

차량 안정성을 고려한 인휠모터 방식 연료전지 전기자동차용 회생제동 알고리즘 개발 Development of Regenerative Braking Control Algorithm for In-wheel Motor Type Fuel Cell Electric Vehicles Considering Vehicle Stability

양동호 · 박진현 · 황성호

D. H. Yang, J. H. Park and S. H. Hwang

Key Words : EHB(전자유압브레이크), Regenerative Braking(회생제동), Vehicle Stability(차량안정성), Co-simulation(연동 시뮬레이션), Fuel Cell Electric Vehicle(연료전지 전기자동차), In-wheel Motor (인휠 모터)

Abstract: In these days, the researches about hybrid and fuel cell electric vehicles are actively performed due to the environmental contamination and resource exhaust. Specially, the technology of regenerative braking, converting heat energy to electric energy, is one of the most effective technologies to improve fuel economy. This paper developed a regenerative braking control algorithm that is considered vehicle stability. The vehicle has a inline motor at front drive shaft and has a EHB(Electro-hydraulic Brake) system. The control logic and regenerative braking control algorithm are analyzed by MATLAB/Simulink. The vehicle model is carried out by CarSim and the driving simulation is performed by using co-simulation of CarSim and MATLAB/Simulink. From the simulation results, a regenerative braking control algorithm is verified to improve the vehicle stability as well as fuel economy.

기호 설명

- L_f, L_r : 무게중심에서 전후륜 차축까지의 거리(m)
- W_f, W_r : 전후륜 차축에 걸리는 무게 (kg)
- δ : 조향각 (°)
- $C_{\alpha f}, C_{\alpha r}$: 전후륜 타이어 코너링 강성계수
- g : 중력가속도 (9.8 m/s^2)
- γ : 요 레이트 (yaw rate)
- V_x : 차속 (vehicle velocity)

1. 서 론

최근, 수소를 연료로 하여 전기를 생산하는 연료전지에 관한 연구가 활발히 진행되면서, 친환경 고효율

차량인 연료전지 전기자동차(Fuel Cell Electric Vehicle; FCEV)에 대한 연구 또한 여러 분야에서 활발히 이루어지고 있다^{1~2)}. 특히, 차량의 효율을 높이기 위한 많은 연구가 진행되고 있는데, 이 가운데 회생제동(regenerative braking)은 제동 시 마찰로 소모되는 운동에너지를 배터리, 울트라 커패시터(ultra-capacitor)와 같은 에너지 저장장치에 저장하여 이를 구동 시 다시 이용하는 기술로, 전기자동차, 연료전지 전기자동차 또는 하이브리드 전기자동차의 연비 개선을 위한 핵심적인 분야로 연구되고 있다^{3~8)}. 한편, 최근 자동차 시장은 연비와 동력 성능뿐만 아니라 우수한 차량 안정성을 갖춘 첨단 지능형 차량의 개발을 요구하고 있다. 차량의 안정성 확보를 위해 현재 많은 기술들이 개발되어 있으며, 대표적으로 ABS(Anti-lock Braking System), TCS(Traction Control System), VDC(Vehicle Dynamics Control), ASC(Active Steering Control) 등의 능동 안전(active safety) 시스템 등이 연구되어 왔다. 이는 차량의 주행 시 사고를 예방함과 동시에 운전자

접수일 : 2010년 2월 7일
 황성호(책임저자) : 성균관대학교 기계공학부
 E-mail : hsh@me.skku.ac.kr, Tel : 031-290-7464
 양동호, 박진현 : 성균관대학교 대학원 기계공학과

에게 편의와 신뢰성을 제공하는 기술로써, 세계 각국에서 연구가 이루어지고 있다⁹⁾.

본 논문에서는 연료전지 차량의 안정성을 고려한 회생제동 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘 검증을 위해 MATLAB/Simulink기반 연료전지 차량 시뮬레이터를 개발하였으며, 개발된 연료전지 차량 시뮬레이터를 활용하여 알고리즘 검증을 수행하였다. 연료전지 차량 시뮬레이터는 제어기 모델과 플랜트 모델 및 차량 모델로 이루어져 있으며, 여기서 차량 모델의 경우 차량 동특성 해석 시뮬레이션에 많이 사용되는 CarSim 프로그램을 이용하였다.

2. 연료전지 차량 시뮬레이터

Fig. 1은 본 연구의 대상 차량인 연료전지 차량의 구조를 나타낸 것이다. 전륜은 인라인 모터를, 후륜은 인휠 모터를 각각 장착하고 있으며, 또한 연료전지 스택, 수소저장 탱크, 배터리, DC/DC 컨버터로 구성되어 있다.

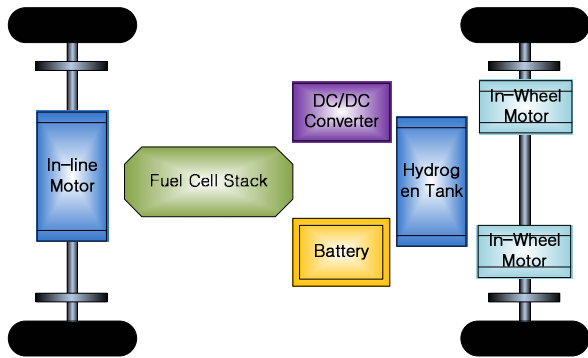


Fig. 1 Structure of Fuel Cell vehicle

2.1 연료전지 및 동력계 모델링

Fig. 3은 연료전지 및 동력계의 모델링 결과를 보여준다. 주요 부품인 연료전지 스택, 모터 및 DC/DC 컨버터는 각각의 성능 곡선과 특성 맵 및 과도상태 동역학을 이용하여 모델링을 수행하였으며, 배터리의 경우 내부저항의 특성에 따른 배터리 SOC(State of Charge) 모델을 사용하였다. 또한 차량의 출발, 정지, 가속 등의 각각의 주행모드에 대해서 제어를 모델링하였으며, 운전자의 거동을 반영하기 위해 운전자 모델링도 수행하였다. 운전자 모델의 경우 차량의 선회 시 안정성을 파악하기 위해 조향 값 뿐 만 아니라 가속페달 및 브레이크페달 값도 출력이 되도록 모델링하였다.

2.2 차량모델

차량 모델의 경우, 차량의 동적거동 해석에 많이 사용되고 있는 CarSim 프로그램을 이용하였다. 차량 모델은 크게 전·후륜 현가장치, 조향 및 타이어 등으로 구성되어 있으며, 기본 데이터는 CarSim에서 제공하는 데이터를 기반으로 설정하였다. 차량의 형태는 SUV 모델로서 차량의 무게 배분이나 중량은 일반 양산 차량을 기초로 설정하였다.

차량이 선회 시 요구되는 요 속도(yaw rate)를 구하기 위해 식 (1)과 같은 차량 방정식을 활용해 차량의 요 속도 값을 계산하였다.

$$\gamma_d = \frac{V_x}{(L_f + L_r) + \left(\frac{W_f}{C_{\alpha f}} - \frac{W_r}{C_{\alpha r}} \right) \frac{V_x^2}{g}} \delta \quad (1)$$

여기서, γ_d 는 요구되는 요 속도, V_x 는 차속, L_f, L_r 은 무게중심에서 전후륜 차축까지의 거리, W_f, W_r 은 전후륜 차축에 걸리는 무게, $C_{\alpha f}, C_{\alpha r}$ 은 전후륜 타이어 강성계수, g 는 중력가속도를 나타낸다. 본 논문에서 사용된 파라미터 값은 Table 1.과 같다. 또한 Fig. 2는 전후륜 타이어 강성계수를 도출하기 위한 그래프를 보여준다.

Table 1 Steering parameters

Parameters	Values
L_f	1,056 mm
L_r	1,584 mm
W_f	1,122 kg
W_r	748 kg

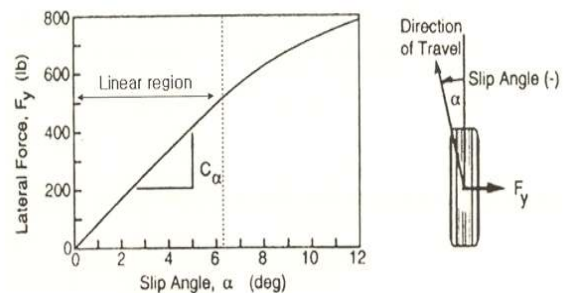


Fig. 2 Parameters for $C_{\alpha f}, C_{\alpha r}$

2.3 연동 시뮬레이션 (co-simulation)

Fig. 4은 연료전지 차량의 동적거동 해석을 위한 CarSim과 MATLAB/Simulink간의 연동 시뮬레이션 환경을 보여준다. 운전자 모델에서 출력되는 액셀,

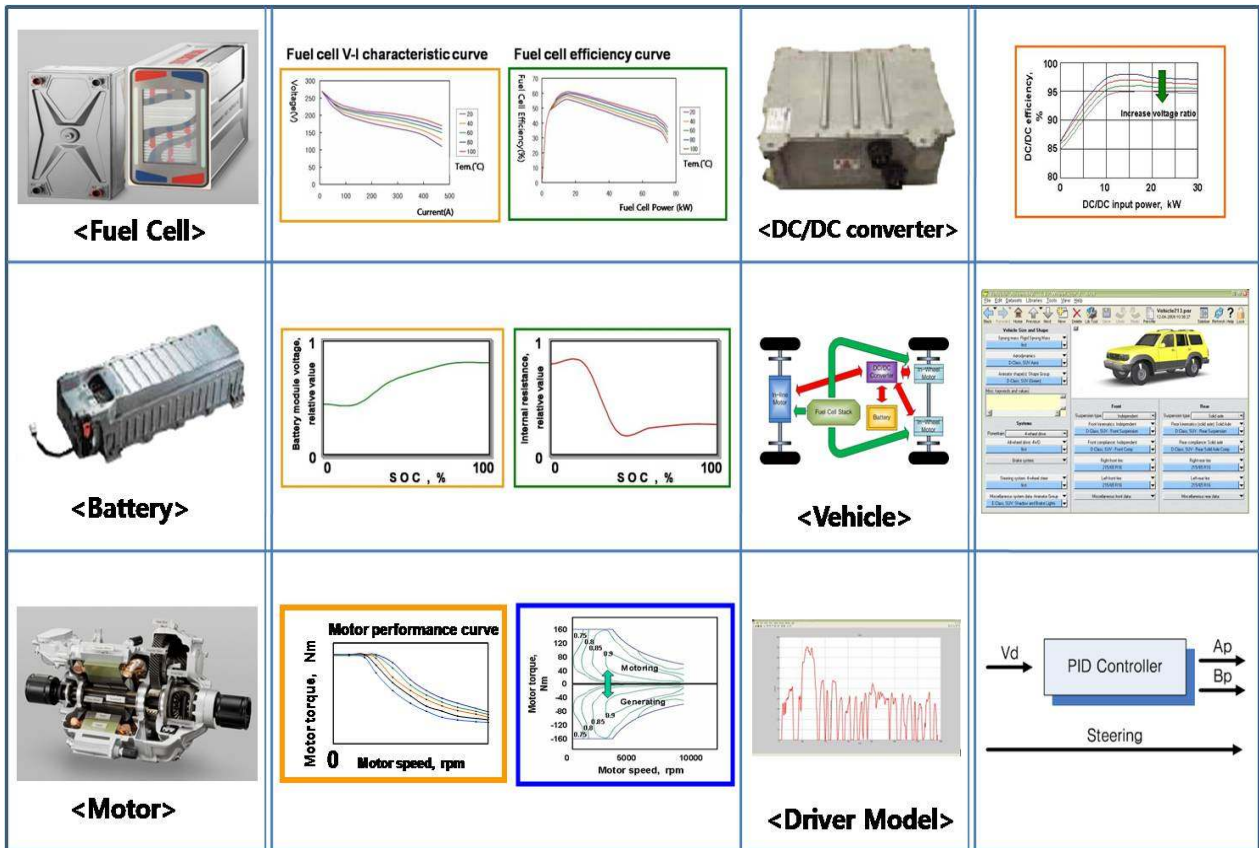


Fig. 3 Modeling of Fuel Cell Electric Vehicle

브레이크 및 조향 값에 따라 연료전지의 출력이 결정되고, 이에 따라 모터에서 구동력이 출력된다. MATLAB/Simulink에서 출력된 차량의 구동력은 CarSim의 차량 모델에 전달되게 되는데, 이에 따라 차량의 동적거동 특성이 달라지게 된다.

본 시뮬레이션 환경에서는 차량의 속도와 요 속도를 다시 MATLAB/Simulink 모델에 전달하게 되어 있다. 전달된 상태값의 변화에 따라 MATLAB/Simulink에서는 제어기 모델에 의하여 차량을 제어하게 된다.

3. 회생제동 제어 알고리즘

운전자의 제동의지를 가지고 제동을 시작하게 되면, 회생제동 가능 여부를 판단하게 된다. 회생제동이 가능할 시에는 배터리의 SOC와 모터의 각속도, 그리고 기어비 등을 고려하여 회생제동력을 판단한 후 회생제동 제한로직을 거쳐 최종적인 회생제동력이 계산된다. 회생제동력을 제외한 제동력은 물리적인 브레이크 제동력으로 작용한다. 여기서 사용되는 브레이크 종류로는 EMB(Electro-mechanical Brake), EHB(Electro-hydraulic Brake), EWB (Electronic Wedge Brake) 등 많은 전자제어 브레이크들이 있으며, 본 논문에서는 EHB가 장착된 시스템을 대상으로 연구를 수행하였다. 이를 바탕으로 한 회생제동 알고리즘은 Fig. 5와 같다.

3.1 회생제동 제한로직

회생제동은 배터리 SOC, 차량 속도, 모터와 배터리의 출력에 의해서 제한한다. 회생제동 제한 로직은 배터리의 SOC를 고려하여 배터리의 과충전 또는 과방전을 제한, 배터리가 손상되는 것을 방지하고, 충·방전 효율이 좋은 구간에서 회생제동이 이루어질 수 있도록 제한하는 역할을 한다.

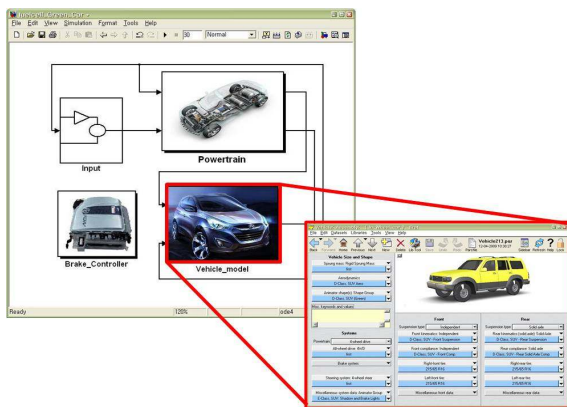


Fig. 4 Co-simulation using CarSim and MATLAB

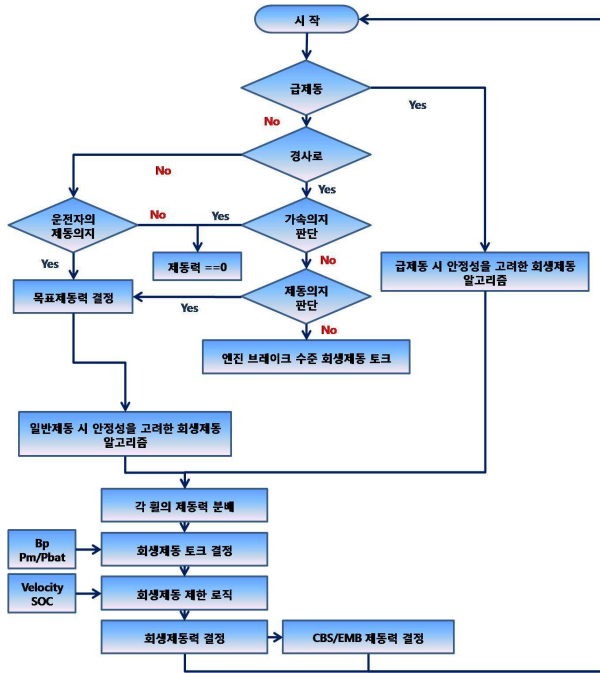


Fig. 5 Control flow of regenerative braking

또한, 차량의 속도는 저속에서의 회생제동으로 인해 순간적인 회생제동 토크가 증가하게 되면 승차감(제동감)이 나빠지기 때문에 이를 제한하여 승차감에 부정적인 영향을 주지 않도록 제한한다.

마지막으로 모터의 출력이 배터리의 출력보다 크게 되면 배터리가 손상될 수 있다. 따라서 배터리의 출력이 모터의 출력 보다 큰 영역에서만 회생제동이 작동되도록 제한하였다.

3.2 안정성을 고려한 알고리즘

차량의 오버스티어링(oversteering), 언더스티어링(understeering), 또는 스플릿-뮤(split- μ) 상황에서 일반적으로 ABS나 TCS 등을 사용하여 차량을 안정적으로 제어한다.

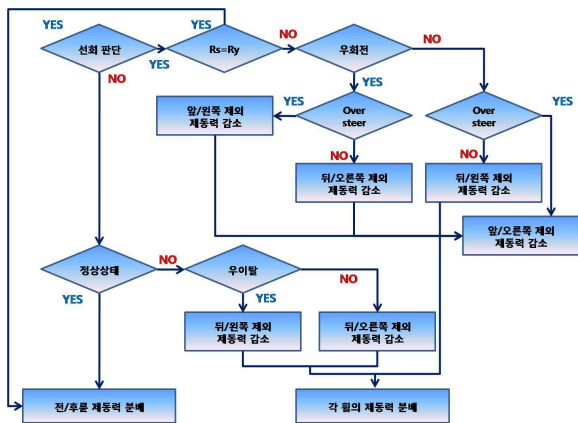


Fig. 6 Braking torque decision in a rapid stop

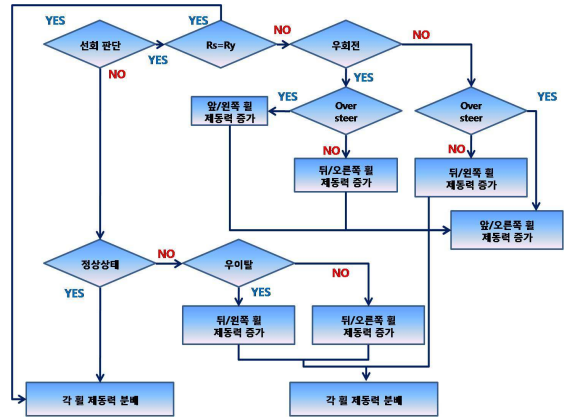


Fig. 7 Braking torque decision in a normal stop

본 논문에서는 차량의 요 속도를 입력받아 각 휠의 제동력을 결정하여 차량의 오버스티어링, 언더스티어링 값 등을 측정하여 제동력을 결정하게 되는데, 이때 제동력의 일부를 회생제동이 가능한지를 판단하여 차량의 안정성을 도모함과 동시에 에너지 효율을 높일 수 있게 하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 차량의 제동 상황에 따른 각 휠에 분배되는 제동력을 결정하는 알고리즘이다.

4. 시뮬레이션

회생제동 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 개발된 연료전지 차량 성능 시뮬레이터에 회생제동 알고리즘을 MATLAB/simulink로 작성하여 탑재하였다. 차량의 안정성을 고려한 회생제동 알고리즘의 성능 검증을 위해 다음과 같은 차량 사양을 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 2 Vehicle parameters

Parameters	Values
Vehicle mass	1870 kg
Fuel cell power	100 kW
Fuel cell voltage	259.6 V
Motor power	100 kW
Battery power	24 kW
Reduction gear	10.03
Height	1,655 mm
Width	1,820 mm
Length	4,410 mm
Wheel base	2,640 mm
Center of mass (From Front Wheel)	X : 1,056 mm Y : 910 mm Z : 700 mm

선회시 차량의 안정성을 확인하기 위하여 J-turn 시뮬레이션을 수행하였다. 차량을 80km/h까지 가속 후 5초 동안 정차하도록 설정을 하였으며, 차량이 정차를 시작하기 1초 전에 조향각을 Fig. 8과 같이 50°로 계단형태 신호(step)로 입력하였다. 시뮬레이션 결과는 다음 그래프와 같으며, 같은 시뮬레이션 조건으로 차량의 안정성을 고려한 알고리즘을 탑재한 차량과 탑재하지 않은 차량에 대해 비교하였다.

시뮬레이션 결과, 알고리즘을 탑재한 차량이 그렇지 않은 일반 차량보다 안정적으로 정차를 하는 것을 알 수 있었다. Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에서 보는 것과 같이 알고리즘을 탑재한 차량의 경우 차량의 안정성 판단에 기준이 되는 요 속도의 값이 탑재하지 않은 차량보다 앞선 수식으로 구해진 기준 요 속도 값에 추종하여 차량이 정차하는 것을 확인할 수 있다. 또한 알고리즘을 탑재한 차량의 경우 회생제동량이 탑재하지 않은 차량보다 많이 발생하여, 배터리의 최종 SOC값이 약 2%정도 높게 측정이 되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 연료전지 차량의 성능 시뮬레이터를 개발하고, 연비 향상 뿐 아니라 차량의 제동 시 안정성을 고려한 회생제동 알고리즘을 개발하였다. 개발된 성능 시뮬레이터를 이용하여 안정성을 고려한 회생제동 알고리즘을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink와 CarSim 프로그램을 연동할 수 있는 연동 시뮬레이션(co-simulation) 환경을 구축하였다. 선회와 제동이 동시에 이루어지는 경우에 대한 시뮬레이션 결과, 본 논문에서 제안한 회생제동 알고리즘이 차량의 요 속도를 제어하여 안정적으로 차량을 제동 시킴으로써, 회생제동을 통한 연비향상 뿐 아니라 차량의 안정성 또한 증진시키는 것을 확인할 수 있었다.

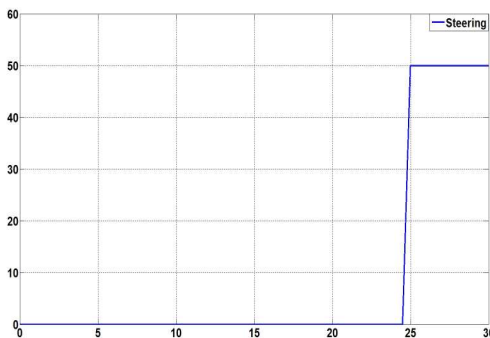


Fig. 8 Simulation input (Steering wheel angle)

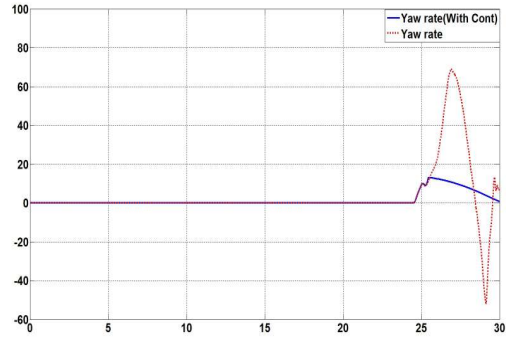


Fig. 9 Simulation results (Yaw rate)

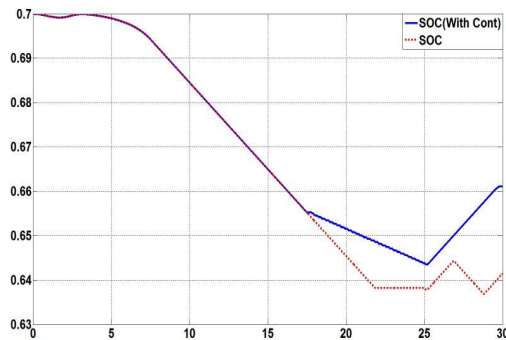


Fig. 10 Simulation results (Battery SOC)

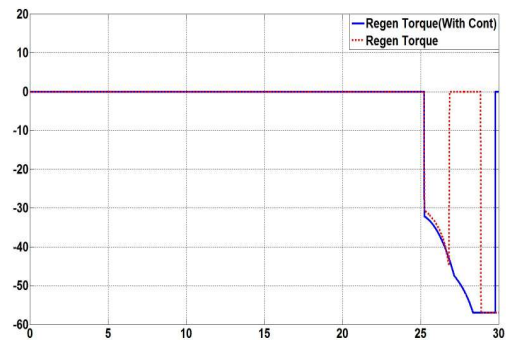


Fig. 11 Simulation results (Motor regen. torque)

후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRF-2005-205-D00021)

참고 문헌

- 1) K. H. Hauer, R. M. Moore, S. Ramaswamy, "The Hybridized Fuel Cell Vehicle Model of the University of California", SAE SP-1589, 2001.
- 2) C. H. Park, K. C. Oh, D. H. Kim, H. S. Kim,

- "Development of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Performance Simulator", IJAT, Vol.5, No.4, pp.287-295, 2004.
- 3) Mando, "Regenerative Brake Method of Electric Vehicle", KR2007-0059556, 2007.
- 4) KIA Motors, "Method of Regenerative Brake", KR Patent 0036329, 1997.
- 5) Bosch, "Method and Apparatus for Controlling the Brake System of Motor Vehicles with Electricdrive", US Patent 5853229, 1998.
- 6) J. W. Dixon, M. E. Ortuar, "Ultracapacitors DC-DC Converters in Regenerative Braking System", IEEE AESS System Magazine, 2002.
- 7) Jeewook Huh, Hanbyeol Jin, Dongkwan Seo, Sung-Ho Hwang, "Analysis of Braking Characteristics and Development of Regenerative Braking Control Algorithm for a Passenger Fuel Cell Electric Vehicle", KSAE Autumn Conference, pp.2188-2193, 2007.
- 8) J. K. Ahn, K. H. Jung, D. H. Kim, H. B. Jin, H. S. Kim, S. H. Hwang, "Analysis of A Regenerative Braking System for Hybrid Electric Vehicles using An Electro-Mechanical Brake", IJAT, Vol.10, No.2, pp.229-234, 2009.
- 9) K. S. Lee, J. G. Shin, "Vehicle Active Safety Technology Trends", KSAE Special Proceedings Division General Conference, pp.1969-1984, 2009.