

온도변화에 강인한 EPB 시스템의 퍼지모델 기반 고장검출 방법

Fuzzy Model-Based Fault Detection Method of EPB System for Varying Temperature

문 병 준*, 김 동 한, 박 중 국

(Byoung-Joon Moon, Dong-Han Kim, and Chong-Kug Park)

Abstract: In this paper, a robust fault detection method for varying temperature based on fuzzy model is proposed. To develop a robust force estimation model, it needs temperature information because the output of force sensor is affected by a temperature variation. The nonlinear dynamic system, such as the parking force of the EPB (Electronic Parking Brake) system is necessary to have a higher order equation model. But, because of the calculation time, the higher order equation model is hard to be used in real application. In case of the lower order equation model, the result is not as accurate as acceptable. To solve this problem, the robust fuzzy model-based fault detection is developed. A proposed fault detection method for varying temperature is verified by HILS (hardware in the loop simulation).

Keywords: EPB (Electronic Parking Brake), fault detection, fuzzy model, sensor fault, force sensor

I. 서론

주차 브레이크(parking brake)와 관련된 자동차 법규 중에서 가장 가혹한 조건 중 하나는 차량 총 중량 (G.V.W: Gross Vehicle Weight) 상태에서 30% 노면 경사에 차량을 유지시키는 것이다. 이때 운전자의 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 주차력(parking force)을 발생시키는 EPB 시스템의 필요성이 인식되기 시작하였다. 차량을 경사로에서 밀림현상 없이 주차하기 위해서는 주차력을 측정하는 주차력 센서(force sensor)가 가장 중요하다. 이 센서에 고장이 발생하면 충분한 주차력이 공급되지 않아서 차량 안전에 심각한 위험을 줄 수 있다. 그러므로, 차량의 안전성을 향상시키기 위해 기존의 온라인 센서 감시(on-line sensor monitoring) 고장검출 방법으로는 검출하지 못하는 이상 신호(abnormal signal) 고장을 검출하기 위한 신뢰성 높은 고장검출 방법이 필요하다[1].

기존의 이상 신호 고장을 검출하는 방법인 모델기반 고장검출 방법(model-based fault detection method)에는 상관함수, FFT 등의 주파수 특성을 이용한 신호해석기법과 파라미터, 상태변수 추정 및 패러티 방정식들을 이용한 기법이 있다. 이러한 모델기반 고장검출 방법은 지난 20년간 Wilksy, Iserman 등에 의해 저차 선형 프로세스의 구동장치 및 측정장치 등의 고장진단에 광범위하게 연구되어 왔다. 그러나 모델기반 고장검출 방법은 근본적으로 계통에 대한 정확한 수학적 모델을 요구하므로 불확실성을 포함한 계통, 대규모 계통 및 비선형성이 강한 계통에의 직접적인 적용이 곤란하다. 이러한 문제점으로 인하여, 계통에 대한 정확한 수학적 모델

을 요구하지 않으면서도 고장의 검출을 수행할 수 있는 지식기반 고장검출 방법(knowledge-based fault detection method)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. 본 논문에서와 같이 EPB 시스템의 주차력과 같은 비선형 시스템을 수학적으로 모델링할 경우 고차의 미분방정식으로 표현되어야 된다. 그러나, 고차의 모델은 이용하기 어렵기 때문에 이를 근사화하여 낮은 차수로 표현하지만, 그 결과가 만족스럽지 못하기 때문에 비선형 시스템을 효과적으로 표현할 수 있는 지식기반 고장검출 방법중 한가지인 퍼지모델 기반 고장검출 방법을 구현하였다[3]. 온도변화에 강인한 모델을 적용한 이유는 EPB시스템의 동작온도 범위(40°C ~ 85°C)에서는 고장을 오검출해서는 안되기 때문에, 전 온도영역과 동작 범위에서 모델의 추종성능이 확보되어야 한다. 이 퍼지모델의 출력값과 주차력 센서의 출력값을 비교하여 잔차(residual)를 구하고, 적응 임계치(adaptive threshold)[4] 기법을 사용하여 설정된 임계치(threshold)를 잔차가 초과할 경우에 고장을 검출한다. 제안된 퍼지모델 기반 고장검출 알고리즘은 HILS (Hardware in the Loop Simulation)시험을 통해 검증하였다.

II. 본론

1. EPB 시스템

기존의 주차 브레이크에서 운전자의 힘을 통하여 주차 제동력을 얻었던 것과는 달리 EPB 시스템에서는 운전자의 간단한 스위치 조작을 통하여 모티가 주차 제동력을 발생하는 시스템이다. 그림 1은 EPB 시스템의 구성도를 보여준다. 먼

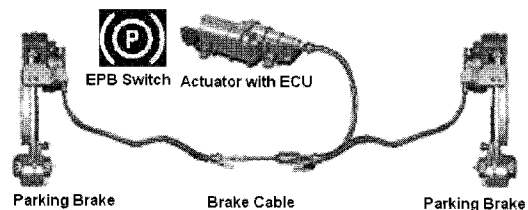


그림 1. EPB 시스템 구성도.

Fig. 1. EPB system configuration.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 6. 5., 수정: 2009. 7. 2., 채택확정: 2009. 7. 23.

문병준, 김동한, 박중국: 경희대학교 전자공학과, 만도 중앙연구소
(coolmanbj@mando.com/donghani@khu.ac.kr/ckpark@khu.ac.kr)

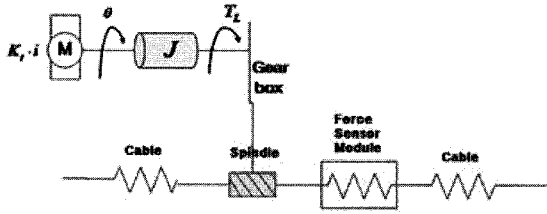


그림 2. EPB 시스템의 액츄에이터 구성도.
Fig. 2. Actuator configuration of EPB system.

저, 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 액츄에이터(actuator)는 그림 2와 같이 DC 모터, 기어박스(gear box), 스피들(spindle), 주차력 감지 모듈(force sensor module), 케이블(cable)로 구성되어 있다. 모터가 토크(torque)를 발생시키고 감속 기어 박스를 거쳐 증폭된다. 기어박스가 토크를 받아 회전하게 되면, 스피들을 이동시키게 되고, 이때 발생하는 힘은 메인 케이블을 통해 양쪽의 케이블에 동일한 힘으로 나누어져서 가해진다. 이때 브레이크 패드(brake pad)에 작용하는 힘은 주차력 감지 모듈을 통하여 전압으로 출력된다.

2. 기존의 주차력 수학적 모델

기존의 주차력 모델은 탄성 에너지(elastic energy) 공식과 전기 에너지(electric energy)공식을 이용하여 작성된다.

$$E = \frac{1}{2} kx^2 \tag{1}$$

$$W_s = V \cdot A \cdot T \tag{2}$$

- E : elastic energy
- k : stiffness
- x : displacement
- W_s : electric power, energy
- V : voltage
- A : ampere
- T : time

EPB 시스템에 인가되는 전기 에너지는 DC 모터, 기어 박스, 스피들 등을 통해서 케이블에 장력을 발생시키고, 이는 주차력 감지 모듈에 있는 스프링을 동작시켜 홀센서(hall sensor)를 통해서 전압으로 표현된다. 이처럼 EPB 시스템은 케이블단 기구부의 유격으로 인해 동작환경의 변화에 따라 비선형 모델이 되어야 하지만 비선형 시스템을 고차의 미분방정식으로 모델링하여 실제 시스템에 적용하기 어렵기 때문에 이를 근사화하여 인가된 전기 에너지와 스프링의 변화로 인해 출력되는 주차력 에너지를 등가로 놓고 모델을 작성하였다.

$$F = k \cdot x \tag{3}$$

$$E = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{F^2}{2k} = \beta \cdot W_s \tag{4}$$

$$F = \alpha \cdot \sqrt{W_s} \tag{5}$$

- F : estimation force
- α : model constant
- β : electric energy constant

표 1의 온도별 모터 구동전류합의 룩업 테이블을 통해 추정 온도를 이용하여 식(4)의 주차력 모델에 온도 계수(γ)를 추가하여 온도변화에 따른 비선형성을 보완한 주차력 추정모형을 작성하였다.

$$F_T = \alpha \cdot \gamma \cdot \sqrt{W_s} \tag{6}$$

- F_T : temperature reflected estimation force
- γ : temperature constant

3. 온도 추정 알고리즘

주차력 감지센서의 출력이 온도변화에 따라 달라지는 이유는 다음의 두 가지 원인으로 요약이 가능하다[5].

1. 주차력 센서가 장착되어있는 기구부의 각각의 부품들의 재질이 상이하여, 온도변화에 따른 각 부품들의 수축 및 팽창의 정도가 달라지므로 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 특성변화만이 아니라, 장착되어있는 기구부의 특성 변화도 영향을 끼치므로, 실제 EPB 시스템에서 발생하는 온도변화에 따른 출력의 변화는 센서 스펙에 명기되어 있는 것보다 크다. 이와 같이 추정 온도를 반영하지 않은 주차력 추정 모델에서는 온도변화에 따라 잔차가 커져, 임계치를 큰 값으로 설정해야하므로, 온도가 반영되지 않은 모델의 고장 검출 효과가 미미하였다.

이에 온도 추정 알고리즘을 개발하여, 모델기반 고장검출의 효과와 신뢰도를 향상시켰다. EPB 시스템의 온도 추정 방법은 온도가 낮아지면 모터저항 및 각 부품들의 저항이 작아져서 저온에서 많은 전류가 흐르고, 반대로 고온에서는 적은 전류가 흐르므로, 옴의 법칙인 $V=IR$ 을 이용하여 온도 추정 알고리즘을 개발하였다. 표 1은 온도별 모터 구동전류합의 룩업 테이블(lookup table)이다. EPB 시스템에서는 모터 구동전

표 1. 온도별 모터 구동전류합의 룩업 테이블.

Table 1. Lookup table of motor current sum classified by temperature.

Temperature	Motor Current Sum
-40℃	1351.2
-20℃	824.3
0℃	671.8
25℃	571.5
45℃	516.0
65℃	487.2
85℃	483.5

류의 합을 구한 후에, 룩업테이블을 이용하여 온도를 추정하였다.

4. 제안된 주차력 퍼지 모델

본 논문에서 사용된 EPB 시스템의 주차력과 같은 비선형 시스템을 수학적으로 모델링할 경우 고차의 미분방정식으로 표현되어야 된다. 그러나, 고차의 모델은 이용하기 어렵기 때문에 이를 근사화하여 낮은 차수로 표현하지만, 그 결과가 만족스럽지 못하기 때문에 비선형 시스템을 효과적으로 표현할 수 있는 퍼지모델을 사용하였다.

퍼지모델이 입력값을 인식하기 위해 입력값은 정규화되어 사용된다. 이러한 정규화된 입력값들을 언어적인 변수로 나타내기 위해 소속함수를 이용한 퍼지화 과정이 필요하게 되며, 본 논문에서는 계산상의 이점을 고려하여 삼각형 형태의 소속함수를 이용하여 퍼지화를 수행하였다. 입력 및 출력 변수에 대한 정규화 범위는 기존 시스템의 실험결과를 이용하여, 각각의 변수에 대한 정규화 범위를 선정하였다. 또한 입력과 출력에 대한 언어적인 변수는 정규화 범위로 표현하기 위해 다음과 같이 사용하였다.

4.1 입력 변수

4.1.1 전력

전력에 대한 언어적인 변수는 power로 하였다. 이에 대한

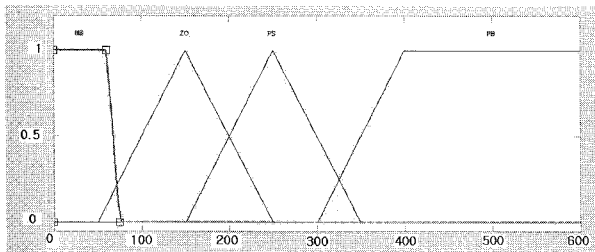


그림 3. 전력의 멤버쉽 평선.
Fig. 3. Membership functions of power.

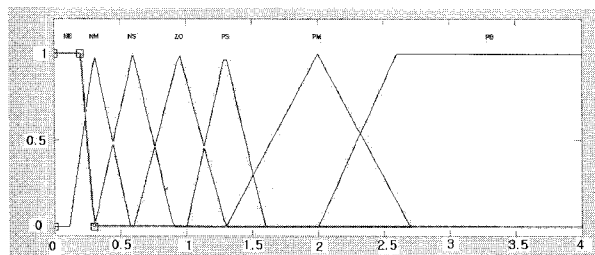


그림 4. 시간의 멤버쉽 평선.
Fig. 4. Membership functions of time.

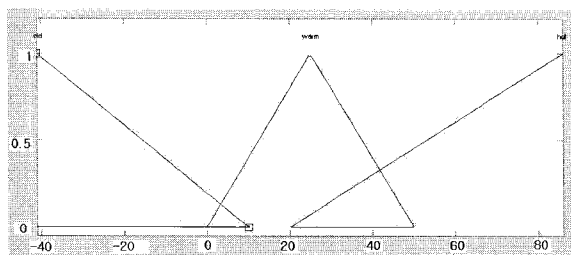


그림 5. 온도의 멤버쉽 평선.
Fig. 5. Membership functions of temperature.

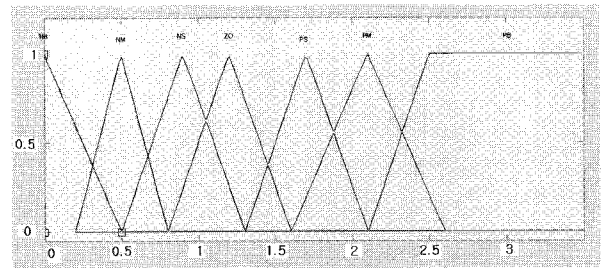


그림 6. 주차력의 멤버쉽 평선.
Fig. 6. Membership functions of force.

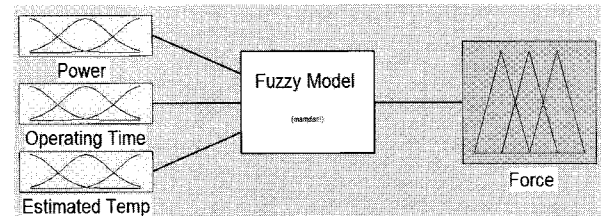


그림 7. 퍼지 모델의 블록 다이어그램.
Fig. 7. Block diagram of the fuzzy model.

정규화 범위는 0~600으로 한정하였다(그림 3 참조).

4.1.2 동작시간

동작시간에 대한 언어적인 변수는 operating time로 하였다. 이에 대한 정규화 범위는 0~4로 한정하였다(그림 4 참조).

4.1.3 추정온도

추정온도에 대한 언어적인 변수는 estimated temp로 하였다. 이에 대한 정규화 범위는 EPB 시스템의 동작온도인 -40℃ ~ 85℃로 한정하였다(그림 5 참조).

4.2 출력 변수

EPB 시스템의 추정 주차력에 대한 언어적 변수는 force로 하였다. 이에 대한 정규화 범위는 0 ~ 3.5로 하였다(그림 6, 7 참조).

본 연구에서 사용된 퍼지모델의 규칙 중 하나는 다음과 같다.

$$\text{If (Power is ZO) and (Operating Time is NS) and (Estimated Temp is HOT) then (Force is ZO)} \quad (7)$$

입력 변수들의 상세 퍼지 집합수가 각각 전력 4개, 동작시간 7개, 온도 3개로 나뉘어 있으므로 규칙은 84개이다. 퍼지 추론 방법은 여러 시스템에 적용한 결과 신뢰성이 높게 평가된 최대-최소법을 사용하였으며 비퍼지화에서는 무게중심법을 사용하였다.

5. 퍼지모델 기반 고장검출 방법의 구조

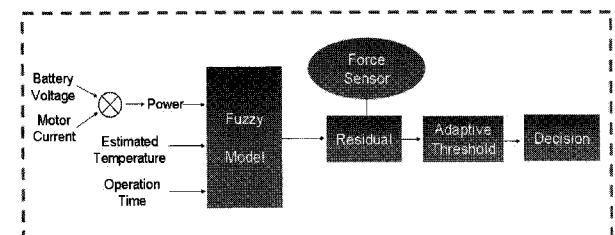


그림 8. 퍼지모델 기반 고장검출 방법의 구조.
Fig. 8. Structure of the fuzzy model-based fault detection method for EPB.

고장검출을 위한 데이터들은 아래와 같은 방법으로 얻는다.

1. 모터 전류와 배터리 전압의 곱으로 구한 전력, 추정 온도, 동작시간을 이용하여 퍼지모델의 주차력값을 추정한다.
 2. 퍼지모델의 추정 주차력값과 측정 주차력값을 비교하여 잔차를 계산한다.
 3. 잔차가 적응 임계치 기법을 사용하여 설정된 임계치의 크기(magnitude of threshold)를 초과할 경우에 고장을 검출한다.
6. 적응 임계치

본 논문에서는 온도변화에 강인한 EPB 시스템의 퍼지모델 기반 고장검출 방법을 구현하기 위하여 적응 임계치 기법을 사용하였다. 저온영역으로 갈수록 소모되는 전기 에너지의 표준편차가 커서, 고온 영역에서는 모델의 정밀도가 높고, 저온 영역에서는 모델의 정밀도가 낮아진다. 그러므로, 정밀도가 높은 온도영역에서는 낮은 임계치를 사용하고, 정밀도가 낮은 온도 영역에서는 높은 임계치를 사용하여 온도변화에 강인한 고장검출 방법을 구현하였다.

III. 실험 결과

그림 9는 추정온도를 수학적 모델에 반영한 추정 주차력값(force model temp)과 온도를 반영하지 않은 추정 주차력값(force model)을 비교한 결과이다. 이 결과에서 보면, 저온(-40℃)에서는 온도를 반영한 추정 주차력값(force model temp)의 추중성능이 기존 대비 약 40% 향상된 것을 알 수 있다.

그림 10, 11, 12은 온도별(-40℃, 25℃, 85℃)로 실제 주차력 센서(measured force)의 출력값과 기존의 수학적 모델(math model)의 추정 주차력값, 제안된 퍼지모델(fuzzy model)의 추정 주차력값에 대한 비교실험을 HILS를 이용하여 검증한 시험결과이다. 실험 결과에서 보면 온도 추정 알고리즘을 반영한 결과로서 모델들이 저온(-40℃)과 고온(85℃)에서도 실제 센서의 출력값을 잘 추중하고 있다. EPB 시스템의 동작시간이 온도변화에 따라 달라지는 이유는 EPB 시스템 기구부의 부품들의 재질이 상이하므로, 온도변화에 따른 각 부품들의 수축 및 팽창의 정도가 달라서, 저온에서는 기구적으로 저항이 커서 동작시간이 길고, 고온에서는 저항이 감소하여 동작시간 짧아진다.

본 논문에 사용된 EPB시스템의 수학적 모델은 근사화된 낮은 차수의 모델이다. 실험 결과를 통해 알 수 있듯이 수학

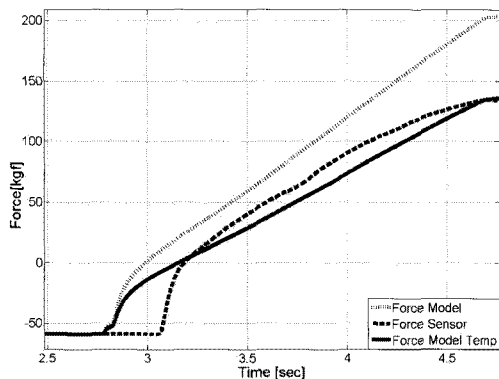


그림 9. 온도 반영모델과 기존모델의 비교실험(-40℃).
Fig. 9. Experimental result of temperature reflected model vs. temperature unreflected model(-40℃).

적 모델은 초기 동작구간(0 ~ 300mS)에서 EPB 시스템의 비선형성을 충분히 반영하지 못하기 때문에, 실제 주차력 센서의 출력값은 변화하지 않으나, 수학적 모델은 약 60kgf정도 변화하였다. 이와 같이 수학적 모델은 초기 동작구간에서 잔차가 지나치게 크므로, 임계치 역시 큰 값으로 설정해야 한다. 임계치가 지나치게 큰 경우는 모델기반 고장검출의 효용성

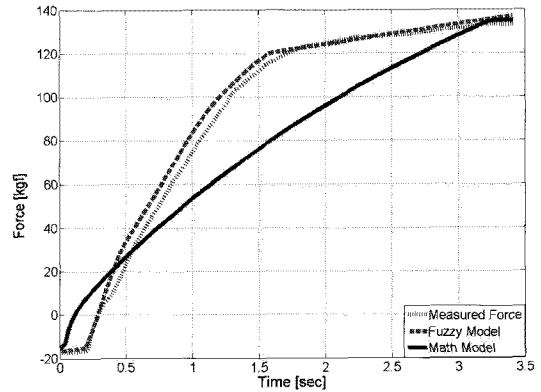


그림 10. 퍼지모델과 수학적 모델의 비교실험 결과(-40℃).
Fig. 10. Experimental result of fuzzy model vs. mathematical model(-40℃).

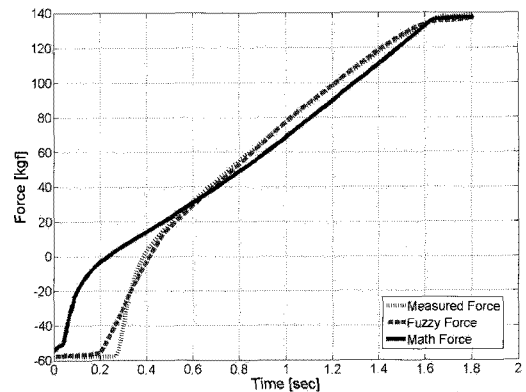


그림 11. 퍼지모델과 수학적 모델의 비교실험 결과(25℃).
Fig. 11. Experimental result of fuzzy model vs. mathematical model(25℃).

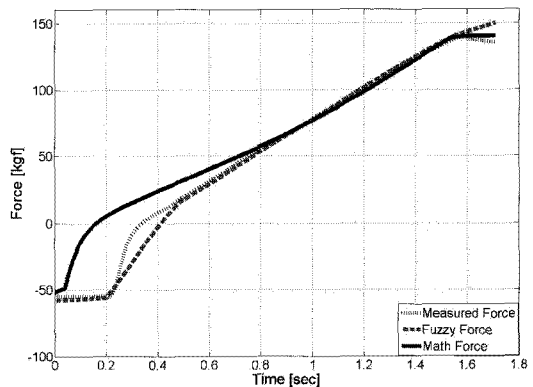


그림 12. 퍼지모델과 수학적 모델의 비교실험 결과(85℃).
Fig. 12. Experimental result of fuzzy model vs. mathematical model(85℃).

표 2. 온도별 적응 임계치.

Table 2. Adaptive Threshold classified by temperature.

Temperature	Residual	Adaptive Threshold	Fault
-40℃	40	50	N
25℃	40	40	Y
85℃	40	30	Y

이 감소하여 모델기반 고장검출 자체가 불필요해지거나, 오검출의 위험이 있다. 그러나, 제안된 퍼지모델은 EPB 시스템의 비선형성이 반영되어 초기 동작구간에서 약 20kgf 이내로 변화하는 것을 알 수 있다. 실험 결과를 통해서 퍼지모델의 추정 주차력값이 EPB 시스템 동작구간(-60kgf ~ 150kgf)과 동작온도(-40℃, 25℃, 85℃)에서 수학적 모델의 추정 주차력값보다 실제 주차력 센서의 값을 추종하는 것을 알 수 있다.

표 2는 온도별로 적응 임계치를 적용한 표이다. 40℃에서는 잔차(residual)의 크기가 40 이지만, 고장 검출을 위한 적응 임계치의 크기가 50으로 설정이 되어 있어서 고장을 검출하지 않고, 85℃에서는 잔차의 크기가 40℃일 때와 동일하게 40 이지만, 적응 임계치의 크기가 30으로 설정이 되어 있어서 고장을 검출한다. 이와 같이 정밀도가 높은 온도영역에서는 낮은 임계치를 사용하고, 정밀도가 낮은 온도 영역에서는 높은 임계치를 사용하여, 온도변화에 강인한 적응 임계치 기법을 EPB 시스템의 고장검출 방법에 적용하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 주차력 센서를 장착한 EPB 시스템을 상용화하는데 있어 중요 기술인 온도변화에 강인한 퍼지모델 기반 고장검출 방법을 제시하였다.

1) EPB 시스템의 주차력과 같은 비선형 시스템을 수학적으로 모델링할 경우 고차의 미분방정식으로 표현된다. 그러나, 고차의 모델은 이용하기 어렵기 때문에 이를 근사화하여 낮은 차수로 표현하지만, 그 결과가 만족스럽지 못하여, 비선형 시스템을 효과적으로 표현할 수 있는 퍼지모델을 사용하였다.

2) 저온영역으로 갈수록 소모되는 전기 에너지의 표준편차가 커서, 고온 영역에서는 모델의 정밀도가 높고, 저온 영역에서는 모델의 정밀도가 낮아진다. 그러므로, 정밀도가 높은 온도영역에서는 낮은 임계치를 사용하고, 정밀도가 낮은 온도 영역에서는 높은 임계치를 사용하여 온도변화에 강인한 적응 임계치 기법을 EPB 시스템의 고장검출 방법에 적용하였다.

3) 실제 주차력 센서의 출력값과 기존의 수학적 모델의 추정 주차력값, 제안된 퍼지모델의 추정 주차력값에 대한 비교 실험을 HILS를 이용하여 수행하였다. 실험 결과를 통해서 퍼지모델의 추정 주차력값이 EPB 시스템 동작구간(-60kgf ~ 150kgf)과 동작온도(-40℃, 25℃, 85℃)에서 수학적 모델의 추

정 주차력값보다 실제 주차력 센서의 값에 근사하게 추종하는 것을 알 수 있다.

참고문헌

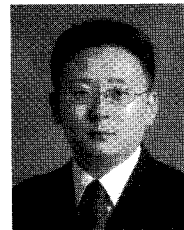
[1] K. J. Han, K. S. Huh, D. G. Hong, J. G. Kim, H. J. Kang, and P. J. Yoon, "Real-time model-based fault diagnosis system for EHB system," *Transactions of KSAE*, vol. 16, no. 4, pp. 173-178, 2008.

[2] 김성호, 이성룡, 강정규, "페루프 제어 시스템을 위한 퍼지-신경망 기반 고장 진단 시스템의 개발," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제7권 제6호, pp. 494-501, 2001.

[3] 김훈모, "사출 성형기 Barrel 온도에 관한 퍼지 알고리즘 기반의 고장 검출 및 진단," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제9권 제1호, pp. 958-962, 2003.

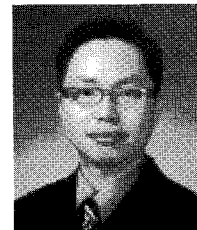
[4] J. Chen and R. J. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, pp. 51-54, Kluwer, 1999.

[5] 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.



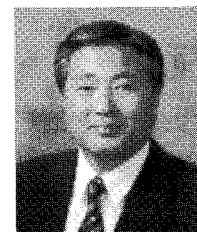
문 병 준

2002년 경희대학교 전자공학과 졸업.
2007년 경희대학교 전자공학과 석사.
2007년~현재 경희대학교 전자공학과 박사과정. 2001년~현재 만도 중앙연구소 제직. 관심분야는 퍼지, 신경망 및 고장 검출진단.



김 동 한

1995년 KAIST 전기및전자공학과 졸업.
1998년 KAIST 전기및전자공학과 석사.
2003년 KAIST 전기및전자공학과 박사.
2007년~현재 경희대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 Multi Agent 시스템, 지능제어, 로봇추구.



박 종 국

1971년 서울대학교 물리학과 졸업. 1975년 연세대학교 전자공학과 석사. 1979년 연세대학교 전자공학과 박사. 1980년~현재 경희대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 자동제어, 퍼지, 신경망, 유전 알고리즘.