

모듈 구조 데이터베이스 기반의 터보기기 결합 진단용 하이브리드 퍼지 전문가 시스템

A Hybrid Fuzzy Expert System Based on Module-type Database for Fault Diagnosis of Turbomachinery

백두진* · 이용복† · 김승종* · 김창호* · 곽현덕* · 장건희**

Du-Jin Baek, Yong-Bok Lee, Seung-Jong Kim, Chang-Ho Kim, Hyun-Duck Kwak and Gunhee Jang

Key Words : Turbomachinery(터보기기), Condition Monitoring(상태 감시), Fault Diagnosis(결합 진단), Fuzzy Expert System(퍼지 전문가 시스템)

ABSTRACT

This paper suggests a fuzzy expert system for fault diagnosis of rotating machinery, based on modulated databases. In the proposed system, alarm and trip levels are set based on ISO, considering operating condition, machinery type and maintenance history. Input signals for diagnosis, such as sub- and super-harmonic components of vibration and mean value, are normalized from 0 to 1 under the threshold level and otherwise equal to one so that chronic faults slightly below the threshold level can be monitored. The database for diagnosis consists of two modules: the well-known Sohre's chart module and if-then type rules. The Sohre's chart is utilized for the most common problems of high-speed turbomachinery, while the rule-based module, which was collected from many papers and reports, is for diagnosing peculiar faults according to the type of machinery. To infer the results from two modules, a fuzzy operation of Yager sum was adopted. Using a simulator constructed in laboratory, experimental verification was performed for the cases of resonance and housing looseness which were intended. The experimental results show that the proposed fuzzy expert system has feasibility in practical diagnosis of rotating machinery.

1. 서 론

최근 산업분야에서 사용되는 터보기기는 고속화, 고성능화 및 공장 자동화에 따른 24시간 운전을 실현하고 있는 추세이다. 이에 따라 기계적 고장이나 설비의 노후화로 인해 트러블의 발생 가능성이 증가하고 있으며 현장 전문가와 효율적인 관리 시스템의 부족으로 막대한 정비비용을 야기하고 있다. 따라서 이러한 터보기기를 관리한다는 것은 곧 대상플랜트에서의 안전 관리, 유지 보수비용의 절감, 생산 가동률의 향상과 직결되므로, 경쟁력의 확보를 위해 회전기계의

상태 감시 및 조기 진단은 필수 불가결한 기술이다.

산업 현장에서 사용되는 터보기기에는 일반적으로 운전상태를 감시하기 위해 진동, 압력, 온도 등을 측정하기 위한 각종 센서가 부착되어 있고, 설비보안의 측면에서 유용하게 활용되고 있다. 이러한 데이터들 중에서도 진동 신호는 회전기계의 운전 상태를 판단하는 중요한 지표로서 현재까지 많은 회전기계 이상 진단 시스템에 진동 신호가 사용되었으며, 다른 데이터들에 비해 상대적으로 많은 양의 데이터베이스가 구축 되어있다.

진동신호에 기반을 둔 대부분의 이상 진단 시스템은 주파수 성분을 이용하여 한계값과의 비교를 통한 정상/이상의 이원론적 결과를 추론한다.⁽¹⁾ 이 때의 진단 추론은 각각의 기계마다 운전 상태에 따라 달라지는 한계값을 일일이 변화시키면서 적용해야 하는 불편함 및 오진 가능성을 감수하여야 하고, 또한 그 한계값을 근소하게 밀도는 만성적인 결합에 대해서는

† 책임저자, 정회원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터
E-mail : lyb@kist.re.kr
Tel : (02) 958-5663, Fax : (02) 958-5669

* 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터

** 한양대학교 정밀기계공학과

정상이라고 판단하게 되는 잠재적 오진 가능성을 가지며, 점진적인 변화에 기초한 결함의 예지가 어렵다. 이러한 문제점들에 대하여 많은 선행 연구들이 이루어졌다. Tim 등은 Sohre's chart⁽²⁾의 주파수 성분들을 바탕으로 규칙 기반 진단을 적용하여 전문가 시스템을 구현하였으며, Chun 등은 이 Sohre's chart를 규칙 기반으로 지식을 표현한 후 퍼지 추론 진단을 수행하는 전문가 시스템을 연구 개발하였다.^(3,4) 이러한 기존의 전문가 시스템 및 퍼지 이론을 사용한 연구들은 독립된 데이터베이스를 사용한 기법으로, 진단에 적용되는 데이터베이스인 전문가의 지식의 다양성 및 취약성에 대한 보완의 어려움이 있었다.

따라서 본 논문에서는 Table 1에서와 같이, 기계의 종류와 구성 요소, 운전 조건 등의 정보를 고려하여 ISO 진동규격에 맞는 경보 레벨, 비상정지 레벨을 선정하였고^(5,6), 이를 이용하여 주파수 성분들의 한계값을 정하였다. 추론 과정에 퍼지 이론을 적용하여 정상, 이상 및 중간단계의 정보를 정량적으로 활용한 퍼지 전문가 시스템을 제안 하였으며, 진단의 근거가 되는 데이터베이스에는 Sohre's chart와 "If~then~"구조의 규칙들이 모듈화 되어 있다. 특히 규칙 기반 지식들은 기계 종류별로 모듈화 하여, 그 중 대상 기계에 적합한 것을 선택적으로 사용함으로써 진단의 신뢰성을 높였다. 아울러 실험 장치를 통한 모의 실험결

과의 사례를 통하여 제안된 시스템의 성능을 확인하였다.

2. 입력 신호 처리

2.1 한계값 설정

기계의 진동특성은 기계의 종류, 형식 및 사용목적에 따라 별도의 진동 한계값 설정이 필요하게 되며, 규격의 진동 한계값 또는 기준값을 참조하여 각 기계에 대한 판별기준을 선정할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 ISO진동규격 중 축 진동(ISO 7919)에 대한 규격을 적용하였으며⁽⁵⁾, 대상 기계의 종류 및 운전 조건, 구성요소 등의 정보를 입력함으로써 대상 기계의 경보 레벨과 비상정지 레벨을 선정할 수 있도록 하였다. 또한 선정된 경보 레벨을 기준으로 Fig. 1과 같이 각각의 특정 주파수 성분마다 한

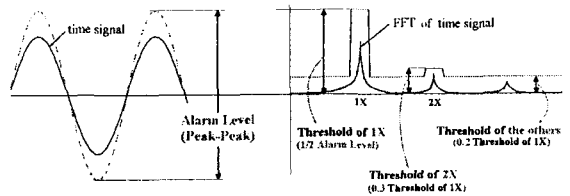


Fig. 1 Thresholds for multiple harmonic frequencies

Table 1 Mechanical Vibration Standard of Rotating and Non-Rotating Parts^(5,6) : ISO 10816 and ISO 7919

	발진 출처	회전 속도 (rpm)	지진 분류	ISO 10816 : mm/s(rms) 7919 : $\mu\text{m(P-P)}$			Level				
				A/B	B/C	C/D	Alarm	Trip			
ISO 10816 (베어링 진동)	2	대형 중기 터빈 발전기	50MW 이상	1500 or 1800	-	2.8	5.3	8.5	6.625	10.625	
			3000 or 3600	3.8		7.5	11.8	9.375	14.75		
	3	일반 산업용 기계	50MW 이하	ISO 10816/3 과 동일							
			압축기 발전기 전동기 송풍기, 팬	300kW ~ 50MW	120 ~ 15,000	강	2.3	4.5	7.1	5.625	8.875
				유연		3.5	7.1	11.0	8.875	13.75	
			15kW ~ 300kW	강		1.4	2.8	4.5	3.5	5.625	
				유연		2.3	4.5	7.1	5.625	8.875	
			펌프	15kW이상 (구동장치분리)		강	2.3	4.5	7.1	5.625	8.875
				유연		3.5	7.1	11.0	8.875	13.75	
			15kW이상 (구동장치연결)	강		1.4	2.8	4.5	3.5	5.625	
유연	2.3	4.5	7.1	5.625		8.875					
4	가스 터빈	3MW 이상	3000 ~ 20,000	-	4.5	9.3	14.7	11.625	18.375		
3MW 이하	ISO 10816/3 과 동일										
5	수력 기계	-									
6	왕복동 기계	-									
ISO 7919 (회전축 진동)	2	대형 중기 터빈 발전기	50MW 이상	1,500	-	100	200	320	250	400	
				1,800		90	220	290	275	362.5	
				3,000		80	165	260	206.25	325	
				3,600		75	150	240	187.5	300	
	50MW 이하	ISO 7919/3 과 동일									
3	일반 산업용 기계	-	1,000 ~ 30,000	-	$4,800 / \sqrt{n}$	$9,000 / \sqrt{n}$	$13,200 / \sqrt{n}$	$11,250 / \sqrt{n}$	$16,500 / \sqrt{n}$		
4	가스 터빈	-	3,000 ~ 30,000	-	ISO 7919/3 과 동일						
5	수력 기계	-									
영역 A : 양호		영역 B : 장시간 운전 허용		영역 C : 제한된 기간동안 운전 허용 (보수조치가 필요)			영역 D : 허용 불가				

계값을 설정하였다. 1x 성분의 한계값은 경보 레벨의 1/2 값으로 정의하였고, 2x 성분의 한계값은 1x 성분의 한계값의 30%를 적용하였으며, 나머지 성분들의 한계값은 1x 성분의 한계값의 20%를 적용하였다. 이는 통상 회전체에는 상존하는 잔류 불평형에 의해 어느 정도 크기의 1x 성분이 항상 존재하게 되므로 이에 가중치를 준 것이다.

2.2 입력신호의 정량화

본 진단에서는 FFT 해석을 통해 11가지의 특정 주파수 성분을 입력신호로 사용하였다. 이는 Sohre's chart의 특정 주파수 성분이 11가지이기 때문이며, 11가지의 성분들로도 거의 모든 회전 기계의 상태를 나타낼 수 있기 때문이다. 앞 절에서 소개한 바와 같이 각각의 주파수 성분마다 한계값이 설정되면, 11가지의 주파수 성분들은 Fig. 2(b)와 같은 퍼지 멤버십 함수에 의해 0에서 1까지의 값을 갖게 된다. 즉, 한계값 미만의 입력에 대해서는 퍼지 멤버십 함수를 적용하여 0과 1사이의 중간 값으로 정량화하여 사용하고, 한계값 이상의 값은 Fig. 2(a)와 동일한 기존의 일반적인 특성 함수를 그대로 적용하였다.⁽⁷⁾

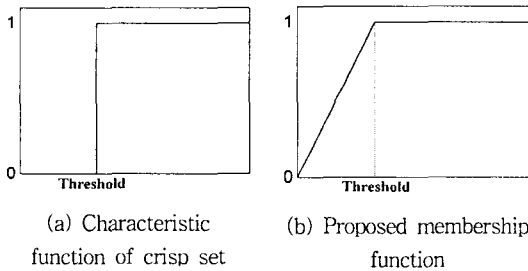


Fig. 2 Membership functions for input normalization

입력 신호는 식(1)과 같은 집합의 형태로 표현되며, 그 성분들은 Table 2와 같다.

$$Input = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9, I_{10}, I_{11}\} \quad (1)$$

Table 2 Elements of input set

I_1	Resonance frequency	I_7	1/2X
I_2	40~50X	I_8	1/4X
I_3	50~100X	I_9	Lower multiples
I_4	1X	I_{10}	Odd frequency
I_5	2X	I_{11}	Very high frequency
I_6	Higher multiples		

3. 데이터베이스의 구성

지식과 추론기능이 합쳐져서 전문가 시스템이 만들어진다고 할 만큼 지식은 전문가 시스템의 가장 중요한 요소이므로 획득된 지식을 어떻게 효과적으로 표현, 저장하는가 하는 것은 바로 전문가 시스템의 성능과 직결되는 문제이다. 여기서 지식이란 데이터, 정보, 사실들과 같은 의미로 사용되고, 기계 진단 시스템이 지능적으로 작동하는 데 필요한 정보로서 사실, 믿음, 문제 해결 방법, 절차, 개념의 정의 등을 포함하며 또한 이들 간의 관계를 말한다.

일반적으로 지식 표현방법은 인간의 일상 언어와 컴퓨터 언어와의 표현구조 사이의 어느 중간에서 타협점을 결정하게 된다. 이러한 중간 절충안으로 규칙이나 프레임 형태 등이 있는데, 이들은 서술적으로 나타내기 보다는 구조화와 체계화를 이루고 있어 컴퓨터에 의해 쉽게 구현될 수 있고 추론 및 검색에 용이하다.⁽⁸⁾ 본 논문에서는 이러한 프레임 형태의 지식과 규칙형태의 지식을 데이터베이스로 구축하여 진단 추론에 사용하였다.

3.1 Sohre's Chart 모듈

John S. Sohre는 세계 전역에서 회전 기계의 수많은 결함 및 고장에 대해 거의 40년간의 작업 경험을 통해 광범위한 양의 데이터를 수집했으며, 이 데이터베이스를 이용하는 것을 허락했다. Sohre에 의해 제공된 이 데이터베이스는 기계의 증상들과 원인들이 chart의 형태로 주어진다. 이 Sohre's chart는 일반적으로 결합별 증상(주파수 성분)들의 합이 100이다. 하지만 100이 넘는 경우도 존재하게 되는데, 이것은 일부 기계에서 몇 가지 증상들이 동시에 발생하는 경우가 생길 수 있기 때문이다. 이 chart는 엔지니어들에게 기계를 진단하는데 많은 도움을 주며, 또한 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 이것을 퍼지 전문가 시스템에 적용하고자 각각의 결합마다 모든 증상들의 합이 1이 되도록 Table 3과 같이 정규화 하였으며, 입력되는 주파수 성분들로부터 진단 결과를 1차 추론하기 위한 데이터베이스로 사용하였다.

3.2 기계 종류별 모듈

기계 종류별로 데이터베이스를 모듈화 하여 대상 기계에 적합한 것을 사용함으로써 상세 진단이 가능하다. 이러한 데이터들은 국내·외의 여러 논문 및 현장사례를 통하여 수집된 것으로 기계의 종류에 따라 발생할 수 있는 특정 결합의 진단에 유용하게 쓰일 수 있다. 현재까지 압축기, 터빈, 모터, 펌프, 발전기, 송풍기 및 팬 등에 관한 데이터가 수집되어, 본 퍼지 전문가 시스템의 지식 기반 규칙 모듈로 구축되어 있다.

Table 4는 "If~then~" 구조의 규칙 형태로 되어 있

는 압축기에 대한 데이터베이스의 일부를 보여주고 있으며⁽⁹⁾, Table 5는 스팀 터빈 발전기에 대한 데이터베이스의 일부로서⁽¹⁰⁾, 발생할 수 있는 대표적 진동들의 특성을 주파수, 발생속도, 진폭, 위상 특성 등으로 분류한 항목들의 인과관계를 나타내고 있다.

Table 4 A part of data-base for compressor

Rule 1	If predominant frequency is 1x, and amplitude(of vibration) radial, and location rotor Then problem is unbalance with belief 0.7
Rule 2	If predominant frequency is Nx, and amplitude radial Then problem is mechanical looseness with belief 0.5
Rule 3	If predominant frequency direction is axial, and predominant frequency is synchronous Then problem is misalignment with belief 0.6
⋮	⋮

Table 5 A part of data-base for steam turbine

Rule 1	If 주파수 = 1x, and 발생운전속도 = 전속도, and 진폭변화 = 불변, and 위상변화 = 안정, and 운전조건/상태변화 = 회전수 Then problem is unbalance with belief 1.0
Rule 2	If 주파수 = 위험속도 and 1/2x or 1/3x or 1/4x or 0.3~0.8x and 발생운전속도 = 위험속도이하, and 진폭변화 = 급증 or 불규칙, and 운전조건/상태변화 = 회전수 or 부하 or 회전자의 조립/끼워 맞춤 or 기동운전 시 Then problem is hysteresis whirl with belief 1.0
Rule 3	If 주파수 = 1/2x or 1/3x or 1/4x or 0.3~0.8x and 발생운전속도 = 위험속도의 3배, and 진폭변화 = 급증 or 불규칙, and 운전조건/상태변화 = 회전수 or 기동운전 시 Then problem is looseness with belief 1.0
⋮	⋮

Table 3 A part of normalized Sohre's chart

	Resonant Freq.	40~50%	50~100%	1X	2X	Higher Multiples	1/2X	1/4X	Lower Multiples	Odd Freq.	Very High Freq.
Initial unbalance	5/105			90/105	5/105	5/105					
Permanent rotor bow	30/130			90/130	5/130	5/130					
Temporary rotor bow	20/120			90/120	5/120	5/120					
Casing distortion	10/120	10/120	10/120	60/120	20/120	10/120					
Foundation distortion		20/100		40/100	30/100					10/100	
Seal rub	10/100	10/100	10/100	20/100	10/100	10/100			10/100	10/100	10/100
Misalignment	5/125	10/125		30/125	60/125	10/125					10/125
Journal & Bearing eccentricity	60/160			40/160	60/160						
Casing & Support looseness	50/180	50/180		30/180						50/180	
Gear inaccuracy or damage						20/100				20/100	60/100
Coupling inaccuracy or damage	10/260	20/260	10/260	20/260	30/260	10/260				80/260	80/260
Critical speed	100/200			100/200							
Oil whirl	30/100	70/100									

이러한 규칙 형태의 지식 구조는 모듈화 된 진단 시스템 구현이 가능하기에 새로운 지식이나 사례가 발생하였을 경우 데이터베이스에 추가하기 쉬운 장점이 있다.

4. 진단 알고리즘

4.1 프레임 기반 진단

불평형, 축정렬 불량, 위험 속도 등과 같은 대부분의 회전기에서 발생할 수 있는 일반적인 결함들로 구성되어 있는 Sohre's chart 모듈을 사용하여 1차 진단 결과를 추론한다. 입력되는 신호로부터 식 (2)의 퍼지 연산을 통해 각각의 결함에 대한 신뢰도를 산출한다.

$$A \cdot B = \{(x, \mu_{A \cdot B}(x)) \mid x \in U\},$$

$$\sum_{x=1}^{11} \mu_{A \cdot B} = \sum_{x=1}^{11} \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (2)$$

식 (2)의 “·”은 확률곱(Probabilistic Product)이라 하며, 퍼지 집합 A와 B의 교집합을 확률적 개념을 적용하여 멤버십 정도의 곱으로 정의한 것이다. 즉, A는 입력신호로 사용되는 주파수 성분들의 집합이고, B는 Sohre's chart의 각 결함과 특정 주파수 성분들과의 상관관계를 나타내는 집합으로 구성된다. 이 연산은 현재 입력되는 주파수 성분들에 의해 각 결함들의 주파수 성분에 확률적인 가중치를 주는 것을 의미한다. 연산을 통해 가중치가 부가된 11가지의 주파수 성분들의 값을 모두 더하면 각각의 결함에 대한 신뢰도가 구해진다.

Table 6은 정규화 된 Sohre's chart 중 “Seal Rub” 결함의 신뢰도 산출 결과를 퍼지 입력과 기존의 비퍼지 입력에 대해 비교해 본 결과이다. 퍼지 집합 A는 멤버십 함수에 의해 한계값 이하에 대한 입력에 대해서도 정량적

인 값을 갖지만, 일반 집합 A'은 한계값 이하에 대한 입력력을 모두 0으로 정의하고 있다. A'에 비해 A가 B의 패턴과 더욱 비슷하게 입력되므로 결과적으로, 신뢰도 산출 결과에서도 나타나듯이 각각 78%와 30%로서 진단의 정확성이 향상되었다.

Table 6 Diagnosis example of "Seal Rub" based on Sohre's chart

A	{ 0.6 0.5 0.9 1 0.9 0.7 0 0.2 0.7 0.5 1 }
A'	{ 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 }
B	{ 0.1 0.1 0.1 0.2 0.1 0.1 0 0 0.1 0.1 0.1 }
Belief(A)	$\sum(\mu_A \cdot \mu_B) = 0.78$
Belief(A')	$\sum(\mu_{A'} \cdot \mu_B) = 0.3$

4.2 규칙 기반 진단

규칙 형태는 가장 널리 알려진 지식 표현 방법 중의 하나이다. 이는 If 구문의 조건이 만족되는 상태이면 Then 구문이 논리적으로 참이 되는 형태이다. 기존의 이러한 규칙 형태에서의 진단은 If 구문을 100% 만족하는 경우에 한해서 그 결과를 도출할 수 있었다. 따라서 주요 결합 원인이 추론에서 누락되거나 상대적으로 오진의 가능성이 높은 단점이 있었다. 이에 본 논문에서는 Fig. 2(b)의 멤버쉽 함수를 적용한 입력 신호를 If 구문에 적용하여 조건을 100% 만족하지 않는 경우에 대해서도 0이 아닌 값으로 결과를 산출할 수 있도록 하였다. 이와 같이 If 구문에서 연산된 값은 Then 구문에서의 결합의 신뢰도에 곱해지는 가중치로 사용된다.

$$\begin{aligned} \text{new belief} &= \text{weight} \times \text{belief}, \\ \text{weight} &= \min(s_1, s_2, \dots, s_n), \end{aligned} \quad (3)$$

(n: The symptoms number)

Table 7은 압축기 타입에 관한 규칙 형태의 데이터베이스 중 "Unbalance"결함에 대한 신뢰도를 퍼지 입력과 비퍼지 입력에 대해 비교해 본 결과이다. 식(3)과 같이 S₁, S₂, S₃ 는 If 구문에서 'and'로 연결된 각 증상들을 나타내고, 가중치는 이 증상들의 최소값으로 구해지며 새롭게 산출되는 신뢰도는 Then 구문에 주어진 기존의 신뢰도에 가중치를 곱하여 구해진다. 기존의 비퍼지 입력에 대한 결과로는 If 구문의 1x 성분이 한계값을 넘어야만 가중치를 1로 갖게 되고 0.7이라는 신뢰도의 "Unbalance"라는 진단 결과가 산출된다. 이에 비해 퍼지 멤버쉽 함수가 적용된 1x 성분의 입력은 한계값 이상일 경우에 대해서는 비퍼지 입력의 결과와 동일한 결과를 산출하며, 한계값 이하의 값에 대해서도 0.8, 0.3과 같이 정량적인 값

으로 활용 되어지고, 식(3)의 연산과정을 통해 새로운 신뢰도를 산출하게 된다. 결과적으로 한계값을 근소하게 밀도는 만성적인 결함이나 점진적으로 증가하는 결함 형태의 예지와 같이, 기존의 방법에서 정상이라고 판단되었던 오진의 가능성을 개선할 수 있었다.

Table 7 Diagnosis example of "Unbalance" using rule base for compressor

If 'predominant freq.=1x' and 'amplitude radial' and 'location rotor' then problem is 'Unbalance' with belief 0.7						
	S ₁	S ₂	S ₃	weight	result	new belief
	1x	radial	rotor	min(S ₁ , S ₂ , S ₃)		weight × belief
Non Fuzzy Input	1	1	1	1	Unbalance	0.7
	0	1	1	0	-	-
Fuzzy Input	1	1	1	1	Unbalance	0.7
	0.8	1	1	0.8	Unbalance	0.56
	0.3	1	1	0.3	Unbalance	0.21

4.3 최종 진단

Sohre's chart 모듈을 사용하여 구해진 진단 결과와 기계 종류별 규칙 모듈을 사용하여 구해진 진단 결과에서 각각 상위 5가지 결과를 바탕으로 최종 상위 5가지의 진단 결과를 산출한다. 이에 두 가지의 결과 중 중복되는 결합은 중복되지 않은 결합에 비해 신뢰도가 높게 나와야 함은 당연하다. 중복되는 결합에 대하여 그만큼의 가중치를 부가하기 위해 식 (4)의 Yager합 연산을 적용하였다.⁽¹¹⁾

$$\begin{aligned} A \cup B &= \{ (x, \mu_{A \cup B}(x)) \mid x \in U \}, \\ \mu_{A \cup B}(x) &= \min \{ 1, (\mu_A^w + \mu_B^w)^{1/w} \}, w \in (0, \infty) \end{aligned} \quad (4)$$

퍼지 합 연산에는 대표적으로 대수합, 한계합, Zadeh 합, Yager합 등이 있으며, Fig. 3에서 각각의 합 영역을 도식화하여 나타내었다. Fig. 3(c)의 대수합은 확률합이라고도 하며, 확률적인 개념을 포함하고 있어서 두 결과 사이의 종합적인 결과를 얻기 위하여 많이 사용된다. 그러나 데이터베이스의 추가나 수정 시 가중치의 수정이 불가능한 단점이 있다. 이에 매개 변수 w를 이용한 Yager합 연산을 사용하여 가중치의 조절이 가능하도록 하였으며, 적절한 w를 선택하여 원하는 가중치를 설정할 수 있다. w = 1일 때는 Fig. 3(a)의 한계합과 동일한 결과를 얻을 수 있고, w = ∞일 때는 Fig. 3(e)의 Zadeh합과 동일한 결과를 얻을 수 있다. 결합 진단에 있어서, 산출된 결과들 중 중복된 것에 대한 중요도 즉, 가중치를 어떻게 부여하느냐가 중요한 관건이다. 어느 정도의 주관적인 판단이 개입

될 수는 있지만, 데이터베이스들 간의 유사성이나 지식의 양, 신뢰도의 정확성 등이 고려되어야 한다. 본 논문에서는 데이터베이스로 구축된 규칙 모듈에서의 규칙의 개수와 정확성 등을 고려하여 Fig. 3(d)와 같이 $\omega=2$ 로 설정하였다.

용한 결과를 집합 A와 B로 나타내었다. 각각 5가지의 결과를 보여주며, 이 중 중복된 3가지의 결합에 대하여 $\omega=1, 2, \infty$ 일 때의 결과를 산출하여 비교해 보았으며, $\omega=2$ 일 때의 결과를 사용하였다. 결과적으로 새로운 신뢰도를 가지는 상위 5가지의 최종 진단 결과가 산출된다.

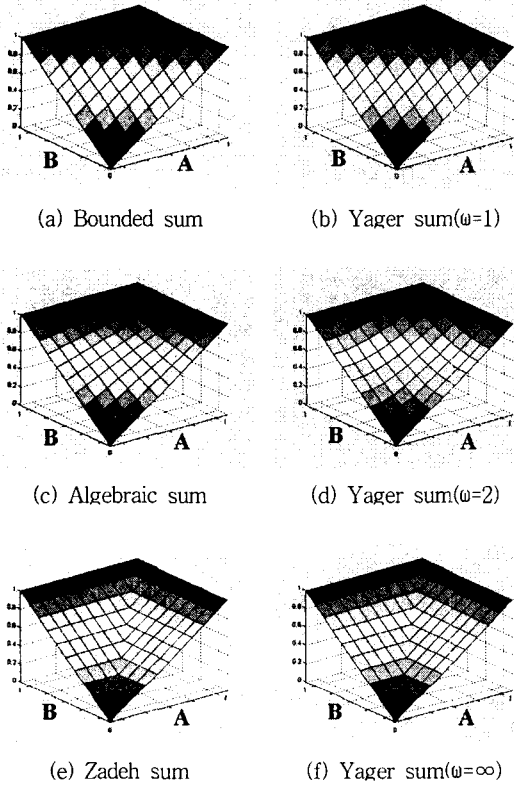


Fig. 3 A typical fuzzy sums

Table 8 Final diagnosis results by weight, ω

	A	B	AU3		
			$\omega=1$	$\omega=2$	$\omega=\infty$
Unbalance	0.9	0.6	1	1	0.9
Critical Speed	0.7	0.5	1	0.86	0.7
Misalignment	0.4		0.4	0.4	0.4
Foundation Distortion	0.3	0.4	0.7	0.5	0.4
Piping Force	0.2		0.2	0.2	0.2
Casing Distortion		0.4	0.4	0.4	0.4
Oil Whirl		0.3	0.3	0.3	0.3

Table 8은 Yager합 연산을 적용하여 중복된 결과에 가중치가 부가된 결과를 보여준다. "Unbalance"결합에 대하여 Sohre's chart 모듈과 기계 종류별 규칙 모듈을 사

5. 회전기 시뮬레이터를 통한 진단 사례의 구현

본 논문에서 제안한 진단 알고리즘의 성능을 확인하고자 산업용 회전 기계를 모사한 실험 장치를 제작하여 인위적으로 결함을 발생시킨 실험을 수행하였다. Fig. 4의 실험 장치는 유도전동기, 기어 박스, 커플링, 볼 베어링 및 저널 베어링 요소, 실 요소, 정하중 기기 등이 유닛화 되어 있어, 실험 목적에 맞게 재구성성이 용이하며, 시스템의 각 유효 부위에 공급 유량 제어, 부가 하중의 제어, 축의 불평형량 및 정렬 불량도 등의 조절이 가능하도록 설계되었다.⁽¹²⁾ 또한 time response, orbit, spectrum, trend 등의 그래프가 실시간으로 display되고, 전문가 시스템 진단 알고리즘이 내장되어 있는 회전 기계용 상태 진단 소프트웨어인 "i-CMS"를 자체 개발하여 사용하고 있으며⁽¹³⁾, 본 퍼지 전문가 시스템 알고리즘 모듈을 추가하여 실험 결과 분석에 사용하였고, 불평형 사례와 공진 사례에 대한 실험을 수행하여 그 결과를 확인해 보았다.

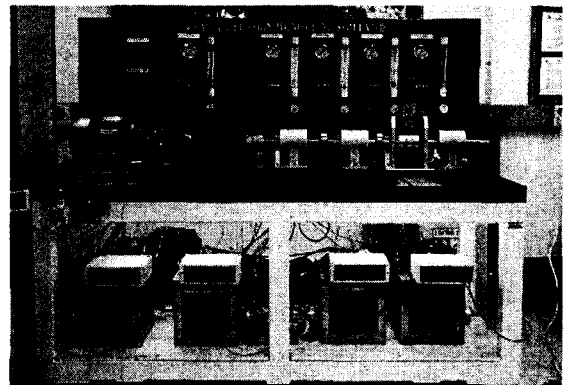


Fig. 4 A view of integrated vibration & wear simulator

5.1 불평형(Unbalance) 사례

모든 회전 기계는 그 정도의 차이는 있으나 다소간의 불평형량이 존재하고 있으며 이 불평형량은 기계의 소음과 진동을 발생시키는 주 원인이 되고 있다. 특히 고속 회전기계의 경우 불평형량에 의한 진동은 기계의 수명과 성능을 저하시키며 불시에 발생하는 기계 고장의 주 원인이다. 이러한 불평형량에 의해, 기하학적 중심(축 중심)과

질량 중심이 일치되지 않아 발생하는 현상을 모사한 실험을 수행하여, 이벤트 전/후의 결과를 바탕으로 본 논문에서 제안한 진단 알고리즘에 적용하여 보았다. 또한 그 결과를 퍼지 입력과 비퍼지 입력에 대하여 비교해 보았으며, 프레임 기반 진단, 규칙 기반 진단 및 최종 진단 결과들에 대해서도 비교해 보았다.

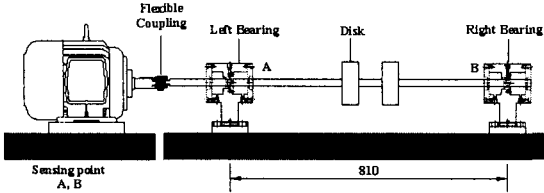


Fig. 5 Schematic view of unbalance test

Fig. 5와 같이, 직경 17mm인 축을 사용하여, 양 단을 저널 베어링으로 지지하고, 중심에 불평형량을 조절할 수 있는 두 개의 디스크를 부착하였다. 1차 임계 속도인 2100rpm을 넘긴 3500rpm의 속도로 운전하며, 불평형량을 단계적으로 부가하였다.

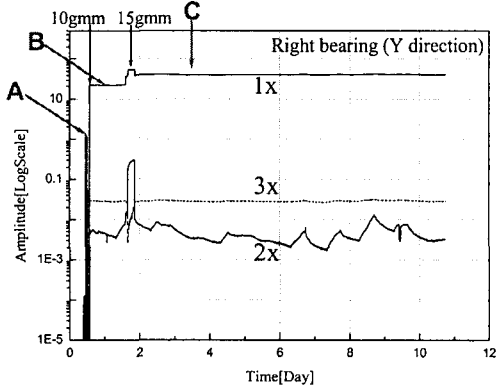
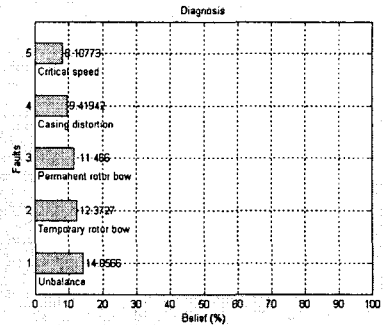


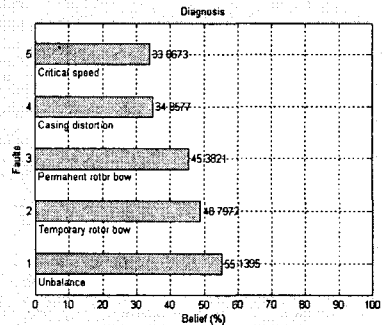
Fig. 6 A trend of vibration frequencies at a right bearing under the unbalance test

Fig. 6은 불평형 실험에서의 파워 스펙트럼 트렌드를 나타낸 그림으로, 1x, 2x 및 3x 성분들의 시간에 따른 변화 추이를 나타낸다. A는 초기 상태이고, B와 C는 각각 10gmm, 15gmm의 불평형량이 부가된 상태이다. Fig. 7은 A, B, C에서의 진단 결과를 보여준다. 초기 상태인 A에 대한 진단 결과에서는 결함들의 신뢰도 값이 10안팎의 값을 보이고 있고, 이것은 불평형량이 부가되지 않은 초기 상태를 잘 나타내주고 있다. 각각 10gmm와 15gmm의 불평형량이 부가된 B, C에서의 진단 결과를 보면, 10gmm에서 15gmm로 불평형량을 증가시키기에 따라 예상 결함 상위 5가지 결과들의 신뢰도가 증가함을

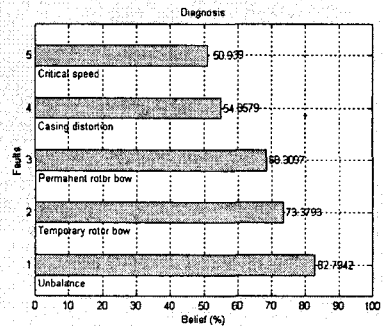
알 수 있다. 또한 실험 목적에 맞는 "Unbalance"라는 정확한 진단 결과를 도출해 내었다. 또한 10gmm의 불평형량이 부가된 B에 대한 진단 결과에서 보여지는 "Unbalance"의 신뢰도는 55%이므로 아직 심각한 이상이 발생하지 않은 단계임을 알 수 있고, 특히 55%라는 신뢰도의 수치적인 의미보다 "Unbalance"라는 결함의 형태로 진행될 가능성에 대한 예지를 할 수 있다는 데 의의가 있다.



(a) Diagnosis result at A



(b) Diagnosis result at B



(c) Diagnosis result at C

Fig. 7 Diagnosis result of "Unbalance"

Table 9 A comparison between diagnosis result at "C" of unbalance test using non-fuzzy and fuzzy input

	Non-fuzzy input	Fuzzy input
Frame-based Diagnosis	70	74
Rule-based Diagnosis	0	66
Final Diagnosis	70	83

그리고, Table 9에서와 같이 퍼지 입력에 의한 결과가 비퍼지 입력에 의한 결과보다 신뢰도가 전체적으로 높게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존에 누락되었던 한계값 이하의 입력 성분들이 퍼지 멤버십 함수에 의해 정량적으로 활용된 것으로 볼 수 있다. 또한 퍼지 입력에 대해서는 프레임 기반 진단 결과와 규칙 기반 진단 결과를 바탕으로 가중치가 부가된 새로운 신뢰도를 가지는 최종 진단 결과가 산출된 것을 알 수 있다.

5.2 공진(Resonance) 사례

모든 동적인 시스템은 일련의 특성 또는 정규모드를 가지며, 각 모드는 진동의 특정 고유 진동수와 일치한다. 어떤 정규모드가 기계의 운전 조건에 의해 부가된 조화 가진과 일치할 경우 과도한 진동이 발생하며, 이를 공진이라 한다. 그리고 이 때의 회전 속도를 일반적으로 임계 속도라고 한다. 회전 기계에서는 이러한 공진을 피하기 위하여 설계단계에서 이를 충분히 검토하며, 일반적으로 허용 운전 속도를 임계 속도의 70% 이내로 설정한다. 하지만 장기간 운전 중인 기계는 열변형이나 마모 등의 원인으로 시스템의 특성이 바뀔 가능성이 있으며, 이에 따라 원하지 않는 공진 영역에서의 운전이 되어 기계의 파손 및 인명 피해를 초래할 수도 있다. 이러한 공진 현상을 임의로 모사한 실험을 수행하여, 본 논문에서 제안한 퍼지 전문가 시스템 알고리즘에 적용해 보았으며, 그 결과를 퍼지 입력과 비퍼지 입력 및 프레임 기반 진단, 규칙 기반 진단, 최종 진단에 대하여 비교, 검증해 보았다.

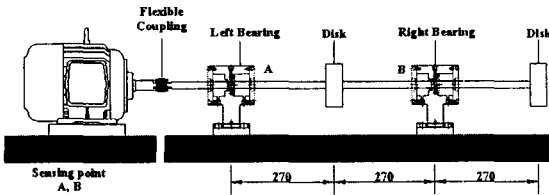


Fig. 8 Schematic view of resonance test

Fig. 8과 같이, 직경 17mm인 축을 사용하여, 두개의 저널 베어링으로 지지된 중심과 오른쪽 끝단에 디스크를

부착하였다. 1차 임계 속도는 2040rpm이며, 1500rpm의 초기 상태로 실험을 시작하여, 약 2시간 후에 임계 속도 근처인 2000rpm으로 속도를 올렸다.

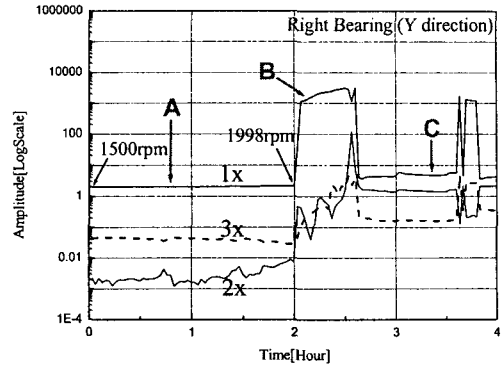
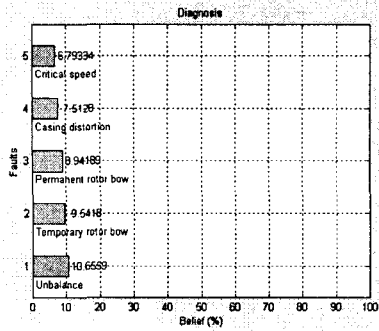
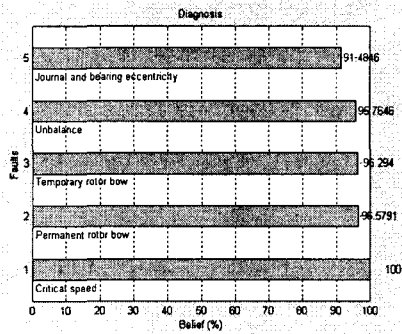


Fig. 9 A trend of vibration frequencies at a right bearing under the resonance test

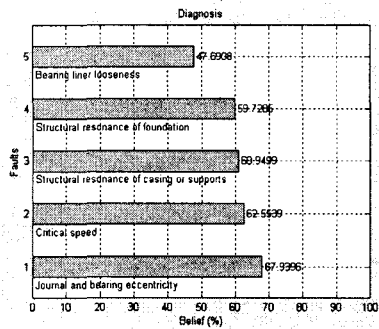
Fig. 9는 공진 실험에서의 파워 스펙트럼 트렌드를 나타낸 그림으로, 1x, 2x 및 3x 성분들의 시간에 따른 변화 추이를 나타낸다. A는 초기 상태이고, B는 시스템의 공진 속도보다 약간 낮은 2000rpm으로 증가 시켰을 때의 상태이며, C는 공진의 영향으로 시스템의 변화에 의해 공진점을 넘어선 안정화 상태이다. Fig. 10은 A, B, C에서의 진단 결과를 보여준다. 초기 상태인 A는 회전 기계의 일반적인 정상 운전 영역의 기준인, 시스템의 1차 임계 속도의 약 70%에 해당하는 조건으로서 진단 결과에서는 결함들의 신뢰도 값이 10안팎의 값을 보이고 있다. B는 약 40분간 공진이 지속된 상태이며, 진단 결과에서는 "Critical Speed"라는 정확한 진단을 하였다. 이 때의 신뢰도 값이 100%이므로 경보레벨을 넘어서서 상당히 위험한 상태로 운전되고 있음을 알 수 있다. 나머지 결과들도 매우 높은 수치를 보이고 있으며, 이것은 공진 속도로 운전이 지속됨에 따라 부가적으로 발생하는 결함들이 증가함을 의미한다. C에서는 공진 실험 조건과는 좀 차이가 있어 보이는 "Journal & Bearing eccentricity"라는 결과를 진단하였다. 이는, C의 상태는 B와 동일한 운전 속도이지만, 급격한 진동에 의해 마모량이 증가하여 베어링 간극이 커진 상태이며 그 결과, 시스템의 공진점이 낮아져 공진 속도를 넘어간 형태의 운전 조건이 되는 것으로 볼 수 있다. 이는 초기 베어링 간극과 실험 후에 측정된 베어링 간극을 비교한 결과에서 유추할 수 있다. 즉, 약 40분간 지속된 공진에 의해 축이 시스템의 1차 모드(굽힘 모드) 형태로 변형이 되었으며, 베어링 또한 초기의 진원형 모양이었던 것이 마모되어 변형된 것을 알 수 있다.



(a) Diagnosis result at A



(b) Diagnosis result at B



(c) Diagnosis result at C

Fig. 10 Diagnosis result of "Resonance"

Table 10 A comparison between diagnosis result at "B" of resonance test using non-fuzzy and fuzzy input

	Non-fuzzy input	Fuzzy input
Frame-based Diagnosis	90	96
Rule-based Diagnosis	40	85
Final Diagnosis	91	100

Table 10에서는 불평형 사례와 마찬가지로, 퍼지 입력에 의한 결과가 비퍼지 입력에 의한 결과보다 신뢰도가 높게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 또한 프레임 기반 진단 결과와 규칙 기반 진단 결과를 바탕으로 가중치가 부가된 새로운 신뢰도를 가지는 최종 진단 결과가 산출된 것을 알 수 있으며, 이처럼 중복된 결과에 가중치를 부가하는 수치적인 연산은 중복되지 않은 결합에 비해 그 신뢰도가 높다는 의미이며, 비전문가로 하여금 도출된 예상 결합에 대한 현재의 기계 상태를 가장 잘 인식시킬 수 있는 방법이라 사료된다. 이와 같이 본 논문에서 제안하는 퍼지 전문가 시스템 알고리즘의 적용 결과가 실험 전/후의 상태를 분석한 결과를 신뢰성 있게 포괄하고 있음을 검증하였다.

6. 결론

본 논문에서는 회전 기계의 이상 및 결함을 효율적, 효과적으로 진단하기 위하여 퍼지 이론을 적용한 전문가 시스템의 추론 방법을 모색하고, 그 방법을 사용하여 퍼지 전문가 시스템을 개발하였다. 퍼지 멤버십 함수를 사용하여 한계값 이하의 정보를 정량적으로 활용함으로써 기존의 전문가 시스템에서의 문제점이었던 입력 정보의 누락이나 오진의 가능성을 개선할 수 있었으며, 전문가 시스템의 가장 중요한 요소인 데이터베이스를 기계 종류별로 모듈화 하여 사용함으로써 신뢰성 있는 진단이 가능하였다. 이 시스템의 성능을 모의 실험결과로 평가함으로써 회전 기계의 이상 진단 문제에 대한 퍼지 전문가 시스템의 적용 가능성을 타진하였다.

본 연구를 통해 개발된 퍼지 전문가 시스템은 실제 산업 현장에서 사용되고 있는 기존의 상태 진단 시스템에 추가되어 모니터링 및 상태 진단에 사용되고 있으며, 이것을 통해 설비의 사고 예방 뿐 만 아니라, 진단의 신뢰성 향상을 통한 운전 효율의 증대로 보수 유지비의 절감도 예상된다.

후 기

본 논문은 KIST-2000 연구프로그램 사업의 지원으로 이루어진 것으로, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 양보석, 전순기, 김호중, 1996, "퍼지이론을 이용한 회전 기계의 진동진단법", 대한기계학회논문집(A), 제20권 제5

호, pp. 1411~1418.

(2) John W. Sawyer, 1980, Sawyer's Turbomachinery Maintenance Handbook, Turbomachinery International Publications.

(3) Tim Talyor, and David Lubkeman, 1989, "Applications of Knowledge-based Programming to Power Engineering Problems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 1, pp. 345~352.

(4) Chun Siu, Qiang Shen, and Robert Milne, 1997, "A Fuzzy Expert System for Vibration Cause Identification in Rotating Machines", Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 1, pp. 555~560.

(5) ISO Standard : "Mechanical Vibration of Non-Reciprocating Machine-Measurements on Rotating Shafts and Evaluation-", ISO/IS 7919, 1996.

(6) ISO Standard : "Mechanical Vibration- Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts-", ISO/IS 10816, 1996.

(7) Chin-Teng Lin, and C. S. George Lee, 1996, Neural Fuzzy Systems, Prentice-Hall, Inc.

(8) 이재규, 최형림, 김현수, 서민수, 주석진, 지원철, 1998, 전문가 시스템 원리와 개발, 법영사.

(9) Rahul Nahar, 1989, An Expert System for Vibration Fault Diagnosis of Turbomachinery, MS thesis, ROMAC, Univ. of Virginia.

(10) 이안성, 홍성욱, 김호중, 이현, 1995, "스팀터빈 발전기 진동진단 시스템 개발", 한국소음진동공학회지, 제5권, 제4호, pp. 543~554.

(11) 채석, 오영석, 1997, 퍼지이론과 제어, 청문각

(12) 백두진, 이용복, 김승중, 윤의성, 김창호, 공호성, 장건희, 2002, "마멸현상에서 발생하는 회전기 시스템의 진동, 마모, 온도의 상관관계 연구", 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 453~459.

(13) Yong-Bok Lee, Tae-Wook Lee, Seung-Jong Kim, Chang-Ho Kim, and Yun-Cheol Rhim, 2001, "A Hybrid Knowledge Based Expert System for Rotating Machinery" The 14th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Manchester, UK, pp.689~696.