

EHB 시스템을 위한 실시간 모델 기반 고장 진단 시스템

한 광 진¹⁾ · 허 건 수^{*2)} · 홍 대 건³⁾ · 김 주 곤³⁾ · 강 형 진³⁾ · 윤 팔 주³⁾

한양대학교 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾ · 만도³⁾

Real-Time Model-Based Fault Diagnosis System for EHB System

Kwangjin Han¹⁾ · Kunsoo Huh^{*2)} · Daegun Hong³⁾ · Joogon Kim³⁾ · Hyungjin Kang³⁾ · Paljoo Yoon³⁾

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

²⁾School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾413-5 Gomae-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-901, Korea

(Received 21 January 2007 / Accepted 19 February 2007)

Abstract : Electro-hydraulic brake system has many advantages. It provides improved braking performance and stability functions. It also removes complex mechanical parts for freedom of design, improves maintenance requirements and reduces unit weight. However, the EHB system should be dependable and have back-up redundancy in case of a failure. In this paper, the model-based fault diagnosis system is developed to monitor the brake status using the analytical redundancy method. The performance of the model-based fault diagnosis system is verified in real-time simulation. It demonstrates the effectiveness of the proposed system in various faulty cases.

Key words : Brake-by-wire(전자제어식 제동), Fault detection and isolation(고장 검출 및 분류), Electro-hydraulic brake(EHB, 전기유압식 제동), Fault Diagnosis(고장 진단)

1. 서 론

EHB(Electro-Hydraulic Brake, 전기유압식 제동) 시스템은 많은 이점을 지니고 있다. 기존의 유압식 제동장치에 비하여 더 좋은 제동 성능을 지녔으며, 안정성 확보를 위한 기능들(ABS, TCS, ESC, EBD 등)을 보다 쉽게 구현할 수 있다. 또한 복잡한 기계 및 유압 장치 없이도 더 정확하고 빠른 응답의 제동력을 생성할 수 있다.¹⁾

제동장치는 차량의 안전에 치명적인 장치로, EHB 시스템은 높은 신뢰성이 보장되어야 한다. 이를 위해 EHB 시스템은 유사시 제동력을 확보할 수 있는 유압식 대비 장치를 갖추고 있으며, 전기 계통의 고장이 발생한 경우 이를 통해 제한적으로 제동

력을 얻을 수 있다. 따라서 EHB 시스템에서 제동장치의 동작 상태에 관한 정보가 필요하며, 이는 강인한 고장 진단 시스템이 통해 가능하다.²⁾

본 연구에서는 EHB 시스템을 위한 실시간 모델 기반(model-based) 고장 진단 시스템을 개발하였다. EHB 시스템에서 고장을 고려한 상태 공간 모델을 유도하고, 이에 대하여 관측기(observer)를 설계하였다. 또한 설계한 관측기를 이용한 analytical redundancy 기법^{3,4)}과 adaptive threshold 기법⁵⁾을 사용한 고장 진단 시스템을 개발하였고, 그 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. Model-Based Fault Diagnosis

EHB 시스템의 블록선도는 Fig. 1과 같다. 이는 유압식 actuator, 휠, EHB 제어기, 그리고 센서들로 이

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

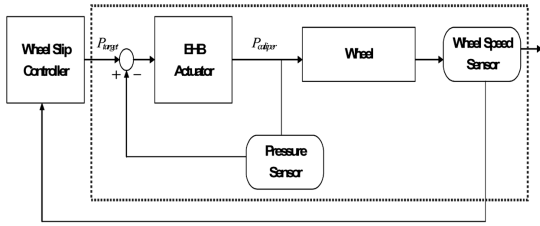


Fig. 1 Block diagram of the EHB system

루어져 있으며 그 중 휠 슬립 제어기(wheel slip controller)와 같은 상위 제어기는 고장 진단 시스템 개발에서 고려하지 않아도 되므로,⁵⁾ 점선 안의 블록들만 고려한다.⁶⁾

2.1 EHB 시스템의 고장을 고려한 모델링

EHB 시스템에서 고장이 발생할 수 있는 위치에 따라 고장을 분류하여 보면 다음의 세 가지가 있다. 휠 속도 센서(wheel speed sensor)와 압력 센서(pressure sensor), 그리고 EHB actuator의 고장이다. 세 가지 모두 EHB 시스템의 성능에 중요한 영향을 미치는 요소들로 이들 중에서 어떤 고장이 발생하였을 때 어느 위치에서 그리고 언제 발생했는지를 알아야, 이를 운전자에게 알리고 대비 장치를 작동시키는 등의 조치를 취할 수 있다.

모델 기반 고장 진단 시스템을 구성하기 위해, 고장을 고려한 EHB 시스템의 수학적 모델을 유도하였다. EHB actuator는 압력 서보기구(pressure servo)로 식 (1)의 1차 시스템으로 모델링 하였다.

$$G_{EHB}(s) = \frac{P_b(s)}{P_{target}(s)} = \frac{1}{t_c s + 1} \quad (1)$$

차량이 제동할 때 Fig. 2와 같이 타이어와 지면 사이에 제동력이 발생한다. 이로부터 휠의 동역학적 모델은 식 (2)와 같다.

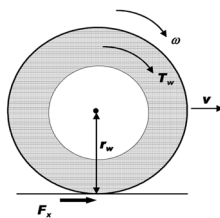


Fig. 2 Wheel dynamics

$$J_w \dot{\omega} = T_w - r_w F_x = -K_b P_b - r_w F_x \quad (2)$$

여기서 J_w 는 휠의 관성 모멘트, ω 는 휠의 회전 속도, T_w 는 제동 토크, r_w 는 휠의 반지름, F_x 는 직진력, K_b 는 브레이크 게인(brake gain), P_b 는 브레이크 유압을 나타낸다.

직진력을 계산하기 위해 선형 타이어 모델을 사용하였다. 저 슬립 구간(low slip range)이라 가정하면 직진력은 식 (3)과 같다.

$$F_x = c_\lambda \lambda = c_\lambda \frac{v_x - r_w \omega}{v_x} \quad (3)$$

식 (1), 식 (2) 와 식 (3)으로부터 고장 진단을 위한 상태 공간 모델(state-space model)을 식 (4), 식 (5)로 설정하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_b \\ \dot{F}_x \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/t_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -K_b/J_w & -r_w/J_w & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_b \\ F_x \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/t_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} P_{target} + \begin{bmatrix} 1/t_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_a \quad (4)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} P_{b,m} \\ c_\lambda \lambda_c \\ \omega_m \end{bmatrix} = \mathbf{I} \begin{bmatrix} P_b \\ F_x \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{s-P_b} \\ f_{s-\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ e_{m-F_x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 f_a, f_{s-P_b} , 그리고 $f_{s-\omega}$ 는 각각 EHB actuator의 고장, 압력 센서 고장, 그리고 휠 속도 센서 고장이며, 모두 additive fault²⁾로 가정하였다. e_{m-F_x} 는 위의 식 (3)에서 사용한 선형 타이어 모델의 오차이다.

2.2 관측기 설계

설계한 EHB 시스템의 모델 식 (4)와 식 (5)를 기반으로 다음과 같이 관측기를 설계하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) &= A\hat{\mathbf{x}}(t) + Bu(t) + L(\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t)) \\ \hat{\mathbf{y}}(t) &= C\hat{\mathbf{x}}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

설계한 관측기의 오차와 오차 동역학(error dynamics)은 각각 식 (7) 그리고 식 (8)과 같다.

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{LC})\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}\mathbf{f}_a(t) - \mathbf{L}\mathbf{f}_s(t) - \mathbf{L}\mathbf{E}_m(t) \quad (8)$$

출력 신호와 식 (6)의 관측기로부터 추정된 출력 신호와의 차를 residual로 설계하면 식 (9)와 같다.

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t) \quad (9)$$

식 (9)는 식 (6), 식 (7), 그리고 식 (8)의 관계로부터 정리하면 다음의 식 (10)으로 다시 쓸 수 있다.

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{C}\mathbf{e}(t) + \mathbf{f}_s(t) + \mathbf{E}_m(t) \quad (10)$$

Fig. 3에서 고장 진단을 위한 residual 생성 과정을 블록선도로 나타내었다.

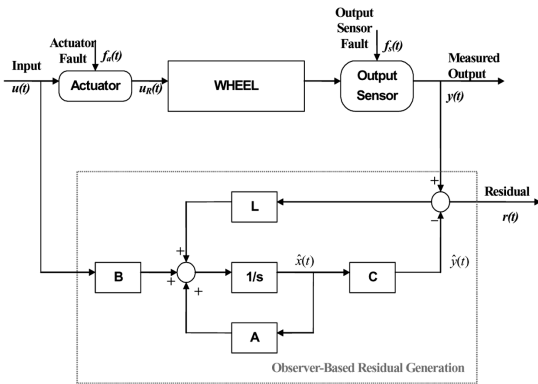


Fig. 3 Residual generation

2.3 Residual 분석

시스템의 수학적 모델을 기반으로 관측기를 설계하여 고장 진단 시스템을 설계하여, 각 고장에 대한 검출성(detectability)을 분석하였다. 시스템에 고장이 발생하였을 때 residual에 그 영향이 바로 나타나야 정확한 고장 진단이 가능하다. 특히 강한 검출성을 갖지 못한다면, 고장이 존재함에도 불구하고 residual에서 그 영향이 사라져버려 고장 진단 시스템이 오작동을 하게 된다. 이는 관측기의 동적 특성이나 잘못된 모델의 설계로 인한 것으로 강한 검출성을 갖기 위해서는 다음 두 가지 조건을 모두 만족해야 한다.

조건 1 : \mathbf{A} , \mathbf{C} 가 가관측성(observable)

조건 2 : $G_{rf}(0) \neq 0$

여기서 $G_{rf}(s)$ 는 residual에 대한 고장의 전달함수이고, $G_{rf}(0)$ 는 정상상태 게인이다.

조건 1은 식 (4)의 상태 공간 모델로부터 만족하는 것을 확인할 수 있다. 조건 2에 대한 조사를 위해 앞서 설계한 residual은 식 (11)과 같고 각각의 고장의 전달함수는 식 (12)와 같다. 또한, 각 전달함수에 대한 고장의 정상상태 게인을 구하면 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} r_1 &= P_{b,m} - \hat{P}_b \\ r_2 &= \omega_m - \hat{\omega} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} G_{rfs}(s) &= \mathbf{C}[\mathbf{sI} - (\mathbf{A} - \mathbf{LC})]^{-1}(-\mathbf{L}) + \mathbf{I} \\ G_{rfa}(s) &= \mathbf{C}[\mathbf{sI} - (\mathbf{A} - \mathbf{LC})]^{-1}\mathbf{B} \\ G_{rEm}(s) &= \mathbf{C}[\mathbf{sI} - (\mathbf{A} - \mathbf{LC})]^{-1}(-\mathbf{L}) + \mathbf{I} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{r_1(s)}{f_{s-P_b}(s)} \right|_{s=0} &\neq 0, \quad \left. \frac{r_1(s)}{f(f_{s-\omega})(s)} \right|_{s=0} = 0 \\ \left. \frac{r_1(s)}{f_{s-\omega}(s)} \right|_{s=0} &= 0, \quad \left. \frac{r_1(s)}{f_a(s)} \right|_{s=0} \neq 0, \\ \left. \frac{r_1(s)}{e_{m-Fx}(s)} \right|_{s=0} &= 0, \quad \left. \frac{r_2(s)}{f_{s-P_b}(s)} \right|_{s=0} \neq 0, \\ \left. \frac{r_2(s)}{f(f_{s-\omega})(s)} \right|_{s=0} &\neq 0, \quad \left. \frac{r_2(s)}{f_{s-\omega}(s)} \right|_{s=0} = 0, \\ \left. \frac{r_2(s)}{f_a(s)} \right|_{s=0} &\neq 0, \quad \left. \frac{r_2(s)}{e_{m-Fx}(s)} \right|_{s=0} \neq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 식 (13)으로부터 residual r_1 은 압력 센서 고장과 EHB actuator 고장에 강한 검출성을 가지는 것을 볼 수 있다. Residual r_2 는 위의 두 고장과 더불어 휠 속도 센서 고장과 선행 타이어 모델 오차에 강한 검출성을 갖는 것을 볼 수 있다.

EHB actuator의 고장은 두 residual r_1, r_2 에서 모두 나타나므로 이를 제외하면, 각각의 residual은 식 (14)와 같이 각 고장 요소들이 미치는 영향들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$r_1 = r_{1_p_b}$$

$$r_2 = r_{2_p_b} + r_{2_w} + r_{2_e_{m_Fx}} \quad (14)$$

여기서 우변의 항들은 각 고장 요소들이 각각의 residual에 주는 영향이다.

식 (14)의 $r_{2_p_b}$ 는 앞서 구한 정상상태 계인으로부터 $r_{1_p_b}$ 의 선형 함수 형태로 나타낼 수 있고, 일반적으로 $r_{2_w} \gg r_{2_e_{m_Fx}}$ 이므로, 고장 검출 및 분류를 위한 adaptive threshold를 식 (15)로 설계하였다.

$$T_1(t) = \eta_1$$

$$T_2(t) = f[r_1(t)] + \eta_2 + \alpha \quad (15)$$

여기서 η_1 과 η_2 는 실험적, 경험적으로 구한 작은 값이다. α 와 $f[]$ 는 각각 다음 식 (16), 식 (17)과 같다.

$$\alpha = \left| r_{2_e_{m_Fx}} \right|_{\max} \quad (16)$$

$$f[r_1(t)] = a \cdot r_1(t) \quad (17)$$

여기서 a 는 다음 식 (18)과 같다.

$$a = \frac{r_1(s)}{f_{s_p_b}(s)} \Big|_{s=0} / \frac{r_2(s)}{f_{s_p_b}(s)} \Big|_{s=0} \quad (18)$$

따라서 설계한 adaptive threshold를 이용하여 residual의 값에 따라서 다음 Table 1과 같이 EHB 시스템의 상태를 진단할 수 있다.

Table 1 EHB system status

Residual status		Description
$r_1(t) < T_1(t)$	$r_2(t) < T_2(t)$	No fault
$r_1(t) \geq T_1(t)$	$r_2(t) < T_2(t)$	Pressure sensor fault
$r_1(t) < T_1(t)$	$r_2(t) \geq T_2(t)$	Wheel speed sensor fault
$r_1(t) \geq T_1(t)$	$r_2(t) \geq T_2(t)$	Both sensor faults

3. 시뮬레이션

설계한 고장 진단 시스템의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션을 차량 동역학 해석 프로그램인 CarSim/Real-Time을 사용하여, 다양한 고장 상황에

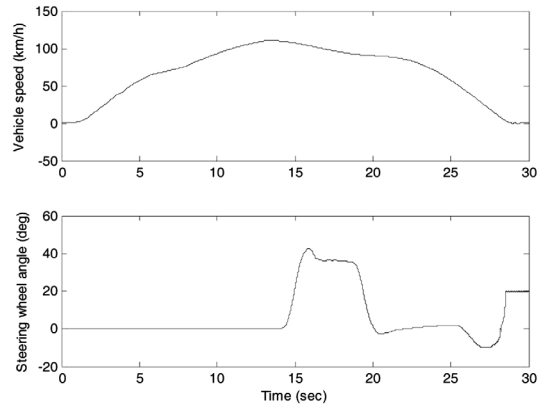


Fig. 4 Simulation vehicle speed and steering wheel angle

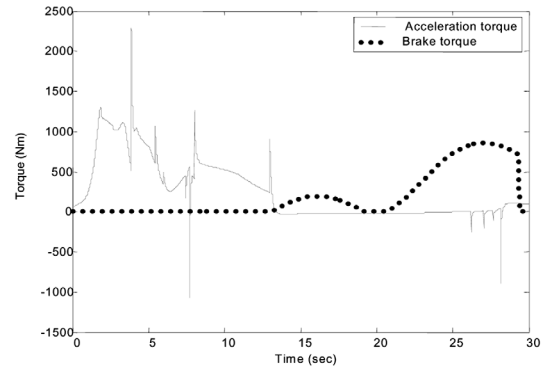


Fig. 5 Simulation acceleration torque and brake torque

대하여 실시간 환경에서 수행하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 수행한 시뮬레이션에서 차량의 속도와, 조향각, 구동 토크, 그리고 제동 토크를 나타낸다.

3.1 고장이 발생하지 않은 경우

고장이 발생하지 않은 경우, Fig. 6에 추정된 제동력, 산출된 제동력, 그리고 실제 제동력을 비교하였

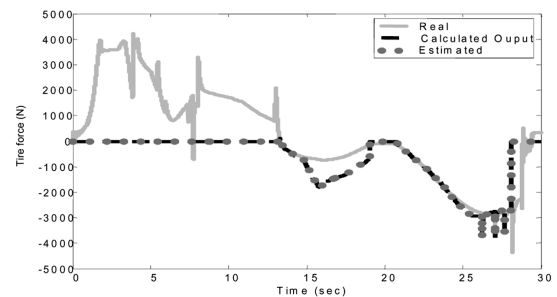


Fig. 6 Longitudinal tire force in the case of no fault

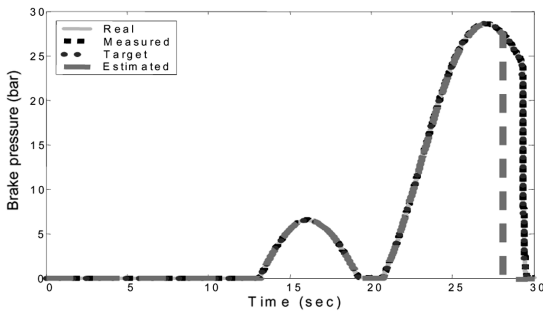


Fig. 7 Brake pressure in the case of no fault

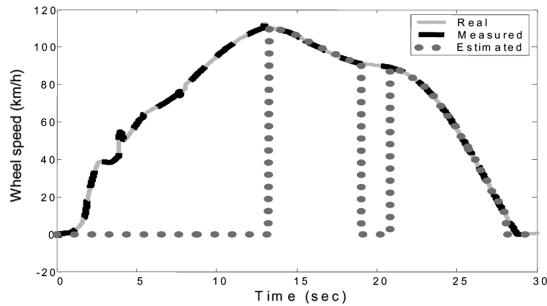


Fig. 8 Wheel speed in the case of no fault

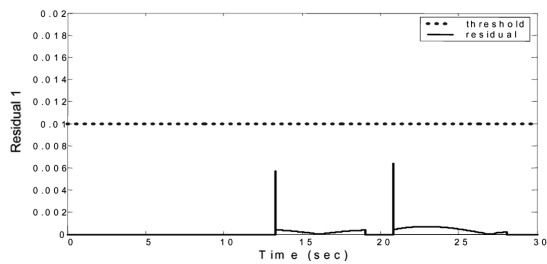


Fig. 9 Residual 1 in the case of no fault

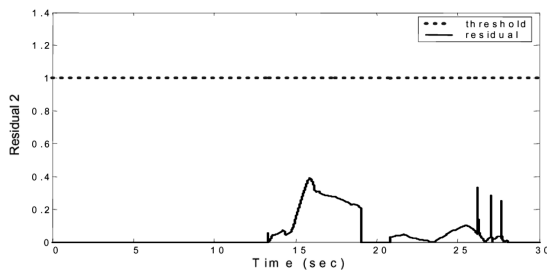


Fig. 10 Residual 2 in the case of no fault

다. 약 13초까지의 가속구간에서는 추정을 하지 않으므로 0으로 나타난다. 대략 15초에서 20초사이 구간에서 발생하는 추정 오차는 조향 상황을 고려하지 않은 모델을 사용했기 때문이다. 브레이크 압력

과 휠 속도의 추정 값과 실제 값도 Fig. 7과 Fig. 8에서 각각 보이고 있다.

이 경우 residual에서 고장이 발생하지 않음을 나타내는 것을 Fig. 9와 Fig. 10에서 보이고 있다.

3.2 고장이 발생한 경우

Fig. 11과 Fig. 12에 나타낸 고장이 발생하는 경우, 즉 15초에 압력 센서에 고장이 1bar만큼 발생하고, 17초에 휠 속도 센서에 약 -5%의 고장이 발생하는 경우의 제동력, 브레이크 압력, 그리고 휠 속도의 추정 결과를 Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15에 각각 나타내었다.

Fig. 16과 Fig. 17에서 설계한 고장 진단 시스템의 각 residual이 각각의 고장에 대하여 명확하게 고장을 감지하고, 이를 분류하는 것을 나타내고 있다.

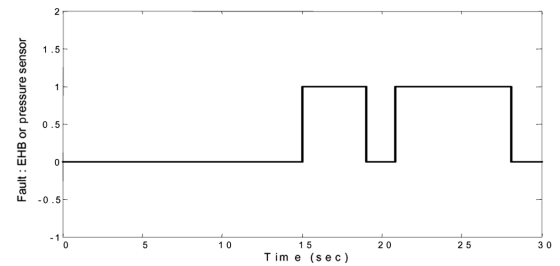


Fig. 11 Pressure sensor fault scenario

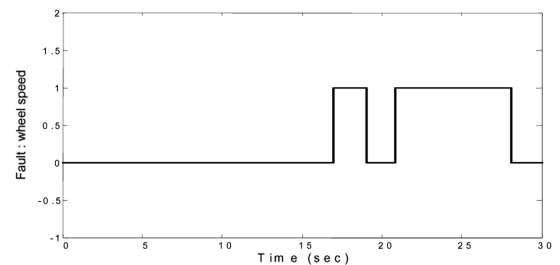


Fig. 12 Wheel speed sensor fault scenario

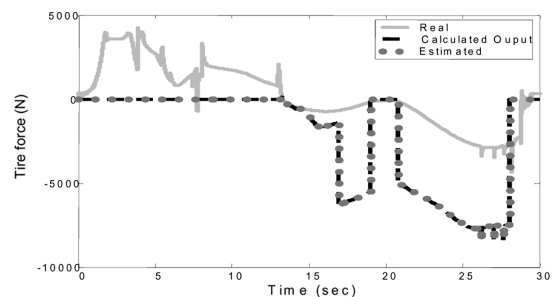


Fig. 13 Longitudinal tire force in the fault case

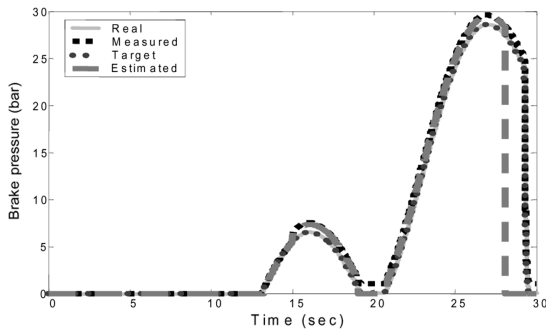


Fig. 14 Brake Pressure in the fault case

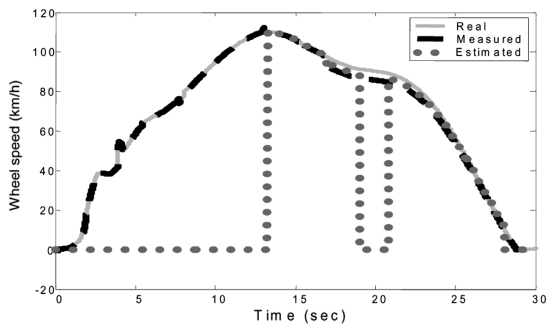


Fig. 15 Wheel speed in the fault case

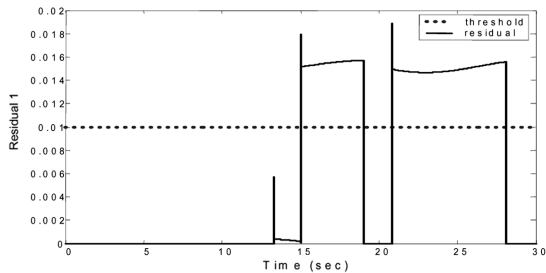


Fig. 16 Residual 1 in the fault case

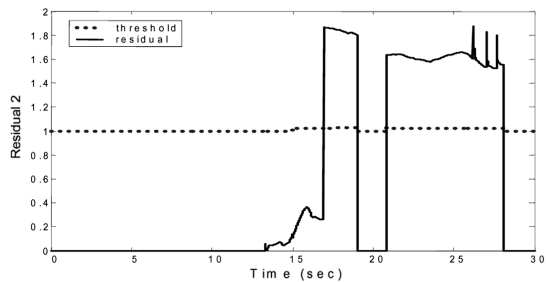


Fig. 17 Residual 2 in the fault case

4. 결론

본 연구에서 EHB 시스템의 실시간 모델 기반 고장 진단 시스템을 개발하였다. 설계한 시스템은 analytical redundancy를 기반으로 adaptive threshold를 이용하였다. EHB 시스템의 고장을 진단하기 위해 고장을 고려한 EHB 시스템의 모델과 이를 기반으로 관측기를 설계하였다. 이를 통해 추정된 출력 변수들을 통해 residual을 생성하고, 이로써 실시간으로 EHB 시스템의 고장을 진단할 수 있음을 실시간 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 “자동차기반기술개발사업” 연구지원으로 수행되었음(과제번호:10005253).

References

- 1) W. Jonner, H. Winner, L. Dreilich and E. Schunck, “Electrohydraulic Brake System-The First Approach to Brake-by-wire Technology,” SAE 960991, 1996.
- 2) J. Gertler, Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems, Marcel Dekker, pp. 153-154, 1998.
- 3) J. Chen and R. J. Patton, Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems, Kluwer, pp.4-5, 1999.
- 4) T. B. Cunningham and R. D. Poyneer, “Sensor Failure Detection using Analytical Redundancy,” Proc. Joint Automatic Control Conference, Vol.1, San Francisco, Ca., pp.278-287, 1977.
- 5) M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze and M. Staroswiecki, Diagnosis and Fault-Tolerant Control, Springer, pp.264-266, 2003.
- 6) D. Hong, K. Huh, H.-J. Kang, P. Yoon and I. Hwang, “Robust Wheel Slip Control for Brake-by-Wire System Daegun,” Transactions of KSAE, Vol.13, No.3, pp.102-109, 2005.