

EMB 시스템의 모델 기반 센서 고장 검출 알고리즘 개발

황우현¹⁾ · 양이진¹⁾ · 허건수^{*2)}

한양대학교 대학원 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 미래자동차공학과²⁾

Model-based Sensor Fault Detection Algorithm for EMB System

Woohyun Hwang¹⁾ · Ijin Yang¹⁾ · Kunsoo Huh^{*2)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 1 February 2010 / Revised 27 June 2011 / Accepted 27 July 2011)

Abstract : The brake-by-wire technology is a new automotive chassis system that allows standard braking operations by electronic components with lighter weights and faster response. The brake-by-wire units such as EMB (Electro-Mechanical Brake) are controlled by electronic sensors and actuators and, thus, the fault diagnosis is essential for implementation. In this study, a model-based fault diagnosis system is developed for the sensors based on the analytical redundancy method. The fault detection algorithm is verified in simulations for various faulty cases. A test bench is built including the EMB unit and the performance of the proposed fault diagnosis system is evaluated through the experiment.

Key words : Brake-by-wire(브레이크바이와이어), Electro-mechanical brake(전자 기계식 제동), PMSM(영구자석형 동기전동기), Clamping force sensor(클램핑 힘 센서), Model-based fault detection(모델 기반 고장 검출), EMB test bench(EMB 실험장치)

1. 서 론

자동차 산업의 급속한 발전과 복잡한 도로교통체계의 변화에 따라 자동차의 안전성과 안락한 승차감에 대한 소비자의 관심과 요구가 더욱 커지고 있다. 이와 관련하여 차량의 안전도 관련 기술은 많은 발전을 거듭하여 왔으며, 전자와 제어분야의 기술을 접목하여 능동안전 시스템 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 차량의 안전성 및 조종성(steerability)을 확보하기 위해서는 제동 기술은 제동 시뿐만 아니라 가속 시 또는 일반 주행 시에서도 차량 자세 제어를 위해 필요하다. 따라서 향후의 제동 장치는 더욱 복잡하고 다양한 형태로 신속히 각 바퀴를 제어할 수 있어야 한다. 차량 내 다양한 새시 제어

시스템이 늘어남에 따라 기존의 유압 브레이크 시스템은 응답속도 등에서 한계를 보이고 있으며, BBW(Brake-By-Wire) 시스템이 대안으로 떠오르고 있다. 전자제어식 제동 시스템은 기존의 유압 브레이크 장치에 솔레노이드 밸브를 이용하여 전자 제어하는 EHB(Electro-Hydraulic Brake)와 모터를 사용하여 직접 제어하는 전기구동 방식의 EMB(Electro-Mechanical Brake)로 나누어진다. 특히 EMB의 경우 브레이크 부스터나 유압 호스 등을 제거할 수 있으므로 공간적인 활용도가 높고, 유압을 사용하지 않으므로 친환경적인 장점이 있다. 또한 직접 모터를 제어하는 방식이기 때문에 빠른 응답속도를 보이므로 향상된 제동장치 등에 적합하다.¹⁻³⁾

유럽의 한 시장조사 기관의 보고서에 따르면 EMB system의 경우 이르면 2014년에는 시장에 소

*Corresponding author, E-mail: khuh2@hanyang.ac.kr

개될 것으로 예상되고 있다. 이러한 시장 동향으로 신뢰성 확보를 위한 고장 진단 알고리즘 개발의 필요하다. 향후 수년 안에 실용화 단계에 이를 수 있는 수준까지 도달하기 위해선 BBW 시스템에서 fail을 미리 예측하는 fault diagnosis 기법이 필요하다. Fault diagnosis 기법은 크게 하드웨어 중복을 통한 방법과 해석적 중복을 통한 방법으로 나누어진다.⁴⁾ 하드웨어 중복에 의한 방법은 센서나 액추에이터 등을 중복해서 사용하는 방법으로 비교적 간단하게 신뢰성을 확보할 수 있지만 비용이 많이 들기 때문에 공학적으로 가치가 떨어진다. 모델 기반의 센서 고장 진단 알고리즘의 경우 수학적 modeling을 통해 hardware redundancy를 대체할 수 있어 상대적으로 비용 절감을 할 수 있는 장점이 있다. 반면, 차량 system에 적용하기 위한 real-time system이 요구되어 복잡한 수학적 modeling 적용에 제한적이며, modeling error로 인한 false alarm 또는 missing fault detection 이 발생될 수 있는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 EMB system에 장착되는 current sensor와 rotor speed sensor와 clamping force sensor에 대한 모델기반 센서 고장 진단 알고리즘을 제안하였다. 모델기반 센서 고장 진단 알고리즘의 단점을 보완하기 위해 비교적 단순한 수학적 모델 적용이 가능한 transfer function을 이용한 residual을 생성하였다. 알고리즘을 검증하기 위해 MATLAB®-Simulink®을 이용한 simulation 및 HILS 시험 환경을 구현하였다. 이러한 시험 환경을 통하여 실제로 구현 가능한 고장인 clamping force sensor에 대한 step fault signal과 같은 임의의 additive fault 신호가 센서 신호에 인가될 경우에 대해서 제안된 알고리즘의 성능을 검증하였다.

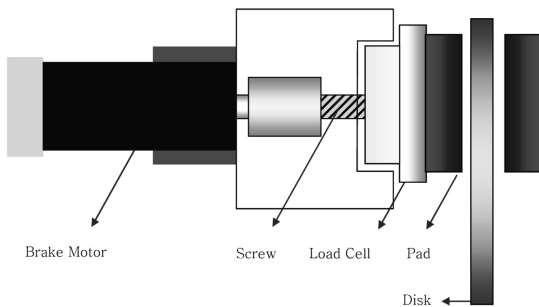


Fig. 1 EMB system

2. EMB 시스템의 모델링

Fig. 1은 EMB 시스템을 나타낸 그림이다. EMB 시스템은 모터와 스크류로 이루어져 회전운동을 직선운동으로 변환하여 브레이크 힘을 발생시키는 구조로 이루어져 있다. EMB 시스템을 모델링하기 위해서는 전기모터로 구성된 전기 시스템과 브레이크 캘리퍼와 디스크로 구성된 기계 시스템을 각각 모델링 하여야 한다. 전기 시스템의 모델링의 경우 기준 좌표계 변환(reference frame transformation)을 사용한다. 기준 좌표계 변환은 교류 시스템을 쉽게 모델링하고 해석하기 위해 전압, 전류, 자속 등의 좌표계를 변환하는 것이다. EMB에서 사용된 모터는 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)이며, 전압 방정식은 전동기가 회전할 경우 시변 미분 방정식으로 표현된다. 3상의 a, b, c 좌표계는 변환을 통해 d, q, n 의 좌표계로 바뀌게 되는데, d 축, q 축, n 축은 각각 직축, 횡축, 중성축을 의미한다. d, q, n 의 정지좌표계를 이용하면 PMSM의 전압방정식을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.^{5,6)}

$$\begin{aligned} v_d &= Ri_d + \frac{d}{dt}(L_d i_d) - \omega_s \psi_q \\ v_q &= Ri_q + \frac{d}{dt}(L_q i_q) + \omega_s \psi_d \\ \psi_q &= L_q i_q, \quad \psi_d = L_d i_d + \phi \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 v_d, v_q 는 각 축의 전압을, i_d, i_q 는 전류를, L_d, L_q, ψ_d, ψ_q 는 각 축의 인덕턴스와 쇠교를, ω_s, R, ϕ 는 각각 동기 속도와 저항, 회전자에 의한 쇠교를 나타낸다. 모터에서 발생하는 전기적 토크는 기계시스템의 부하로 작용하게 된다. 전기적 토크와 부하의 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P[\phi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

$$T_e = T_L + J \frac{d}{dt} \omega_r + T_{rs} \quad (3)$$

여기서 T_L 은 부하토크, J 는 관성모멘트, T_{rs} 는 마찰이나 점성 등의 저항력이다.

PMSM의 최대 토크를 발생시키기 위해서는 동기

속도로 회전하는 회전자 자속과 회전자계를 직각으로 유지되도록 3상 전류의 위상을 제어하여야 한다. 따라서 자속성분의 전류 i_d 는 0으로 설정한다. 모터가 브레이크 패드를 직접 미는 힘을 clamping force라 하고, 부하토크는 스크류의 효율과 pitch에 의하여 clamping force로 작용한다.

식 (4)와 같은 가정들을 이용하면 식 (5)와 같은 시스템의 state-space 모델을 구할 수 있다. EMB 시스템에서 중요한 역할을 하는 세 가지 센서, 그 중에서 clamping force의 크기를 측정하는 센서의 고장을 검출하기 위하여 모델의 변수를 식 (5)와 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} T_L &= \frac{P_s}{2\pi\eta} F_{cl} \\ T_{rs} &= B\omega_r \\ i_M &= i_q, L_M = L_q, v_M = v_q, \omega_s \approx P\omega_r \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_M \\ \dot{F}_{cl} \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L_M & 0 & -P\phi/L_M \\ 0 & 0 & 0 \\ 3P\phi/2J & -P_s/2\pi\eta J & -B/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_M \\ F_{cl} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_M$$

$$\begin{bmatrix} i_M \\ F_{cl} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_M \\ F_{cl} \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 P 는 pole pair의 개수, P_s 는 screw의 pitch, η 는 screw의 효율, 그리고 i_M, F_{cl}, ω_r 은 각각 측정된 모터 전류, clamping force, 회전 속도를 나타낸다.

3. EMB 시스템의 센서 고장 감지 모델

EMB 시스템의 fault는 발생 위치에 따라 전류 센서와 힘 센서, 그리고 회전자 속도 센서에서 발생하는 fault가 있다. 세 가지 모두 EMB 시스템의 성능에 중요한 영향을 미치는 요소들이기 때문에 fault 발생 시 언제 어느 위치에서 발생했는지 알아야 한다. 그래야만 운전자에게 경고 메시지를 주고, mechanical backup이나 fault accommodation 또는 controller redesign과 같은 조치를 취할 수 있다. 전류 센서와

힘 센서, 그리고 회전자 속도 센서의 고장 감지 및 추정을 위해 센서의 고장 모델은 다음 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} i_{Mm} &= i_M + f_1 \\ F_{clm} &= F_{cl} + f_2 \\ \omega_{rm} &= \omega_r + f_3 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $i_{Mm}, F_{clm}, \omega_{rm}$ 은 각각 측정된 전류 센서 값, 힘 센서 값, 회전자 속도 센서 값을 나타내며 f_1, f_2, f_3 는 각각 센서의 고장신호를 나타낸다.

EMB 시스템의 센서의 고장을 검출하기 위하여 영구자석형 동기전동기의 모델과 센서의 고장 모델을 같이 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + E_x d(t) + F_x f(t) \\ y(t) &= Cx(t) + F_y f(t) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서

$$x = \begin{bmatrix} i_M \\ F_{cl} \\ \omega_r \end{bmatrix}, u = v_M, f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} -R/L_M & 0 & -P\phi/L_M \\ 0 & 0 & 0 \\ 3P\phi/2J & -P_s/2\pi\eta J & -B/J \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/L_M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$E_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_x = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

α 는 실제 모터의 전류와 모터의 고장 전류 사이의 gain을 나타낸다. 이러한 gain을 사용한 이유는 측정된 전류가 모터의 드라이브에도 쓰이므로 고장 난

전류가 발생하면 이 전류로 인하여 모터가 잘못된 전압을 발생시킬 수 있기 때문이다. 이때의 효과를 나타내기 위하여 위와 같이 외란의 형태로 고려하였다.

위의 모델은 다음과 같은 전달 함수의 형태로 나타낼 수 있다.

$$y(s) = G_{yu}(s)u(s) + G_{yd}(s)d(s) + G_{yf}(s)f(s) \quad (8)$$

여기서

$$G_{yu}(s) = C(sI - A)^{-1} B,$$

$$G_{yd}(s) = C(sI - A)^{-1} E_x,$$

$$G_{yf}(s) = C(sI - A)^{-1} F_x + F_y.$$

센서의 고장을 검출하기 위하여 Fig. 2와 같이 residual을 적절하고 안정한 $V_{ry}(s)$ 와 $V_{ru}(s)$ 를 이용하여 생성한다. 이를 식으로 표현하면 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

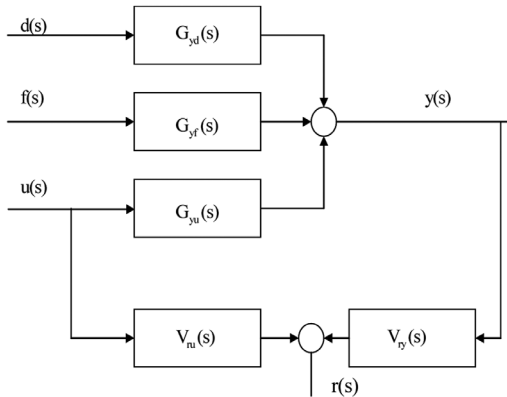


Fig. 2 Residual generator

$$\begin{aligned} r(s) &= V_{ry}(s) y(s) + V_{ru}(s) u(s) \\ &= \begin{pmatrix} V_{ru}(s) + V_{ry}(s)G_{yu}(s) \\ V_{ry}(s)G_{yd}(s) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} u(s) \\ d(s) \end{pmatrix} \\ &\quad + V_{ry}(s)G_{yf}(s)f(s) \end{aligned} \quad (9)$$

위의 생성된 residual에서 고장에 의한 영향만을 고려하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\begin{pmatrix} V_{ry}(s) & V_{ru}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{yu}(s) & G_{yd}(s) \\ I & 0 \end{pmatrix} = 0 \quad (10)$$

위의 식에서 $V_{ry}(s)$, $V_{ru}(s)$ 값을 구하고 다음과 같은 residual을 얻을 수 있다.

$$r(s) = V_{ry}(s)H_{yf}(s)f(s) \quad (11)$$

생성된 residual로부터 고장을 검출하기 위하여 fault detectability를 만족해야 한다. 본 연구에서는 세 가지 종류의 센서 고장과 residual의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \left. \frac{r_1(s)}{f_1(s)} \right|_{s=0} \neq 0, \quad \left. \frac{r_1(s)}{f_2(s)} \right|_{s=0} = 0, \quad \left. \frac{r_1(s)}{f_3(s)} \right|_{s=0} \neq 0 \\ \left. \frac{r_2(s)}{f_1(s)} \right|_{s=0} = 0, \quad \left. \frac{r_2(s)}{f_2(s)} \right|_{s=0} \neq 0, \quad \left. \frac{r_2(s)}{f_3(s)} \right|_{s=0} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

위의 관계식으로부터 r_1 은 전류 센서와 각속도 센서의 고장을 검출할 수 있고, r_2 는 clamping force 센서의 고장을 검출할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션

설계한 고장진단 시스템의 성능을 검증하기 위하여 MATLAB[®]-Simulink[®]을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 전동기의 파라미터들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R &= 0.5 \Omega & P &= 4 \text{ pairs} \\ L &= 5 \text{ mH} & B &= 0.04 \text{ Nm / rad / s} \\ \eta &= 0.5 & \phi &= 0.5 \text{ V / rad / s} \\ p &= 0.05 & J &= 0.0207 \text{ kgm}^2 \\ \alpha &= 1 \end{aligned}$$

Fig. 3은 clamping force 센서의 고장 시나리오를 나타낸다. 고장은 3초와 6초 사이에 50N의 크기로 발생하였고, 7초와 12초 사이에 80N 이상의 크기로 발생하였다. Fig. 4는 그 때의 residual 값들을 나타낸다. 본 연구에서 설계된 residual은 고장이 발생하지 않을 경우 0의 값을 가진다. 고장이 발생한 시간에서 residual2의 값이 0이 아닌 값을 가지므로 clamping force 센서의 고장은 residual2에서 검출됨을 알 수 있다.

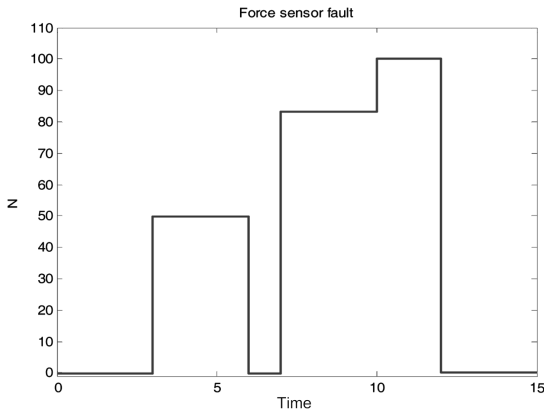


Fig. 3 Clamping force sensor measurement with faults

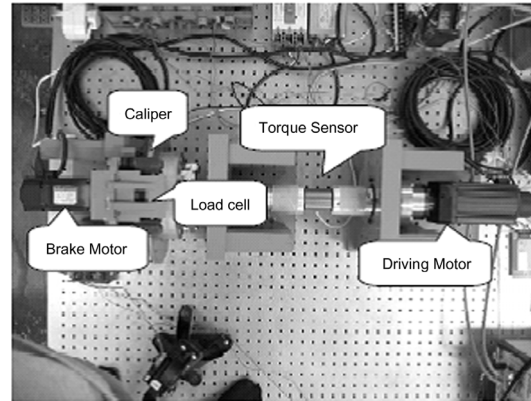


Fig. 5 EMB test bench

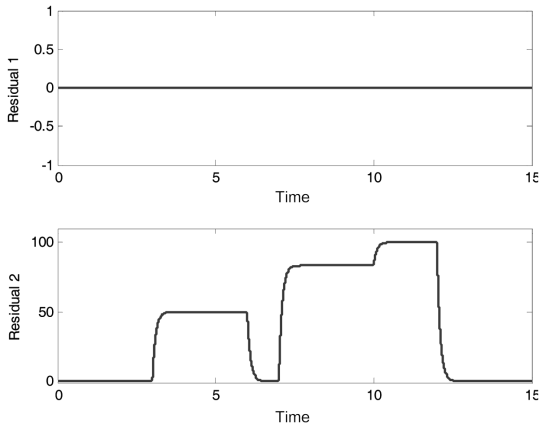


Fig. 4 Residuals

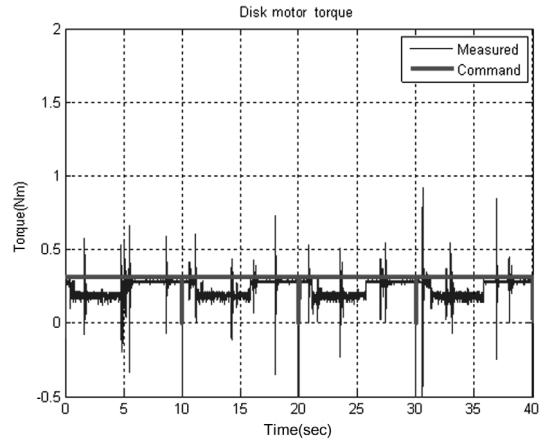


Fig. 6 Driving disk motor of the EMB test bench

5. EMB 실험장치를 이용한 검증

실험적 검증을 위한 EMB test bench를 구성하였다. 실험 장치의 전체 구성은 Fig. 5와 같이 서보 드라이브 모터를 이용하여 디스크를 회전시키고, 또 다른 서보 드라이브 모터와 연결된 캘리퍼와 브레이크 패드를 이용하여 디스크를 멈추는 구성으로 이루어져 있다.

AC 서보 모터는 OTIS 사의 CN10이며 드라이브는 FDA-5010을 사용하였다. 구동 방식은 3상 전압형 PWM 구동이며, 토크 제어 모드로 작동된다. 구동 모터의 정격토크는 3.18 Nm, 정격 회전 속도는 3000 rpm이다.

Fig. 6과 Fig. 7은 EMB 실험장치가 정상적으로 작동할 때의 실험값을 나타내고 있다. 테스트 환경은 Fig. 6과 같이 일정한 토크로 브레이크 디스크를 회

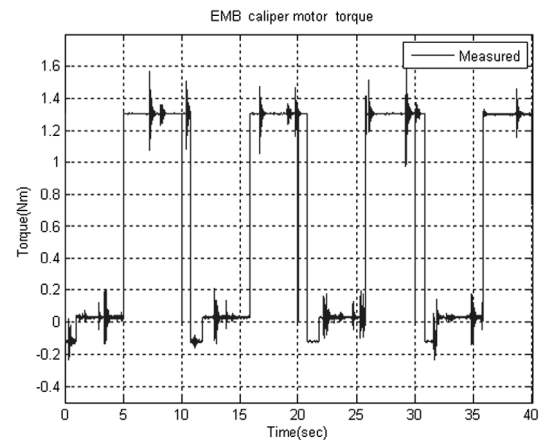


Fig. 7 Caliper motor torque in braking

전시키기 위한 입력 명령을 주고 그 때 Fig. 7과 같은 형태의 브레이크 상황이 발생된다.

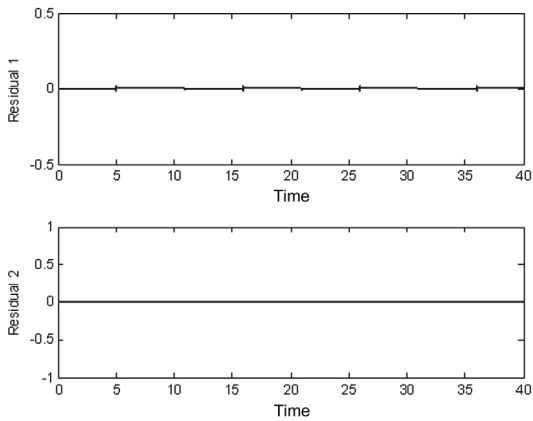


Fig. 8 Residuals in the case of no fault

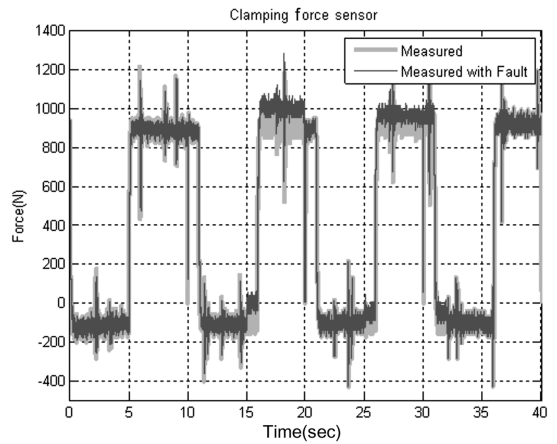


Fig. 11 Clamping force sensor measured with fault

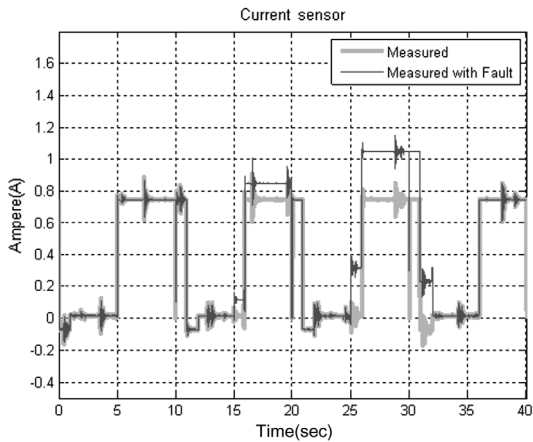


Fig. 9 Current sensor measured with fault

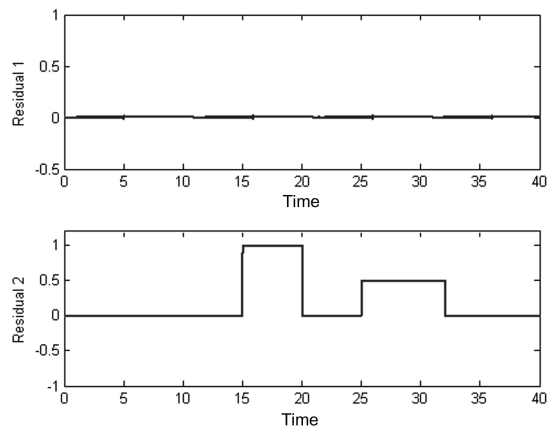


Fig. 12 Residuals of force sensor fault only

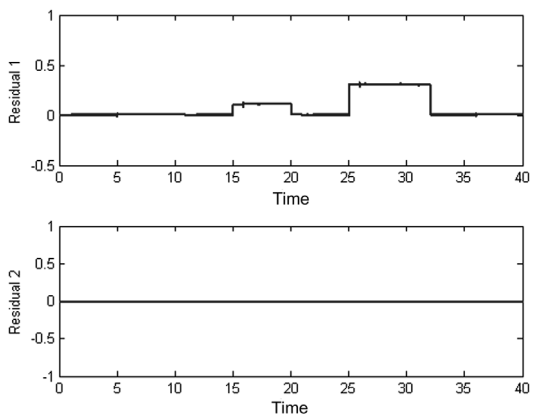


Fig. 10 Residuals of current sensor fault only

Fig. 8은 정상적인 작동 시에 residual의 값을 나타낸다. 0의 값을 나타내고 있으므로 고장이 발생하지

않았다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 current sensor에서 고장이 나지 않았을 경우와 고장이 났을 경우를 동시에 나타낸 그림이다.

15초와 20초 사이에 10%에 해당하는 0.1A가 offset으로 발생하였고, 또한 25초와 32초 사이에 그보다 더 큰 offset이 발생한 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 current sensor에서 고장이 발생하였을 경우 residual을 나타내는 그림이다. 고장이 나지 않았을 경우는 residual의 값이 0의 값을 나타내고 고장이 발생하면 어떠한 값을 나타낸다. 0이 아닌 값이 어떠한 시점에서 발생하였다는 것은 그 시점에 고장이 발생한 시점이라 할 수 있다.

본 연구에서 제안된 Model-based fault diagnosis 기법에서 보면 residual1의 값의 변화는 current sensor

의 고장을 나타낸다. Fig. 10과 같이 current sensor에서 15초에 고장이 발생하였고 또한 25초에도 발생한 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 11은 clamping force 센서에 고장이 발생한 경우를 나타낸다. 15초와 20초 사이에 10%에 해당하는 100 N이 offset으로 발생하였고, 또한 25초와 32초 사이에 5%에 해당하는 offset이 발생한 것을 확인 할 수 있다. 이 경우의 residual의 값은 Fig. 12와 같다. Residual2를 통해서 clamping force sensor에서 15초에 고장이 발생하였고 또한 25초에도 발생한 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 EMB 시스템의 신뢰성을 향상시키기 위하여 모델을 이용한 고장진단 기법을 개발하였다. EMB 시스템에서 모터의 서보 드라이브와 축 변환 오차를 고려하여 더욱 강인한 고장 진단 시스템을 개발하였다. 시스템의 세 가지 센서의 고장 진단을 위하여 residual generator를 이용하여 fault signal을 감지, 분리를 하였다. 또한 개발된 고장진단 기법의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. Clamping force를 측정하는 힘 센서와 모터의 전류 센서의 고장은 시뮬레이션을 통하여 각각 감지가 되고 두 개의 센서 고장이 isolation이 되는 것을 확인하였다. 또한 개발된 기법의 실험적 검증을 위하여 test bench를 제작하였다. 이 실험 장치를 통하여 센서의 고장을 구현하고, 실험 데이터를 바탕으로 clamping force 센서와 전류 센서 고장 진단 알고리즘을 검증하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 자동차기반기술개발사업(과제번호:10005253)과 지식경제부와 한국 산업 기술재단의 전략기술 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

References

- 1) R. Schwarz, R. Isermann, J. Bohm, J. Nell and P. Rieth, "Modeling and Control of an Electro Mechanical Disk Brake," SAE 980600, 1998.
- 2) D. Schenk, R. Wells and J. Miller, "Intelligent Braking for Current and Future Vehicles," SAE 950762, 1995.
- 3) N. A. Kelling and P. Leteinturier, "X-by-wire: Opportunities. Challenges and Trends," SAE 2003-01-0113, 2003.
- 4) J. Chen and R. J. Patton, Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems, Kluwer, Netherlands, pp.4-5, 1999.
- 5) D. W. Novotny and T. A. Lipo, Vector Control and Dynamics of AC Drives, Oxford University Press, UK, pp.290-291, 1996.
- 6) P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-magnet Motor Drives, Part I: The Permanent-magnet Synchronous Motor Drive," IEEE Transaction on Industry Application, Vol.25, No.2, pp.265-273, 1989.