

연료전지 하이브리드 자동차의 룰 베이스 전략과 최적 제어 전략의 비교

정 춘 화¹⁾ · 박 영 일²⁾ · 임 원 식³⁾ · 차 석 원^{*1)}

서울대학교 기계항공공학부/정밀기계설계공동연구소¹⁾ · 서울과학기술대학교 기계설계자동차공학부²⁾ ·
서울과학기술대학교 자동차공학부³⁾

Comparison of Rule-based Power Management Strategy and Optimal Control Strategy in Fuel Cell Hybrid Vehicles

Chunhua Zheng¹⁾ · Yeong-il Park²⁾ · Wonsik Lim³⁾ · Suk Won Cha^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical and Aerospace Engineering/SNU-IAMD, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²⁾School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

³⁾Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 29 September 2011 / Revised 7 December 2011 / Accepted 7 December 2011)

Abstract : Fuel economy is an important factor in a vehicle owing to recent energy supply and environmental problems. This paper deals with fuel cell hybrid vehicles (FCHVs) and introduces a fuel economy evaluation method. The fuel economy of an FCHV depends on its power management strategy. Two rule-based power management strategies are applied to this paper and their fuel economy is evaluated based on the optimal control theory. The concept of the optimal line is also applied to this paper, which is used to compare the fuel consumption of a power management strategy to the optimal result. The two rule-based strategies are also compared to each other.

Key words : Fuel cell hybrid vehicle(연료전지 하이브리드 자동차), Fuel economy evaluation(연비평가), Rule-based power management strategy(룰 베이스 동력 관리 전략), Optimal line(최적 라인)

1. 서론

에너지 자원과 환경 문제가 거론되고 있는 요즘 차량의 연비는 더없이 중요한 요소로 작용하고 있으며 따라서 연비를 향상시키기 위한 여러 가지 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 연료전지 하이브리드 차량을 대상 차량으로 선정하여 연비 평가 방법에 대해 소개하였다. 차량의 연비는 주로 주행 전략에 의존하게 되는데 본 연구에서는 연료전지 시스템의 효율을 고려한 룰 베이스 전략 두 가지를 적용하여 그 연비를 평가하였다. 연비 평가 시, 최적 제어 이론에서 도출되는 최적 라인이라는 개념

을 도입하여 룰 베이스 전략의 연비를 최적의 연비와 비교하는 방법을 사용하였다. 두 가지 룰 베이스 전략을 세 주행사이클에 적용하여 연비 평가를 진행하였으며 두 가지 전략의 특징들에 대해 분석하였다.

2. 차량 시스템

본 연구의 대상 차량은 연료전지 하이브리드 자동차이며 사용된 차량의 파라미터들은 Table 1에 표시되어 있다. 이 데이터들은 Reference 1을 참조하여 선정하였다. 시뮬레이션에 사용된 차량의 동력전달 계는 Table 2에서와 같이 선정하였다. 45 kW의 연료

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

Table 1 Parameters of the vehicle

| Item | Value |
|--|-------|
| Vehicle total mass (kg) | 1500 |
| Final drive gear efficiency (%) | 95 |
| Tire radius (m) | 0.29 |
| Aerodynamic drag coefficient | 0.37 |
| Vehicle frontal area (m ²) | 2.59 |
| Air density (kg/m ³) | 1.21 |
| Rolling resistance coefficient | 0.014 |

Table 2 Powertrain information of the FCHV

| | |
|------------------------|---------|
| Motor | 75 kW |
| Fuel cell system (FCS) | 45 kW |
| FCS power rate | 18 kW/s |
| Battery | 2.4 kWh |
| Converter efficiency | 95% |

Table 3 Parameters used in the FCS model

| Item | Value |
|-------------------------------------|---------|
| Anode pressure (atm) | 2 |
| Cathode pressure (atm) | 1.97 |
| Stack temperature (°C) | 80 |
| Cell number | 242 |
| Active area (cm ² /cell) | 280 |
| Membrane thickness (cm) | 0.01275 |

전지 시스템과 2.4 kWh의 배터리를 동력원으로 사용하였으며 모터는 75 kW짜리를 사용하였다. 본 연구에서 DC-DC 컨버터는 이상적인 컨버터로 가정하여 효율을 95%라고 하였으며 연료전지 시스템의 느린 응답으로 인한 Power rate는 18 kW/s로 하였다.

연료전지 시스템의 모델은 Reference 2를 참조하였으며 이 모델에 적용된 데이터들은 Table 3에 표시되어 있다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 연료전지 시스템의 네트 파워와 연료소모율의 관계를 나타낸다.

배터리는 내부저항 모델³⁾을 사용하였다. 이 모델에서 배터리의 각 파라미터들은 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$\dot{SOC} = -\frac{I}{Q_{bat}} \quad (1)$$

$$I = \frac{V(SOC) - \sqrt{V(SOC)^2 - 4R(SOC)P_{bat}}}{2R(SOC)}$$

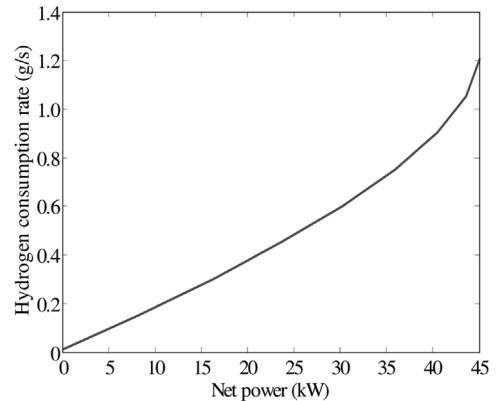


Fig. 1 FCS net power and fuel consumption rate

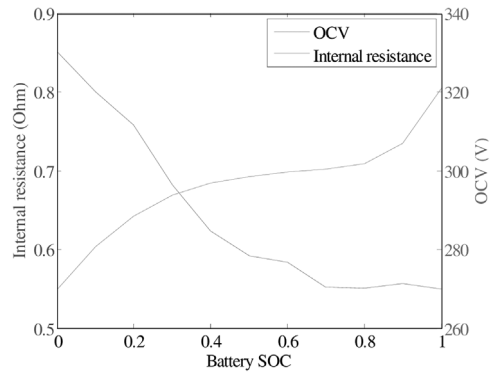


Fig. 2 Battery SOC and internal resistance, and battery SOC and OCV

여기서 Q_{bat} 은 배터리 용량을 나타내고 P_{bat} 은 배터리 파워를 나타내며 I 는 배터리의 전류를 나타낸다. 이 모델에서 배터리의 내부저항 R 와 Open circuit voltage (OCV) V 는 배터리 SOC의 함수이다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 배터리의 성능 곡선을 보여주고 있는데 여기서는 충전과 방전 시의 내부저항이 같다고 가정하였다.

3. 룰 베이스 전략

차량의 연비는 주로 주행전략에 의존하게 되는데 본 연구에서는 연료전지 시스템의 효율 특성을 고려한 룰 베이스 전략 두 가지를 제시하고 그 연비를 평가하였다.

두 가지 룰 베이스 전략의 컨셉은 Fig. 3과 Fig. 4에 표시되어 있다. 연료전지 시스템은 두 그림의 그

연료전지 하이브리드 자동차의 룰 베이스 전략과 최적 제어 전략의 비교

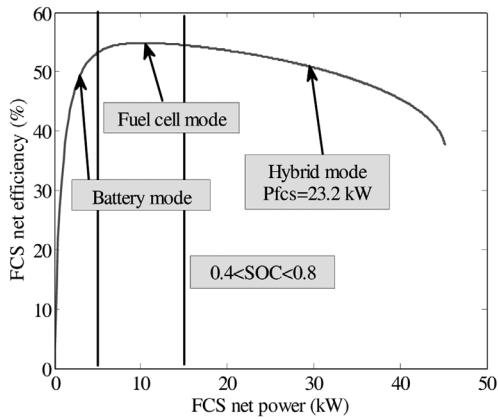


Fig. 3 The concept of the strategy 1

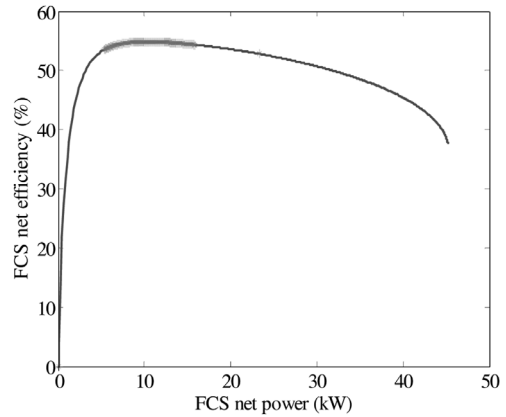


Fig. 5 Operating points of the strategy 1

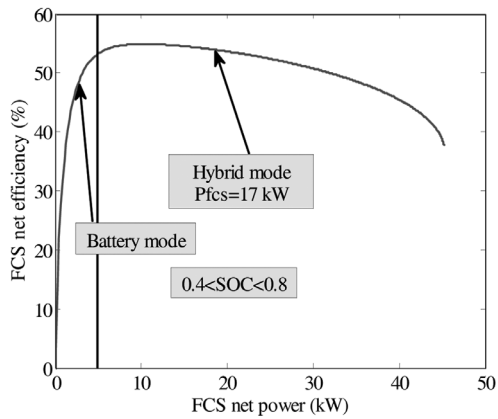


Fig. 4 The concept of the strategy 2

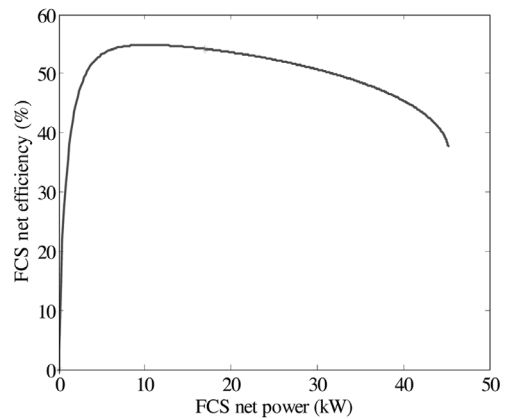


Fig. 6 Operating points of the strategy 2

래프와 같은 효율 특성을 가지고 있다. 5 kW미만에서는 효율이 낮기 때문에 이 부분에서는 되도록 배터리만 사용한다. 5 kW를 초과하면 연료전지 시스템의 효율이 높은 구간이기 때문에 이 구간에서는 연료전지를 사용할 수 있다. 전략 1에서는 이 구간을 연료전지 모드와 하이브리드 모드로 나누었으며 전략 2에서는 하이브리드 모드 하나를 사용하였다. 하이브리드 모드에서 연료전지 시스템은 항상 일정한 파워를 공급하게 되는데 동력이 모자라면 배터리가 보충하고 남으면 배터리에 충전하게 된다. 전략 1에서 이 일정한 파워는 23.2 kW이고 전략 2에서는 17 kW이다. 이 두 전략에서 배터리 SOC의 사용 범위는 모두 0.4에서부터 0.8까지이다.

이 두 가지 전략을 컨셉 상 비교해 보면 다음과 같다. 전략 1은 모드 전환이 더 많기 때문에 전략 2에

비해 더 복잡하다. 대신 전략 1에서는 연료전지 모드가 있으므로 하여 연료전지 시스템이 대부분 시간동안 효율이 가장 좋은 부분에서 작동하게 되는 데 이로 인해 연비가 향상될 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 두 전략을 적용하였을 때의 연료전지 시스템의 작동점들을 보여주고 있다.

이 두 그림을 확인해 보면 전략 1에서는 연료전지 시스템이 일정한 구간에서 작동하는 반면 전략 2에서는 항상 한 점에서 작동한다는 것을 알 수 있다.

Table 4와 Table 5는 각각 이 두 전략을 세 주행사이클에 적용시켰을 때의 시뮬레이션 결과이다. 이 세 주행사이클은 각각 FTP75 urban, NEDC 2000, Japan 1015이다. 여기서 배터리 SOC의 초기 값은 모두 0.7이다.

Table 4 Simulation results of the strategy 1

| Driving cycle | Final SOC | Fuel consumption (g) |
|---------------|-----------|----------------------|
| FTP75 urban | 0.7301 | 140.9974 |
| NEDC 2000 | 0.548 | 119.9436 |
| Japan 1015 | 0.7269 | 50.2213 |

Table 5 Simulation results of the strategy 2

| Driving cycle | Final SOC | Fuel consumption (g) |
|---------------|-----------|----------------------|
| FTP75 urban | 0.7933 | 153.9849 |
| NEDC 2000 | 0.5883 | 130.3876 |
| Japan 1015 | 0.7847 | 59.6799 |

4. 연비 평가

이 부분에서는 위에서 소개된 두 가지 룰 베이스 전략의 시뮬레이션 결과를 최적의 결과와 비교하여 연비를 평가하였다. 여기서 최적 라인이라는 개념을 적용하였는데 이는 최적 제어 이론에서 얻을 수 있다.

최적 제어 이론에 의하면 연료전지 하이브리드 자동차의 최적 해는 Hamiltonian을 식 (2)와 같이 정의하였을 때 식 (3)에 의해 구할 수 있다.^{3,4)}

$$H = \dot{m}_{h_2}(P_{fcs}(t)) + p \cdot F(SOC(t), P_{fcs}(t)) \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial P_{fcs}} = 0 \quad (3)$$

여기서 \dot{m}_{h_2} 는 연료전지 시스템의 연료 소모율을 나타내고 P_{fcs} 는 연료전지 시스템의 파워를 나타낸다. 식 (2)에서 첫 번째 항은 연료 소모와 관련된 항인데 여기서 연료 소모율과 연료전지 시스템 파워의 관계는 Fig. 1에 도시되어 있다. 두 번째 항은 배터리의 전기적 에너지 소모에 관한 항인데 여기서 함수 F 는 식 (1)로부터 얻을 수 있다. p 는 전기 소모와 연료 소모 사이의 등가 파라미터이다.^{3,4)} 식 (3)은 최적의 해를 얻을 수 있는 Necessary condition인데 주어진 차량과 주행사이클에 대해 최적의 P_{fcs} 의 값이 정해지면 따라서 최적의 배터리 파워도 결정되며 이로 인해 최적의 동력분배가 수행된다.

p 를 바꿔 가면서 시뮬레이션을 진행하여 배터리 최종 SOC와 연료 소모량 결과를 도시하면 그 그래프가 바로 최적 라인이다. 최적 라인은 최적 제어 이론에서 얻음으로 하여 다른 전략의 연비를 그와 비

교하여 평가할 수 있게 된다. 여기서 최적 라인은 근사한 직선이 된다.⁵⁾ 같은 차량 시스템에 대해 주행 사이클이 다름에 따라 최적 라인의 형태가 조금씩 달라지긴 하나 배터리 SOC의 사용범위가 크지 않은 하이브리드 차량 시스템에서는 최적 라인을 직선으로 볼 수 있다. 최적 라인은 사실상 배터리의 전기적 에너지 소모와 연료 소모의 관계를 나타낸다. 이 최적 라인과 위에서 언급한 두 가지 룰 베이스 전략에서 얻은 시뮬레이션 결과를 비교하면 그 두 가지 전략의 연비를 평가할 수 있다.

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 각각 전략 1을 위에서 언급된 세 주행사이클에 적용하였을 때 얻은 시뮬레이션 결과를 최적 라인과 비교한 것이다. 여기서 실선은 최적 라인을 나타내고 삼각형은 룰 베이스 전략의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

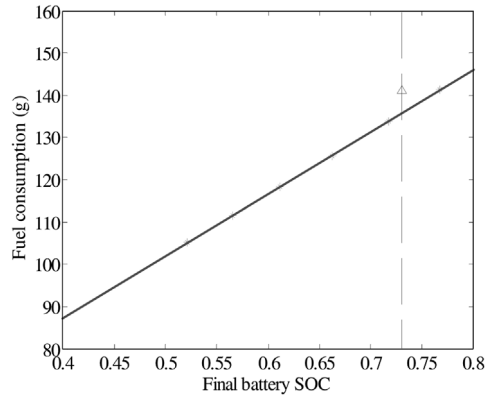


Fig. 7 Comparison of the simulation result of the strategy 1 to the optimal line (FTP75 urban)

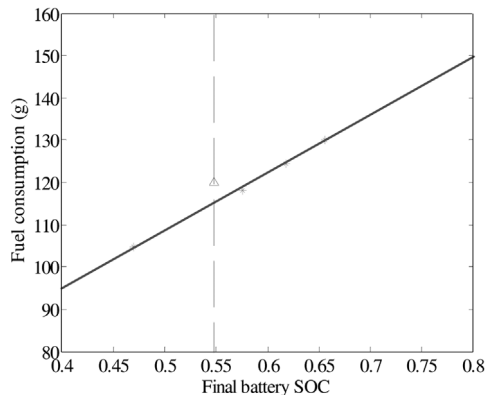


Fig. 8 Comparison of the simulation result of the strategy 1 to the optimal line (NEDC 2000)

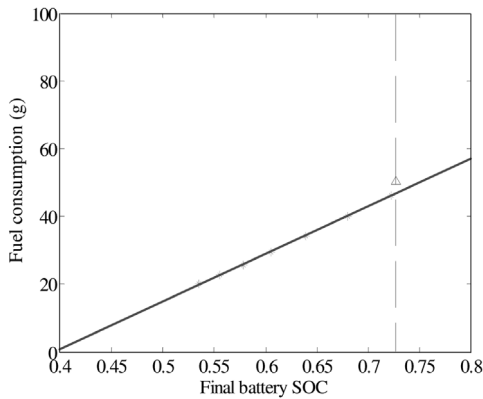


Fig. 9 Comparison of the simulation result of the strategy 1 to the optimal line (Japan 1015)

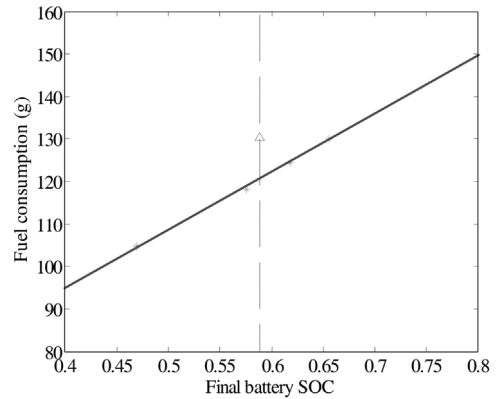


Fig. 11 Comparison of the simulation result of the strategy 2 to the optimal line (NEDC 2000)

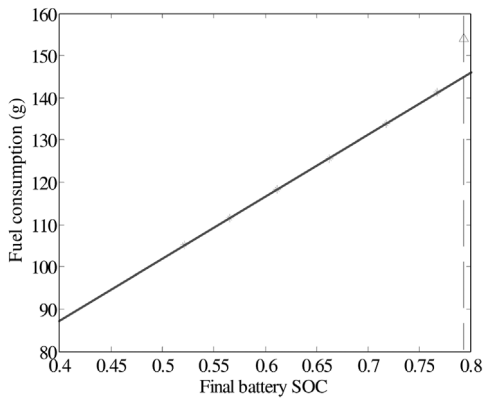


Fig. 10 Comparison of the simulation result of the strategy 2 to the optimal line (FTP75 urban)

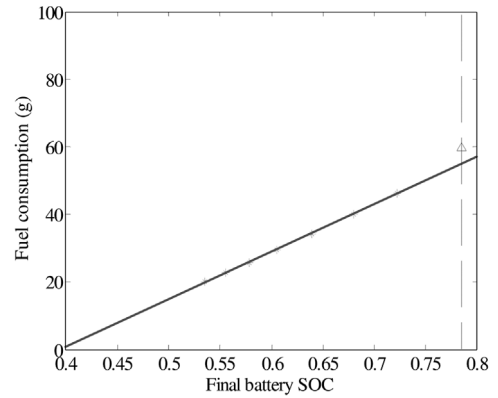


Fig. 12 Comparison of the simulation result of the strategy 2 to the optimal line (Japan 1015)

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 각각 전략 2를 위에서 언급된 세 주행사이클에 적용하였을 때 얻은 시뮬레이션 결과를 최적 라인과 비교한 것이다. Fig. 7부터 Fig. 12까지에서 볼 수 있듯이 전략 1과 전략 2의 시뮬레이션 결과는 항상 최적 라인 위에 위치하게 되는데 이는 최적 라인은 최적 제어 이론에서 도출되었기 때문이다. Fig. 7로부터 Fig. 12까지에서 p 값은 마이너스 값으로 이 값이 작아질수록 배터리 최종 SOC값과 연료 소모량이 커진다. 즉 최적 라인의 오른쪽으로 갈수록 p 값은 작아진다.

Table 6과 Table 7은 각각 전략 1과 전략 2의 시뮬레이션 결과를 최적 라인 즉 최적의 결과와 비교한 것이다. 두 Table을 비교해 보면 전략 1의 시뮬레이션 결과가 전략 2에 비해 최적 결과에 더 가깝다는

Table 6 Comparison of the strategy 1 to the optimal control (initial SOC=0.7)

| Driving cycle | Fuel consumption (strategy 1) (g) | Fuel consumption (optimal control) (g) | Discrepancy (%) |
|---------------|-----------------------------------|--|-----------------|
| FTP75 urban | 140.9974 | 135.5814 | 3.99 |
| NEDC 2000 | 119.9436 | 115.1163 | 4.19 |
| Japan 1015 | 50.2213 | 46.7647 | 7.39 |

Table 7 Comparison of the strategy 2 to the optimal control (initial SOC=0.7)

| Driving cycle | Fuel consumption (strategy 2) (g) | Fuel consumption (optimal control) (g) | Discrepancy (%) |
|---------------|-----------------------------------|--|-----------------|
| FTP75 urban | 153.9849 | 144.8837 | 6.28 |
| NEDC 2000 | 130.3876 | 120.9302 | 7.82 |
| Japan 1015 | 59.6799 | 55 | 8.51 |

것을 알 수 있다. 이는 연비의 관점에서 볼 때 전략 1이 전략 2에 비해 우월하다는 것을 나타낸다. 이는 연료전지 시스템이 전략 1에서 효율이 더 좋은 구간에서 작동하기 때문인데 이는 Fig. 5와 Fig. 6의 비교에서 알 수 있다. 반면 Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 전략 2에서 연료전지 시스템은 항상 일정한 조건에서 작동한다. 이는 전략 2가 더 간단하다는 것을 설명하며 따라서 전략 2의 구현도 더 쉽다는 것을 알 수 있다. 또한 연료전지 시스템이 항상 일정한 조건에서 작동하게 함으로써 연료전지 시스템의 수명에도 유리하다.

5. 결론

본 연구에서는 연료전지 하이브리드 자동차를 대상으로 연료전지 시스템의 효율을 고려한 두 가지를 베이스 전략을 제기하였으며 이 전략들의 연비를 최적 라인을 이용하여 평가하였다. 최적 라인은 최적 제어 이론에서 도출되었기 때문에 다른 전략의 연비를 평가하는데 쓸 수 있게 된다. 두 전략의 시뮬레이션 결과를 최적 라인과 비교해 본 결과, 연비 면에서 전략 1은 전략 2에 비해 우월하였는데 이는 전략 1에서 연료전지 시스템이 전략 2에 비해 효율이 더 좋은 구간에서 작동하기 때문이다. 반면 전략 2는 전략 1에 비해 항상 일정한 조건에서 작동하기 때문에 실제적 구현이 더 간단할 수 있으며 또한 연료전지 시스템의 수명에도 유리할 것으로 예상되었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2012-0000921)과 지식경제부 산업원천기술개발사업(10033110, HEV/PHEV 시스템 성능 최적화 및 통합제어 원천기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) J. Bernard, S. Delprat, F. N. Büchi and T. M. Guerra, "Fuel-cell Hybrid Powertrain: Toward Minimization of Hydrogen Consumption," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.58, pp.3168-3176, 2009.
- 2) J. T. Pukrushpan, H. Peng and A. G. Stefanopoulou, "Control-oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems," Transactions of ASME, Vol.126, pp.14-25, 2004.
- 3) N. W. Kim, Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle, Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, 2009.
- 4) N. W. Kim, S. W. Cha and H. Peng, "Optimal Control of Hybrid Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle," IEEE Transactions on Control System Technology, Vol.19, No.5, pp.1279-1287, 2011.
- 5) C. E. Oh, N. W. Kim, S. M. Byun, Y.-I. Park and S. W. Cha, "Research on the Method for Evaluating Fuel Economies of Hybrid Electric Vehicles Based on Equivalent Fuel Consumption," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.2870-2872, 2009.