Copyright ⓒ 2010 KSAE
KSAE10-A0230

전자 브레이크를 적용한 연료전지자동차 회생제동 시스템의 신뢰성 평가기술 개발 PART-(2)

전 광 기[*1)] · 황 현 수[1)] · 최 성 진[1)] · 양 동 호[2)] · 황 성 호[2)] · 박 희 람[3)] · 최 세 범[3)]

자동차부품연구원 차체샤시기술연구센터[1)] · 성균관대학교 기계공학과[2)] · 한국과학기술원 기계공학과[3)]

Development of Reliability Evaluation Technology for FCEV Regenerative Braking System PART-(2)

Kwangki Jeon[*1)] · Hyunsoo Hwang[1)] · Sungjin Choi[1)] · Dongho Yang[2)] · Sungho Hwang[2)]
Heeram Park[3)] · Seibum Choi[3)]

[1)] *Body & Chassis System Research Center, KATECH, 74 Yongjung-ri, Pungse-myun, Cheonan, Chungnam,330-912, Korea*
[2)] *School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 300 Chunchun-dong, Suwon, 440-746, Korea*
[3)] *Department of Mechanical Engineering, KAIST, 335 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea*

Abstract : The demand of the green car like hybrid electric vehicle, fuel cell electric vehicle(FCEV) and pure electric vehicle have risen dramatically. The key technology is the regenerative braking in the energy saving technology. And electronic brake has been developed along with the advance of the electronic control technology. The reliability about the braking system is very important because the braking system is concerned with safety of vehicle. But the regulation is not sufficient enough. In this study, to develop the reliability assessment technology FCEV model with regenerative braking system and electronic braking system(EWB, EMB) was developed. The reliability assessment scenarios about regenerative braking system and electronic braking system is developed using ABS brake regulations and FMEA results. This scenarios ware applied to the performance simulation of the FCEV with the regenerative braking and the electronic braking system. And the fail-safe control strategy of a EMB was suggested and verified.

Key words : Fuel Cell Electric Vehicle(FCEV, 연료전지 자동차), Reliability(신뢰성), Regenerative Braking(회생제동), Electronic Wedge Brake(EWB, 전자 쐐기 제동장치), Eletro-Mechanical Brake(EMB, 전기기계식 제동장치), Brake-by-Wire(BBW, 전자제동시스템), Failure Mode and Effective Analysis(FMEA, 고장 형태 영향 분석)

Nomenclature

m_W : wedge mass, kg
x_W : wedge mass center's position of x direction, m
y_W : wedge mass center's position of y direction, m
α : wedge angle, rad
β : the angle between the motor shaft and a wedge, rad
K_{Screw} : screw stiffness coefficient, N/m
D_{Screw} : screw damping coefficient, N/(m/s^2)
θ_M : motor position, rad
ω_M : motor angular sped, rad/s
i_M : motor current, A
R_M : motor resistance, Ω
L_M : motor inductance, H
G_r : gear ratio
L : screw lead, m
J_M : motor and screw inertia, kg·m^2

* 전 광 기 , kkjeon@katech.re.kr

1. 서 론

최근 석유자원의 고갈과 함께 환경 규제 강화로 인하여 하이브리드 전기자동차, 연료전지 자동차, 전기자동차 등과 같은 그린카에 대한 정부와 소비자들의 관심이 높아지고 있으며, 이러한 수요를 충족시키기 위해 전세계 대부분의 자동차 완성업체들은 그린카에 대한 연구 개발을 활발히 진행하고 있다.

이러한 그린카에서 에너지 효율을 높이는 가장 중요한 기술 중 하나로 제동 시 운동에너지를 전기에너지로 저장하는 회생제동 기술의 중요성이 높이 평가받고 있다.

이와 함께 전자 제어 기술의 발달로, 브레이크 시스템에서도 EMB(Electro-Mechanical Brake), EWB (Electronic Wedge Brake)와 같은 전자식 브레이크 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

브레이크 시스템은 탑승자의 안전에 직접적인 영향을 미치는 장치로써 신뢰성이 매우 중요하다. 2010년 초기 Toyota 자동차사의 가속페달과 제동장치 결함에 따른 리콜 사태는 자동차 신뢰성의 중요도를 입증하고 있다.

전자 브레이크가 적용된 연료전지자동차를 대상으로 회생제동 및 전자 브레이크 시스템의 신뢰성 평가 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위해 이전 연구에서 대상 전자 브레이크를 적용한 연료전지 차량의 해석 모델과 회생제동 및 전자 브레이크 시스템의 신뢰성 평가 시나리오를 개발하였다. [1)]

본 연구에서는. 개발된 시나리오를 해석 모델에 적용하여 연료전지자동차의 회생제동 및 전자 브레이크 시스템의 고장 영향도를 평가하고, 전자 브레이크 시스템의 고장 발생 시 차량의 안정성 확보를 위한 고장대응 알고리즘을 제안하였다.

2. 전자 브레이크 적용 연료전지자동차 해석 모델 개발

2.1 연료전지 자동차 해석 모델

연료전지 자동차 해석 모델은 각 시스템 별로 연료전지 스텍, 배터리 시스템, DC/DC 컨버터 시스템, 모터 시스템 등으로 구성되었으며, 각 시스템의 모델링은 시험값을 기본으로 하는 특성 Map을 도출하여 사용하였다. Fig. 1은 연료전지 자동차 해석 모델의 주요 시스템을 나타낸다.

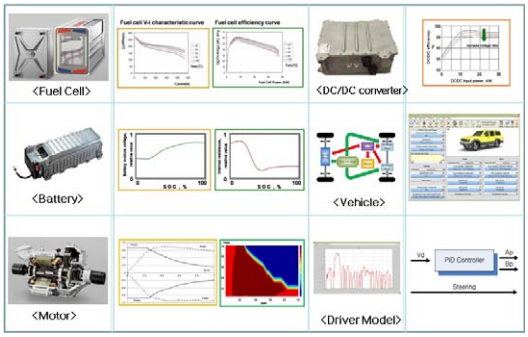

Fig. 1 Main systems of the FCEV model

2.2 EMB, EWB 해석 모델

모터 액츄에이터 및 전자 제어 기술의 발달로 전자 브레이크 시스템에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. Siemens VDO에서는 prototype EWB를 개발하였으며[2)], 국내에서는 C. H. Jo등[3, 4)]과 S. Y. Kim등[5)]이 EMB 및 EWB 시스템의 해석 모델 및 제어기 모델을 개발한 바 있고, prototype 시스템을 개발하여 제어기 모델을 적용 평가한 바 있다.

본 연구에서 대상 차량은 구동 모터로 회생제동을 하고 기계적 제동 시스템으로는 전륜 EWB 시스템과 후륜 EMB 시스템이 적용되었다. 후륜 EMB의 구조는 Fig. 2와 같으며 해석 모델의 지배 방정식은 식(1)에서부터 식(5)까지와 같다.

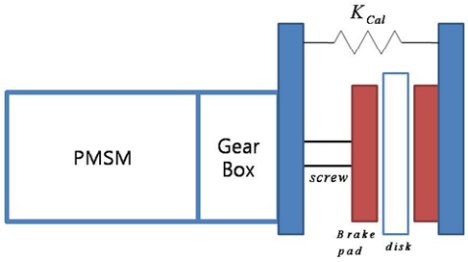

Fig. 2 Schematic diagram of a EMB system

$$T_M = K_t i_M \tag{1}$$

$$L_M \dot{i}_M = -R_M i_M - K_e \omega_M + u_M \tag{2}$$

$$T_M = T_L + D_{screw}\,\omega_M + J_M\,\dot{\omega}_M \tag{3}$$

$$T_L = \frac{L}{2\pi\eta G_r} F_N \tag{4}$$

$$F_N = K_{cal}\frac{L}{2\pi}\frac{\theta_M}{G_r} \tag{5}$$

EWB는 EMB와 달리 브레이크 패드와 같이 웻지가 평면운동을 하는 2차원 구조를 이루며 쐐기에 의한 제동력 강화 효과로 작은 전류로 큰 제동력을 얻을 수 있다는 장점이 있어 본 연구에서는 후륜에 비하여 제동력이 크게 작용하는 전륜에 EWB가 적용되었다. 그 구조는 Fig. 3과 같으며 해석 모델의 지배방정식은 식(6)에서부터 식(11)과 같다. 모터 구동부의 지배방정식은 EMB와 동일하다.

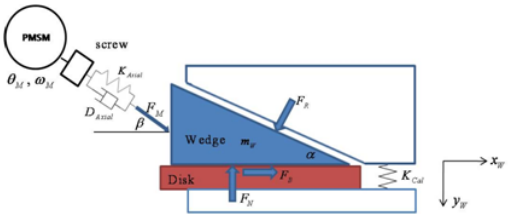

Fig. 3 Schematic diagram of the EWB system

$$m_W\,\ddot{x}_W = F_M\cos\beta + F_B - F_R\,\sin\alpha \tag{6}$$

$$m_W\,\ddot{y}_W = F_M\sin\beta - F_N + F_R\cos\alpha \tag{7}$$

$$y_W = \tan\alpha\; x_W \tag{8}$$

$$F_B = \mu F_N \tag{9}$$

$$F_M = -K_{Screw}\left(\frac{x_W}{\cos\beta} - \frac{L}{2\pi}\theta_M\right) - D_{Screw}\left(\frac{\dot{x}_W}{\cos\beta} - \frac{L}{2\pi}\omega_M\right) \tag{10}$$

$$2\pi\eta T_L = LF_M \tag{11}$$

EWB 및 EMB 모델의 요구 제동력 추종 제어기는 H. R. Park 등[6]이 개발한 adaptive sliding mode 제어기 모델을 사용하였다.

2.3 EMB, EWB 적용 연료전지 자동차 통합 해석 모델

Fig. 4는 EMB, EWB를 적용한 연료전지 자동차의 해석 모델 구성도이다. 차량 해석 모델에서 각 휠의 제동력을 산출하여 EMB, EWB 모델에 요구 제동력을 인가하고 EMB, EWB 해석 모델에서 계산된 제동력을 차량 동역학 모델에 전달해 주는 구조로 통합 해석 모델을 개발하였다. 연료전지 자동차의 각 시스템과 EMB, EWB 시스템 및 제어기 모델은 MATLAB/Simulink를 통해 개발되었으며, SUV급 대상 차량의 동적 해석 모델은 CarSim을 통해 개발되었다.

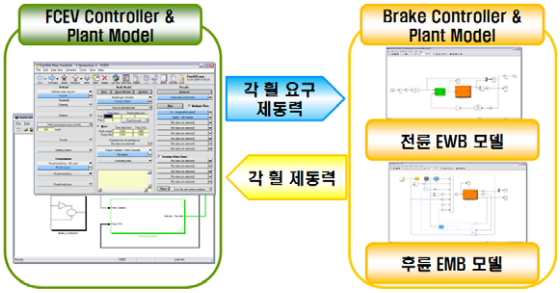

Fig. 4 FCEV simulation model with EWB and EMB systems

Fig. 5에서부터 Fig. 8까지는 해석 모델의 검증을 위해 대상 연료전지 자동차 제동 시험 결과와 해석 모델의 결과를 비교한 그래프이다. Fig 5와 Fig. 6은 마른 아스파트 노면에서 초속도 40 kph 주행 중 Full 제동 시의 속도와 감속도를 비교한 그래프이다.

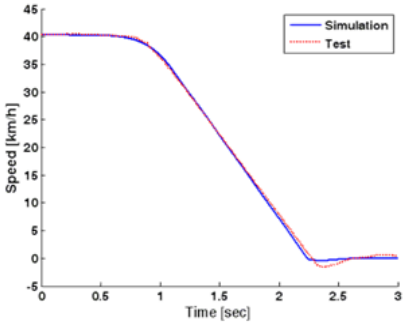

Fig. 5 Comparison of vehicle speed

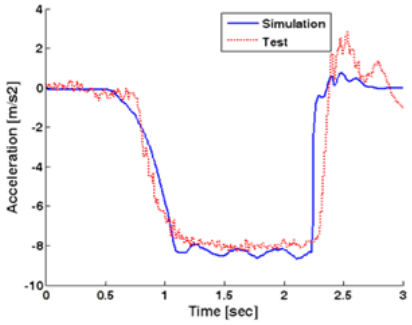

Fig. 6 Comparison of vehicle deceleration

또한 해석 모델에 ABS 제어 알고리즘을 탑재하여 실차 ABS 시험과 비교 검증을 수행하였다. ABS 제어 알고리즘은 상위 제어기에서 EWB 및 EMB 제어 시스템에 인가된 제동력 명령을 타이어와 노면의 슬립 발생 시 On/Off 제어하는 방식으로 개발되었다.

Fig. 7은 차량의 속도를 ABS 실차 시험과 해석 결과를 비교한 그래프이며, Fig. 8은 차량의 감속도를 비교한 그래프이다.

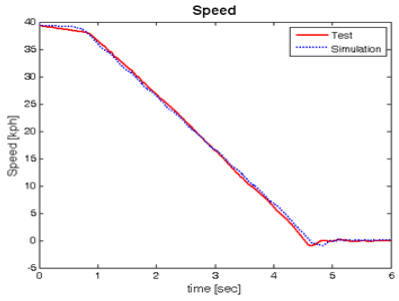

Fig. 7 Comparison of vehicle deceleration

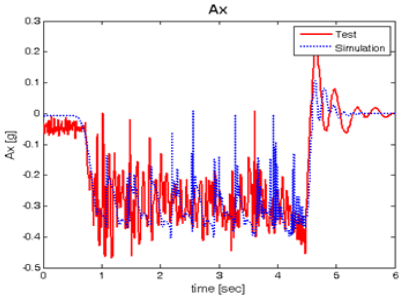

Fig. 8 Comparison of vehicle deceleration

3. 고장 영향도 평가 및 고장 대응 알고리즘 개발

3.1 신뢰성 평가 시나리오 개발

기존 연구에서 회생제동 및 EWB, EMB 시스템에 대한 FMEA를 통하여 개발된 고장 시나리오와 국내외의 ABS 제동 성능 시험 평가 규격을 활용하여 개발된 주행 시나리오를 조합해 신뢰성 평가 시나리오를 개발하였다. 개발된 고장 시나리오 중의 일부를 Table 1에 요약하여 나타내었다.[1)]

Table 1 The scenarios about failure

No	Failure System	Failure Mode	Code
1	Normal	-	00
2	Brake Pedal Sensor	A signal wire open	B1
3		Two signal wires open	B2
4	Motor/Inverter	1 phase open	M1
5		All phases open	M2
6	EWB/EMB	Current sensor malfunction	W1/E1
7		Speed Sensor malfunction	W2/E2
8		Position Sensor malfunction	W3/E3
9		Actuator malfunction	W4/E4
10	EWB/EMB	Controller of EWB/EMB malfunction	W5/E5
11		Jammed wedge	W6/-
12	CAN communication between controllers	CAN communication malfunction between BCU and VCU	T1
13		CAN communication malfunction between BCU and each wheel ECU	T1

3.2 고장 대응 알고리즘 개발

개발된 고장 시나리오 중 고장 코드 E1에 해당되는 제동 시 후륜 좌측 휠 EMB의 전류 센서 고장 발생 시 차량의 거동 특성을 확인하고 차량의 안정성을 향상시키기 위한 고장 대응 알고리즘을 개발하였다.

Fig. 8은 후륜 좌측 휠 EMB의 전류 센서 고장 발

생 시와 안정성을 향상시키기 위한 고장 대응 알고리즘에 대한 그림이다. 만약 제동 중 후륜 좌측 휠의 EMB 고장으로 제동력을 잃게 되면 후륜 우측 휠과의 제동력 차이로 인하여 차량의 요 모멘트(yaw moment)가 발생하게 되어 차량의 안정성이 크게 악화될 수 있다. 이를 방지하기 위하여 Fig. 8의 우측 그림과 같이 고장 감지 이후 전륜의 제동력을 증가시켜 제동거리를 보상하고, 전류 센서 고장이 발생한 휠의 제동력을 추종하도록 고장나지 않은 반대측 휠의 EMB 제동력을 제어하여 차량의 안정성을 향상시키는 고장 대응 알고리즘을 제안하였다.

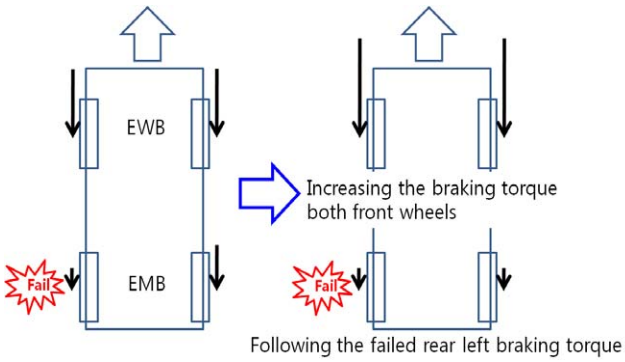

Fig. 8 Fail-safe control strategy

Fig. 9는 주행 시나리오 중 A2 Code에 해당되는 80kph에서 Full 제동 조건에서 정상 시(Normal), 후륜 좌측 EMB 전류센서 고장 시(Failure), 고장 대응 알고리즘 적용 시(Maneuver)의 차량의 속도를 각각 비교한 그래프이다.

Fig. 10은 후륜 좌측 휠의 정상 시(Normal)와 EMB 전류센서 고장 시(Failure)의 제동토크를 비교한 그래프이다. 전류 센서 고장으로 인하여 정상적인 제어가 이루어지지 않아 제동력이 정상 시에 비해 감소되었다.

Fig. 11은 후륜 우측 휠의 정상 시(Normal)와 고장 발생 시 고장 대응 알고리즘에 따라 제어되는 제동토크(Maneuver)를 비교한 그래프이다.

Fig. 12는 차량의 요각속도(yaw rate)를 비교한 그래프로서 고장 대응 알고리즘이 적용된 경우, 적용되지 않은 경우에 비해 요각속도(yaw rate)가 1/3로 감소함을 알 수 있다.

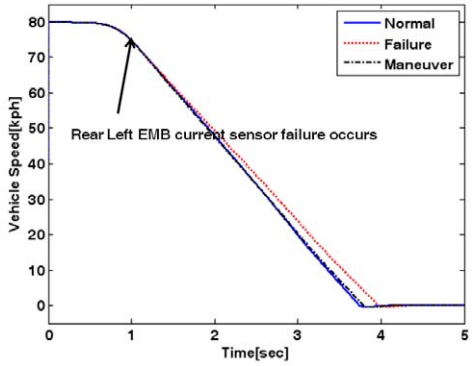

Fig. 9 Comparison of the vehicle speeds

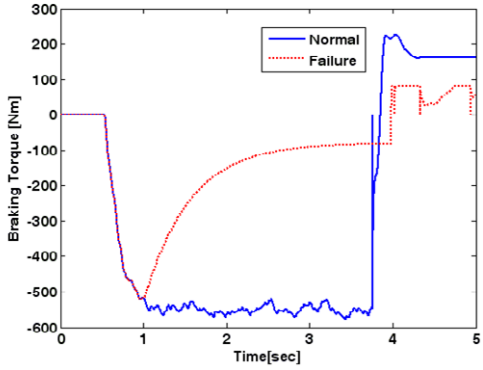

Fig. 10 Comparison of the braking torque in the rear left EMB

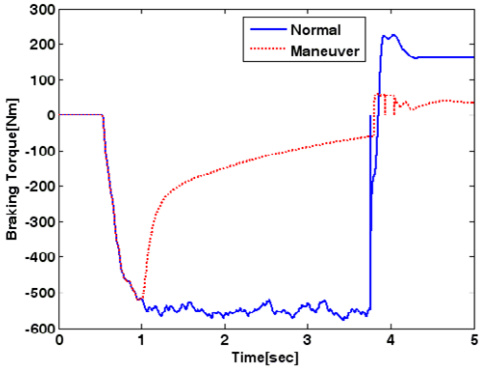

Fig. 11 Comparison of the braking torque in the rear right EMB

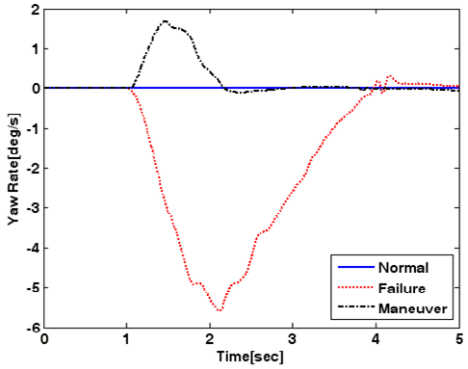

Fig. 12 Comparison of the vehicle yaw rates

6. 결 론

EMB, EWB가 적용된 연료전지 차량의 신뢰성 평가를 하기 위하여 이전 연구에서는 대상 해석 모델과 신뢰성 평가 시나리오를 개발하였다.

본 연구에서는 신뢰성 평가 시나리오 중 80kph 주행 중 Full 제동 상황에서 후륜 한 휠의 EMB 전류 센서 고장 발생 시 차량의 안정성을 확보하기 위한 고장 대응 알고리즘을 개발하고, 그 타당성을 해석을 통해 검증하였다. 한쪽 휠의 EMB 고장 발생 시 제동거리가 늘어나고, 차량의 횡방향 안정성 문제가 발생한다. 이 때 제안된 고장 대응 알고리즘을 적용할 경우 차량의 안정성을 향상시킬 수 있다는 것을 해석을 통해 확인하였다.

추후 개발된 해석 모델을 이용하여 다양한 신뢰성 평가 시나리오의 적합성 평가와 이에 대한 고장 대응 알고리즘에 대한 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행한 산업원천 기술개발사업에 의해 지원되었습니다.

References

1) K. K. Jeon, H. S. Hwang, S. J. Choi, D. H. Yang, S. H. Hwang, H. R. Park, S. B. Choi, "Development of Reliability Evaluation Technology for Green Car Regenerative Braking System PART-(1)", KSAE 2010 spring conference, 2010
2) R. Roberts, B. Gombert, H. Hartmann, D. Lange, M. Schautt, "Testing the Mechatronic Wedge Brake", SAE Technical paper series 2004-01-2766, 2004
3) C. H. Jo, S. M. Lee, H. S. Kim, "Analysis of Braking Performace for a Vehicle with Front EWB and Rear EMb", KSAE 2009 conference, pp. 1267~1272, 2009
4) S. M. Lee., C. H. Jo, H. L. Song, Y. S. Cho, I. S. Kim, D.Y. Hyun, H. S. Kim, "Analysis of Braking Performace for Electro-Wedge Brake System", KSAE 2009 conference, pp. 641~646, 2009
5) S. Y. Kim, S. B. Choi, J. G. Kim, "The Design of Electronic Noncircular Gear Brake and Adaptation Scheme for Pad Friction-coefficient Estimation", KSAE 2008 conference, 2009
6) H. R. Park, S. B. Choi, S. J. Choi, K. K. Jeon, H. S. Hwang, "Adaptive Control of Self-energizing Brake System using Noncircular Gear", KSAE 2010 conference, 2010