 등<sup>(3)</sup>은 상업용 HEV에서 배터리 SOC의 경로가 적정 작동범위인 45~75%를 넘지 않는 최저 배터리 용량을 찾기 위해 시뮬레이션을 반복하는 시행착오법을 사용하였다.

오경철 등<sup>(4)</sup>은 병렬형 HEV의 엔진과 모터의 동력 분배에 대해 연비를 최소로 하는 제어전략을 MMFD최적화 기법을 사용하여 최적화 하였다.

국광표 등<sup>(5)</sup>은 FCHEV에서 울트라캐패시터와 배터리의 최적 용량선정을 위해 유전자알고리즘을 사용하여 연비를 최소화하는 울트라캐패시터와 배터리의 용량을 제시 하였다.

정춘화 등<sup>(6)</sup>은 최적제어이론을 사용하여 FCHEV의 최소연료소모량을 얻을 수 있는 필요조건으로부터 등가연료파라미터의 최적경로를 구하고 사용구간내 배터리 전압과 저항이 일정하다는 가정하에 일정 등가연료파라미터를 사용한 경우와 연비를 비교하였다.

본 논문은 로드레벨링 제어전략에 주행전후 배터리 충전량 변화에 대한 등가연료소모량 개념을 도입하여 제어전략에서 배터리 사용구간 확대만으로 연비를 향상 시킬 수 없도록 제한하였고 로드레벨링 제어전략의 주 연료사용 구간을 분석하여 연료전지의 사용비율이 높은 영역에 대해 배터리-연료전지 간 동력분배를 연비향상을 목표로 최적화하였다.

## 2. 연료전지 차량 모델링

차량모델은 Carsim을 사용하였으며 사용된 차량과 연료전지 하이브리드 시스템의 데이터는 Table 1 및 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Parameter of vehicle

Item	Value
Vehicle unsprung mass(Kg)	1140
Front sprung mass(Kg)	60
Rear sprung mass(Kg)	60
Fianl drive gear ratio	3.33
Tire radius(m)	0.338
Aerodynamic drag coefficient	0.456
Vehicle frontal area(m <sup>2</sup> )	1.6
Air density(Kg/m <sup>3</sup> )	1.206
Rolling resistance coefficient	0.004
Hydraulic brake torque(Nm)	700
Regenerative brake torque(Nm)	250

연료전지 하이브리드 모델의 기본구성은 다음 Fig. 1과 같다.

기본 모델은 Front Drive Inwheel Motor System이며 가속시에는 가속페달로부터 요구되는 출력(P<sub>D\_drive</sub>)을 계산하고 필요한 출력을 연료전지(P<sub>Fuelcell</sub>)와 배터리(P<sub>Batt</sub>)로부터 제어전략에 따라 공급받아 모터를 구동(T<sub>M</sub>)하여 차량 모델에 입력하며 제동 시에는 브레이크 페달로부터 요구 제동토크(T<sub>D\_brake</sub>)를 계산하고 모터의 회생제동 토크(T<sub>b\_regen</sub>)와 유압제동토크(T<sub>b\_hydr</sub>)를 나누어 총 제동토크를 차량모델에 입력하도록 하였으며 회생제동 전류(i<sub>regen</sub>)를 배터리에 저장하도록 모델링하였다. 연료전지는 식 (1)과 같이 비가역현상을 고려한 연료전지모델을 사용하여 모델링 되었고 액상 및 기상 각각의 온도에 따른 Gibbs free energy에 의한 연료전지 단위셀의 전류전압 특성은 Fig. 2와 같이 사용전류의 증가에 따라 단위셀의 전압이 낮아지는 것을 보여주고 있다.

$$E_{cell} = -\frac{\Delta g^0}{ZF} - \frac{RT}{2\alpha F} \ln\left(\frac{i(t)}{i_0}\right) - \frac{RT}{ZF} \ln\left(1 - \frac{i(t)}{i_l}\right) - i(t)r \quad (1)$$

$\Delta g^0$ 는 Gibbs free energy의 변화량이며 Z는 수소 전자의 개수, F는 Faraday상수이다. R은 기체상수, T는 연료전지 작동온도이며  $\alpha$ 는 전달계수

Table 2 Powertrain parameter

FCS power (KW)	Battery capacity (KWh)	Motor power (KW)
60	2.0	60

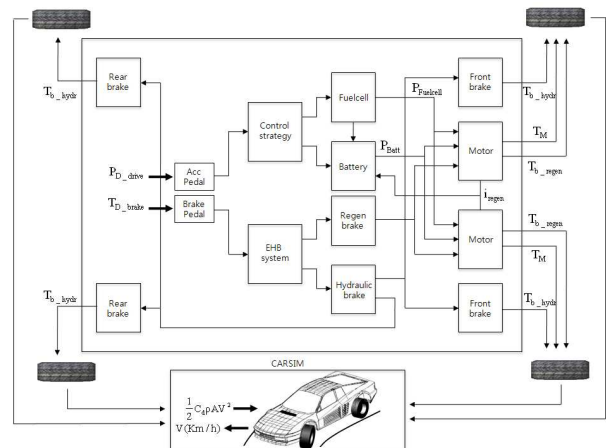


Fig. 1 Fuelcell hybrid model

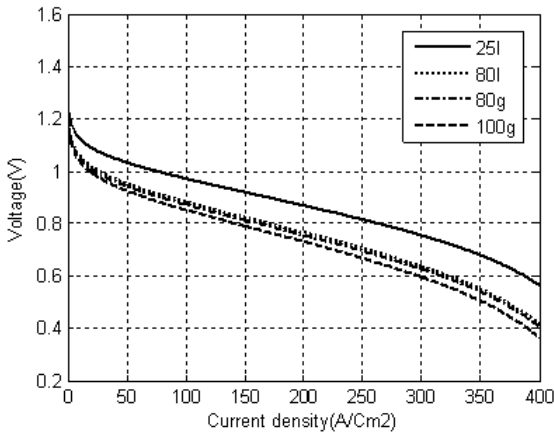


Fig. 2 Unit cell I-V curve

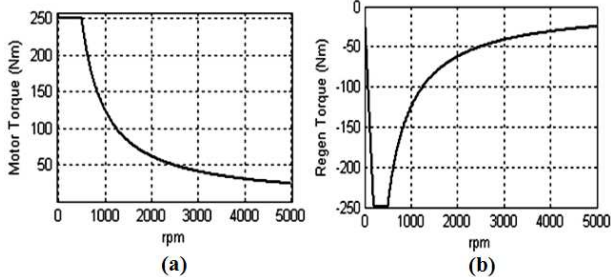


Fig. 3 Driving & braking motor torque curve

이고  $i$ 는 연료전지 출력전류,  $i_0$ 는 교환전류밀도이다.  $i_1$ 은 한계전류밀도이며,  $r$ 은 스택내부저항이다.

배터리는 전류사용량과 충전상태를 나타내는 방정식 (2)를 사용하여 모델링되었다.

$$I_{used} = \{(1 - SOC_{initial}) \times I_{max}\} + \frac{I_{batt}}{3600} \quad (2)$$

$$SOC = \frac{(I_{max} - I_{used})}{I_{max}}$$

$I_{max}$ 는 배터리의 용량이며 SOC는 배터리의 충전상태이고  $SOC_{initial}$ 는 초기 SOC값이다.  $I_{batt}$ 는 충전 전류이며  $I_{used}$ 는 배터리의 전류사용량이다.

모터는 Fig. 3과 같이 일정토크영역을 가진 60KW 모터특성에 일치하도록 모델링 되었으며 구동 및 회생제동을 나누어 모델링 하였다.

(a)는 구동시 모델링된 모터의 토크 특성을 나타내고 있으며 (b)는 회생제동시 모터의 제동 토크를 보여주고 있다.

제동 모델은 전후 제동 압력배분 및 유압제동영역과 회생제동영역을 나누어 모델링 하였다. Fig. 4는 요구 제동토크( $T_{D\_brake}$ )에 대해 유압 브레이크 토크와 회생제동 토크가 영역을 나누어 분담하고 있는 것을 보여주고 있다.

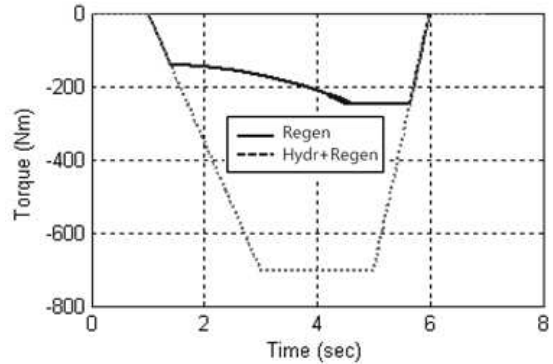


Fig. 4 Regen & hydraulic brake torque

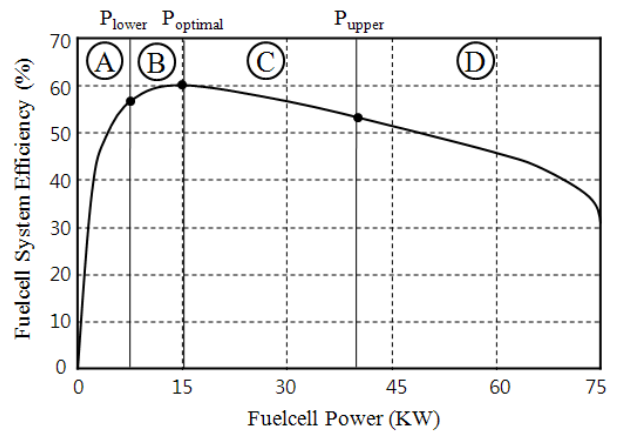


Fig. 5 Load leveling control strategy

회생제동 토크는 제동에 의해 차량의 속도가 감소되면서 모터의 회전수가 감소하여 모터의 회생제동 토크 특성에 따라 제동토크가 증가 하는 것을 보여주고 있으며 회생제동 토크를 상회하는 요구제동 토크를 유압 제동장치가 담당하도록 모델링된 결과를 보여주고 있다.

회생제동 시 충전전류는 식 (3)을 사용하였다.

$$i_{regen} = \frac{E_{regen}}{R} = \frac{K_\phi \times \omega}{R} \quad (3)$$

제어전략은 연료전지 스택을 고효율 영역에서 운전되도록 하고 고효율구간에서 운전하고 남은 출력을 배터리에 저장하도록 하여 배터리 SOC 유지에 유리하도록 제안된 로드레벨링 제어전략을 사용하였으며 Fig. 5에 로드레벨링 전략을 도시하였다.

로드레벨링 제어전략은 연료전지 시스템 효율 그래프에서  $P_{lower}$ ,  $P_{optimal}$ ,  $P_{upper}$  세 기준점을 중심으로 제어 영역을 나누어 배터리와 연료전지의 출력을 제어한다. A영역은 배터리 사용 영역이며

B영역은  $P_{optimal}$ 에서만 운전되며 요구 출력을 제외한 나머지 출력은 배터리에 충전하게 된다. C영역은 연료전지 사용구간이다. D영역에서 연료전지는  $P_{upper}$ 점까지만 구동되며 그 이상 필요로 하는 출력은 배터리에서 공급하도록 되어있다.

### 3. 연료전지 사용영역 분석 및 동력분배 모델링

Fig. 6은 PID제어를 통해 차량모델이 UDSS (Urban Dynamometer Driving Schedule, FTP-72 or LA-4 mode) 드라이빙 사이클을 추종할 때 로드레벨링 제어전략에 의해 요구되는 배터리와 연료전지의 출력 그리고 회생제동으로 충전되는 출력을 나타내고 있다. 연료전지의 출력은 고출력이 요구되는 초기 발진가속에만 사용되는 것을 볼 수 있으며 해당 영역은 로드레벨링 제어전략에서 연료전지만 구동되도록 지정된  $P_{optimal} \sim P_{upper}$ 영역으로 이 영역을 배터리출력을 더한 하이브리드 영역으로 변환하면 더해진 배터리 출력만큼 요구되는 연료전지 출력이 감소하여 연비향상을 기대할 수 있다.

Fig. 7은  $P_{optimal} \sim P_{upper}$ 영역을 하이브리드화 하기 이전의 차량모델이 제어전략을 따라 UDSS 사이클을 추종할 때 요구출력, 배터리출력, 연료전지출력을 나타내고 있으며  $0 \sim P_{upper}$ 영역인  $0 \sim 7(KW)$ 에서는 배터리만 구동되며,  $P_{lower} \sim P_{optimal}$ 영역인  $7(KW) \sim 15(KW)$ 에서는 연료전지가  $P_{optimal}$ 인  $15(KW)$ 로 운전되며 남은 출력은 배터리에 저장하는 것을 볼 수 있다. 하이브리드화 하기 위한  $P_{optimal} \sim P_{upper}$ 영역인  $15(KW) \sim 40(KW)$ 에서는 연료

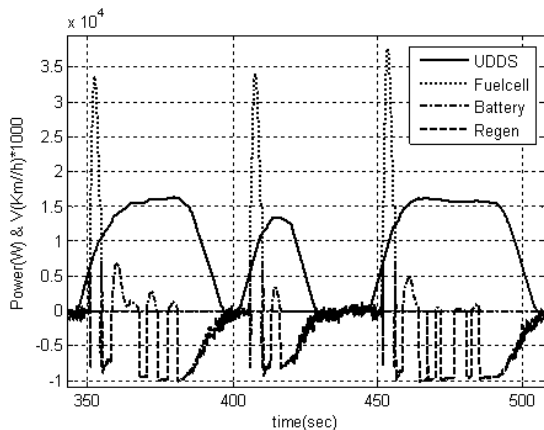


Fig. 6 Fuelcell, Battery, Regen Power in UDSS

전지만 구동되고 있으며  $P_{upper} \sim 75(KW)$ 영역인  $40(KW) \sim 75(KW)$ 에서는 연료전지가  $40(KW)$ 까지만 작동되고 나머지 요구출력은 배터리가 담당하는 것을 볼 수 있으며 모든 영역이 로드레벨링 제어 전략을 따라 제어되고 있는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 8은  $P_{optimal} \sim P_{upper}$ 영역을 하이브리드화 한 차량모델이 제어전략을 따라 UDSS 사이클을 추종할 때 요구출력, 배터리출력, 연료전지출력을 나타내고 있으며 배터리 출력보조를  $23(KW)$ 로 제한했을 때의 그래프이다.  $P_{optimal} \sim P_{upper}$ 영역인  $15(KW) \sim 40(KW)$ 에서 배터리가  $27(KW)$ 까지 동력을 보조하고 있는 것을 확인할 수 있다.

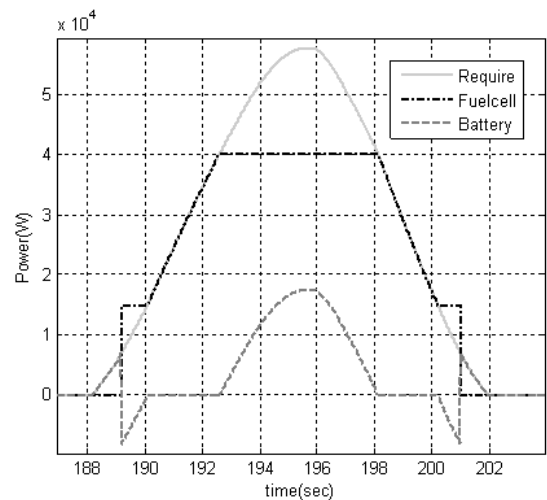


Fig. 7 Normal load levelling control strategy power in UDSS

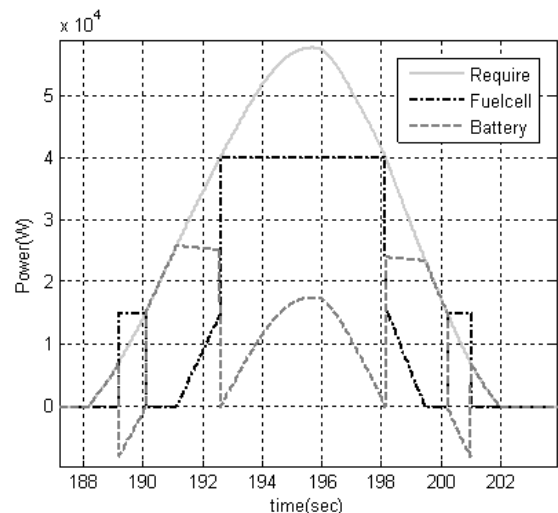


Fig. 8 Hybrid load levelling control strategy power in UDSS

4. 최적화

UDDS를 추종하는 차량 각 부분의 작동상태를 나타내는 상태변수는 다음과 같다.

$$\overline{X}(t) = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{D-drive} \\ P_{Fuelcell} \\ P_{Batt} \\ SOC \\ T_M \\ T_{D-brake} \\ T_{b-Hydr} \\ T_{b-Regen} \\ \omega_1 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$P_{D-drive}$ 는 UDDS를 추종하기 위한 요구출력이며  $P_{Batt}$ 와  $P_{Fuelcell}$ 은 각각 요구출력을 충족하기 위해 분배된 배터리 출력과 연료전지 출력을 나타낸다. SOC는 배터리의 충전량을 나타내며  $T_M$ 은 모터 토크,  $T_{D-brake}$ 는 UDDS를 추종하기 위한 요구제동력,  $T_{b-Hydr}$ ,  $T_{b-Regen}$ 은 각각 요구제동력을 충족하기 위해 분배된 유압제동력과 회생제동력이고  $\omega_1$ 은 모터의 회전수이다. 각각의 상태변수는 다음의 구속조건을 만족시켜야만 한다.

$$\dot{V} = f(\overline{X}, \overline{u})$$

$$0.45 \leq SOC \leq 0.75$$

구속조건을 만족시키면서 목표를 만족하게 하는 제어변수는 다음과 같다.

$$\overline{u}(t) = [u] = [x]$$

$x$ 는 배터리 동력배분 결정 factor이다. UDDS를 PID제어에 의해 추종하게 되면 요구동력이 결정되고 여기에서  $x$ 에 의해 배터리의 동력 배분량이 결정되면 연료전지의 동력은 다음 식(4)와 같이 된다.

$$P_{Fuelcell} = P_{D-drive} - P_{Batt} \tag{4}$$

배터리의 출력보조는 배터리의 효율구간을 고려하여 SOC가 구속조건 영역에 있을 때 실행하여야만 한다. 그러므로 출력보조를 위해 사용가능한 배터리의 동력은 다음 식 (5)과 같이 배터리가 보조할 수 있는 최대출력과 SOC 구속조건인 충전량 가중치를 곱하여 결정된다. 충전량 가

중치는 배터리의 SOC가 구속조건 방전 하한값 이하로 방전하지 않도록 하기 위한 가중치이다.

$$P_{avail} = (P_{bmax} \times x) \times \frac{SOC - SOC_{low}}{SOC_{high} - SOC_{low}} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} &\text{if } P_{D-drive} \leq P_{avail} \\ &\quad P_{Batt} = P_{D-drive} \\ &\text{if } P_{D-drive} \geq P_{avail} \\ &\quad P_{Batt} = P_{avail} \end{aligned}$$

$P_{avail}$ 는 가용 배터리 출력이며  $P_{bmax}$ 는 배터리 최대출력이다. SOC는 현재 배터리의 SOC이며  $SOC_{high}$ 는 배터리 충전 상한값 0.75 이며  $SOC_{low}$ 는 배터리 방전 하한값 0.45 이고  $x$ 는 설계변수이다.  $P_{bmax}$ 는 10(KW)로 정하였다.

하이브리드 차량의 연비는 배터리의 SOC변화량에 등가연료 파라미터를 곱한 등가연료소비량과 수소사용량을 합해서 다음 식 (6)와 같이 나타낼 수 있으며 최적화의 목적함수가 된다.

$$\text{minimize } \Phi \tag{6}$$

$$\Phi(u) = \{f(u) + p \times h(u)\}^2$$

$$\text{subject to } 0 \leq x \leq 7$$

$\Phi(u)$ 는 총 연료 소비량이며  $f(u)$ 는 연료전지의 수소사용량을 나타내며 식 (7)과 같다.  $p$ 는 등가연료 파라미터이며  $h(u)$ 는 식 (8)와 같이 SOC의 변화량이다.

$$f(u) = \dot{m}_{h2} = \frac{N_{cell} \cdot M_{h2}}{n \cdot F} \cdot I_{stack} \tag{7}$$

$$h(u) = SOC_{initial} - SOC_{final} \tag{8}$$

등가연료 파라미터는 UDDS 주행사이클에서 배터리 초기 SOC를 Table 3 같이 변화시켜 얻은 SOC변화량과 수소소모량 변화의 관계를 통해 Fig. 9처럼 데이터를 curve fitting하여 얻어진다.

Table 3 Delta SOC and delta hydrogen consumption

Initial SOC	0.8	0.7	0.6
Final SOC	0.7739	0.6838	0.6036
Delta SOC	-0.0261	-0.0162	0.0036
H2 consumption	58.52	59.18	60.27
Delta H2 consumption	0	0.66	1.75

배터리의 용량은 비용과 중량 그리고 용적의 문제로 인해 주어진 연비측정 사이클에서 배터리의 방전 하한값에 도달하지 않는 조건을 만족시키는 최저 용량을 선택해야만 하므로 기존 연비측정 사이클인 UDSS에서 SOC가 방전 하한값인 0.45 이하로 내려가지 않는 최저 배터리용량인 2.0KWh를 사용하였고 1.2KWh와 1.6KWh 일때의 SOC를 다음 Fig. 10에 나타내었다.

최적화는 global optimization이 가능한 유전자 알고리즘을 사용하였다. 유전자 알고리즘은 돌연변이 함수를 만들어 최적화하는 영역을 넓히므로 다른 최적화 기법과 달리 local minimum에 빠질 가능성이 낮은 대신 해석시간이 상대적으로 긴 단점이 있다.

최적화 프로그램은 Matlab의 Optimization toolbox내의 유전자 알고리즘(GA)를 사용하였고Population은 20으로 돌연변이 함수(Mutation function)는 constraint

dependant를 교배함수(Crossover function)는 Scattered를 선정하였다.

UDSS에서 0~150초 구간을 최적화 하여 식 (6)을 만족하는 설계변수 x를 구하였다. Fig. 11에 최적화 수행결과가 나와 있으며 51세대 x=4.215에서 최소 목표함수의 값이 4.9682인것을 보여주고 있으며 세대별 최소 Fitness 값(목표함수 값)과 평균 Fitness값을 보여주고 있다. 목표함수 값이  $\Phi = 4.968$  이므로 최소 연료소비량은 2.2289(g)이 된다.

Fig. 12는 설계변수 x를 0~7까지 변경하여 수동으로 각각의 x값에 대한 목표함수 값의 변화를 계산한 결과이다. 최적화 결과와 같이 4.215에서 목표함수 값이 최저가 되는 것을 확인할 수 있으며 최적화 결과의 타당성을 검증하였다.

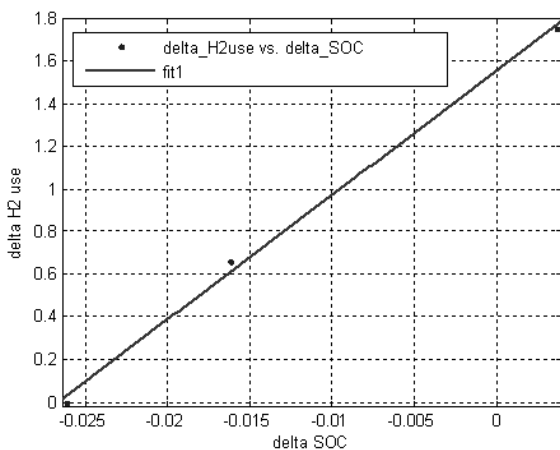


Fig. 9 Delta SOC and Delta hydrogen consumption

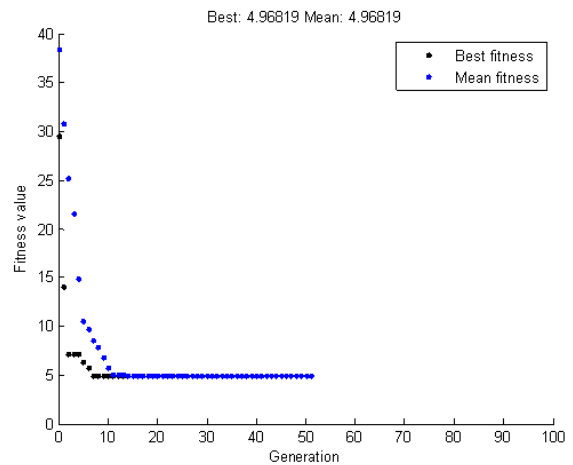


Fig. 11 Genetic algorithm best fitness

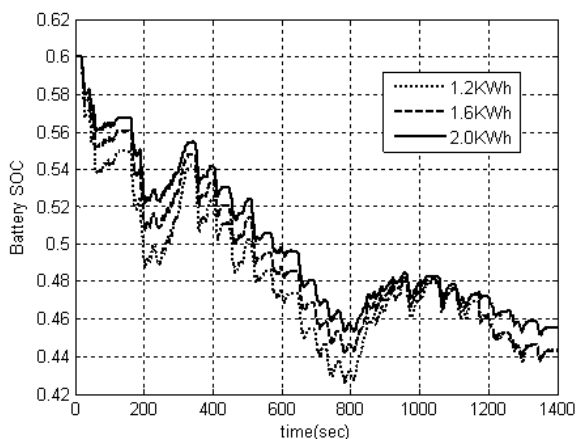


Fig. 10 Battery SOC

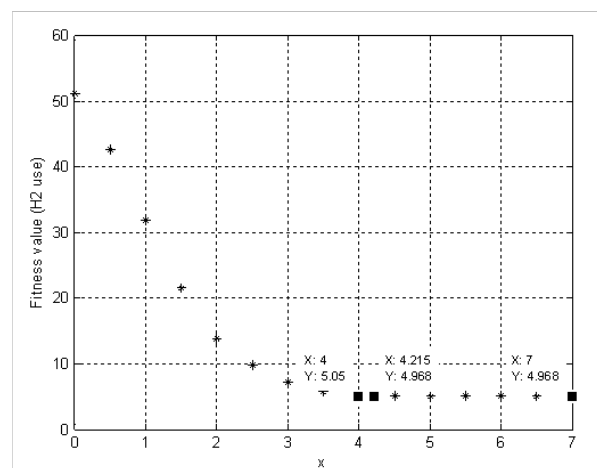


Fig. 12 Optimization result verification

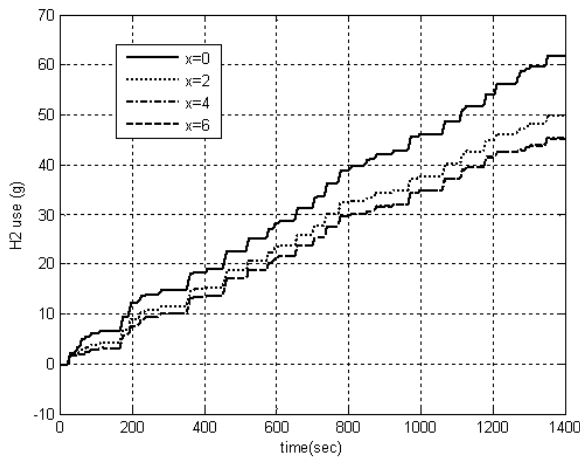


Fig. 13 Fuel consumption comparison

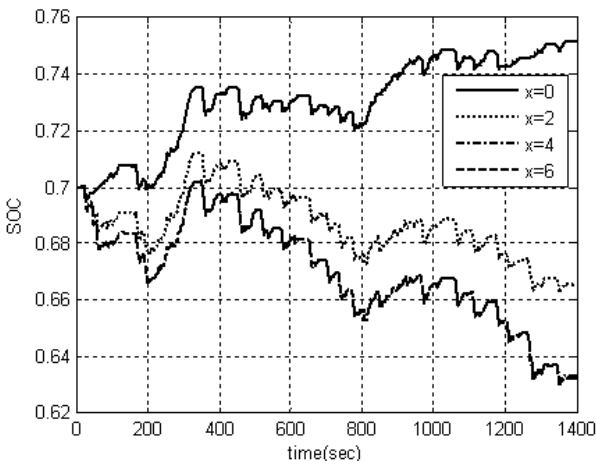


Fig. 14 Battery SOC variation in UDSS

Fig. 13은 최적화기법을 이용한 로드레벨링 제어전략과 이용하지 않은 로드레벨링 제어전략의 UDSS에서의 연비비교이다.

배터리 SOC 최종값은 Fig. 14와 같으며 최적제어를 사용하지 않은 기존 로드레벨링 제어전략의 최종 SOC는 0.7512로 등가연료파라미터에 최초 SOC에서 최종SOC를 뺀 값을 곱한 등가연료 소모량은 -3.43(g)이다. 최적제어된 로드레벨링 제어전략의 최종 SOC는 0.6326로 등가연료 소모량은 4.5158(g)이다.

결과적으로 최종 연료 소모량은 최적화된 로드레벨링 제어전략이  $45.11+4.5158=49.6258(g)$ 이고 최적화 전 소모량은  $61.62-3.43=58.19(g)$ 이다.

배터리와 연료전지의 동력분배를 최적화한 로드레벨링 제어전략을 사용한 결과 기존 로드레벨

링 제어전략을 사용한 연비보다 약 14.7%향상된 것을 확인하였다.

## 5. 결론

(1) 연료전지, 배터리, 모터, 제어전략으로 구성된 연료전지 하이브리드 시스템을 모델링하였다.

(2) 로드레벨링 제어전략을 기본 제어전략으로 사용하였고 대부분의 수소사용량이 발생하는 구간을 하이브리드 구간으로 변경 및 동력분배를 유전자 알고리즘을 사용하여 최적화하였다.

(3) 최적화된 로드레벨링 제어전략 사용으로 SOC변화량을 최소화 하였고 기존 제어전략대비 14.7%의 연비 향상 효과를 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) Lee, G. S., 2009, "Strategic Analysis for Environmental Friendly Vehicle Development," *KSAE09-W0105 2009 Electric Vehicle Special Workshop*, pp. 7~11.
- (2) Park, C. H., 2003, "Development of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Performance Simulator and Control Strategy," Sungkyunkwan University.
- (3) Jeong, J. R., Lee, D. H., Shin, C. W., Lim, W. S., Park, Y. G. and Cha, S. W., 2010, "Study on Battery Sizing of a Heavy-Duty Hybrid System Using Optimal Control Method," *KSAE10-B0296 KSAE 2010 conference*.
- (4) Oh, K. C., Choi, D. H. and Kim, H. S., 2004, "Optimization of Control Strategy and Power Source for a Parallel Hybrid Electric Vehicle," *KSAE04-L0037 KSAE 2004 Electric Vehicle Workshop & Symposium*.
- (5) Kook, K. P., Oh, K. C. and Kim, H. S., 2005, "A Study on Optimization of ESU Sizing for a Fuelcell Hybrid Electronic Vehicle," *KSAE05-S0078 KSAE 2005 conference*, pp. 495~500.
- (6) Zheng, C. H., Park, Y. I., Lim, W. S. and Cha, S. W., 2012 "Optimal Control of Fuel Cell Hybrid Vehicles," *KSAE*, Vol. 20, No. 2, pp.135~140.
- (7) Oh, G. G., 2011, "The Present State of Battery Development," *KSAEWP\_20110825 KSAE EDV Workshop*, pp. 131~144.