

EPB 시스템의 센서 고장 허용 제어 기법

이 원 구¹⁾ · 이 영 옥¹⁾ · 장 민 석¹⁾ · 이 총 우¹⁾ · 정 정 주^{*2)} · 정 한 별³⁾

한양대학교 전기공학과¹⁾ · 한양대학교 전기제어생체공학과²⁾ · (주)만도³⁾

Fault Tolerant Control of Sensor Fault of EPB System

Wongoo Lee¹⁾ · Young Ok Lee¹⁾ · Minseok Jang¹⁾ · Choong Woo Lee¹⁾ ·
Chung Choo Chung^{*2)} · Han Byul Chung³⁾

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

²⁾Division of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾MANDO Corporation, Central R&D Center, 413-5 Gomae-dong, Giheung-gu, Gyeonggi 446-901, Korea

(Received 23 March 2009 / Accepted 15 December 2009)

Abstract : In this paper, a fault tolerant control against sensor faults of electric parking brake (EPB) is proposed. Fault tolerant control method of EPB system is strongly demanded since sensor faults can endanger a driver's safety. In this paper, a clamp force estimation method is presented using motor's armature current and angular velocity. Clamp force estimation method is applied for fault detection method with parity equations. The goal of the detection method is to detect and identify faults in encoder, current sensor, force sensor, and parking cable. And a switching logic for fault tolerant control against the three sensor faults is suggested. Experimental results show that the proposed force estimation method satisfies the specifications of EPB system. The effectiveness of the fault detection method is validated with experimental results. Although a single sensor fault happens, EPB system with the proposed fault detection method does not develop into a failure on subsystem or system level.

Key words : EPB(전자 제어식 주차 브레이크 시스템), Fault tolerant control(고장 허용 제어), Fault detection(고장 검출), Force estimation(힘 추정), Clamp force(제동력)

Nomenclature

A : force, kgf
B : time, sec

v, c, s : viscous, Coulomb, Stribeck
 S, E, R : slot, encoder, current ripple
 NL : nonlinear

Subscripts

m : motor
 a : apply
 i, f : inertial, frictional
 t : total

1. 서론

최근 자동차 산업에서는 사용자의 편의를 강조하는 지능형 자동차에 대한 관심이 높아가는 가운데 전자식 센서, 액츄에이터, 전자제어장치(ECU:Electronic Control Unit)등을 이용하는 X-by-wire 시스템에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다.¹⁾ X-by-wire란 기계 또는 유압으로 제어되던 스티어링 휠이나 브레이크 등의 장치들을 전자제어 방식으로 전

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

환하는 기술이다. X-by-wire 기술을 브레이크에 적용할 경우 brake-by-wire라고 한다. Brake-by-wire 시스템은 기존의 시스템과 비교하여 차량 시스템 구성 요소가 모듈화 되어 차량의 개발 비용이 저렴하고, 편리성 및 기능 확장의 유연성이 뛰어나다. 전자 제어식 주차 브레이크(Electric Parking Brake 이하 EPB) 시스템은 brake-by-wire 시스템의 일종으로 최근 실제 차량에 장착되고 있으며, 제어 기법과 다양한 부가 기능에 대한 연구가 진행중이다.²⁾

EPB 시스템은 하위 시스템의 고장이 인명 피해까지 이어질 수 있다. 따라서 고장 검출을 포함한 다양한 고장 허용제어(fault tolerant control) 기법에 대한 연구가 요구된다.³⁾ 고장 허용 제어 기법은 크게 하드웨어 중복(hardware redundancy)을 통한 방법과 해석적 중복(analytic redundancy)을 통한 방법으로 나누어진다.⁴⁾ 하드웨어 중복에 의한 방법은 동일한 기능을 갖는 하드웨어를 두 개 이상 사용하여 고장을 허용하는 것으로, 가장 신뢰성이 높고 간단하게 구현할 수 있다는 장점이 있으나 구현하고자 하는 곳에 두 개 이상의 기기를 설치해야 하기 때문에 구조적으로 복잡해지고 추가적인 비용이 발생하는 단점이 있다. 이러한 하드웨어 중복의 단점을 해결하기 위해 1970년대 이후에 해석적 중복 개념이 제안되었다. 이는 서로 다른 역할을 맡고 있는 기기라 하더라도 시스템 내부의 동특성에 대한 정보를 이용하면 하드웨어 중복을 이용한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다는 사실에 바탕을 두고 있다. 본 연구에서는 해석적 중복 방법을 통해 EPB 시스템에 사용된 센서들의 고장을 검출하는 방법을 제시하고, 나아가 센서 고장 허용 제어가 가능한 EPB 시스템의 구현 가능성을 확인한다.

본 논문에서는 EPB 시스템에서 힘 센서, 엔코더, 전류 센서의 고장 발생 시에도 정상적인 동작을 보장하는 센서 고장 허용 제어 기법을 제안한다. EPB 시스템의 센서 고장 허용 제어를 위해 동일한 센서를 중복 사용한다면 추가적인 비용이 발생하게 되고, 공학적으로 가치가 떨어진다. 고장 허용 제동력 제어를 위해 제동력(clamp force)을 측정하는 힘 센서의 고장 발생 시에도 정상적인 제동력 제어를 위해 모터의 전류와 각속도 정보를 이용하는 제동

력 추정 기법을 제안한다. 또한 엔코더 고장 발생을 대비하여 전류 리플을 이용해 모터의 회전수를 측정하는 방법을 사용한다. 제동력 추정 기법과 전류 리플을 이용해 모터의 회전수를 측정하는 기법을 고장 검출을 위한 패리티 방정식에 적용하여 잔차 발생 행렬을 구한다. 총 5개의 잔차 변화를 통하여 힘 센서, 엔코더, 전류 센서의 고장과 파킹 케이블의 연결 고장을 검출할 수 있다. 또한 2개의 잔차를 통하여 위 3가지 센서의 고장을 판별할 수 있다. 실험을 통해 제동력 추정기법을 검증하고, 모의실험 및 실험을 통해 EPB 시스템 고장 검출 기법을 검증하였다. 실험 결과 제동력 추정 기법은 허용 오차 범위를 만족하는 결과를 보였고, 고장 검출 기법을 통해 EPB 시스템의 단일 센서 고장 발생 시에도 정상적인 동작을 보이는 것을 확인하였다.

2. EPB 시스템 소개

본 장의 2.1절에서 EPB 시스템에 대해 소개하고, 2.2절에서 EPB 시스템의 구성 요소들을 설명한다.

2.1 EPB 시스템

Fig. 1은 cable puller stretched type model의 EPB 시스템이다. EPB 시스템은 크게 전자 제어 장치와 액츄에이터로 구성된다. EPB 시스템은 주차 레버를 스위치로 대체하여 기존의 수/족동식 주차 브레이크 시스템에 비해 보다 넓은 내부 공간 확보가 가능하다. 또한, 스위치를 이용한 간편한 동작으로 경사면과 같이 운전자의 힘이 많이 필요한 곳에서 주차 시에 여성이나 노약자들이 쉽게 주차할 수 있고, Anti-lock Brake System(ABS) 및 Electronic Controlled Suspension(ECS)등과의 협조 제어를 통해 다양한 부가기능들의 구현이 가능하다.²⁾

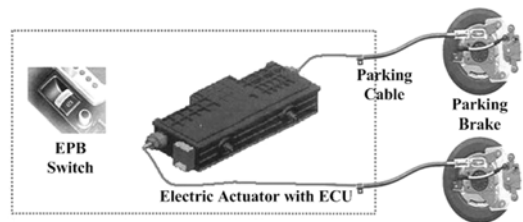


Fig. 1 EPB system

2.2 EPB 시스템 구성

본 논문에서 사용하는 cable puller stretched type EPB 시스템은 DC 모터와 파킹 케이블, 스크류, 기어박스, 힘 센서, 전류 센서, 엔코더 등으로 이루어져 있다. 시스템의 구성은 Fig. 2와 같다.²⁾

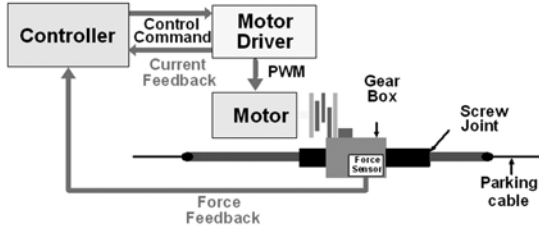


Fig. 2 Cable puller stretched type model EPB

EPB 시스템의 braking 동작 순서는 다음과 같다. 운전자가 EPB 시스템을 작동 시키면 제어부에서는 차량의 무게와 노면의 기울기 정보들을 바탕으로 파킹 케이블의 목표 장력, 즉 목표 제동력을 결정한다. 모터 드라이버를 통해 구동된 모터의 회전력은 스크류 조인트를 통해 수평 방향의 힘으로 변환되어 제동력을 가한다. 제동력은 힘 센서를 통해 측정되며 제어부에서 목표 제동력에 도달할 때 까지 제어신호를 출력한다.

3. EPB 제동력 추정 기법

EPB 시스템은 제동력을 측정하기 위하여 힘 센서를 이용하고 있다. 힘 센서에 고장이 발생하면 목표 제동력에 도달하지 못하거나 과도한 제동력이 가해져서 차량 사고와 인명 피해로 이어질 수 있다. 힘 센서의 경우 비싼 가격과 구조의 복잡성 등의 단점을 가지고 있기 때문에 고장 발생을 대비해 힘 센서를 중복 사용하는 데에 한계가 있다. EPB 시스템에서 제동력을 추정하고 힘 센서의 고장을 검출하기 위해 모델 기반 고장 검출 방법 등이 연구되었다.^{11,12)} 이 방식은 파킹 케이블의 탄성 계수와 모터의 회전수 정보를 바탕으로 구현되었다. 하지만 온도 변화 또는 파킹 케이블의 연결 고장으로 인해 탄성 계수가 변화하는 경우와 초기 부하량 차이에 따라 일정한 제동력을 위한 모터의 총 회전수가 변화하는 경우 힘 센서의 고장 검출을 보장할 수 없다.

본 논문에서는 모터의 전류와 각가속도를 이용한 제동력 추정 기법을 제안한다. 이 기법은 파킹 케이블의 탄성 계수 변화, 초기 부하 조건 등과 관계없이 제동력을 추정할 수 있다.¹⁴⁾ 이 제동력 추정 기법은 EPB 고장 검출 기법에 적용될 수 있으며, 저가 EPB 시스템 구현 시에도 유용하게 사용될 수 있다.⁵⁾

EPB 시스템에서 사용되는 DC 브러쉬 모터의 출력 토크는 모터 자속 밀도가 포화되지 않는 한 모터에 흐르는 전류에 비례한다.

$$T_m = K_m I_m \quad (1)$$

where T_m : Motor output torque

K_m : Motor torque constant

I_m : Motor current

모터에 흐르는 전류로부터 EPB 시스템의 제동력, F_a 를 추정하기 위해 다음과 같은 수식을 사용한다.⁶⁾

$$T_m = T_a + T_i + T_f \quad (2)$$

where T_a : Clamping force torque

T_i : Inertial effects torque

T_f : Frictional resistance torque

제동력 토크, T_a 는 F_a 에 비례한다. 즉, $T_a = \gamma F_a$ 이다. γ 는 스크류 계인과 기어비에 의해 결정된 상수이다. 또한 이너서 토크, T_i 는 모터의 각가속도, $\dot{\omega}$ 와 이너서, J_t 에 비례한다. 식 (2)를 F_a 에 대해 정리하면 식 (3)과 같다.

$$F_a = \frac{K_m I_m - J_t \dot{\omega} - T_f}{\gamma} \quad (3)$$

T_f 는 점성 마찰 토크, T_v 와 쿨롱 마찰 토크, T_c , 스트라이백 마찰 토크, T_s 로 이루어져 있다.

$$T_f = T_v + T_c + T_s \quad (4)$$

EPB 시스템의 주요 관심 동작 영역에서 스크류의 T_v 와 T_s 는 T_c 에 비하여 매우 작은 값이기 때문에 $T_f \approx T_c$ 로 간략화한다.⁷⁾ 따라서, 식 (3)은 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$F_a = \frac{K_m I_m - J_t \dot{\omega} - T_c}{\gamma_t} \quad (5)$$

또한 T_c 는 F_a 에 대해 비례상수, μ 와 상수 offset 항, α 로 식 (6)과 같이 표현된다.^{8,9)}

$$T_c = \mu F_a + \alpha \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$F_a = \frac{K_m I_m - J_t \dot{\omega} - \alpha}{\gamma + \mu} \quad (7)$$

여기서 K_m , J_t , γ 는 EPB 플랜트의 구조에 의해 결정되는 상수항으로 사전에 계산이 가능하다. 또한 μ , α 는 스크류 상수 기계 구성요소의 특성에 의해 결정되는 상수항으로 실험을 통해 측정할 수 있다. 따라서 EPB 시스템의 동작 도중 값이 변하는 파라미터인 각가속도, $\dot{\omega}$ 와 모터에 흐르는 전류, I_m 를 측정하여 제동력, F_a 을 추정할 수 있다.

4. EPB용 고장 검출 기법

본 장에서는 EPB 시스템의 고장 검출 기법을 설명한다. 전류 리플을 이용하여 모터 회전수를 측정하는 기법과 3장에서 제안한 제동력 추정 기법을 고장 검출 기법에 적용하여 EPB 시스템의 센서와 파킹 케이블의 연결 고장을 검출한다.

4.1 전류 리플을 이용한 회전수 측정 기법

EPB 시스템에서는 엔코더를 사용하여 모터의 회전수를 측정할 수 있다. 하지만 엔코더의 고장 발생 시에 EPB 시스템은 모터의 회전 정보를 획득할 수 없다. Consoli 등은 모터의 전류 리플을 이용하여 모터의 회전수를 측정하는 기법을 제안하였다. 이 방법은 DC 모터의 1회전 마다 발생하는 전류 리플의 파형이 반복되는 점에 착안하여 전류 리플을 계수하고 회전각을 측정하는 기법으로 엔코더를 대체할 수 있다.¹⁰⁾ DC 모터에서 발생하는 전류 리플 주파수는 모터의 각속도와 슬롯의 개수에만 영향 받으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_R = N_s \omega \quad (8)$$

여기에서 ω_R 는 전류 리플의 주파수를, N_s 는 모터 회전자의 슬롯 개수를, ω 은 모터의 각속도이다. 식 (8)을 이용할 경우 엔코더와 별도로 모터의 회전수와

각속도를 측정할 수 있다. 또한 식 (8)을 EPB 고장 검출 기법에 적용하여 EPB 시스템의 센서 고장을 검출한다.

4.2 EPB용 고장 검출 알고리즘

EPB 시스템의 고장을 검출하기 위해서 패리티 방정식을 이용한 고장 검출 기법을 사용한다.³⁾ 이 기법은 모델 기반 검출 기법으로 실제 시스템과 공칭 모델(nominal model)의 관계를 나타내는 패리티 방정식을 유도하고 잔차 확인을 통해 시스템의 고장을 검출한다.⁴⁾ 패리티 방정식 유도 과정에는 전류 리플을 이용한 모터 위치 측정 기법과 제동력 추정 기법이 적용되었다.

$$0 = V(t) - R I_m(t) - L \frac{dI_m(t)}{dt} - K_m \frac{d\theta_R}{dt} \quad (9)$$

$$0 = F_a(t) - \frac{K_m I_m(t)}{\gamma + \mu} + \frac{J_t}{\gamma + \mu} \frac{d^2 \theta_R(t)}{dt^2} - \frac{\alpha}{\gamma + \mu} \quad (10)$$

$$0 = \theta_R(t) - \theta_E(t) \quad (11)$$

식 (9)는 모터에 가해진 입력 전압, $V(t)$ 과 전류, 역기전력의 관계식이다. 역기전력 상수는 모터 토크 상수, K_m 와 동일하다고 가정한다. 모터의 전류 리플을 이용하여 모터의 각가속도를 측정하고, 이를 이용하여 제동력을 추정하였을 때 식 (7)을 식 (10)과 같이 정리할 수 있다. 식 (11)은 전류 리플을 이용하여 측정된 모터 회전수, $\theta_R(t)$ 와 엔코더를 이용하여 측정된 모터의 회전수, $\theta_E(t)$ 와의 관계식이다. 식 (9)~식 (11)을 주파수 영역에서 행렬 형태로 표현하면 식 (12)와 같다.

$$0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V(s) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} F_a(s) + \begin{bmatrix} -R - Ls \\ -K_m \\ \gamma + \mu \\ 0 \end{bmatrix} I_m(s) \quad (12)$$

$$+ \begin{bmatrix} -K_m s \\ J_t s^2 \\ \gamma + \mu \\ 1 \end{bmatrix} \theta_R(s) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \theta_E(s)$$

잔차 발생 행렬 W 를 구하기 위해서는 적어도 하나의 측정 입력과 잔차가 독립 관계를 가져야 한다. 잔차 발생 행렬 W 는 아래와 같다.

$$W_1(s) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \text{이므로, } W_1(s) = [0 \ 1 \ 1],$$

$$W_2(s) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \text{이므로, } W_2(s) = [1 \ 0 \ 1],$$

$$W_3(s) \begin{bmatrix} -R-Ls \\ -\frac{K_m}{\gamma+\mu} \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \text{이므로, } W_3(s) = \left[\frac{K_m}{\gamma+\mu} \ -R-Ls \ 1 \right],$$

$$W_4(s) \begin{bmatrix} -K_m s \\ J_t s^2 \\ \gamma+\mu \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \text{이므로, } W_4(s) = \left[\frac{J_t s}{\gamma+\mu} \ K_m \ 0 \right],$$

$$W_5(s) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = 0 \text{이므로, } W_5(s) = [1 \ 1 \ 0] \text{이다.}$$

시스템의 고장 검출을 위한 패리티 방정식은 아래와 같은 과정을 통해 구해진다.⁴⁾

$$r(s) = W(s) \{A_m(s)y_p(s) - B_m(s)u_p(s)\}$$

플랜트 모델은 $G_m(s) = B_m(s)/A_m(s)$ 이며 $u_p(s)$, $y_p(s)$ 는 각각 플랜트의 실제 입력력 신호이다. 플랜트 모델과 입력력 신호 관계인 식 (9)~식 (11)을 이용하여 패리티 방정식을 시간영역에서 유도하면 식 (13)~식 (17)과 같다.

$$r_1(t) = F_a(t) - \frac{K_m}{\gamma+\mu} I_m(t) + \frac{J_t}{\gamma+\mu} \ddot{\theta}_R(t) + \theta_R(t) - \theta_E(t) \quad (13)$$

$$r_2(t) = V(t) - R I_m(t) - L \dot{I}_m(t) - K_m \dot{\theta}_R(t) + \theta_R(t) - \theta_E(t) \quad (14)$$

$$r_3(t) = \frac{K_m}{\gamma+\mu} V(t) - R F_a(t) - L \dot{F}_a(t) - \frac{K_m^2}{\gamma+\mu} \dot{\theta}_R(t) - \frac{J_t R}{\gamma+\mu} \ddot{\theta}_R(t) - \frac{J_t L}{\gamma+\mu} \ddot{w}(t) + \theta_R(t) - \theta_E(t) \quad (15)$$

$$r_4(t) = \frac{J_t}{\gamma+\mu} \dot{V}(t) + K_m F_a(t) - \frac{J_t R}{\gamma+\mu} \dot{I}_m(t) - \frac{K_m^2}{\gamma+\mu} I_m(t) - \frac{J_t L}{\gamma+\mu} \ddot{I}_m(t) \quad (16)$$

$$r_5(t) = V(t) + F_a(t) - \left(R + \frac{K_m}{\gamma+\mu}\right) I_m(t) - L \dot{I}_m(t) - K_m \dot{\theta}_R(t) + \frac{J_t}{\gamma+\mu} \ddot{\theta}_R(t) \quad (17)$$

5개의 잔차 신호 r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 를 이용하여 각각의 고장 상태에 대한 잔차 패턴을 확인하면 전류 센서, 엔코더, 힘 센서의 고장 등 3가지 센서 고장과 파킹 케이블 연결고장 상태를 검출할 수 있다. 또한 3장에서 제안된 제동력 추정 기법과 결합하여 EPB 시스템의 센서 고장 허용 제동력 제어를 할 수 있다. 본 논문에서 사용된 EPB 시스템의 고장 검출 및 센서 스위칭 방법은 Fig. 3의 블록도로 표현된다.

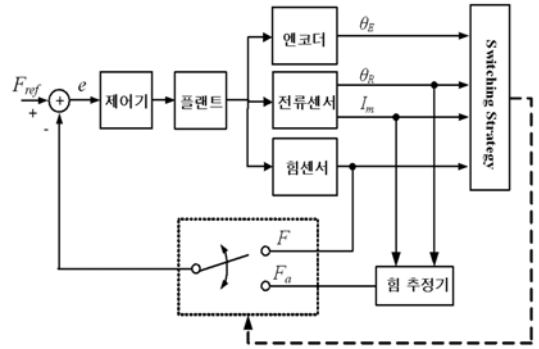


Fig. 3 Fault tolerant control against sensor faults of EPB system

Fig. 3의 힘 추정기 블록은 3장에서 제안한 제동력 추정 기법이 적용된 블록이고, Switching Strategy 블록은 4장에서 제안한 EPB 고장 검출을 위한 패리티 방정식이 적용된 블록이다. EPB 시스템은 제동력 제어를 위해 힘 센서를 우선적으로 사용한다. Switching Strategy 블록에서는 엔코더와 전류센서, 힘 센서의 출력 신호를 이용하여 힘 센서의 고장을 검출하고, 고장이 발생한 경우 제동력 추정 기법을 적용하여 EPB 시스템을 제어한다.

5. 모의실험 및 실험 결과

본 장에서는 3장에서 제안한 제동력 추정기법을 실험을 통해 검증하고 4장에서 제안한 고장 검출 기법을 모의실험 및 실험을 통해 검증한다.

5.1 제동력 추정 기법 검증

5.1.1 EPB 제어 실험 환경

제동력 제어 실험을 위해 힘 센서 및 전류 센서, 엔코더가 장착된 cable puller stretched type EPB를 사용한다. 실험기에는 파킹 케이블의 절대적인 장력 측정을 위해 로드셀 및 인디케이터가 장착되어 있고, 주전원은 차량용 12[V] 배터리를 사용한다. 실험 환경은 Fig. 4와 같다.

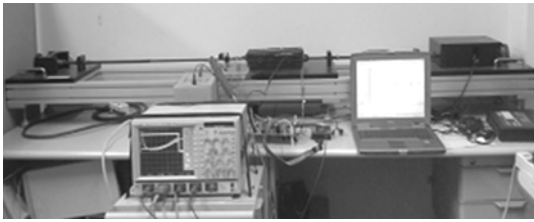


Fig. 4 Experimental environment of EPB system

EPB 제동력 제어는 비선형 비례 제어기를 사용한다.¹³⁾ 비선형 비례 제어기의 제어 신호는 식 (18)과 같다. u 는 제어 입력 신호이고, K_{p_nl} , α , δ 는 비선형 계인, e 는 목표 제동력 오차이다.

$$u = f(e, \alpha, \delta) \quad (18)$$

$$f(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} K_{p_nl}|e|^\alpha, & \forall e > \delta \\ K_{p_nl}\delta^{\alpha-1}e, & \forall e \leq \delta \\ u_{min}, & \forall e \leq 0 \end{cases}$$

where $\delta > 0, 1 > \alpha > 0$

5.1.2 제동력 추정 실험 결과

제동력 추정 기법의 유효성을 검증하기 위하여

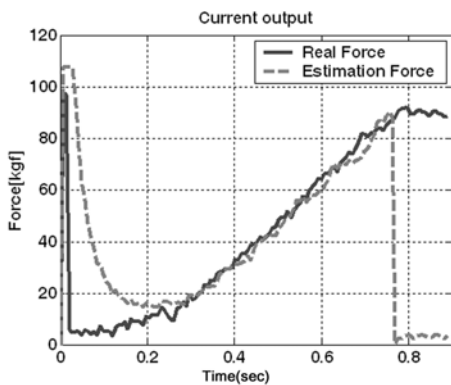


Fig. 5 Experimental result of force estimation

모터에 흐르는 전류와 각속도를 이용하여 추정된 제동력과 힘 센서로 측정된 실제 제동력을 비교하였다. 목표 제동력을 95[kgf]로 설정하였을 때 실험 결과는 Fig. 5와 같다.

빨간색 점선은 추정 제동력, 파란색 실선은 실제 제동력을 나타낸다. 추정 제동력과 실제 제동력의 초기 오차는 모터 구동 초기에 발생하는 돌입 전류 때문이다. 돌입 구간 0.3[sec]이후 추정 제동력과 실제 제동력은 $\pm 10\%$ 의 허용 오차 범위 이내에 존재한다.

5.1.3 제동력 추정 기법 성능 검증

제동력 추정 기법의 성능을 검증하기 위하여 힘 센서와 전류 센서를 이용하여 80~100[kgf]의 목표 제동력 당 10회 반복 실험을 진행하였다. 로드셀을 이용하여 측정된 절대적인 최종 제동력은 각 센서를 이용하여 제동력 제어한 결과와 비교되었다.

1) 브레이킹 동작 시 실험 결과

제동력 제어 실험은 힘 센서를 이용하여 제어한 경우와 제동력 추정 기법을 이용하여 제어한 경우로 나누어 진행하였다. 80~100[kgf]의 목표 제동력에 대한 오차의 평균값과 편차는 Fig. 6과 같다. 제동력 추정 기법을 사용하여 제동력을 제어한 경우 목표 제동력에 대해 $\pm 5\%$ 이내의 오차 범위 내에서 동작하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 EPB 시스템의 허용 오차 범위인 $\pm 10\%$ 이내를 만족하는 결과이다.

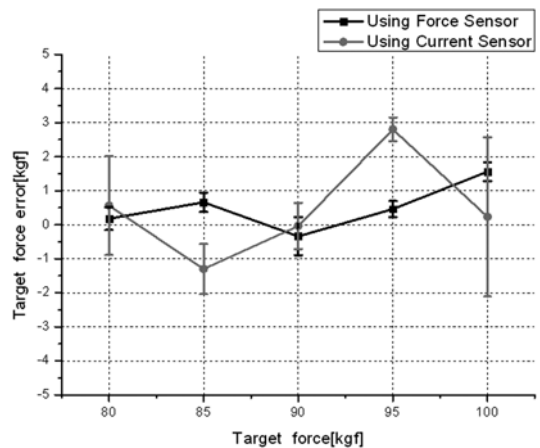


Fig. 6 Average and deviation of error at each target clamp force

Fig. 6에서 각 목표 제동력마다 오프셋 오차와 편차가 발생하는 이유는 EPB 실험기의 구조적 특성으로 인해 생기는 전류의 저주파 진동 성분 때문이다. 본 실험기에서는 85[kgf]와 95[kgf] 부분에서 전류의 진동 성분이 크게 존재하기 때문에 전류 센서를 이용한 제동력 제어 시 85[kgf]와 95[kgf] 부분에서 오차가 더 크게 나타났다. 전류의 저주파 진동 원인은 prototype 제작 시 축의 misalignment로 인한 부하 토크의 변화 때문인 것으로 추정된다.

2) 제동력 해제 시 실험 결과

제동력 해제 시의 경우는 초기 제동력을 80~100 [kgf]로 하고, 목표 제동력을 0[kgf]로 하여 실험을 진행 하였다. 실험 결과 Fig. 7과 같이 모든 초기 제동력에 대해 목표 제동력이 ±1[kgf] 이내의 오차 범위 내에서 동작하였다. 제동력 해제의 경우 브레이킹 동작 시에 비해 오프셋 오차가 작게 난다. 이것은 오프셋 오차의 주원인인 전류의 저주파 진동이 브레이킹 동작 시에 비해 제동력 해제 시에 작게 나타나기 때문이다. 이상의 실험 결과를 통해 브레이킹 동작 시와 제동력 해제 시 모두 전류 센서만을 이용한 EPB 제동력 제어가 가능하다는 것을 확인하였다.

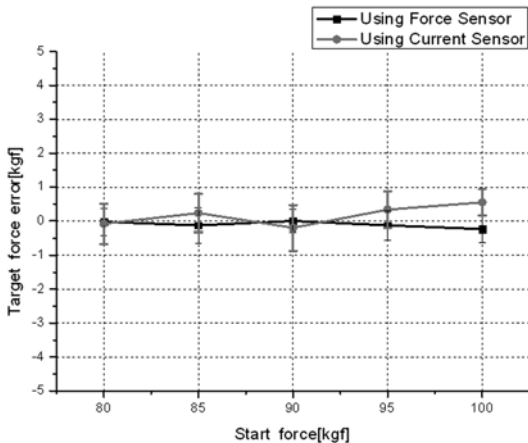


Fig. 7 Average and deviation of error at each start clamp force

5.2 고장 검출 기법 모의실험

EPB 시스템의 고장 검출 기법을 검증하기 위해 모의실험을 진행 하였다. 기계적, 전기적 구성 요소는 Dymola를 이용하여 구현하였으며, 고장 검출을

위한 잔차 발생기는 4장에서 얻은 패리티 방정식을 MATLAB/ Simulink를 이용하여 구현하였다. 4장에서 제안된 고장 검출 기법은 전류 센서, 엔코더, 힘 센서 고장, 파킹 케이블 연결 고장 등 4가지 고장을 검출할 수 있다.

5.2.1 정상 상태의 경우

EPB 시스템의 고장이 발생하지 않았을 때, 5개의 잔차 신호는 Fig. 8과 같다. 모터 돌입 구간 이후 r_2 의 출력 값은 0과 5 사이의 값이며, 이것은 엔코더와 전류 리플을 이용한 위치 값의 차이가 1회전 이하임을 의미한다. 한편 r_1 과 r_4, r_5 는 모터 돌입 구간 이후 0~20의 값을 가지며, r_3 은 10~30의 값을 가진다. 정상 상태의 잔차 신호 패턴은 적응 기준(adaptive threshold) 값을 정하는 데 이용될 수 있으며, 적응 기준과의 차이를 통하여 고장을 감지할 수 있다.

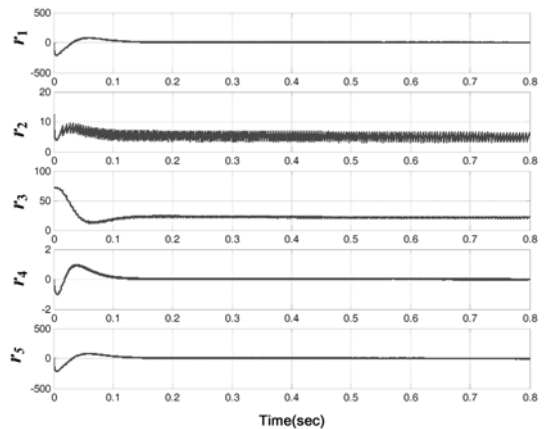


Fig. 8 Residual signals at normal conditions

5.2.2 고장 검출 기법 모의실험 결과

고장 상황에 따른 잔차의 변화 양상을 다음 표에 정리하였다.

Table 1 Residual patterns of EPB system at fault conditions

	f_I	f_E	f_h	f_w
r_1	+	+	+	*
r_2	+	+	0	0
r_3	+	+	+	*
r_4	+	0	+	*
r_5	+	0	+	*

Table 1에서 f_f 는 전류 센서의 고장, f_e 는 엔코더의 고장, f_h 는 힘 센서의 고장, f_w 는 파킹 케이블 연결 고장을 의미한다. ‘+’는 잔차 신호가 기준 값 범위를 계속 넘어선 것을 의미하고, ‘0’은 잔차 신호가 기준 값 범위 내에 존재하는 것을 의미한다. 또한 ‘*’는 고장이 발생하는 순간에만 잔차 신호의 변화가 나타나는 것을 의미한다. 5개의 잔차 신호는 각각의 고장에 대하여 고유의 잔차 패턴을 갖는다. 따라서 고장 발생 시에 나타나는 잔차 패턴의 비교를 통해 EPB 시스템에서 발생할 수 있는 고장을 진단 할 수 있다.

5.3 실험을 통한 고장 검출 기법 검증

본 절에서는 실제 실험을 통해 EPB 시스템의 고장 검출 기법을 검증한다. 하지만, 파킹 케이블 연결 고장 검출의 검증은 구비하고 있는 EPB 실험기로 실험을 수행하기에는 안전상의 문제가 있기 때문에 제외 하고 진행하였다. 5.2절에서 모의실험을 통해 확인한 결과 r_2 와 r_5 잔차 신호만으로 전류 센서, 힘 센서, 엔코더 등 3가지 센서 고장 검출이 가능하였다. 따라서 5개의 잔차 신호 중 r_2 와 r_5 2개의 잔차 신호를 이용하여 힘 센서, 전류 센서, 엔코더의 고장 잔차 패턴을 실험을 통해 확인한다. EPB 동작 이후 약 0.4[sec]가 지난 후에 고장이 발생하도록 하였다.

5.3.1 정상 상태의 경우

Fig. 9는 정상 상태의 경우에 실험을 통해 얻은 잔차 패턴이다. r_2 는 정상 상태의 경우에 0~5의 값을 가지고, r_5 는 모터 돌입 구간 이후에 0~20 값을 가진다. 따라서 r_2 은 0~5, r_5 는 0~20을 기준 값으로 정하고 기준 값의 범위 안에서 변화될 경우 정상 상태로 본다.

5.3.2 엔코더 고장의 경우

Fig. 10은 엔코더 고장을 가정한 실험 결과로 0.4 [sec]에 엔코더의 연결 신호를 차단했을 경우의 잔차 패턴이다. 이 경우 r_2 는 전류 리플을 통한 측정된 모터의 회전수와 엔코더를 통해 획득한 모터의 회전수의 차이 이므로 엔코더 고장 시에 잔차의 값은 변화해야 한다. 실험 결과 Fig. 10과 같이 r_2 는 기준 값의 범위를 벗어나는 경향을 보였고, 엔코더의 정보가 반영되지 않는 r_5 는 정상 상태와 동일한 결과를 보였다.

5.3.3 전류 센서 고장의 경우

Fig. 11은 전류 센서 고장을 가정한 실험 결과로

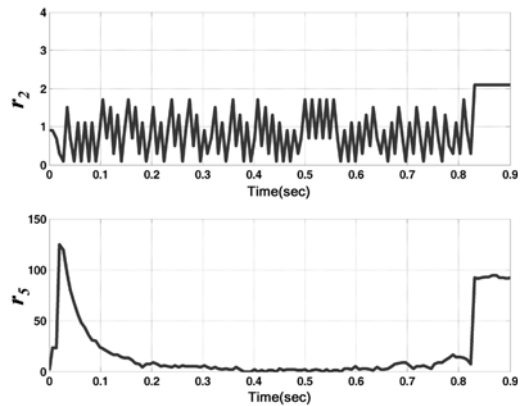


Fig. 9 Residual signals at normal condition

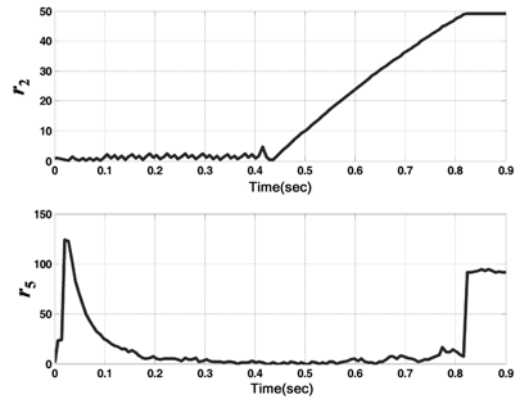


Fig. 10 Residual signals under encoder fault condition

0.4[sec]에 전류 센서의 연결 신호를 차단했을 때의 잔차 패턴이다. r_2 는 전류 정보, r_5 는 전류 리플을 이용해 측정된 모터의 회전정보를 포함하고 있으므로 잔차 패턴은 정상 상태와 비교하여 모두 변화한다.

5.3.4 힘 센서 고장의 경우

Fig. 12는 힘 센서 고장을 가정한 실험 결과로 0.4[sec]에 힘 센서의 연결 신호를 차단했을 경우의 잔차 패턴이다. 힘 센서 정보를 사용한 r_3 에서만 잔차 신호 값의 변화가 있으며, r_2 는 정상 상태와 동일한 결과를 보인다.

5.3.5 실험을 통한 고장 허용 제동력 제어 기법 성능 검증

EPB 시스템은 제동력 제어를 위해 힘 센서를 주센서로 사용하고, 힘 센서의 고장이 발생하였을 경우에는 전류 센서로 스위칭 하여 제동력을 제어한다. EPB 동작 도중 힘 센서에서 전류 센서를 이용한 제동

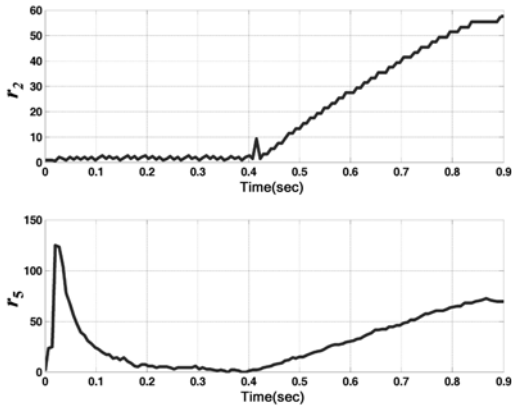


Fig. 11 Residual signals under current sensor fault condition

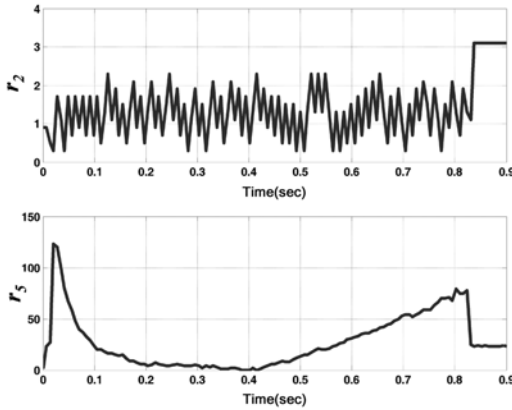


Fig. 12 Residual signals under force sensor fault condition

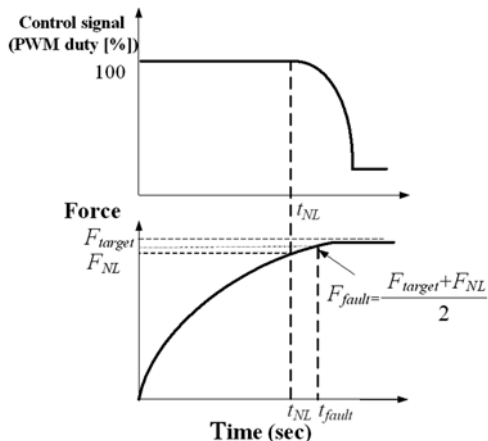


Fig. 13 A point of force sensor fault occurred

력 제어 방법으로 스위칭 시, 제동력 오차를 실험을 통해 확인한다. 목표 제동력은 80[kgf]부터 100[kgf]까지 5[kgf]씩 증가 시키면서 각 제동력마다 10회씩

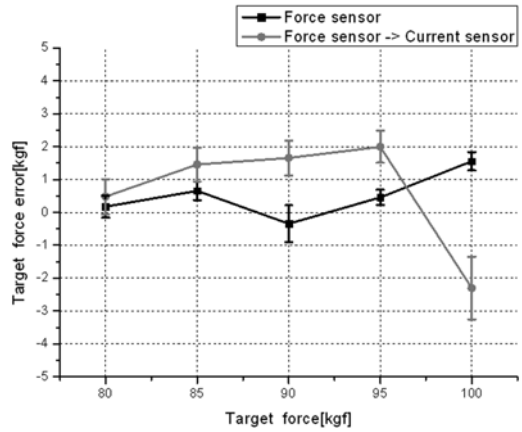


Fig. 14 Average and deviation of error under sensor switching

실험을 진행하였다. 비선형 비례 제어 구간 중 목표 제동력의 약 5%에 도달하기 전까지 제어기의 출력은 최대로 포화된다. 따라서 포화 구간 중 센서 스위칭이 발생할 경우 처음부터 스위칭된 센서만으로 제어하는 경우와 동일한 결과를 얻게 된다. 고장발생은 Fig. 13과 같이 비선형 비례 제어기가 적용되는 t_{NL} 이후인 t_{fault} 에서 발생되는 것을 가정하였다.

힘 센서만을 이용한 경우와 힘 센서에서 전류 센서로의 스위칭이 발생한 경우 제동력 제어의 결과는 Fig. 14와 같다. 두 경우 모두 목표 제동력 오차는 최대 5[kgf]로 EPB의 동작 조건인 $\pm 10\%$ 의 제동력 오차를 만족하였다. 하지만 전류 센서로 스위칭을 한 경우 편차가 증가하였다. 이 편차 및 오차의 변화는 5.1.3 절에서 언급한 전류의 저주파 진동 성분에 의한 영향이다. 이것은 실제 차량에 장착된 EPB 시스템에서는 발생하지 않는 성분이므로 고려할 필요가 없다.

6. 결론

본 논문에서는 제동력 측정을 위해 힘 센서를 장착한 EPB 시스템에서 모터의 전류와 각속도를 이용하여 제동력을 추정하는 기법을 제안하고 모의실험 및 실험을 통해 성능을 검증하였다. 이 기법은 힘 센서 고장 시 전류 센서만을 이용하여도 신뢰도 높은 제동력을 추정할 수 있다. 또한 이 제동력 추정 방법을 패리티 방정식을 이용한 EPB 고장 검출 기법에 적용하여 힘 센서와 엔코더, 전류 센서, 파킹 케이블 연결의 고장을 판별하였다. 모의실험 및 실

힘을 통한 잔차 패턴을 비교한 결과 각 센서들의 고장상태를 검출할 수 있었다. 또한 센서들의 고장 발생 시에도 정상적인 동작을 할 수 있는 센서 고장 허용 제어 기법을 제안하였다. 제동력 추정 기법과 전류 리플을 이용한 모터 회전수 측정 기법, 센서 고장 검출 기법을 이용함으로써 센서의 단일 고장 발생 시에도 제동력 제어가 가능하다. 힘 센서의 고장이 발생한 경우 전류 센서를 이용한 제동력 추정 기법을 이용하여 EPB의 제동력 제어를 시스템을 구현하고, 엔코더의 고장이 발생한 경우 전류 리플을 이용한 회전 정보로 대체 할 수 있다. 마지막으로 전류 센서의 고장이 발생한 경우 힘 센서를 이용해 제동력을 제어하고, 엔코더를 이용해 모터의 회전 정보를 추출 하여 고장 상황에서도 정상적인 동작이 가능하게 됨으로써 EPB 시스템의 센서 고장 허용 제어 시스템이 구현 가능하게 된다.

후 기

This paper was supported in part by the Components and Materials Technology Development Program of MCIE, Republic of Korea under Grant 10014728. It was also in part supported by the Brain Korea 21 Project in 2010.

References

- 1) R. Isermann, R. Schwarz, and S. Stolzl, "Fault-Tolerant Drive-by-Wire Systems," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol.22, Issue 5, pp.64-81, 2002.
- 2) C. Baier-Welt, "Smart Actuator for Intelligent Electrical Parking Brake System - Functionality and Safety, System Approach," 8th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 2002.
- 3) C. W. Lee, H. B. Chung, Y. O. Lee, C. C. Chung, Y. Son and P. Yoon, "Fault Detection Method for Electric Parking Brake (EPB) Systems with Sensorless Estimation Using Current Ripples," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.11, No.3, pp.387-394, 2010.
- 4) R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems (An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance)*, Springer, 2006.
- 5) M. Jang, W. Lee, Y. O. Lee, W. Lee, C. W. Lee, C. C. Chung and Y. Son, "Clamping Force Estimation in Electric Parking Brake System using Angular Velocity of the Motor," *Proc. of Control, Automation, and Systems Symposium*, pp.500-504, 2008.
- 6) R. Hoseinnezhad, S. Saric and A. Bab-Hadi-ashar, "Estimation of Clamp Force in Brake-by-Wire Systems: A Step-by-Step Identification Approach," *SAE*, Vol.011154, 2006.
- 7) R. Schwarz, R. Isermann, J. Bohm, J. Nell and P. Rieth, "Clamping Force Estimation for a Brake-by-wire Actuator," *SAE*, Vol.010482, 1999.
- 8) C. Line, C. Manzie and M. Good, "Control of an Electromechanical Brake for Automotive Brake-by-wire Systems with an Adapted Motion Control Architecture," *SAE*, Vol.012050, pp. 1047-1056, 2004.
- 9) H. Olsson, K. J. Åström, C. C. de Wit, M. Gafvert and P. Lischinsky, "Friction Models and Friction Compensation," *Eur. J. Control*, Vol.4, No.3, pp.176-195, 1998.
- 10) A. Consoli, G. Bottiglieri, R. Letor, R. Rugeri, A. Testa and S. De Caro, "Sensorless Position Control of DC Actuators for Automotive Applications," *Industry Applications Conference*, Vol.2, pp.1217-1224, 2004.
- 11) B. J. Moon, Y. J. Park, D. S. Kim and C. K. Park, "Model Based Fault Detection of Electronic Parking Brake System," *Spring Conference Proceedings, KSAE*, pp.1899-1903, 2008.
- 12) B. J. Moon and C. K. Park, "Robust Model Based Fault Detection of EPB System for Varying Temperature," *Transactions of KSAE*, Vol.17, No.5, pp.26-30, 2009.
- 13) Y. O. Lee, C. W. Lee, C. C. Chung, Y. Son, P. Yoon and I. Hwang, "Stability Analysis of Electric Parking Brake(EPB) Systems with a Nonlinear Proportional Controller," *Proc. of the 17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, pp.14247-14253, 2008.
- 14) W. G. Lee, *A Fault Tolerant Control Method of Electric Parking Brake System*, M. S. Thesis, Hanyang University, pp.29-36, 2009.