연구논문 유공압건설기계학회논문집 제9권 제1호 pp. 1~9 2012년 3월

전기유압식 브레이크를 장착한 연료전지차량의 회생제동 천이구간 특성해석
Transient Characteristic Analysis on the Regenerative Braking System of Fuel-cell Electric Vehicle with Electro-Hydraulic Brake

최정훈 · 조배균 · 박진현 · 황성호
Jeong Hun Choi, Bae-kyoon Cho, Jinhyun Park, Sung-Ho Hwang

접수일: 2011년 10월 17일, 수정일: 2012년 1월 27일, 게재확정일: 2012년 1월 28일

Key Words : Regenerative Braking(회생제동), Electro-hydraulic Brake(전기유압식 브레이크), Fuel-cell Vehicle Simulator(연료전지차량 시뮬레이터), Transient Response(천이구간 응답), Hardware-in-the-loop Simulation(HILS)

Abstract : Nowadays, various researches about eco-friendly vehicles such as hybrid electric vehicle, fuel cell vehicle and electric vehicle have been actively carried out. Since most of these green cars have electric motors, the regenerative energy technology can be used to improve the fuel economy and the energy efficiency of vehicles. The regenerative brake is an energy recovery mechanism which slows a vehicle by converting its kinetic energy into electric energy, which can be either used immediately or stored until needed. This technology plays a significant role in achieving the high energy usage. However, there are some technical problems for controlling the regenerative braking and the electro-hydraulic brake during switching at transient region. In this paper, the performance simulator for fuel-cell vehicle is developed and transient response characteristics of the regenerative braking system are analyzed in the various driving situations. And the hardware-in-the-loop simulation of electro-hydraulic brake is performed to validate the transient characteristics of the regenerative braking system for fuel-cell electric vehicle.

기호 설명

U_a : voltage of battery in charging, discharging
i_α : battery output current, A
E : electromotive force, V
R_i : resistance of battery, Ω
$P_{requried}$: require battery power, W
T_m : motor torque, Nm
R_t : tire radius, m
F_{load} : road load, N
$Voltageratio$: voltage ratio in sourcing, sinking
V_{bus} : voltage of system bus, V
$V_{battery}$: voltage of battery, V

황성호(책임저자) : 성균관대학교 기계공학부
E-mail : hsh@me.skku.ac.kr, Tel : 031-290-7464
최정훈, 조배균, 박진현: 성균관대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

최근, 다양한 환경문제, 에너지 자원 문제들로 인하여 석유 자원을 사용하지 않고 배기가스가 없는 전기 자동차(Electric Vehicle; EV), 연료전지 전기 자동차(Fuel-cell Electric Vehicle; FCEV) 등의 친환경 자동차에 대한 연구와 개발이 여러 분야에서 활발히 이루어지고 있다.

이러한 친환경 자동차들은 기존의 내연기관 자동차와 달리 전기 에너지원을 사용하는 모터로 구동되어 차량의 효율을 높이기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 이 가운데 회생제동(regenerative braking)은 기존 차량의 제동 시 운동에너지가 브레이크에서 마찰로 소모되는 것을 구동 모터에서 전기에너지로 바꿔 배터리, 울트라 커패시터(ultra-capacitor)와 같은 에너지 저장장치에 저장하여 구동 시 다시 이용하는 기술로 친환경 자동차의 연비 개선을 위한 핵심적인 분야로 연구되고 있다.[1)]

회생제동 기술의 적용을 위해선 기존 유압 브레이크 시스템과는 달리 모터의 회생제동력에 따라 물리 제동력을 능동적으로 제어해야 하는데, 본 논문에서는 전기 유압식 브레이크 시스템을 이용하여 물리 제동력을 제어하고자 하였다.

모터에 의한 회생제동력의 적용으로 물리 제동력과 회생 제동력간의 상호 보완 및 회생제동력의 몇 가지 제한들로 인한 천이구간이 생기게 되며, 특히 이 천이구간에서 차량의 감속도 변화에 따른 제동시간 증가나 운전자의 제동 이질감과 같은 문제들이 생기게 된다.

본 논문에서는 전기유압식 브레이크를 이용하여 구성된 회생제동 시스템의 특성을 해석하기 위하여 연료전지 차량 시뮬레이터를 기반으로 HILS를 수행하였다. 또한 브레이크의 응답특성 해석을 거쳐 연료전지 차량 시뮬레이터에 적용하였으며, 회생제동 시 천이구간에서 감속도 변화를 줄이기 위해 몇 가지 상황 변화별 시스템의 특성 변화를 살펴보았다.

2. 연료전지차량 시뮬레이터

본 논문의 대상 연료전지 차량은 전륜에 인라인 모터를 사용하는 구조로 전기모터와 이외에 연료전지 스택, 배터리, DC/DC컨버터 등으로 이루어져 있다. 따라서 연료전지 차량의 시뮬레이터를 위해선 주요 부품의 모델링 과정이 필요하며 이에 따라 각 요소들의 모델링을 수행하고 동력 및 신호전달 흐름에 따라 Fig. 1과 같이 MATLAB/Simulink로 시뮬레이터를 구성하였다.

주요 부품의 모델링은 각각 성능곡선, 특성맵, 과도상태 특성 및 동역학을 기반으로 수행되었으며 배터리는 내부 저항의 특성에 따른 배터리 SoC (State of Charge)모델을 사용하였다.[1)-2)]

주행모드는 가속, 등속, 정지 등으로 나누어 각각의 제어기를 모델링하였고, 모드에 따른 운전자 반응을 위한 운전자 모델링을 수행하였다.

2.1 연료전지 모델링

연료전지는 특성맵을 이용하여 모델링하였으며 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 엑셀 페달량에 따른 차량의 요구전력을 계산하고 이에 따른 전압과 전류의 출력량을 맵을 거쳐 산출하게 된다.

2.2 배터리 모델링

배터리는 구동(motoring) 모드나 외부에서 전력을 요구하는 상황에 방전(discharge)이 되고, 충전(generating) 모드의 회생제동이나 연료전지 스택에 의해 충전(charge)된다.

배터리 전압 U_a은 기전력 E와 배터리 내부저항 R_i, 배터리 부하 전류 i_a에 따라 충 방전 시 각각 식 (1),(2)로 나타낼 수 있다.

$$U_a = E + i_a R_i \,(charge) \tag{1}$$

$$U_a = E - i_a R_i \,(discharge) \tag{2}$$

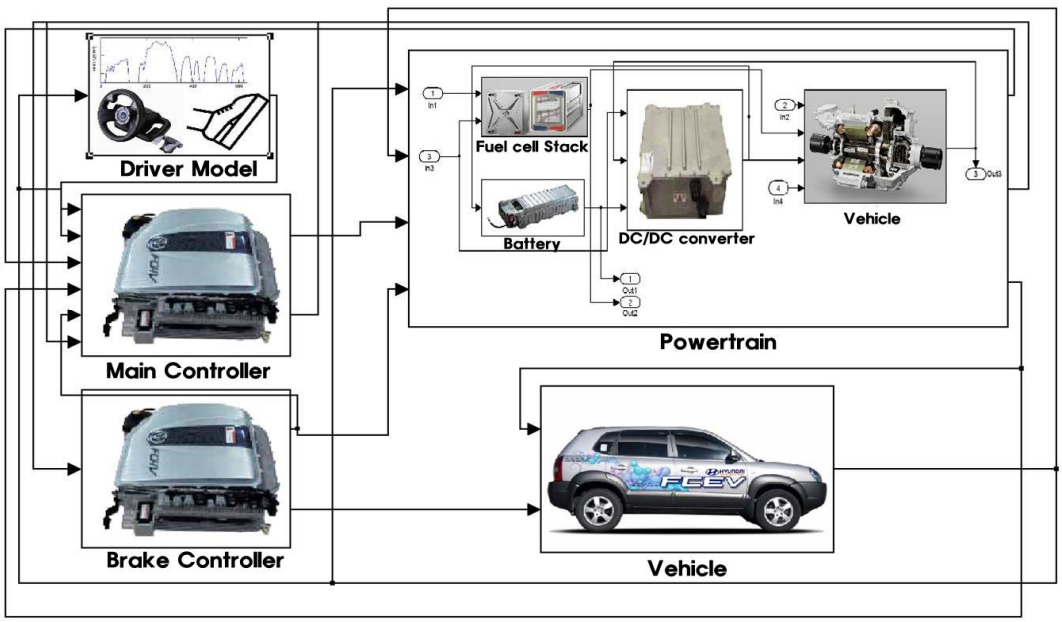


Fig. 1 Fuel-cell Vehicle Simulator

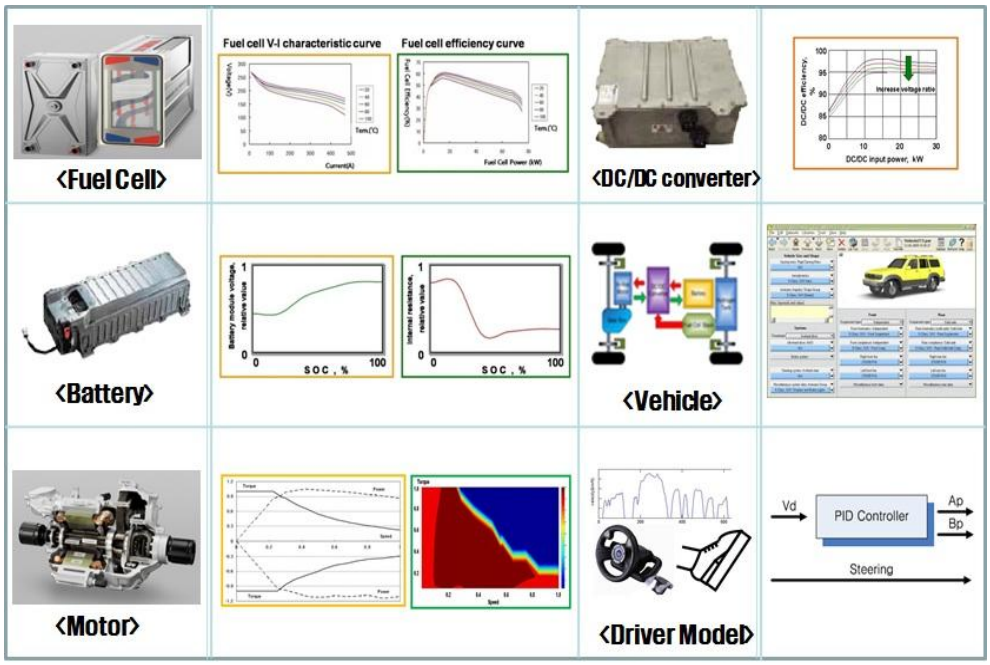


Fig. 2 Fuel-cell Vehicle modeling

배터리에 요구되는 전력 $P_{required}$는 식(3)이 된다.

$$P_{required} = U_a \times i_a \tag{3}$$

$$U_a = \frac{P_{reqired}}{i_a} = E - i_a R_i \tag{4}$$

$$P_{required} = E i_a - i_a^2 R_i \tag{5}$$

따라서 식 (1),(2) 와 (3)을 통해 식(5)로 나타낼 수 있으며 배터리 부하 전류를 통해 충 방전 관계식 (6)과 (7)을 유도할 수 있다.

$$i_\alpha = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 4R_i P_{battery}}}{2R_i} \ (charge) \tag{6}$$

$$i_\alpha = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4R_i P_{battery}}}{2R_i} \ (discharge) \tag{7}$$

2.3 모터 모델링

모터는 성능곡선을 이용하여 모델링하였다. 속도, 연료전지 출력, 요구 운전출력, 요구 회생제동 토크를 입력으로 받아 모토의 가속도와 토크를 출력하며 출력된 토크와 모터 속도는 효율맵을 거쳐 실질적인 모터 토크로 출력된다.

모터 토크는 구동과 회생 모드로 나누어지며, 모드에 따라 배터리의 충 · 방전이 이루어진다.[3)]

2.4 DC/DC 컨버터 모델링

모터를 사용하는 차량의 경우 연료전지 스택이나 배터리의 전압과 모터의 구동전압이 다르기 때문에 전압을 바꿔주는 컨버터가 필요하다. DC/DC 컨버터는 입력된 직류 전류를 교류로 변환하여 전압 조절 후 달라진 전압의 직류 전류로 변화하여 출력한다.

방전 시에는 배터리 전압의 입력 값이 연료전지 스택의 전압을 결정하고, 충전 시에는 연료전지 스택 전압의 입력 값이 전압을 결정하며, 변환 효율은 전압율에 따라 달라지고 충전 시와 방전 시에 따라 다르다. 아래 식은 충, 방전 시의 전압율 관계식을 나타낸다.[4)]

$$Voltage\,ratio = \frac{V_{battery}}{V_{bus}} \ (charge) \tag{8}$$

$$Voltage\,ratio = \frac{V_{bus}}{V_{battery}} \ (discharge) \tag{9}$$

2.5 제어기

제어기는 연료전지차량 주제어기(main controller)와 제동제어기(brake controller)로 구성되며, 다음과 같은 연산과 함께 제어를 수행하게 된다.

폐회로 시뮬레이션 수행 시 각각의 변수들 입력에 따른 요구되는 출력 값의 계산이 필요하며 연료전지 차량 시뮬레이터의 경우에는 입력 값으로부터 차량의 현재 속도, 요구 속도, 엑셀 및 브레이크 페달 위치, 배터리 SOC, 연료전지 스택의 전압, 모터 각속도

의 값 등을 받게 된다. 또한, 연료전지 요구 파워, 배터리 요구 파워, 회생제동 요구 파워, 연료전지 작동 여부, 차량 주행모드, 요구 제동력, 배터리 전압 등의 출력 값을 계산하게 된다.

이로부터 차량의 5가지 주행모드, 출발, 가속, 일반 주행, 감속, 연료전지 정지 각각의 상황에 따라 주제어기 내부 알고리즘을 통하여 각 변수들의 값들이 결정된다.[5)]

2.6 연동 시뮬레이션

차량의 동적 거동 해석은 CarSim을 이용하였다. 주요 부품을 모델링한 MATLAB/Simulink와 차량 모델 Carsim 간의 연동 시뮬레이션(co-simulation)이 필요하다.

Simulink의 운전자 모델에서 출력되는 엑셀, 브레이크 및 조향 값에 따라 컨트롤러 모델에서 연료전지의 출력이 결정되고, 이에 따라 모터에서 구동력이 출력되면 Carsim의 차량 모델에 전달되어 시뮬레이션이 수행되어 차량의 동적 거동 특성에 따른 차량 현재 속도와 요속도(yaw rate)를 다시 Simulink 컨트롤러 값에 전달하여 알맞은 출력 값으로 변환하여 차량을 제어하는 시뮬레이션이 순환적으로 이루어진다.

Fig. 2는 이상과 같은 모델링을 통해 구성된 연료전지차량의 모델 특성맵을 보여준다.

3. 제동시스템 모델링

3.1 전기유압식 브레이크

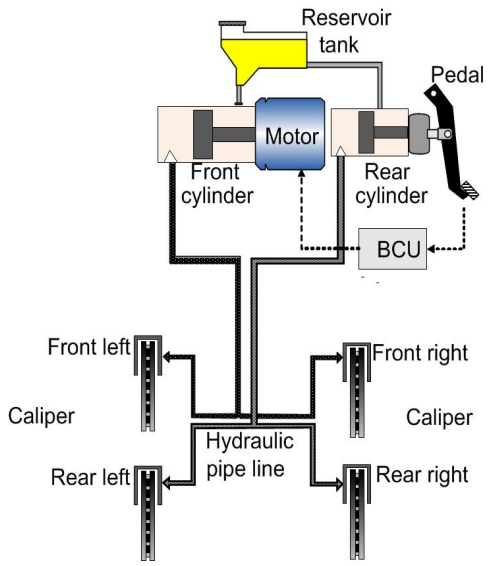


Fig. 3 Electro-hydraulic Brake

전기유압식 브레이크는 다양한 형태로 개발되고 있으며, Toyota Prius에 대표적으로 활용되고 있다. 본 논문에서 사용한 전기유압식 브레이크는 기존의 수동식 브레이크가 후륜에 작용하며, 전기모터를 이용해 마스터실린더를 구동시키고 그 동작에 의해 유압이 전륜에 작용하는 방식이다. 차량의 제동 시 제동력 분배 알고리즘에 의해 계산된 전/후륜 요구제동력 중 전륜 요구 제동력에서 회생제동력을 제외한 나머지 부분에 따라 물리제동력을 가변적으로 제어 가능 하도록 해준다. Fig. 3은 전기유압식 브레이크 시스템의 개념도를 보여준다.[6)~7)]

개념도 내의 제동제어기(BCU)는 연료전지차량 시뮬레이터의 제동제어기(brake controller)와는 별개로서 실제 차량에서 상위 제어기의 명령에 따라 전기유압식 브레이크의 제어를 위한 하위 제어기이다.

3.2 전기유압식 브레이크 응답 특성

브레이크에 대한 모델링이 따로 적용되지 않은 연료전지 차량 시뮬레이터에선 제동제어기에서 계산된 전/후 제동력이 바로 Carsim에 입력되어 시뮬레이션이 수행된다. 이는 실제 브레이크의 응답특성이 고려되지 않았기 때문에 시뮬레이션 결과 값의 신뢰성이 떨어지고 또한 회생제동 천이구간 특성과 같이 짧은 시간에 일어나는 시스템에서 모델의 전달함수에 의한 특성의 영향은 더욱 중요하다.

대상 시스템의 이론적 해석 모델이 갖는 중요성도 크지만 현실성이 결여된 가정이 포함되며, 특히 유압시스템과 같이 이론적인 모델이 복잡하거나 물리과정이 해석하기 어렵고 환경변화에 민감한 시스템의 경우 실험 데이터를 이용한 모델링이 효과적이다.

본 연구에선 과도 응답 특성(transient response)을 알아보기 위하여 스텝 신호(step signal)에 대한 전기유압식 브레이크 시스템의 응답 실험데이터를 사용하였다.[8)~9)]

응답 특성의 실험 데이터를 이용한 전달 함수 모델링은 지수 함수의 합으로 가정하여 적절한 낮은 차수로 추정하였다.

시간 t에 따라 변하는 대상 시스템 $y(t)$를 지수함수의 합으로 나타내면 식 (10)과 같다.

$$y(t) = y(\infty) + Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t} + \cdots \qquad (10)$$

식 (10)를 선형 곡선 맞춤법(Linear curve fitting)하기 위해 양변에 log를 취한 후, 응답 특성 실험 데이

터에 적합한 A, B, α, β 값을 찾아 낼 수 있다.

$$y - y(\infty) \cong Ae^{-\alpha t} \quad (11)$$

$$\log_{10}[y - y(\infty)] \cong \log_{10}A - \alpha t \log_{10}e \quad (12)$$

$$y - [y(\infty) + Ae^{-\alpha t}] \cong Be^{-\beta t} \quad (13)$$

$$\log_{10}[y - y(\infty) + Ae^{-\alpha t}] \cong \log_{10}B - \beta t \log_{10}e \quad (14)$$

적절히 가정된 시간응답 데이터 $y(t)$를 라플라스 변환을 통해 $Y(s)$를 구한다.

출력신호 $Y(s)$는 입력신호 $R(s)$와 전달함수 $G(s)$로 구성된 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$Y(s) = R(s)G(s) \quad (15)$$

여기서 계단응답 $R(s) = \frac{1}{s}$ 이므로 2차 전달함수 $G(s)$를 구할 수 있다.

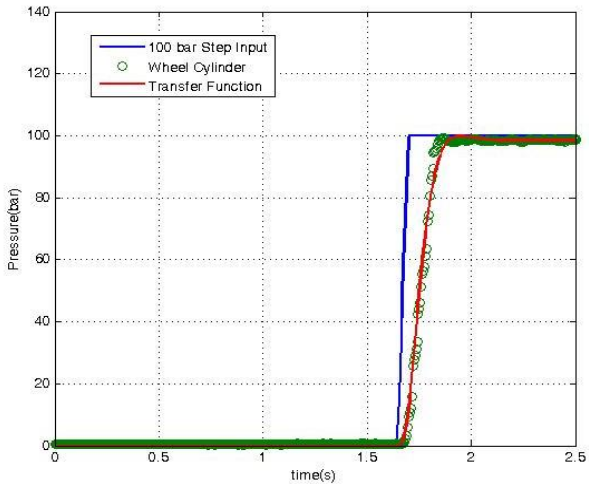


Fig. 4 Transfer function response at 100 bar step input

Fig. 4는 100 bar의 스텝 입력에 대한 휠 실린더 압력 응답과 모델링한 2차 전달함수를 적용시킨 상태에서 동일한 100 bar 스텝 입력에 대한 과도응답 특성 그래프이다. 약 0.2초 정도 지연의 과도특성을 적절하게 추종하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 모터 회생제동 응답 특성

구동과 회생제동에 사용되는 모터의 모델은 속도-토크 특성과 효율 특성맵으로 이루어져 시스템의 동특성이 반영되지 못하였다. 모터의 응답특성은 회로의 구성과 모터의 종류에 따라서 다양한 시상수(time constant)를 가질 수 있으며, 정확한 해석적 모델을 반영하기엔 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 모터의 동특성을 1차 전달 함수로 가정하여 모델링함으로써 실제 모터가 작동하는 응답 지연 범위 내에서 계단입력(step signal)에 대한 동특성 시뮬레이션을 수행하였다.

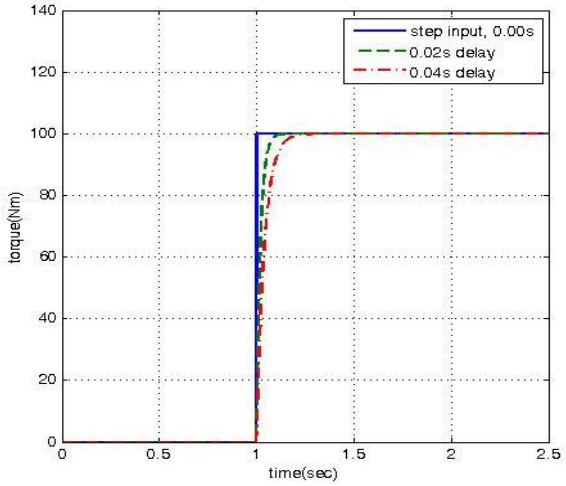


Fig. 5 Motor response at 100 Nm step input

Fig. 5는 0.00초, 0.02초, 0.04초의 시상수를 갖는 모터의 계단입력에 대한 응답특성을 보여준다. 100 Nm의 계단입력에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 본 논문에서는 대상 시스템의 회생제동 모터 시상수를 0.02초로 가정하였다.

4. HILS를 통한 검증

4.1 HILS 환경 구축

연료전지 차량 시뮬레이터와 전기 유압식 브레이크 하드웨어와의 HILS를 수행하기 위한 환경을 구축하였다.

실시간 시뮬레이션을 위해 dSPACE 프로그램과 micro AUTOBOX를 이용하여 시뮬레이터의 제동제어기와 나머지 파워트레인, 차량부 등을 분리하여 각각 나누어 탑재하였으며 입출력을 정의하고, 계측 제어기 통신망 (CAN : Controller Area Network)을 이용하여 신호를 입출력하였다.

차량 시뮬레이터에서 브레이크 페달 값에 의해 계산된 요구 제동력을 제동제어기에서 입력받아 요구 클램핑력으로 변환하여 브레이크를 작동시키고, 압력 센서에 의해 측정되는 실제 압력 값을 차량 시뮬레이터에서 다시 입력받아 차량의 동적 거동을 바꿔주게 된다. Fig. 6은 구축된 HILS 환경을 보여준다.

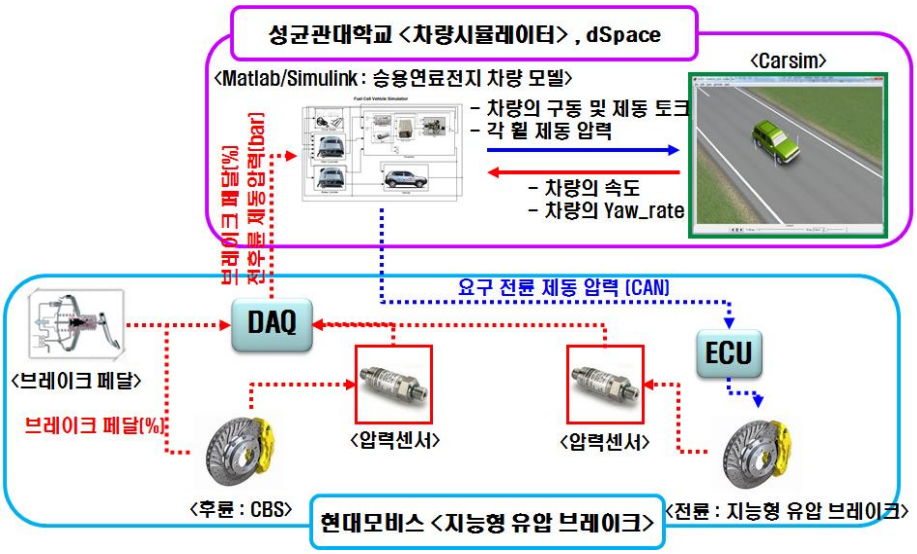


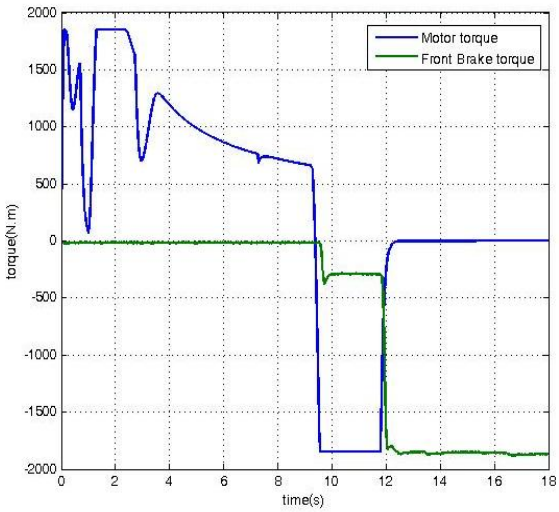
Fig. 6 HILS environment for regenerative braking system

4.2 HILS 수행 결과

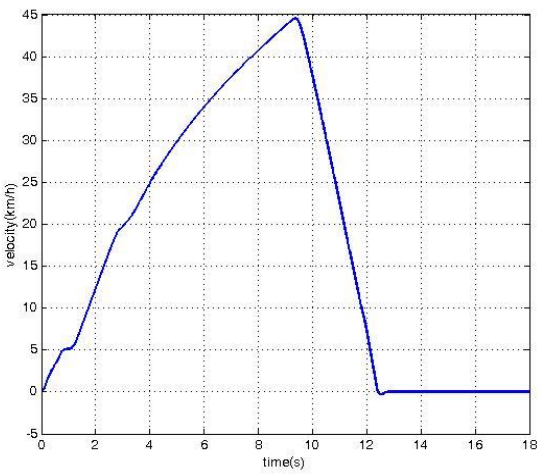
구축된 HIL 환경에서 회생제동 시스템의 특성을 알아보기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션은 각각 40km/h와 80km/h에서 급제동 조건으로 수행하였다. HILS 환경에 구축되어있는 엑셀 페달을 사용하여 목표속도 이상 도달 후 급제동 하였다.

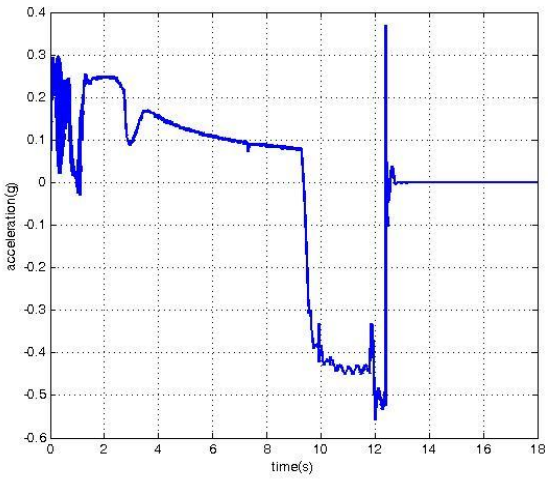
Fig. 7에서 볼 수 있듯이 제동 초기 회생 제동력이 발생하다가 제동제어기의 회생제동 제한 알고리즘에 의하여 제동력이 제한되고 이를 보상하기 위한 전기유압식 브레이크 제동력이 증가하게 되면서 천이구간이 발생하게 되며 차량의 제동 중 가속도의 변화가 생기는 것을 확인할 수 있다.



(b) Motor & brake torque



(a) Vehicle velocity



(c) Vehicle acceleration

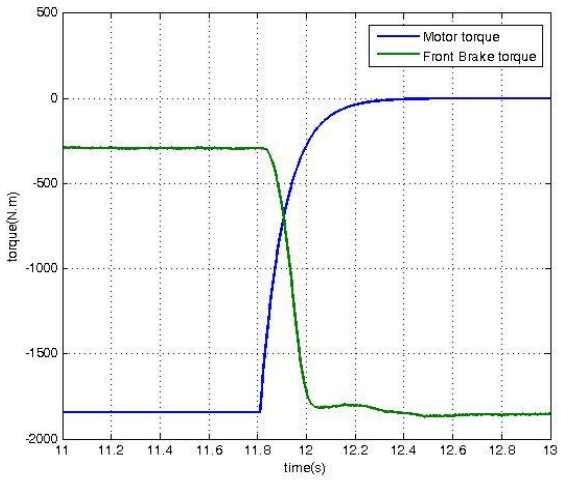
Fig. 7 HIL simulation results during full braking at 40km/h

4.3 천이구간 특성

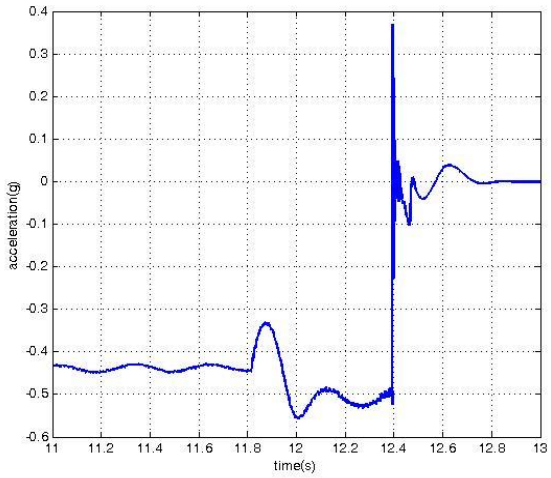
앞서 언급 하였듯이 친환경 자동차의 연비개선을 위한 핵심적인 기술로 회생제동을 적용하게 되면서 천이구간에서의 감속도 변화 등의 새로운 문제가 생기게 되며 이러한 문제들의 해결을 위해선 회생제동 시스템 특성, 특히 천이구간 특성에 대한 연구가 필요하다.[10)]

HILS 수행 결과 중에서 천이구간의 토크와 가속도를 확대해보면 Fig. 8과 같이 나타난다.

회생제동력의 제한과 물리 제동력 보상에 의한 천이 구간에서 각 시스템의 다른 응답 특성에 의해 총 제동력의 합이 요구 제동력보다 작거나 커지게 되고 이러한 변화는 차량의 감속도에 영향을 끼쳐 제동시간을 증가시키고 승차감 측면에서 제동 시 운전자가 이질감을 느끼게 될 수 있다.



(a) Motor & brake torque at change mode



(b) Vehicle acceleration

Fig. 8 Transient response during full braking at 40km/h

5. 천이구간 특성 해석

5.1 응답특성 모델 적용

회생제동 천이구간의 특성 해석을 순수 연료전지 차량 시뮬레이터와 Carsim의 연동 시뮬레이션으로 확인하기 위해 앞서 해석된 전기 유압식 브레이크의 특성 모델을 적용 하였다.

제동제어기에서 계산된 전륜 요구 제동력이 Carsim으로 입력되기 전에 전기 유압식 브레이크의 특성 모델인 2차 전달 함수를 적용하여 HILS와 같은 수행 결과를 얻을 수 있도록 구성하였다.

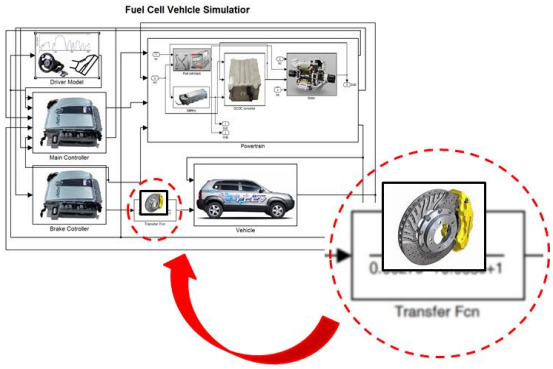


Fig. 9 Fuel cell simulator with brake model

5.2 천이구간 특성 해석

브레이크 모델이 적용된 시뮬레이터를 이용하여 천이구간 특성 파악을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 천이구간에서의 제동력 변화는 각 회생 제동력과 물리 제동력의 다른 응답특성에 따른 것이다. 유압 브레이크와 같은 물리 제동력의 빠른 제어는 어렵지만 회생 제동력의 지연에 따른 응답 제어는 비교적 용이하다고 볼 수 있다. 또한 자동차에 사용되는 모터의 종류나 구동 계통의 방식에 따라 회생 제동의 응답은 달라 질 수 있으므로 이러한 회생제동의 응답 특성 변화에 따른 천이구간 특성을 파악하는 것이 필요하다.

기존 연구 결과를 바탕으로 천이구간에 영향을 주는 변수로 모터 응답 특성, 회생 제동 제한 속도 등의 인자를 Table 1과 같이 여러 수준으로 변화해가며 천이구간 특성 변화를 살펴보았다.

시뮬레이션 수행 결과 중 모터의 지연 특성 변화에 대한 결과를 보면, Fig. 10에서처럼 물리 제동력보다 회생제동 시스템이 빠른 응답 특성을 갖기 때문에 응답 지연을 길게 해줄수록 감속도의 변화가 줄어드는 것을 볼 수 있으나, 너무 길어질 시에는 총제

동력이 증가하여 감속도가 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

Table 1 Simulation conditions

	Control & Design Variables		
	1	2	3
Motor Response Delay (sec)	0.00	0.02	0.04
Speed Control Limit (km/h)	10	15	20

Fig. 11의 회생 제동 제한 속도에 따른 결과를 보면 감속도 크기의 변화는 없고 천이구간이 발생하는 시간만 달라지는 것을 확인 할 수 있다.

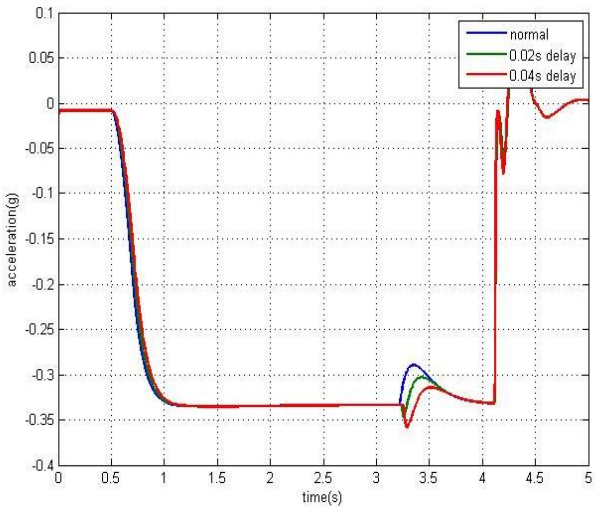


Fig. 10 Vehicle acceleration with variation of motor response delay

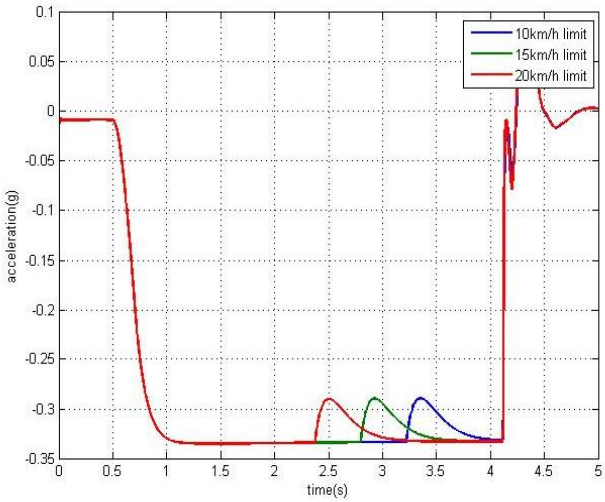


Fig. 11 Vehicle acceleration with variation of speed control limit

6. 결 론

본 논문에서는 전기유압식 브레이크를 장착한 연료전지 차량에서 회생제동 시 제어변환이 일어나는 천이구간에 대한 제동특성 해석을 수행하였다.

전기유압식 브레이크의 동특성을 반영하기 위하여 계단응답에 대한 실험 데이터를 이용하여 시스템 특성을 2차 전달함수로 모델링하였으며, 연료전지 차량 시뮬레이터에 브레이크 모델로 적용시킴으로써 시뮬레이터에서 제동모드 전환이 이루어지는 천이구간 제동특성 해석이 가능하도록 하였다.

회생제동 시스템의 천이구간에서의 감속도 변화에 대한 특성을 알아보기 위하여 회생제동 모터의 시간응답 변화와 제한속도 변화에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 이는 향후 제동 시 과도상태에서의 이질감을 줄이기 위한 전기유압식 브레이크와 회생제동 시스템에 대한 제어 알고리즘 연구를 수행할 기반 데이터를 확보하는데 이용할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 지식경제부에서 시행한 전략기술인력양성사업과 산업원천기술개발사업에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

1) Jeewook Huh, *et al*. “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.
2) J. K. Ahn, *et al*. “Analysis of A Regenerative Braking System for Hybrid Electric Vehicles using An Electro-Mechanical Brake”, IJAT, Vol.10, No.2, pp.229-234, 2009.
3) F. Yamanashi, “Development of Nissan Direct Hydrogen Fuel Cell Vehicle”, EVS18, Vol.18, pp.394, 2001.
4) H. Toyota, “Development of the vehicle dynamics stability while cooperative regenerative brake operating”, JSAE, pp.118-06, 2006.
5) Jangmo Ahn, *et al*. “A Study on Development of Safety Evaluation Technique of Regenerative Braking System”, KSAE08, S0337, 2008.

6) Jae Cheon Lee, *et al*. “An Analytical Investigation of Brake Actuator Dynamics for Platoon control in Consideration of Entrained Air”, SAE, Vol 7, NO. 3.
7) Jungwook Kim, *et al*. “Development of Co-operative control Algorithm for Parallel HEV with Electric Booster Brake during Regenerative Braking”, KSAE11, B0414, 2011.
8) Franklin, “Feedback Control of Dynamic Systems”, 3rd Edition.
9) C. Dorf Richard, *et al*. “Modern control Systems”, 11th edition.
10) 양동호, 박진현, 황성호, “차량 안정성을 고려한 인휠모터 방식 연료전지 전기자동차용 회생제동 알고리즘 개발”, 유공압시스템학회논문집, 제7권, 제2호, 2010. 6.