

퍼지를 이용한 BLDC 모터의 상태전이 고장진단

State Transition Fault Diagnosis in Brushless DC Motor based on Fuzzy

백경동¹, 김연태², 김성신³

¹ 부산시 금정구 부산대학교 전기공학과

E-mail: gdbaek@pusan.ac.kr

² 부산시 금정구 부산대학교 전기공학과

E-mail: dream0561@pusan.ac.kr

³ 부산시 금정구 부산대학교 전기공학과

E-mail: sskim@pusan.ac.kr

요 약

생산 현장에서 기기의 운영과 관리는 제품의 품질 및 기업의 수익성과 직결된다. 그러나 정상적인 작동을 하고 있는 시스템에서 고장의 시점과 고장의 종류를 예측하기 곤란하며 따라서 잔여 가동 시간이 얼마인지도 예측하기 힘들다. 본 논문에서는 산업용 기계, 공정과 의료기기 등 신뢰성이 요구되는 Brushless DC 모터의 상태 변화의 추이를 관찰하여 진단의 특징점으로 사용한다. 본 논문에서 제안한 상태전이 모델은 고장의 시점과 고장의 종류를 예측할 수 있으며 유지보수의사결정에 도움을 줄 수 있다.

Key Words : Fuzzy, State transition, diagnosis, BLDC Motor, Fault diagnosis

1. 서 론

오늘날의 생산 공정의 추세는 자동화와 고정밀이다. 장비의 가동율은 회사의 수익과 직접적으로 연관되어 있기 때문에, 계획되어 있지 않은 설비의 다운타임(down time)을 최소화하여야 한다. 이러한 측면에서 고장 진단 시스템은 이 분야에 많은 공헌을 해왔으며 많은 경험들이 축적되어 오고 있다. 고장진단에 대한 현재의 연구 추세는 고장 발생 여부, 고장의 원인을 규명하는데 초점을 맞추고 있다. 이러한 것은 주로 전문가의 경험을 기반으로 한 추론을 통해 이루어져 오고 있다. 그러나 정상적인 작동을 하고 있는 시스템에서 고장의 시점과 고장의 종류를 예측하기 곤란하며 따라서 잔여 가동 시간이 얼마인지도 예측하기 힘들다. 이러한 이유가 장기간의 유지보수를 필요로 하게 되는 이유이며, 모든 제한 사항들이 현재의 고장 진단 시스템이 현장에 바로 적용되기 곤란한 점으로 볼 수 있다. 본 논문에서는 산업용 기계, 공정과 의료기기 등 신뢰성이 요구되는

곳에 많이 사용되는 Brushless DC 모터를 대상으로 고장진단을 하였다.

기존에 연구된 고장 진단 방법은 Xiang-Qun 등의 [1]에서 파라미터 추정 방법과 신경회로망을 이용하여 일반적인 DC 모터의 고장을 검출하고 식별하는 방법을 제안 하였으며, Moseler 와 R. Isermann 은 [2]에서 간략화된 BLDC 모터 모델을 제시하고, 이 모델을 이용한 실시간 고장검출 방법을 제안하였다. 부산대에서는 두 가지 이상의 복합 고장을 모델화하여 고장 진단에 사용하였다[3].

본 논문은 고장 발생을 알아낼 수 있도록 Brushless DC 모터의 성능 저하를 평가함으로써 유지보수를 미리 결정할 수 있는 예측 및 보정 기반의 진단 시스템을 개발하는 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 측정과 성능평가로 이루어지는 상태전이진단(state transition diagnosis) 전략을 제안하였다. 상태전이진단은 현재와 이전 모터 상태의 차이를 특징점으로 사용하므로 모터 상태를 예측하고 유지보수 결정을 할 수 있게 한다.

논문의 구성은 2장에서 간략화된 BLDC모터 모델에 대하여 설명하고, 3장에서는 데이터를 취득한 시스템에 대해 소개하고, 4장에서는 제안된 진단 알고리즘에 대하여, 5장에서는 실험 결과 및 결론으로 맺었다.

2. BLDC모터 모델

3개의 홀 소자에 의하여 회전자의 위치가 검출되는 4극 3상 Y-결선된 BLDC 모터는 60도 간격으로 인버터에 스위칭 패턴이 인가되며[4] 모터의 속도는 고정자 코일의 입력 전압을 조절하여 제어하는데 하나의 코일의 수학적 모델은 식(1) 과 같다[5].

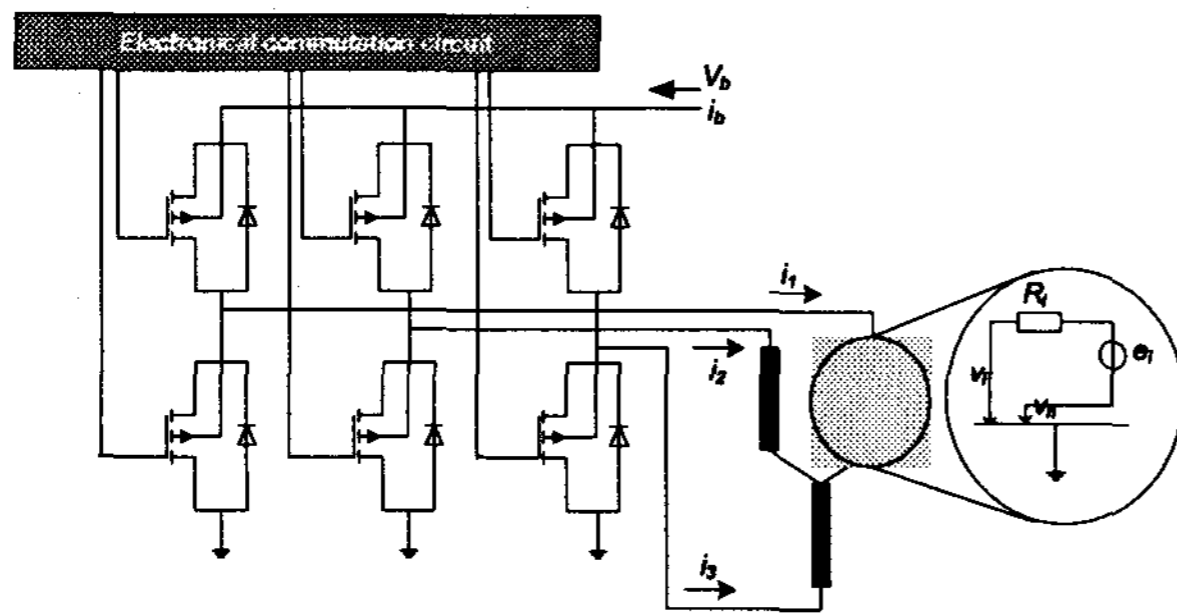


그림 1. 등가회로.

$$v_1 - v_n = R_1 i_1 + e_1 \quad (1)$$

한 상의 역기전력은 $e_1 = k_{E1} \omega_r(t)$ 이며, 여기서 $\omega_r(t)$ 는 회전자의 각속도, k_{E1} 은 역기전력 상수, v_1 은 기준 상전압 그리고 v_n 은 기동전압이다. 이것을 모든 상에서 전개하면 식(2) 와 같다.

$$\begin{pmatrix} v_1 - v_n \\ v_2 - v_n \\ v_3 - v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_{E1} \\ k_{E2} \\ k_{E3} \end{pmatrix} \omega_r(t) \quad (2)$$

모터 내부의 고장은 회전자 각속도에 영향을 줄 것이고, 이러한 변화는 모터 한 상의 전류를 계측하여 고장 계측 신호로 사용하고자 한다.

3. 데이터 취득 시스템

3.1 임의의 고장 시뮬레이션

본 연구에서 임의로 만든 고장은 베어링 마모, 회전자 자속 파손, 고정자 합선이다. 본 연구에서는 정상 모터를 다수 구매하여 고장의 상태를 임의로 발생시켰다. 그리고 홀센서를

이용하여 한 상의 전류를 계측하였다. 또한 산업 영역에서 사용되는 NI 사 데이터 수집 장치인 DAQ 계측보드와 계측용 범용 프로그램 LabVIEW 를 사용하여 전류 신호를 취득하고 MATLAB 프로그램을 이용하여 상태별 주파수를 분석하였다.

표 1. 고장 발생 모터의 총 개수.

모터 상태 변화	수
정상 → 베어링고장	3
정상 → 회전자고장	3
정상 → 고정자고장	2

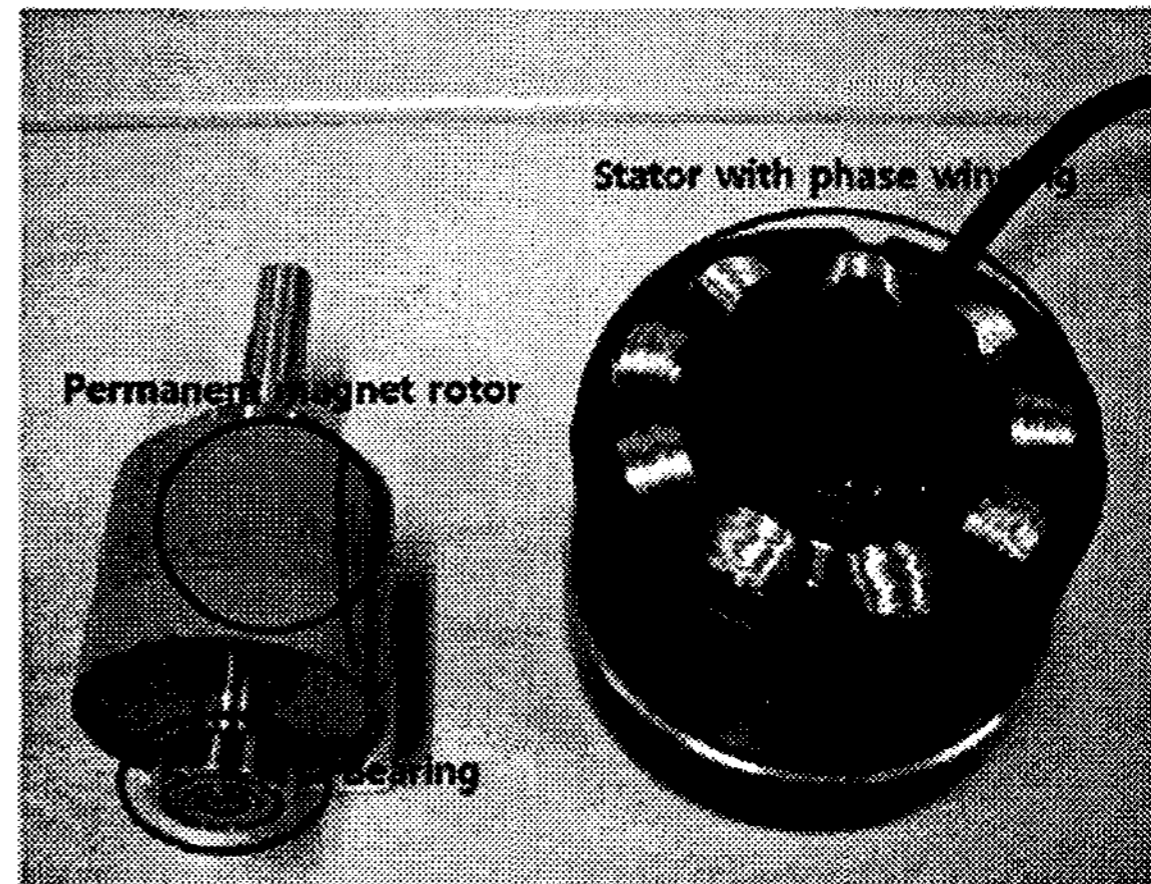


그림 2. BLDC 모터의 임의의 고장위치.

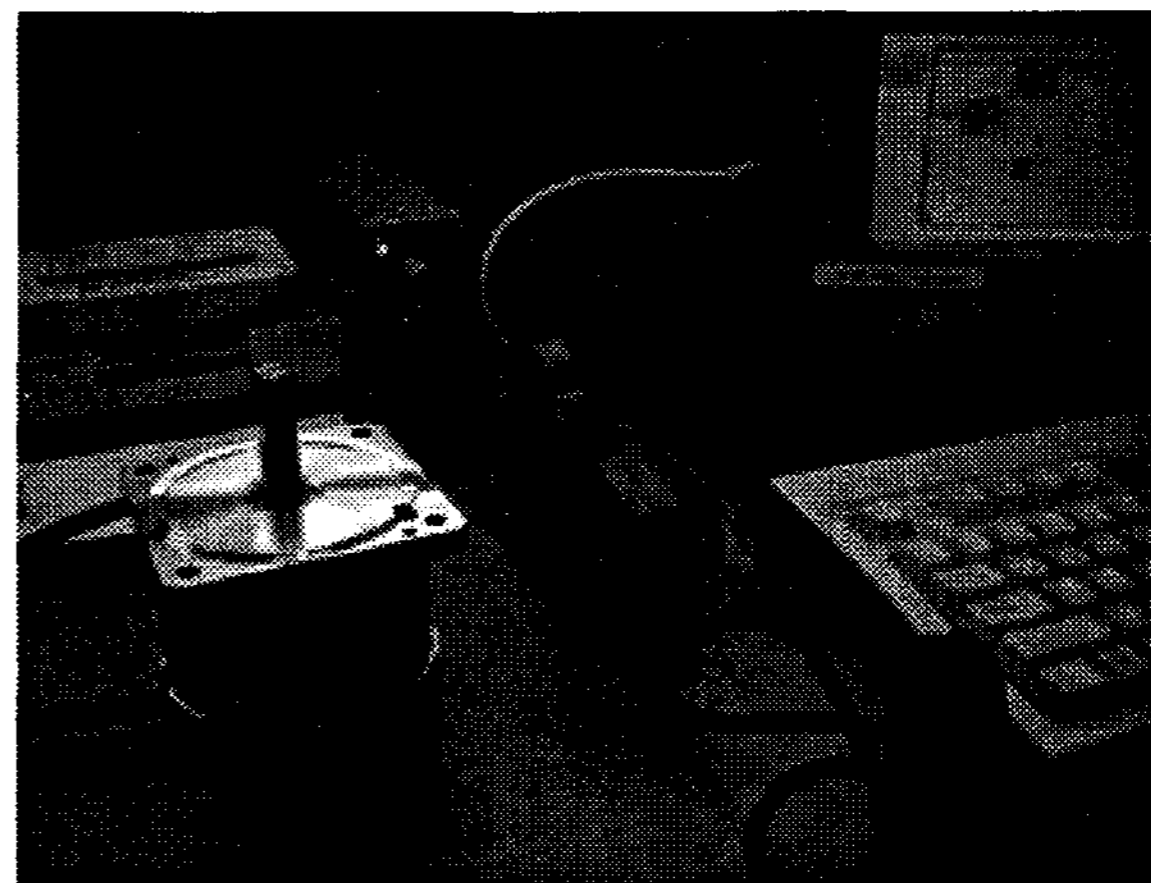


그림 3. 실험장치 사진.

다수의 정상 상태 모터의 계측은 동종의 제품일지라도 다른 정상 신호 레벨을 계측할 수 있었다. 이것은 고장별 임계값을 이용한 고장 진단의 어려움을 보여주며, 진단 시스템이 현장에서 바로 적용되지 못하는 어려움의 원인으로 주목했다.

3.2 세부 진단을 위한 신호의 전처리

본 논문에서는 모터로 입력되는 한 상의 전류 신호를 계측하여 주파수 분석을 통해 특정 대역의 추출하며 신호 노이즈를 고려하는 전처리 과정을 거친다.

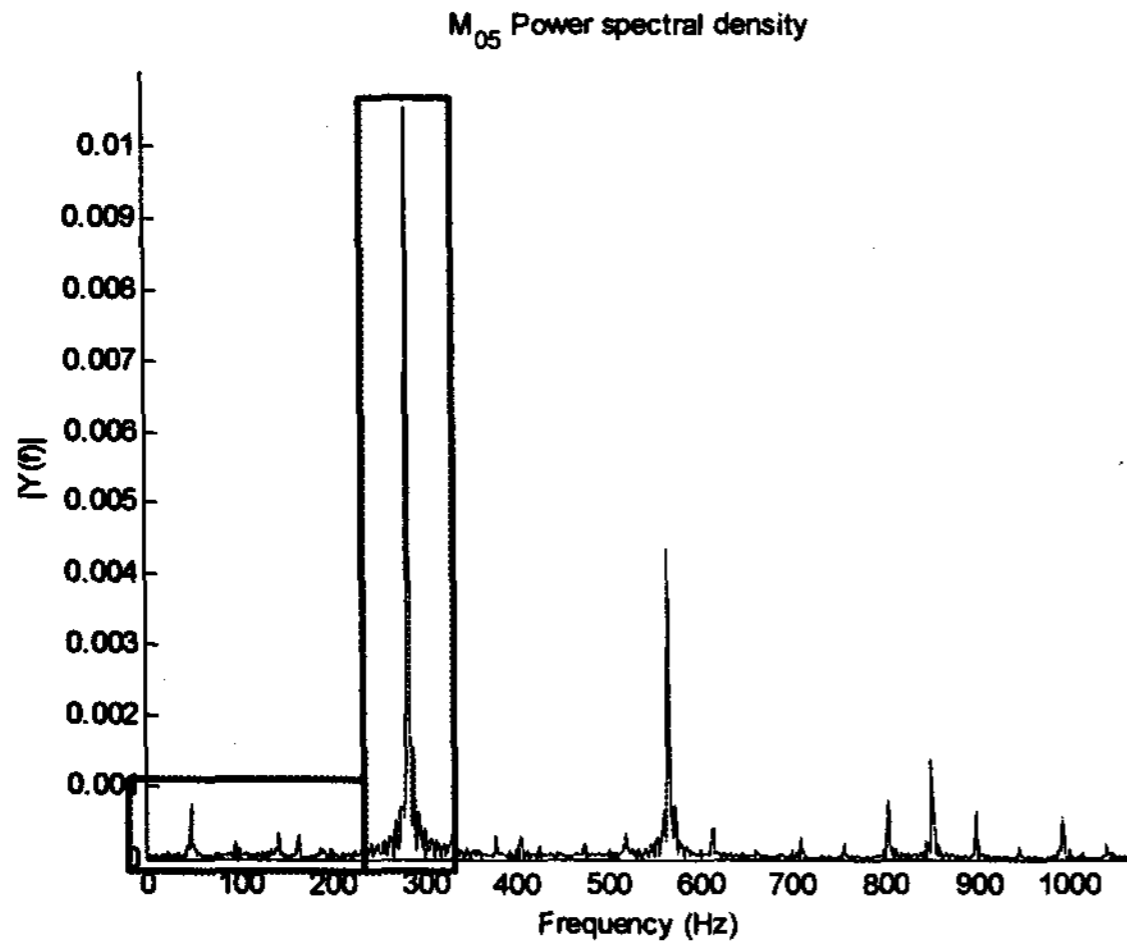


그림 4. 특징 주파수 대역 추출.

특징 주파수 대역은 표준편차가 적고, 서로 다른 상태에서 뚜렷한 구별이 있으며 가능한 대역의 전체 수는 적도록 잡았다. 고조파의 성분은 모터 계측에서 노이즈 성분으로 여기므로 그림 4 대역의 변화를 살펴보았다.

계측된 두 대역의 신호는 일정 시간에 계측된 신호값의 평균값을 구하는 그림 5 과정을 취한다. 마지막으로 식(3) 과 같이 모터 상태별 변화를 알아보기 위해 정상 신호와 나누어 상태별 변화 비율을 살펴보았다.

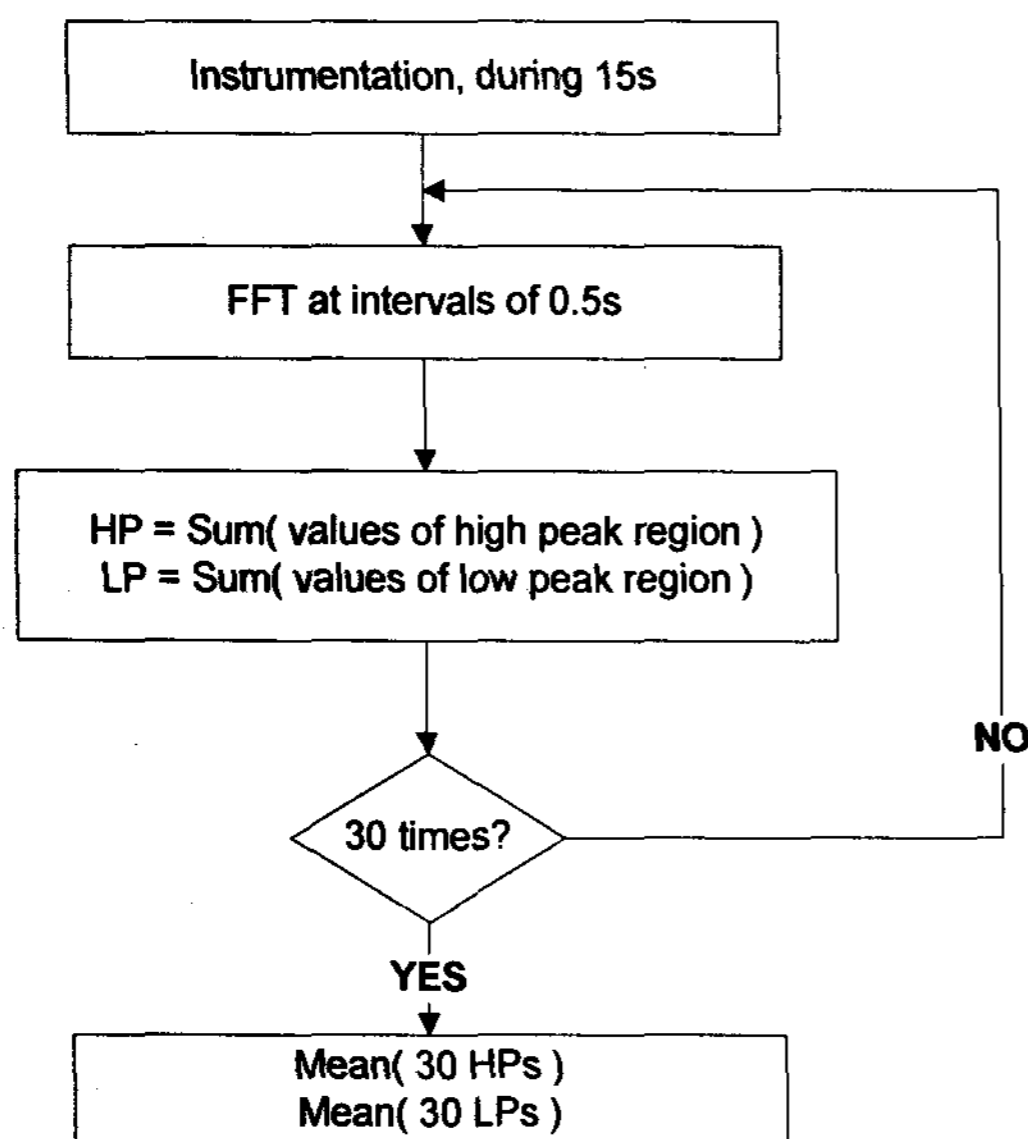


그림 5. 신호 계측 과정 다이어그램.

$$HP\ state = \frac{mean(fault\ state)}{mean(normal)} \quad (3)$$

$$LP\ state = \frac{mean(fault\ state)}{mean(normal)}$$

4. 제안한 진단 알고리즘

본 연구에서 계측된 데이터를 토대로 한 모터의 상태변화는 다음과 같다.

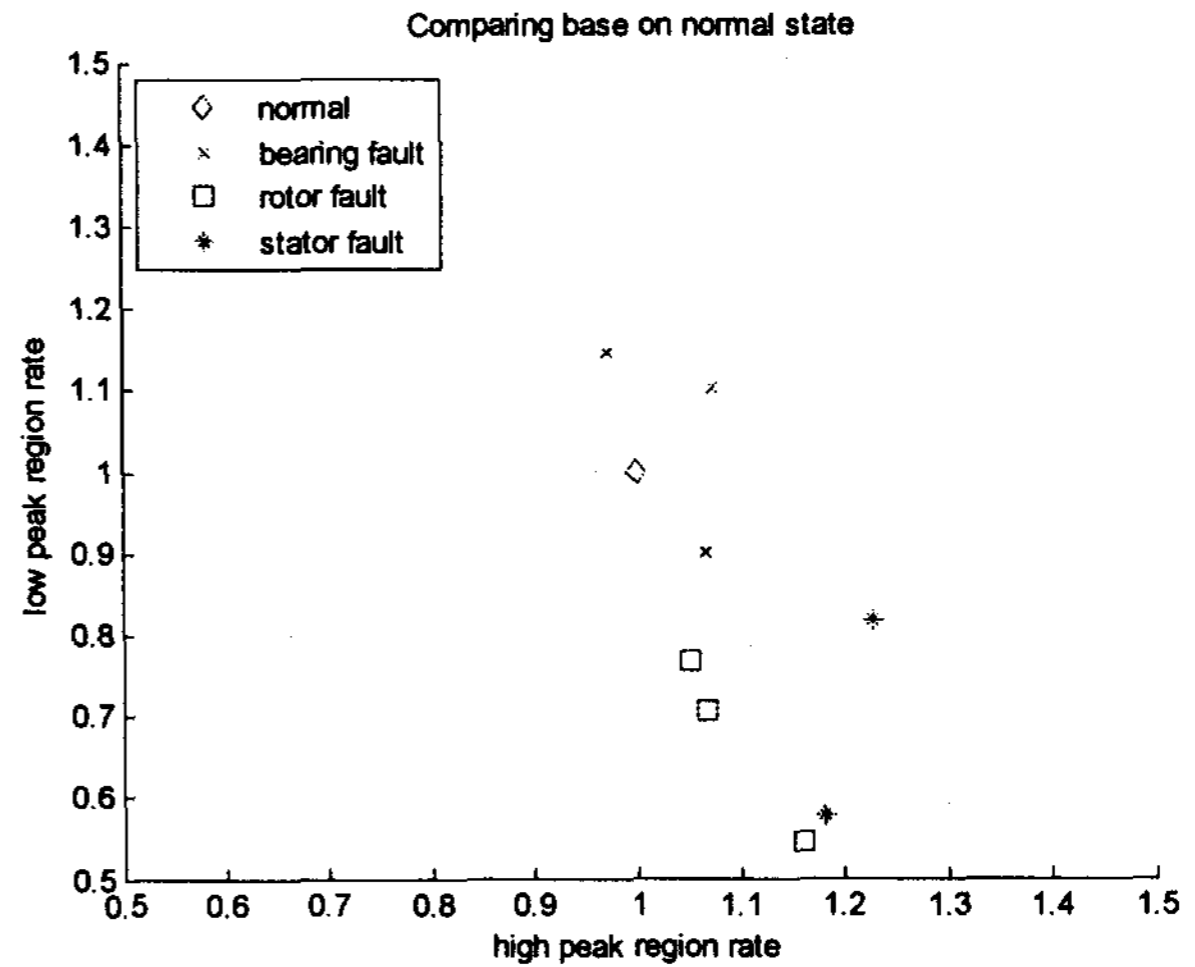


그림 6. 정상의 기준으로 고장의 분포.

베어링 고장의 경우, 모터의 정상 신호 (1,1)에 위치한 중심점 주변부에 위치하며 보통의 경우 고조파 신호와 고조파 주변부 주파수가 높아지는 경향이 있다. 회전자 고장과 고정자 고장의 경우, 고조파 주파수가 높아지고 고조파 주변부 주파수는 낮아지는 경향이 있으며 서로간의 그 정도에서 차이를 보인다. 보통 모터 진단에서는 고장이 전기적인 문제인지 기계적인 문제인지 판단하는 것이 중요하며, 기계적인 변수로서는 베어링의 고장을 전기적인 변수로서는 회전자와 고정자 고장으로 판단한다.

4.1 진단 알고리즘

본 논문에서는 3 단계로 모터의 상태를 진단한다. 처음 단계 상태진단(state diagnosis)에서는 모터의 정상과 고장의 구분을 해내며 Mamdani 추론을 사용한다. 두 번째 단계는 기계적인 고장과 전기적인 고장을 구분해내기 위해 TSK 추론을 사용하여 추론을 간략화 했으며, 세 번째 단계에서 전기적인 두 고장을 구분하고자 하였다.

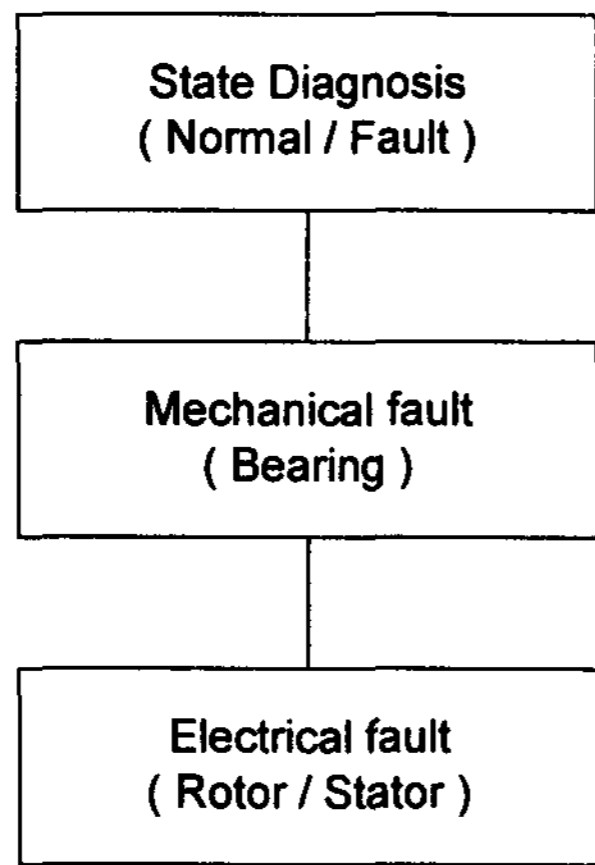


그림 7. 진단 과정.

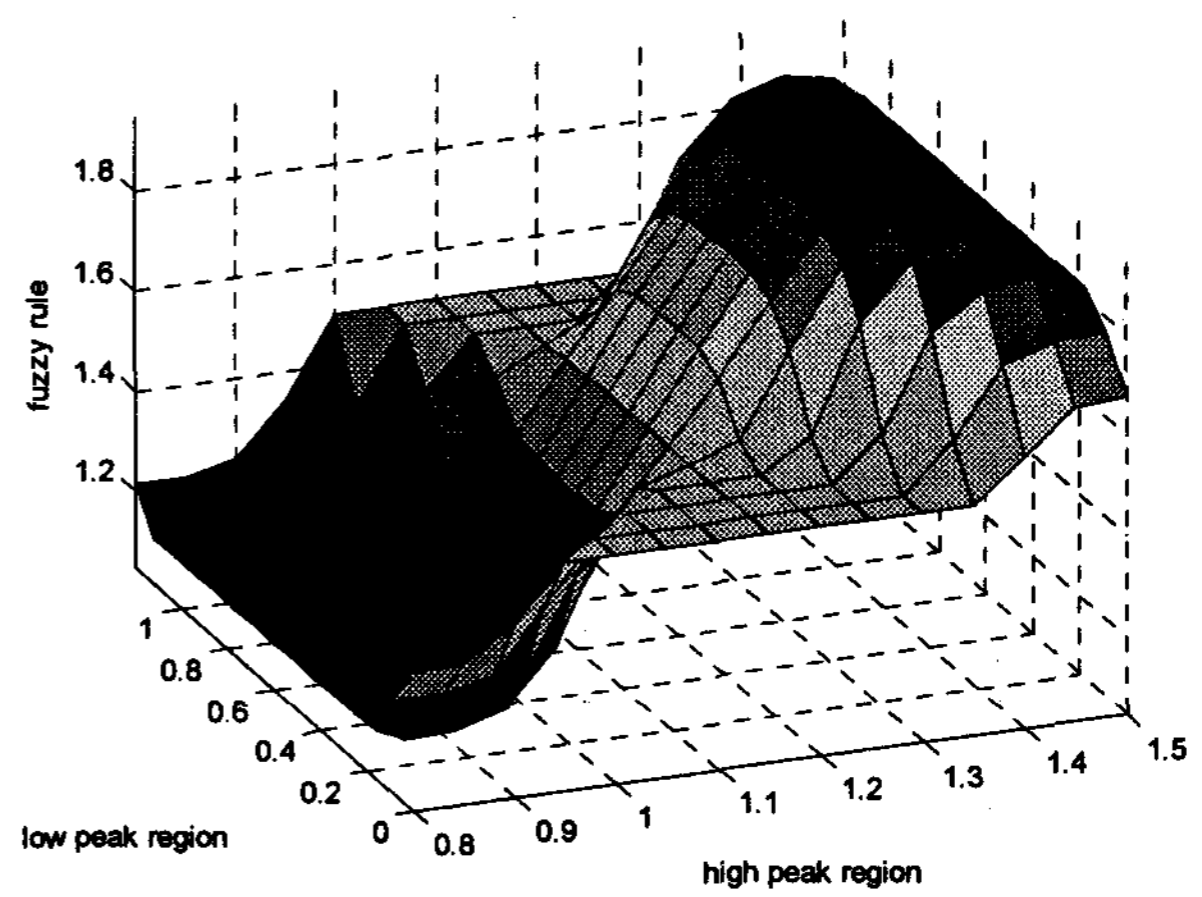


그림 10. 회전자와 고정자 고장 판단 퍼지추론 시스템.

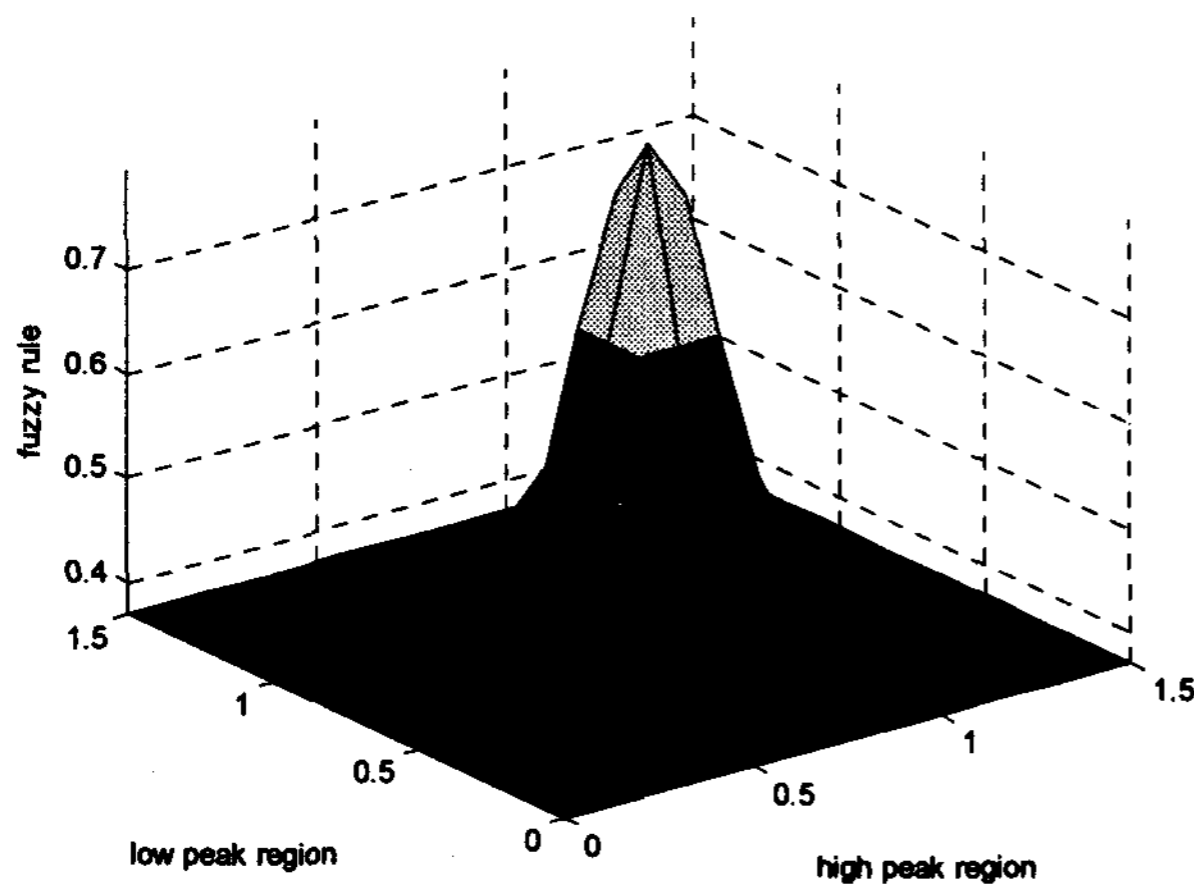


그림 8. 정상 판단 퍼지추론 시스템.

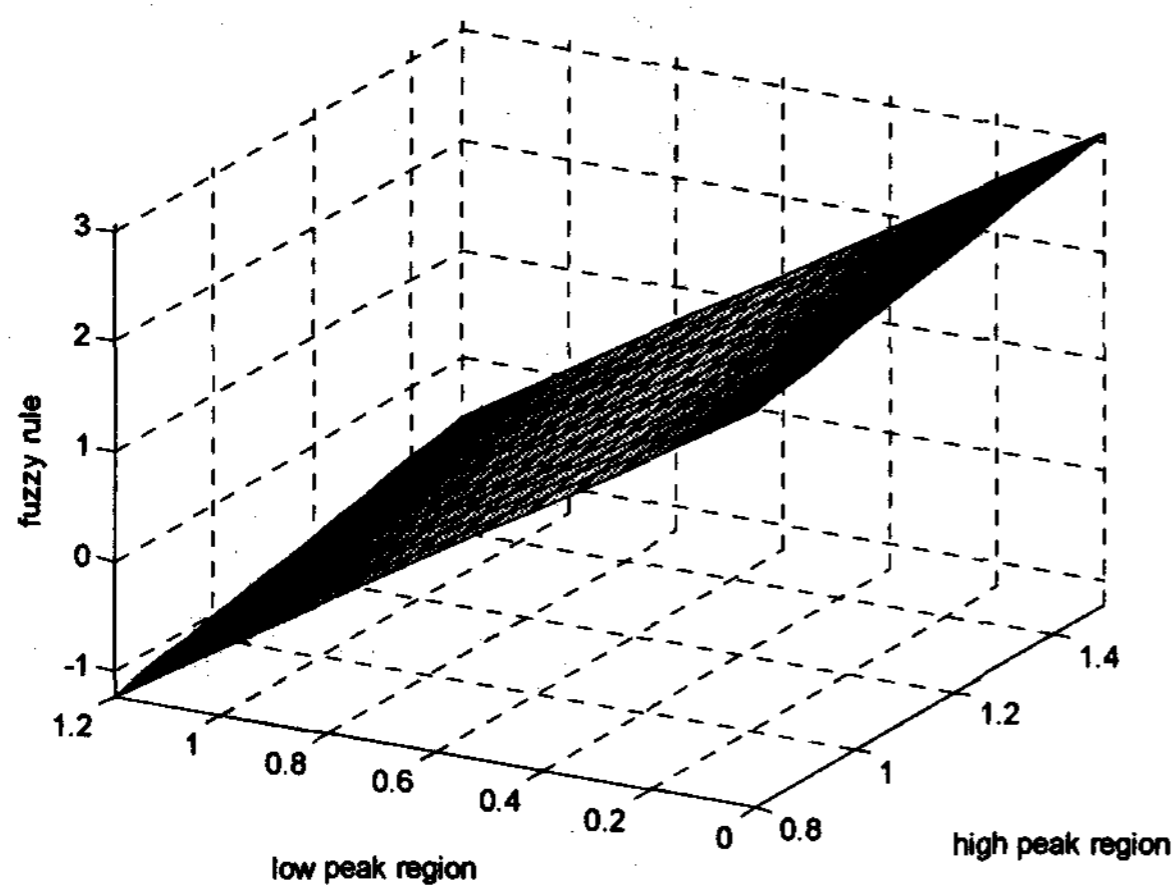


그림 9. 기계적인 고장과 전기적인 고장 판단 퍼지추론 시스템.

5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서는 같은 정상 모터일지라도 다른 정상 신호 레벨을 가진 동종의 모터를 진단하는 방법으로 상태천이진단을 제안하였다. 그림 10 과 같이 동종의 모터일지라도 서로 다른 정상 신호의 분포는 진단 성능을 떨어뜨린다.

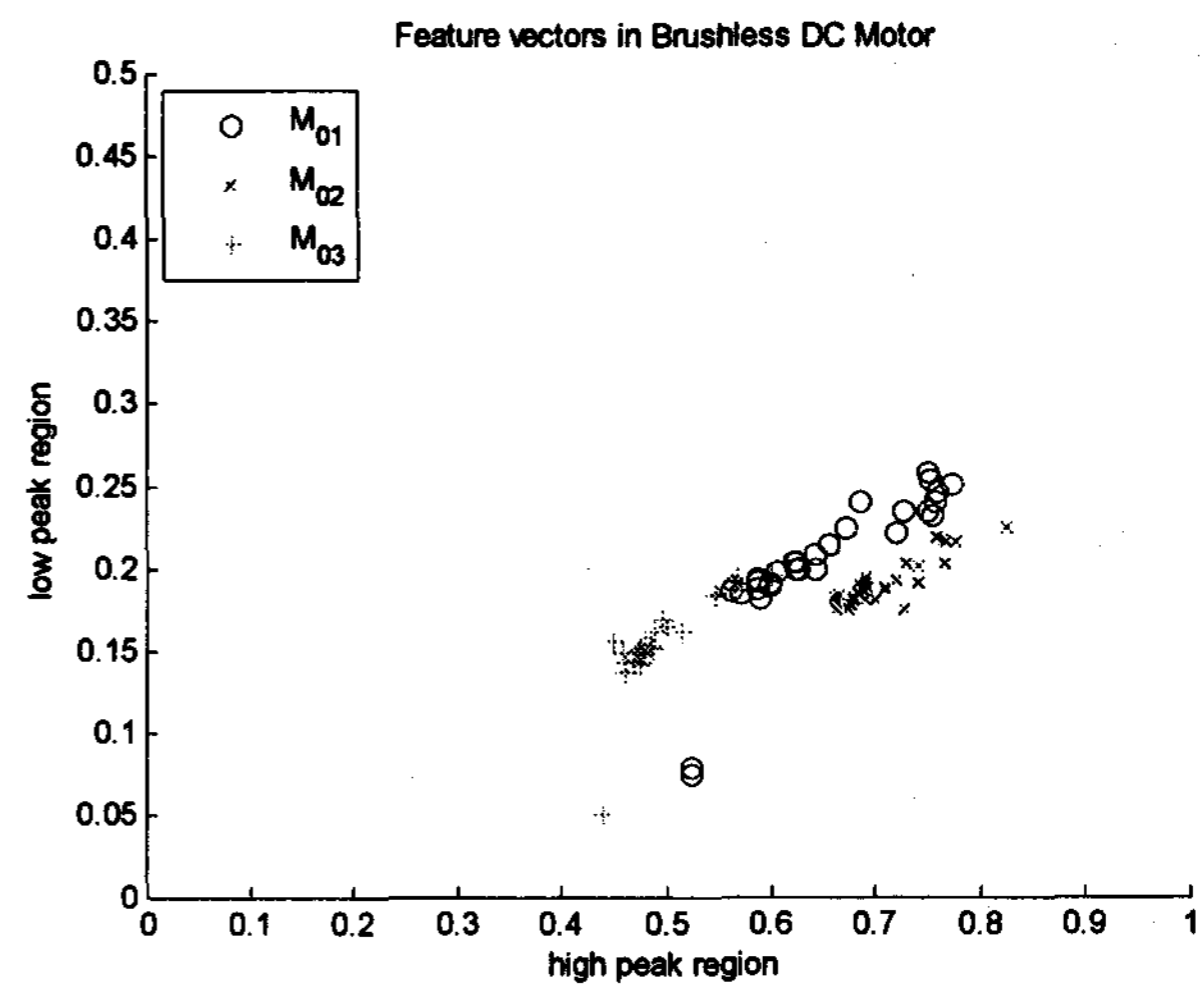


그림 10. 같은 3가지 모터의 정상 신호 분포

그러므로 진단은 모터의 상태 변화를 주시해야 하며 상태 변화는 동종의 모터일 경우 동일한 것으로 가정하여, 진단 알고리즘으로 사용한 데이터 외의 진단 결과는 다음과 같다.

표 2. 모터의 기계/전기적인 고장 진단 결과.

Data	Basic Rule Base	Fuzzy Rule Base
Mechanical Fault (Bearing)	-1	-0.900710558
	-1	-0.887312707
	-1	-0.871236593
	-1	-0.754830564
	-1	-0.737841416
	-1	-0.705612955
	-1	-0.694724706
	-1	-0.405057581
	-1	-0.211911417
Electrical Fault (Rotor/Stator)	1	1.289402544
	1	1.195608115
	1	1.167539744
	1	1.17269248
	1	0.560367259
	1	0.571591814
	1	0.353511215
	1	0.34030369
	1	0.280991573
1	0.264381567	

표 3. 모터의 회전자/고정자 고장 진단 결과.

Data	Basic Rule Base	Fuzzy Rule Base
Rotor Fault	1	1.270574265
	1	1.342173435
	1	1.262816233
	1	1.17833004
	1	1.318548693
	1	1.467335143
	1	1.276156887
	1	1.464481637
	1	1.341078637
	1	1.287615701
Stator Fault	2	1.894806646
	2	1.681282239
	2	1.617179209
	2	1.651558301
	2	1.733681358
	2	1.807066789
	2	1.603847087
	2	1.568160228
	2	1.687270498
	2	1.707121109

전기적 고장과 기계적 고장의 분류는 선형분류기로도 충분히 분류가 가능하였으며, 전기적인 고장인 회전자와 고정자 고장의 두 분류는 값의 차이는 적었지만 둘 모두 분류가 가능하였다. 상태천이 알고리즘은 정상 상태에 대한 정보를 바탕으로 그 변화의 정도를 살펴볼 수 있어 유지보수시점에 대한 의사 결정에 도움을 줄 수 있다.

감사의 글

이 논문은 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업 (차세대물류IT기술연구사업단)의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Xiang-Qun, Hong-Yue Zhang, Jun Liu, and Jing Yang, "Fault Detection and Diagnosis of Permanent-Magnet DC Motor Based on Parameter Estimation and Neural Network", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, pp. 1021-1030, Oct. 2000.

[2] O. Moseler and R. Isermann, "Application of Model-Based Fault Detection to a Brushless DC Motor," IEEE Trans.Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, pp. 1015-1020, Oct., 2000.

[3] 박진수, 김연태, 배현, 김성신, "복합고장을 가지는 농형유도전동기의 모델링과 고장진단", Proceedings of KFIS Autumn Conference 2006, vol. 16, no. 2, 2006.

[4] Electro-Craft Corporation, DC MOTORS SPEED CONTROLS SERVO SYSTEM, 1978.

[5] Olaf Moseler and Rolf Isermann, "Application of Model-Based Fault Detection to a Brushless DC Motor", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 47, NO. 5, OCTOBER 2000