

퍼지 추론을 이용한 스팀 터빈 발전기의 진동 진단 시스템

Vibration Diagnostic System for Steam Turbine Generators Using Fuzzy Inference

남 경 모 (국방과학연구소), 홍 성 옥 (금오공대), 김 성 동 (금오공대)

Kyung-Mo Nam (Agency for Defense Development), Seong-Wook Hong (Kumoh National Univ. of Tech.),
Seong-Dong Kim (Kumoh National Univ. of Tech.)

ABSTRACT

Vibration diagnosis of steam turbine generator is essential for safe operation. For a past few decades, several data base systems for diagnosis of steam turbine generators have been developed and proved useful. However, there still remains a problem in using data base systems such that they require an expert engineer who has a deep insight or knowledge into the system. Moreover, such data base systems can not give any information if the input is not completely fit with data base. This paper presents an effective method for vibration diagnosis of steam turbine generators using fuzzy inference. The proposed method includes also a strategy to overcome the drawback of data base system such that one cannot obtain any information when the input is insufficient or not exact. A computer program is written to realize the entire procedure for the diagnosis. Three realistic problems are dealt with to show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Fuzzy Inference(퍼지추론), Membership Function(소속함수), Turbine Generator (터빈 발전기)

1. 서론

운전중인 회전기계에 과도한 진동이 발생하게 되면 기계의 수명 단축과 가공품의 결함을 초래하게 된다. 일반적인 회전기계의 주된 진동 원인은 불균형(Unbalance), 정렬불량(Misalignment), 베어링 구성 요소의 결함 등 다양한 원인에 의해서 발생할 수 있다. 이러한 문제점에 의한 기계의 파손을 막기 위해서 과거에는 문제 발생 시나, 정기 검사를 하기 위해서 기계를 정지시킨 상태에서 분해, 검사하는 방법을 사용하였으나 최근에는 운전 중인 기계에서 얻을 수 있는 신호를 측정하여 기계 이상을 진단하는 방법이 많이 사용되고 있다 [1-5]. 진동 진단은 진동 원인을 규명하는 방법의 개발과 발견된 결함을 교정하기 위한 대책 수립이 가장 중요하다. 스팀 터빈 발전기는 자체의 고장에 의한 1차적 손실뿐만 아니라 전력 공급 차질에 따른 부가적인 손실이 더 중요한 실정이며 지금과 같이 전력여유가 부족한 시점에서는 스팀 터빈 발전기의 고장을 사전에 혹은 조기에 발견하여 조치하는 것이 그 어느 때 보다 중요한 것으로 판단된다. 스팀 터빈 발전기에 이상 진동 현상이 발생하였을 경우 정밀 진단을 하기 전에 관측 또는 측정

된 데이터를 사용하여 발생 원인과 해결책을 얻을 수 있는 방식이 진단 테이블화 되어 사용되어 오고 있다[6]. 그러나 진단 테이블에 의한 방식은 2치논리에 의한 판단이므로 측정결과를 판단하는 사람의 주관에 따라 오류의 가능성을 배제하기 어려우며 진단 테이블과 일치하지 않는 경우에는 원인이나 해결책에 관한 정보를 전혀 확보할 수 없다는 점과 시스템에 대한 전문적인 지식이 없는 사람은 측정된 데이터가 있다 하더라도 아무런 진단을 할 수 없다는 문제점을 가지고 있다[7].

본 연구에서는 입력을 2치논리가 아닌 퍼지니스(Fuzziness)개념을 도입하여 애매성을 표현할 수 있는 수치로서 입력하고 퍼지 추론법[8, 9]을 이용하여 진단 결과를 도출하도록 하였다. 또한 입력에 있어서도 기존의 진단 테이블 방식의 문제점을 개선하여 관측되지 않은 매개변수는 입력하지 않을 수 있고 여러 가지가 관측된 매개변수에서는 해당되는 모든 부항목을 동시에 입력할 수 있도록 하였다. 데이터 베이스와 일치하는 해결책이 없을 경우에는 입력의 오류 가능성을 전제로 하여 입력된 데이터를 근거로 유추한 이상 진동 원인을 가능성이 높은 순으로 제시하여 관측자가 전문가가

아니라 하더라도 1차적인 진단수단으로 이용할 수 있도록 하였다. 개발된 시스템을 스팀 터빈에서 발생되었던 세가지의 실제 문제에 적용하여 유용성을 검증하였다. 그밖에도 작업자에 따른 입력의 차이에 대한 진단 결과의 변동을 분석하기 위해 입력에 따른 민감도를 분석하였다.

2. 진단 방법

본 논문에서 고려하고 있는 진단 방법은 기존의 데이터 베이스 방식을 보완하여 모든 측정 변수에 대해서 동시 입력이 가능하게 함과 아울러 정확히 일치하는 결과가 없거나 입력이 부족한 경우에도 입력값으로부터 유추할 수 있는 진동 원인의 가능성을 제시할 수 있으며 진단 결과를 퍼지 추론에 의해 도출하여 각 결과들에 대해 높은 가능성을 갖는 것부터 우선 순위로 표시하도록 하였다.

2.1 진단 매개변수와 종합 진동 진단표

특정 시스템을 진단하기 위해서는 먼저 대상 시스템에 대한 충분한 정보와 운전조건, 운전중 발생 가능한 이상 현상 및 상태변화를 표현 할 수 있는 진단 매개변수와 부항목을 설정해야 한다(표 1 참조). 다음은 표 2와 같은 종합 진동 진단표[6]를 만드는 일인데, 운전중에 발생할 수 있는 진동 원인을 설정하고 발생한 진동 원인과 관련되는 매개변수의 부항목을 선택하여 조합으로 구성한다. 이 조합은 추론 결과에 직접적인 관련이 있으므로 진동 이론, 경험적 지식, 대상 시스템의 특성 등을 충분히 고려하여 만들어야 한다.

2.2 입력 조합의 구성

관측된 현상에 대해서는 각 진단 매개변수의 모든 부항목에 대해서 입력이 가능하며 동시에 관측된 현상에 대해서도 동시 입력이 가능하다. 관측되지 않거나 관련이 없는 진단 매개변수에 대해서는 입력을 하지 않아도 된다. 입력되지 않은 진단 매개변수는 추론 과정에서 고려되지 않게 된다. 주어진 입력은 진단 매개변수별로 나뉘어져 최대 n개의 조합(N)으로 표현된다. n개의 조합이란 ${}_5C_i$ 를 의미하며 i는 입력된 진단 매개변수의 개수를 의미한다. 이 조합(N)을 기존에 발생한 문제와 해결책을 저장한 종합 진동 진단표와 비교하여 일치하는 것만을 취한 뒤 조합(M)을 구성하여 진단을 위한 추론을 하게 된다. 조합(M)이 구성될 수 없는

표 1. 진단 매개변수 및 부항목

진단 매개변수	부항목
A. 특징 진동수	1. 1X 2. 회전축계의 임계속도 3. 2X, 3X, 4X 4. 1/2X, 1/3X, 0.3X~0.8X
B. 발생 운전속도	1. 임의, 전속도 범위 2. 임계속도 이하 3. 임계속도 이상 4. 임계속도의 2배이상 5. 임계속도의 1/2배 6. 임계속도의 2배 7. 임계속도의 3배
C. 진폭 변화	1. 불변 2. 점증, 장기변화 3. 급증, 고진동 4. 불규칙
D. 위상 변화	1. 안정 2. 일시적 변화, 변화후 안정 3. 역전변화, 회전반대방향 4. 연속적, 장기변화 불안정
E. 조건/상태변화	1. 회전수 2. 부하 3. 축 정렬상태, 커플링 상태 4. 스팀압력 5. 스팀온도 6. 가감밸브, 개도상태 7. Condenser, 터빈 Casing의 진공도 8. 배기실 온도 9. 베어링 급유압력 10. 베어링 급유온도 11. Bearing Metal 온도 12. 베어링 형식 13. 회전자, Casing의 팽창/팽창차 14. 회전체의 조립/끼워맞춤 15. 여자 전압/전류 16. 발전기 가스 온도 17. 계통교란(Line Shock) 18. 정상 운전상태 19. 기동 운전시 20. 운전 정지시

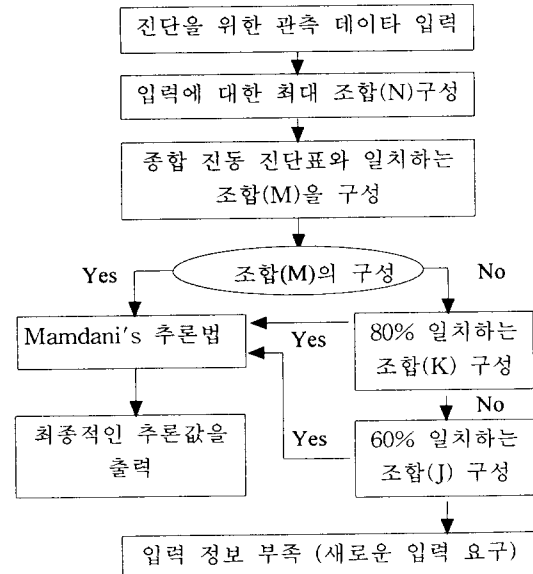


그림 1. 진동 진단 추론 과정

표 2. 종합 진동 진단표

진동 주파수	발생 운전 속도	진폭 변화	위상 변화	운전조건/상태변화	진동 원인 판별
1	1	1	1	1	불균형 진동
1	1	3	2	1, 18, 19, 20	
1	1	2	1, 4	1	
1	1	2	1, 4	2, 5, 15, 16, 20	
1	1	3	3, 4	2, 15	
1, 2, 3, 4	1	3, 4	3, 4	1, 2, 3, 5, 7, 8, 13, 16, 19	Rubbing
1, 3	1	2, 3, 4	4	1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 16, 17, 19, 20	Misalignment
4	3	3, 4	-	1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 19	불안정 진동
2, 4	4	3, 4	-	1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 19	
2, 4	3	3	-	2, 4, 6, 9, 10, 11, 12	
2, 4	2	3, 4	-	1, 2, 14, 19	
2, 4	2	3, 4	-	1, 2, 14, 19	
1, 2, 4	3	3, 4	-	1, 9, 10, 11, 18, 19	
1, 2, 3	1, 5	2, 3	1, 4	1, 17, 18, 19, 20	축 균 열
4	6	3, 4	-	1, 19	베어링 저널의 헐거움

경우에는 이제까지 관측되지 않은 현상이거나 입력이 잘못된 것으로 간주할 수 있으며 이러한 경우에는 조합(N)중 80% 이상 일치하는 조합(K)을 구성하여 추론을 한다. 이때 추론된 값은 정확한 진단 결과를 제공할 수는 없으나 기존에 관측되지 않은 현상이나 잘못 입력되었을 가능성을 고려한 가장 근사적인 추론값이다. 조합(K)과 일치하는 것이 없을 경우에는 60% 이상 일치하는 조합(J)을 구성하여 추론을 하게된다. 이 값 또한 근사적인 해결책을 제시해 줄 수 있다. 60% 이하일 경우는 입력 정보에 대한 부족으로 간주하고 새로운 입력을 하도록 한다. 진동 진단을 위한 추론과정의 흐름도는 그림 1과 같다. 본 연구에서 사용한 진단 테이블은 참고문헌[6]에서 제안되었던 것으로 진단을 위해 표 1에서와 같이 5개의 진단 매개변수로 구성하였으며 각 진단 매개변수에는 다시 여러개의 부항목이 포함되어있다. 표 2에서는 종합 진동 진단표가 보여지고 있다.

관측된 상황에 대한 입력조건은 진단 매개변수가 포함하고 있는 모든 부항목에 대해서 관측된 정도를 0.5 ~ 1사이의 수치로서 입력하도록 하였다. 이 값은 작업자가 판단하기에 진동 현상의 심각성을 표현할 수 있는 수치 값이다. 추론을 위해서 Mamdani의 퍼지 추론법을 사용하였으며, 표 3과 같은 추론 규칙을 사용하였다. 그림 2에서는 스팀 터빈 발전기의 진동 진단을 위해 사용한 입력 및 출력 퍼지 멤버쉽 함수를 보여주고 있다.

표 3. 추론 규칙

If x_i is MI1 then u_i is MO1,
If x_i is MI2 then u_i is MO2,
If x_i is MI3 then u_i is MO3,
If x_i is MI4 then u_i is MO4,
If x_i is MI5 then u_i is MO5,
If x_i is MI6 then u_i is MO6.

2.3 퍼지 진단법

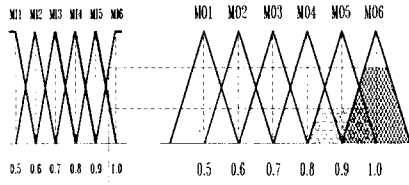


그림 2. 입력 및 출력 멤버십 함수

2.4 추론 결과에 대한 해결책의 제시

이렇게 추론된 값은 종합 진동 진단표에서 제시한 진동 원인의 가중치(Weighting)로서 사용된다. 기존의 방식에서는 특정 진동 원인의 유무만을 제시하였으나 새로 개발된 시스템에서는 특정 진동 원인이 어느 정도 영향을 미치고 있는지를 값으로 표시하여 관측자에게 진동 원인의 심각성을 알 수 있도록 하였다. 또한 다른 진동 원인에 대해서도 가중치를 달리하여 점검 대상의 우선 순위를 제시할 수 있도록 하였다.

3. 진단 시스템의 적용사례

새로 개발된 시스템의 효율성을 검증하기 위해서 참고문헌[6]에서 제시했던 3건의 진동 사고 사례에 적용하였다.

3.1 사례 1

터빈에서 갑작스런 진동이 주기적으로 발생하여 사고로 기록상의 진동현황은 다음과 같다.

- 기록지상에 그려진 진폭이 모두 산 정상임.
- 60Hz 동조 진동 성분이 우세, 30Hz Subharmonic과 120Hz Higher Harmonic 성분이 존재.
- 위상이 불안정하며, 회전체의 회전 반대 방향으로 선회하고 있다.

이러한 현상에 대한 입력값과 그에 따른 진단 결과가 표 4에 정리되어 있다. 기존 시스템에서는 관측된 현상을 여러 차례의 반복입력을 하여 진단 결과를 얻은 반면, 새로운 시스템에서는 관측된 현상을 동시에 한 번의 입력으로 기존 시스템의 결과와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 또한 입력된 데이터로부터 유추할 수 있는 다른 진동 원인을

가중치를 달리하여 우선 순위별로 제시해주고 있음을 알 수 있다.

표 4. 사례1의 입력값과 추론 결과

입력	특징 진동수	진폭변화	위상변화
	1X (0.8) 1/2X (0.7) 2X (0.7)		
진단 결과	0.867	<ul style="list-style-type: none"> • Magnetic • 불균형, 회전부품 일부 탈락 • Rubbing • Bearing 급유부족 • Misalignment • Shaft Crack 	
	0.833	<ul style="list-style-type: none"> • 불균형진동 Oil whirl, Oil whip Steam whirl, 내부마찰 Hysteresis whirl • Bearing Journal 헐거움 	

3.2 사례 2

터빈의 진동이 1, 2차례에 걸쳐 돌발급증(Step change)하여 운전 정지에 이른 사고로, 기록상의 특징은 다음과 같다.

- 1X 동조 진동 성분이 최대.
- 진폭이 Step Change하였고, 위상이 변화한 후 안정 유지.
- 진폭의 Step Change시 베어링 급유온도, 베어링 메탈온도, 출력, 증기 조건에 변화가 없음.

이러한 현상에 대한 입력값과 그에 따른 진단 결과가 표 5에 정리되어 있다.

표 5. 사례2의 입력값과 추론 결과

입력	특징 진동수	진폭변화	위상변화
	1X (1.0)		
진단 결과	0.850	<ul style="list-style-type: none"> • 불균형, 회전부품의 일부탈락 • 베어링 급유부족 	

또한 잘못된 입력이 있는 경우 진단 결과의 변화를 살펴보았는데 표 6에서는 조건/상태변화의 부항목인 스팀압력(0.8)이 관측되지 않은 데이터이나 관측된 데이터로 잘못 입력된 경우의 추론 결과를 보여주고 있다. 이러한 경우에도 가중치의 수치만 줄어들었을 뿐 진동 원인 판별에 대한 추론 결과에는 영향을 미치지 않고 있음을 잘 보여주고 있다. 표 7에서는 2개의 잘못된 입력이 있을 때의 추론 결과를 보여주고 있는데 추론 결과에서 가중치의 현격한 저하를 나타내고 있으며 추가적인 정보에 대한 새로운 진동 원인의 가능성도 제시해 주고 있음을 볼 수 있다.

표 6. 사례2에서 잘못된 입력값이 1개 있을 때의 추론 결과

입력	특징 진동수	진폭변화	위상변화	*조건/상태변화
	1X (1.0)	급중 (0.8)	변화후 안정(0.75)	스팀압력 (0.8)
진단 결과	0.638	• 불균형, 회전부품의 일부탈락 • 베어링 급유부족		
	0.588	• 불안정진동, Steam whirl		

(* 는 잘못된 입력)

표 7. 사례2에서 잘못된 입력값이 2개 있을 때의 추론 결과

입력	특징 진동수	*발생운전 속도	진폭 변화	위상 변화	*조건/상태 변화
	1X (1.0)	임계속도 의 3배(0.7)	급중 (0.8)	변화후 안정 (0.75)	스팀압력 (0.8)
진단 결과	0.510	• 불균형, 회전부품의 일부탈락 • 베어링 급유부족			
	0.470	• 불안정진동, Steam whirl			
	0.430	• 베어링 journal의 헐거움			

(* 는 잘못된 입력)

3.3 사례 3

터빈의 시운전시 진동이 완만히 상승한 후 고진동으로 발전한 사고로, 기록상의 진동 현황을 검토하면 다음과 같다.

● 무부하 1800 rpm에서 장시간 운전하였으며, 운

전중 reheater를 정지시켰다. 이 때 스팀온도에 큰 변화가 초래되었음.

● 운전조건의 변화 2~3 시간후 진동이 상승됨.

이러한 현상에 대한 입력값과 그에 따른 진단 결과가 표 8에 정리되어 있다. 진단 결과로부터 알 수 있는 것은 관찰자가 선택 항목마다 관측된 진동 현상의 심각성을 수치로 입력하는데 있어서 크기를 다르게 부여함에 따라 진단 결과에서 우선 순위의 결정에 영향을 미치고 있음을 볼 수가 있다. 조건/상태변화에서 스팀온도와 회전축, 케이싱의 팽창차의 값을 같은 수치로 입력하게 되면 회전축계 열특성, Misalignment, Rubbing현상을 같은 가중치로 표현되지만, 스팀온도의 값을 높게 평가함에 따라 우선 순위가 바뀌게 되었다. 이는 관찰자의 전문적인 지식이 출력 결과에 반영된 결과라고 볼 수 있다.

표 8. 사례3의 입력값과 추론 결과

입력	진폭변화	조건/상태변화
	장기변화(0.8) 급중 (0.7)	스팀온도 (0.9) 회전축, 케이싱의 팽창차 (0.8)
진단 결과	0.850	• 불균형, 회전축계 열특성 • Misalignment
	0.800	• Rubbing
	0.750	• 불안정진동, Bearing 급유부족

또한 작업자에 따른 입력의 차이에 대한 결과의 변동을 분석하기 위해 입력에 따른 민감도를 분석하였는데 그림 3에서 볼 수 있듯이 입력의 차이에 비교적 둔감하여 사용자의 주관적인 판단에서 올 수 있는 입력 오차에 따른 결과의 차이가 크지 않을 것으로 기대할 수 있다.

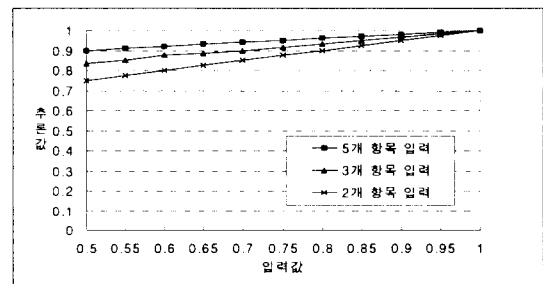


그림 3. 입력값에 대한 출력값의 민감도

그림 4는 개발된 프로그램의 초기 화면, 그림 5는 관측된 상황에 대한 입력화면을, 그림 6에서는 추론 결과를 볼 수 있는 검색화면을 보여주고 있다

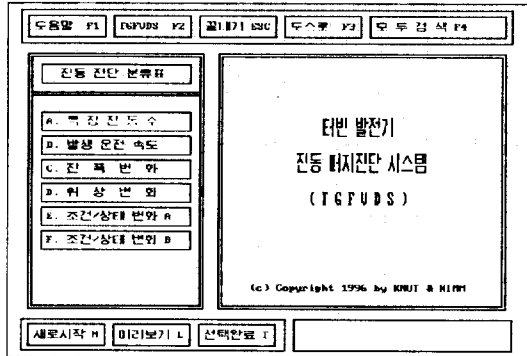


그림 4. 퍼지 진동 진단 프로그램의 초기 화면

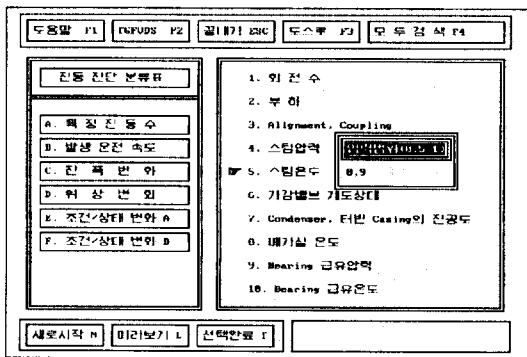


그림 5. 퍼지 추론을 위한 입력 화면

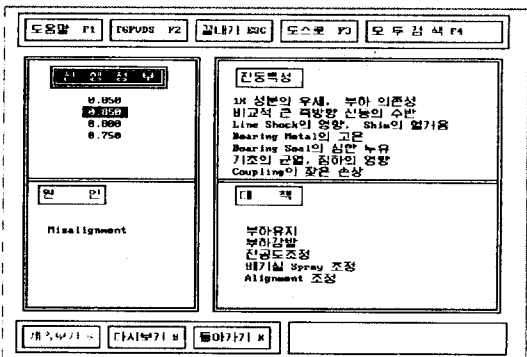


그림 6. 추론 결과의 검색 화면

4. 결론

본 연구에서는 스팀 터빈 발전기의 이상 진동 진단을 위하여 새로운 진단 방법과 2치논리가 아닌 퍼지논리 개념을 도입하여 진단 시스템을 개발

하였으며 실제 진동 사고 사례에 적용하여 개발한 진단 방법과 진단 시스템의 유용성을 확인 하였다. 개발된 시스템에서는 진단 결과를 일정한 가중치로 표시하고, 우선 순위별로 제시하여 관측자로 하여금 진동 상태를 판단하는데 도움을 줄 수 있도록 하였다. 또한 기존의 진단 시스템에서 입력값이 불충분하여 종합 진동 진단표에서 일치하지 않았을 경우에는 해결책을 제시하지 못했던 것과는 달리 개발된 진단 시스템에서는 입력된 값을 사용하여 정확히 일치하는 해가 없다 하더라도 가장 근사한 해결책을 제시해 줌으로서 관측자에게 판단의 근거를 제공하였다. 진단을 위한 전 과정을 프로그램화하여 쉽게 사용할 수 있도록 하였으며, 진단 대상 시스템에 대한 전문가가 아니라도 1차적인 점검수단으로 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 더 많은 데이터 베이스를 구성하고 각 항목에 중요성을 부여한다면 더 좋은 진단 시스템을 구성할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 참고문헌

1. Fredric F. Ehrich, Handbook of Rotordynamics, McGraw-Hill, 1992
2. R. A., Collacott, Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring, Chapman and Hall, 1977
3. A. E., Elsayed, "Knowledge Based Systems for Machinery Fault Diagnosis," 6th IMAC, pp. 1230-1238, 1988,
4. 윤종호, 김성걸, 김종현, 유정훈, 이장무, "회전 기계 불베어링의 자동 진단 시스템에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제19권, 제8호, pp. 1787-1798, 1995
5. K. F. Martin, "A Review by Discussion of Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Machine Tools," International Journal of Machine Tools and Manufactures, Vol. 3, No. 4, pp. 527-551, 1994
6. 이안성, 홍성욱, 김호중, 이현, "스팀 터빈 발전기 진동 진단 시스템 개발," 한국소음진동공학 회지, 제5권 제4호, pp. 543-554, 1995
7. Victor Wowk, Machinery Vibration: Measurement and Analysis, McGraw-Hill, Inc., 1991
8. E. H. Mamdani, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis," IEEE Transactions on Computers, Vol. 26, No. 12, pp. 1182-1191, 1977
9. 채석, 오영석, 퍼지이론과 제어, 청문각, 1995