

온도변화에 강인한 EPB 시스템의 모델기반 고장검출 방법

문 병 준^{*1,2)} · 박 종 국²⁾

만도 중앙연구소¹⁾ · 경희대학교 전자공학과²⁾

Robust Model Based Fault Detection of EPB System for Varying Temperature

ByoungJoon Moon^{*1,2)} · ChongKug Park²⁾

¹⁾Mando Corporation, Active Safety 2 Team, 413-5 Gomea-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-901, Korea

²⁾Department of Electronics Engineering, KyungHee University, Gyeonggi 449-701, Korea

(Received 7 November 2008 / Accepted 28 April 2009)

Abstract : In this paper, a robust model based fault detection for varying temperature is proposed. To develop a robust force estimation model, it needs temperature information because the force sensor's output is affected by a temperature variation. If an EPB system does not include a temperature sensor, the model has a much larger error than an EPB system with a built-in temperature sensor. Therefore, the temperature is estimated by using Ohm's law. The force model is applied with a motor current, battery voltage, operation mode, and the estimated temperature to detect a force sensor's abnormal signal fault. The residual is calculated by comparing the value of the measured force and the estimated force. Fault information is collected by using the output of the evaluated residual with the adaptive thresholds. A proposed robust model based fault detection for varying temperature was verified by HILS (Hardware in the Loop Simulation).

Key words : Electronic parking brake(EPB, 전자제어 주차브레이크), Fault detection(고장 검출), Temperature estimation(온도 추정), Sensor fault(센서 고장), Force sensor(주차력 감지 센서)

Nomenclature

M	: motor
GVW	: gross vehicle weight, kgf
Kt	: motor torque constant
i	: current
Θ	: angular velocity of motor
J	: inertia of motor, kg.m ²
T _L	: torque required to drive spindle, N.m
E	: elastic energy
k	: elastic constant of the spring
x	: elongation of the spring
Ws	: electric power, energy

V	: voltage
A	: ampere
T	: time
F	: estimation force
F _T	: temperature reflected estimation force
α	: model constant
β	: electric energy constant
γ	: temperature constant

1. 서론

주차 브레이크(Parking Brake) 관련한 자동차 법규 중에서 가장 가혹한 조건중 하나는 차량 총 중량(G.V.W, Gross Vehicle Weight) 상태에서 30% 노면 경사에 차량을 유지시키는 것이다. 이때 운전자의

*Corresponding author, E-mail: coolmanbj@mando.com

조작력은 핸드 레버 타입(Hand Lever Type)인 경우 약 40kgf, 족동식 타입(Foot Pedal Type)인 경우 약 50kgf의 힘이 요구된다. 하지만 노약자나 여성운전자의 경우 충분한 조작력을 공급하지 못해서 주차 후 사고로 연결되는 사례가 보고되었다. 이러한 사고를 방지하기 위해서 운전자의 간단한 스위치 조작을 통하여 주차 제동력을 발생시키는 EPB 시스템의 필요성이 인식되기 시작하였다. EPB 시스템에서 충분한 주차력을 공급하기 위해서는 주차력 감지센서(Force Sensor)가 가장 중요하다. 이 센서에 고장이 발생하면, 충분한 주차력이 공급되지 않아서, 차량 안전에 심각한 위험을 줄 수 있다. 그러므로, 기존의 온라인 센서 감시(On-line Sensor Monitoring) 고장검출 방법으로는 검출하지 못하는 이상 신호(Abnormal Signal) 고장을 검출하기 위한 신뢰성 높은 모델기반 고장검출 방법이 필요하다.¹⁾

EPB 시스템에서 주차력 감지센서의 중요성이 매우 큼에도 불구하고, 최근에 주차력 감지센서에 대한 모델기반 고장검출 방법에 대한 논문의 수는 매우 적다.^{2,3)}

기존 논문에서는 모터 회전자의 Solt 수와 모터 회전 속도를 통해서 전류리플 주파수를 구하고, 이 전류 리플 주파수로 모터의 회전속도를 계산한 후에, 이를 통해서 스피들(Spindle)의 동작거리를 추정하고, 이를 통해서 주차력을 추정하는 방법이 있다.²⁾ 그러나, 이 방법을 적용하기에는 두 가지 문제점이 있다. 첫째로, 초기 모터 구동 구간에서는 전류 리플의 크기가 작아서, 모터의 회전속도를 정확히 계산하기 어렵고, 따라서, 추정된 주차력값이 실제 주차력과 많은 오차를 갖는다. 두 번째로, 전류리플을 카운팅하기 위해서 AD Conversion을 수행해야 하는데, 이를 위해 마이크로컨트롤러의 많은 리소스(Resource)가 필요하다. 이는 저비용의(Low Cost) 생산원가를 추구하는 양산제품에 적용하기에는 어려움이 많다.

기존 연구에서는 주차력 감지센서의 이상 신호 고장을 검출하기 위해 모터 전류(Motor Current)와 인가 전압(Battery Voltage), 동작 모드(Operation Mode) 등을 사용하여 주차력 감지센서의 모델을 작성하였다.³⁾ 그러나, 이는 주차력 감지센서의 온도변화에 따른 오차를 감안하지 않아서, 상온의 온도 조

건(normal thermal condition)에서의 모델의 신뢰도는 높지만, 최저 동작온도(-40°C) 또는 최고 동작온도(85°C)에서는 모델의 신뢰도가 낮아진다.

주차력 감지센서의 출력이 온도변화에 따라 달라지는 이유는 다음의 두 가지 원인으로 요약이 가능하다.⁴⁾

1) 주차력 센서가 장착되어있는 기구부의 각각의 부품들의 재질이 상이하여, 온도변화에 따른 각 부품들의 수축 및 팽창의 정도가 상이하여 주차력 센서의 정밀도가 감소한다.

2) 온도변화에 따라 주차력을 감지하여 출력신호를 내보내는 선형 홀 효과 센서(Linear Hall Effect Sensor)의 감도(Sensitivity) 및 전기적인 특성이 변화하여 주차력 센서의 정밀도가 감소한다.

이처럼 온도변화에 따른 주차력 센서의 정밀도 감소는 센서 자체의 특성 변화만이 아니라, 장착되어있는 기구부의 특성 변화도 영향을 끼치므로, 실제 EPB 시스템에서 발생하는 온도변화에 따른 출력의 변화는 센서 스펙에 명기되어 있는 것보다 크다. 그러므로, 실제 EPB 시스템을 이용한 실험을 통해서 온도 변화에 따른 주차력 모델과 주차력 센서의 차이인 잔차(Residual)의 변화를 측정하였다.

온도 변화에 강인한 주차력 모델을 개발하기 위해서는 온도정보가 필요하지만, 만도의 EPB 시스템에는 온도센서가 장착되어 있지 않아서, 온도를 측정할 수가 없으므로, 옴의법칙(Ohm's law)인 $V=IR$ 을 이용하여 온도추정 알고리즘을 개발하였다. 온도가 낮아지면 모터저항 및 각 부품들의 저항이 작아져서 저온에서 많은 전류가 흐르고, 반대로 고온에서는 적은 전류가 흐른다. 이를 이용하여, EPB 시스템의 온도추정 알고리즘을 개발하였다.

본 논문에서는 주차력 감지센서의 이상 신호 고장을 검출하기 위해 모터 전류(Motor Current)와 인가 전압(Battery Voltage), 동작 모드(Operation Mode)와 추정 온도(Estimated Temperature)를 사용하여 온도변화에 강인한 주차력 감지센서의 모델을 작성하였다. 이 모델의 출력값과 주차력 감지센서의 출력값을 비교하여 잔차(Residual)를 구하고, Adaptive Threshold⁵⁾ 기법을 사용하여 설정된 임계치(Threshold)를 잔차가 초과할 경우에 고장을 검출한다. 제

안된 모델기반 고장검출 알고리즘은 HILS(Hardware in the Loop System) 시험을 통해 검증하였다.

2. 본 론

2.1 EPB 시스템

기존의 주차 브레이크에서 운전자의 힘을 통하여 주차 제동력을 얻었던 것과는 다르게 EPB 시스템에서는 운전자의 간단한 스위치 조작을 통하여 모터가 주차 제동력을 발생하는 시스템이다. Fig. 1은 EPB 시스템의 구성도를 보여준다. 먼저, 운전자는 간단한 스위치 조작을 통하여 ECU(Electronic Control Unit)에 입력 신호를 인가한다. ECU는 작동(Apply) / 해제(Release)에 따른 동작 모드를 판단하여 DC 모터를 회전시키고, 이에 따라 제동력이 발생/해제하게 된다. 이 외에도 차량이 정차할 때에는 자동으로 주차 브레이크를 작동하여 차량의 미끄러짐을 방지하는 Auto Hold 기능, 주행 중에 주 제동 장치에 고장이 났을 때 제동력을 발생하기 위한 Dynamic Brake 기능 등이 구현되고 있다.

EPB 시스템의 액추에이터는 Fig. 2와 같이 DC 모터, 기어박스(GearBox), 스피들(Spindle), 와이어(Wire), 주차력 감지 스프링(Force Sensing Spring)으로 구성되어 있다. 모터가 토크(Torque)를 발생시키고 감속 기어 박스를 거쳐 증폭된다. 기어박스가 토크를 받아 회전하게 되며, 스피들을 이동시키게 되고, 이때 발생하는 힘은 메인 케이블을 통해 양쪽의 와이어에 동일한 힘으로 나누어져서 가해진다. 이

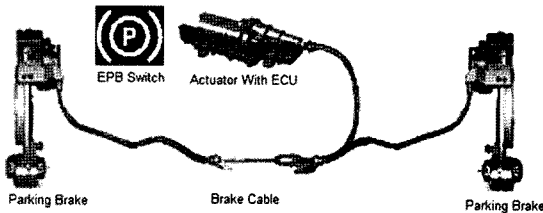


Fig. 1 MANDO EPB 시스템 구성도

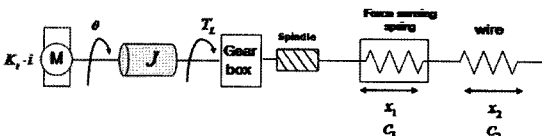


Fig. 2 EPB Actuator의 전체 구성도

때 브레이크 패드(Brake Pad)에 작용하는 힘은 주차력 감지 스프링을 움직이고, 홀 센서(Hall Sensor)를 통하여 전압으로 출력된다.

2.2 EPB 시스템의 모델 기반 고장검출 방법의 구조

- 1) 고장검출을 위한 데이터들은 아래와 같은 방법으로 얻는다.
 - 모터 전류와 인가 전압, 동작 모드, 추정온도를 이용하여 디자인된 모델의 추정 주차력값
- 2) 모델의 추정 주차력값과 측정 주차력값을 비교하여 잔차를 계산한다.
- 3) 잔차가 Adaptive Threshold 기법을 사용하여 설정된 임계치의 크기(Magnitude of Threshold)를 초과할 경우에 고장을 검출한다.

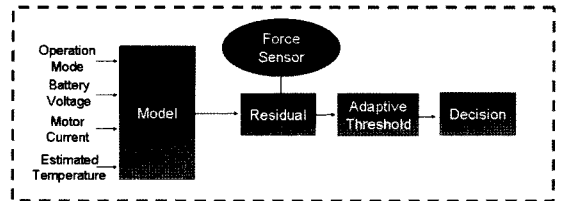


Fig. 3 EPB 시스템의 모델기반 고장검출 방법의 구조

2.3 온도 추정 알고리즘

추정 온도를 반영하지 않은 기존의 모델에서는 온도변화에 따라 잔차가 커져, Threshold를 큰 값으로 설정하였고, 모델을 사용한 고장검출의 효과가 미미하였다. 이에 온도 추정 알고리즘을 개발하여, 모델기반 고장검출의 효과와 신뢰도를 향상시켰다. EPB시스템의 온도 추정 방법은 옴의 법칙(Ohm's law)인 $V=IR$ 을 이용하였다. 온도가 낮아지면 모터 저항 및 각 부품들의 저항이 작아져서 저온에서 많은 전류가 흐르고, 반대로 고온에서는 적은 전류가 흐른다. Table 1은 온도별 모터 구동전류범위의 룩업 테이블(LookUp table)이다. EPB 시스템에서는 모터 구동전류의 값을 측정된 후에, 룩업테이블을 이용하여 온도를 추정하였다.

2.4 주차력 감지 센서의 모델링

주차력 감지 센서의 모델은 탄성 에너지(Elastic

Table 1 온도별 모터 구동전류합의 록업 테이블(14.5V)

Temperature	Motor current sum
-40°C	1351.2
-20°C	824.3
0°C	671.8
25°C	571.5
45°C	516.0
65°C	487.2
85°C	483.5

Energy) 공식과 전기 에너지(Electric Energy)공식을 이용하여 작성하였다.

$$E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 \quad (1)$$

$$W_s = V \cdot A \cdot T \quad (2)$$

EPB 시스템에 인가되는 전기 에너지는 DC 모터, 기어 박스, 스피들 등을 통해서 와이어에 장력을 발생시키고, 이는 주차력 감지 센서부의 스프링을 움직이여 홀 센서를 통해서 전압으로 표현된다. 이와 같이 인가된 전기 에너지와 스프링의 변화로 인해 출력되는 주차력 에너지를 등가로 놓고 모델을 작성하였다.

$$\frac{1}{2} kx^2 = \frac{F^2}{2k} = \beta \cdot W_s \quad (3)$$

$$F = \alpha \cdot \sqrt{W_s} \quad (4)$$

Table 1의 온도별 모터 구동전류합의 록업 테이블을 통해 추정된 온도를 이용하여 식 (4)의 주차력 모델에 온도 계수(γ)를 추가하여 온도변화에 강인한 주차력 추정모델을 작성하였다.

$$F_T = \alpha \cdot \gamma \cdot \sqrt{W_s} \quad (5)$$

2.5 Adaptive Threshold

본 논문에서는 온도변화에 강인한 EPB시스템의 모델기반 고장검출 방법을 구현하기 위하여 Adaptive Threshold 기법을 사용하였다. 저온영역으로 갈수록 소모되는 전기 에너지의 표준편차가 커서, 고온 영역에서는 모델의 정밀도가 높고, 저온 영역에서는 모델의 정밀도가 낮아진다. 그러므로, 정밀도가 높은 온도영역에서는 낮은 Threshold Value를 사

용하고, 정밀도가 낮은 온도 영역에서는 높은 Threshold Value를 사용하여 온도변화에 강인한 고장검출 방법을 구현하였다.

3. 실험 결과

3.1 온도변화에 강인한 주차력 추정 모델의 검증 시험 결과

Fig. 4, 5, 6은 온도별(-40°C, 25°C, 85°C) 주차력 추정 모델의 검증 시험결과이다. 기존 모델의 추정 주차력값(Force Model)과 추정온도를 모델에 반영한 추정 주차력값(Force Model Temp)과 실제 주차력 센서(Force Sensor)의 출력에 대한 비교실험을 HILS (Hardware IN The Loop System)를 이용하여 수행하였다. 실험 결과에서 보면 저온(Fig. 4)과 고온(Fig. 5) 영역에서 추정온도를 모델에 반영한 추정 주차력값(Force Model Temp)이 실제 주차력 감지 센서의 값(Force Model)을 추종하는 것을 알 수 있다.

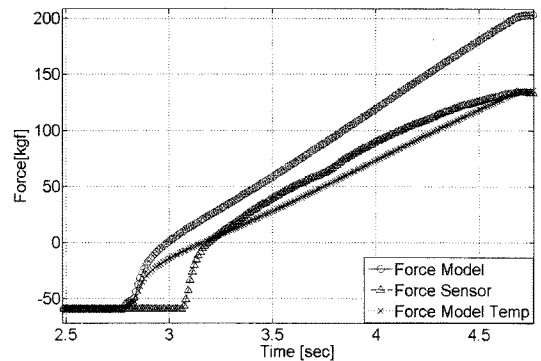


Fig. 4 온도 반영모델과 기존모델의 비교실험(-40°C)

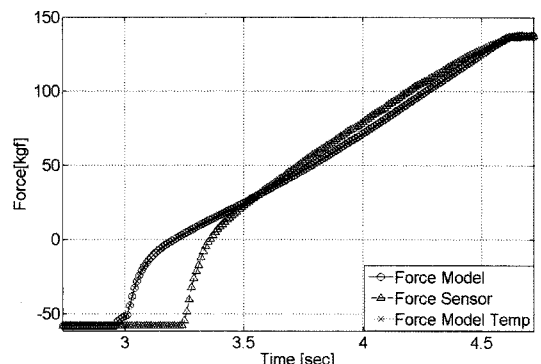


Fig. 5 온도 반영모델과 기존모델의 비교실험(25°C)

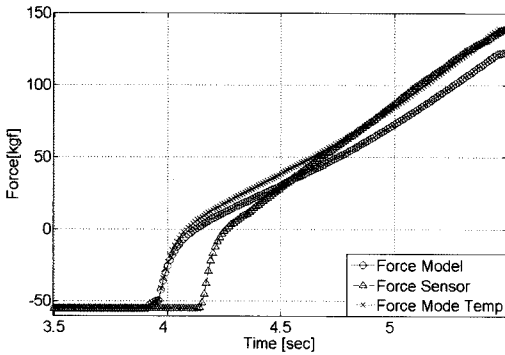


Fig. 6 온도 반응모델과 기본모델의 비교실험(85°C)

Table 2 온도별 Adaptive Threshold

Tem	Residual	Adaptive Threshold	Fault
-40°C	40	50	N
25°C	40	30	Y
85°C	40	40	Y

Table 2는 온도별로 Adaptive Threshold를 적용한 표이다. -40°C에서는 잔차의 크기가 40 이지만, 고장 검출을 위한 Adaptive Threshold의 크기가 50으로 설정이 되어 있어서 고장을 검출하지 않고, 25°C에서는 잔차의 크기가 -40°C일 때와 동일하게 40이지만, Adaptive Threshold의 크기가 30으로 설정이 되어 있어서 고장을 검출한다. 이와 같이 정밀도가 높은 온도영역에서는 낮은 Threshold Value를 사용하고, 정밀도가 낮은 온도 영역에서는 높은 Threshold Value를 사용하여 온도변화에 강인한 Adaptive Threshold 기법을 EPB 시스템의 고장검출 방법에 적용하였다.

4. 결론

본 논문에서는 주차력 감지 센서를 장착한 EPB 시스템을 상용화하는데 있어 필수 기술인 온도변화에 강인한 모델기반 고장검출 방법을 제시하였다.

- 1) 온도 변화에 강인한 주차력 모델을 개발하기 위해서, 옴의법칙(Ohm's law)인 $V=IR$ 을 이용하여 온도추정 알고리즘을 개발하였다.
- 2) EPB 시스템에 인가되는 전기 에너지는 DC 모터, 기어박스, 스핀들 등을 통해서 와이어에 장력을 발생시키고, 이는 주차력 감지 센서부의 스프링을 움직여 홀 센서를 통해서 전압으로 표현된다. 이와 같이 전기 에너지와 스프링의 변화로 인해

출력되는 주차력 에너지를 등가로 놓고 모델을 작성하였다.

- 3) 저온영역으로 갈수록 소모되는 전기 에너지의 표준편차가 커서, 고온 영역에서는 모델의 정밀도가 높고, 저온 영역에서는 모델의 정밀도가 낮아진다. 그러므로, 정밀도가 높은 온도영역에서는 낮은 Threshold Value를 사용하고, 정밀도가 낮은 온도 영역에서는 높은 Threshold Value를 사용하여 온도변화에 강인한 Adaptive Threshold 기법을 EPB 시스템의 고장검출 방법에 적용하였다.
- 4) 인가 전압과 모터 전류를 이용한 설계된 모델의 추정 주차력값과 추정온도를 모델에 반영한 주차력값과의 비교실험을 HILS(Hardware IN The Loop System)를 이용하여 수행하였다. 이 결과를 통해서 추정온도를 모델에 반영한 추정 주차력 값이 실제 주차력 감지 센서의 값을 추종하는 것을 알 수 있다.

References

- 1) K. Han, K. Huh, D. Hong, J. Kim, H. Kang and P. Yoon, "Real-Time Model-Based Fault Diagnosis System for EHB System," Transactions of KSAE, Vol.16, No.4, pp.173-178, 2008.
- 2) H. B. Chung, Y. Son, P. Yoon and C. C. Chung, "A Fault Detection Method for Electric Parking Brake (EPB) Systems with Sensorless Estimation Using Current Ripples," 14th Asia Pacific Automotive Engineering Conference, 2007-01-3660, 2007.
- 3) B. J. Moon, Y. J. Park, D. S. Kim and C. K. Park, "Model Based Fault Detection of Electronic Parking Brake System," KSAE 2008 Annual Conference, pp.1899-1903, 2008.
- 4) G. Mihov, E. Dimitrov and N. Nenov, "Temperature Errors Compensation of Force Sensor for Railway Carriages Wheel Load Measuring," Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress, 27th International Spring Seminar, pp.486-490, 2004.
- 5) J. Chen and R. J. Patton, Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems, Kluwer, pp.51-54, 1999.