

## 다중 센서를 이용한 회전 기계의 진동 진단에 관한 연구

### Vibration diagnosis for a rotating machinery using multiple sensors

°김기환\*, 박영준\*, 윤재용\*, 김재훈\*

\* 삼성중공업 중앙연구소 메카트로개발센터

**Abstracts** : In this paper, the vibration diagnosis system of a rotating machinery is introduced, in which the vibration signals of multiple accelerometers and displacement sensors are used combinedly as input parameters and their characteristics of the vibration response and mutual relationships between each sensor signal are considered to improve the reliability of the diagnosis system. The fuzzy logic is utilized for inferencing the fault from the vibration signal patterns.

**Keywords** : vibration, diagnosis, rotating machinery, fuzzy, sensor

#### 1. 서론

일반적으로 기계 시스템의 동력 전달은 회전 요소를 통해 이루어 지므로, 회전 요소의 이상 진동은 전체 시스템의 동작에 매우 중요한 영향을 미친다. 따라서, 기계 시스템의 회전 요소에 관한 적절한 유지(Preventive or Predictive Maintenance)를 위한 감시 및 진단의 지능화는 전체 시스템의 자동화 및 지능화에 매우 핵심적인 요소이다. 특히, 이는 설비의 관점에서 수명 및 생산성을 증가시키고, 설비의 안전과 고장 방지 등을 위해 필수적인 요소라 할 수 있다.

회전 기계의 진동 진단을 위해서 일반적으로는 변위 센서와 가속도 센서 중에 한 가지 센서를 선택하여 진단을 수행한다. 그러나, 각각의 센서는 그 주파수 응답 특성과 설치 조건이 다르므로 동일한 이상 진동 원인에 반응하는 응답에 차이가 있다. 따라서, 두 종류의 센서를 동시에 적용함으로써 진단의 신뢰성을 높일 수 있다. 또한, 회전축은 축을 지지하는 베어링의 종류에 따라서 진동 특성에 큰 차이가 있으므로 그에 따라 이상 진단의 판단 기준이 달라져야 한다.

본 연구에서는 여러 개의 변위 센서와 가속도 센서의 진동 신호를 동시에 받아 들여 센서의 고유 응답 특성과 상호간의 관계를 고려함으로써 진단의 신뢰성을 향상시킨 회전 기계의 진동 진단 시스템을 개발하였다. 또한 본 시스템은 센서의 설치 조건을 입력 받아 볼 베어링과 저어널 베어링을 구별하여 각각의 진단을 수행할 수 있도록 하였다. 이러한 회전 기계의 진동 진단을 위해서는 전문가의 지식이 매우 유용하므로 전문가의 언어적 지식을 표현할 수 있는 퍼지 논리를 적용하였다. 이를 위하여 변위 센서와 가속도 센서에 관한 각각의 멤버십 함수와 추론규칙을 작성하였고, 여러 개의 센서 신호 상호 간의 가중치를 주기 위한 가중치표를 수립하였다. 또한, 본 시스템의 유용성을 판단하기 위한 간단한 회전 기계 실험 장치를 구성하여 본 시스템의 적용 결과를 제시한다.

#### 2. 진단 시스템의 구성

그림 1은 본 연구에서 구성한 진단 시스템의 개략도이다. 그림

과 같이 진단 시스템은 퍼지 추론 기법을 이용한 1차 진단 부분과 이 결과들을 종합하여 최종 진단을 내리는 2차 진단 부분으로 구성된다. 1차 진단에서는 회전 속도와 각 센서의 진동 신호 및 설치 정보(설치 방향, 센서의 종류, 측정 위치)를 입력 인자로 하여 퍼지 추론을 통해 각각의 센서의 개별적인 진단 결과를 제시하며, 2차 진단에서는 전문가의 지식을 기반으로 각 결합의 주파수 영역, 입력된 센서의 개수, 센서의 종류 등을 종합적으로 고려한 가중치를 적용하여 1차 진단의 개별적인 결과들로부터 최종적인 이상 원인을 제시한다.

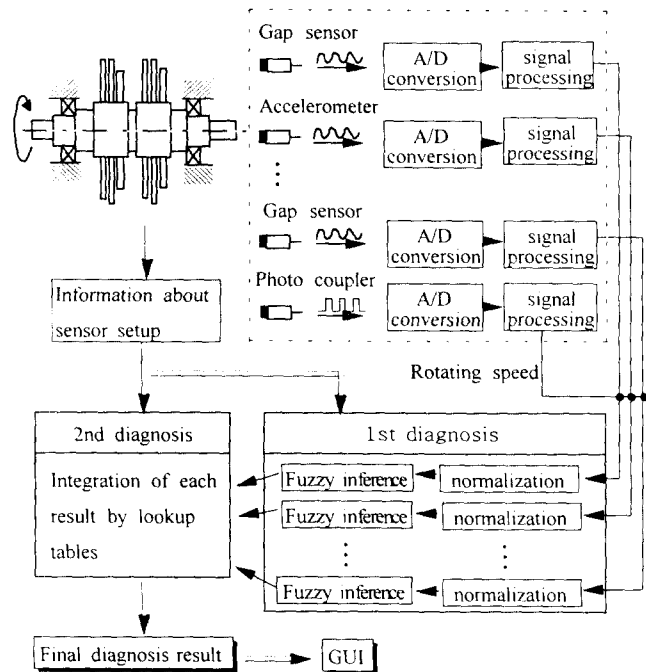


그림 1 회전 기계의 진동 진단 시스템의 구성  
Fig.1 Configuration of the vibration diagnosis system for a rotating machinery

##### 2.1 진동 신호의 입력

변위 센서는 회전하고 있는 축의 변위를 직접적으로 측정하

여 회전축의 거동에 관한 정보를 얻는데 유리하며, 가속도 센서는 축의 지지부나 베이스에 부착되므로 축을 지지하는 베어링과 하우징(Housing)부에 관한 진동 정보를 얻는데 유리하다. 2차 진단에서 각 센서 신호의 1차 진단 결과들을 종합하는 과정에서, 임의의 수의 센서들의 1차 진단 결과들의 조합에 관한 모든 가중치를 데이터 베이스화할 수는 없으므로 본 시스템에서는 가속도계와 변위 센서 각각 최대 4개의 신호를 입력 받을 수 있도록 한다.

또한 축의 회전 속도 변화는 축에 작용하는 가진력과 축을 지지하는 강성 등을 변화시켜 전체 시스템의 진동 특성이 변화함으로 회전 속도를 진단의 중요한 기준 신호로 받아 들여야 한다. 본 시스템에서는 회전 속도의 측정을 위해 포토 커플러(Photo coupler)나 엔코더(Encoder)를 사용할 수 있다.

### 2.2 1차 진단

1차 진단은 각각의 센서 신호에 대하여 그림 2와 같은 퍼지 전문가 시스템으로 구성한다. 일반적으로 퍼지 논리는 시스템 특성이 복잡하여 기존의 정량적 방법으로 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고, 부정확, 불확실한 경우에 기존의 논리 체계에 의한 추론보다 우수한 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서, 여러 원인이 복합적으로 결합되는 회전축 진동과 같이 이상 원인의 진단에 전문가의 오랜 경험을 필요로 하는 경우에 그 적용이 적합하다.

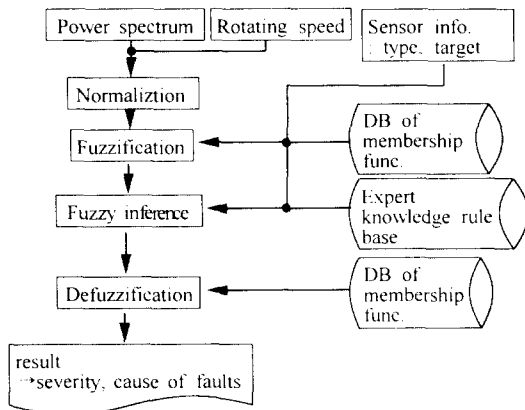


그림 2 퍼지 전문가 시스템의 구성

Fig. 2 Configurator of the fuzzy expert system

#### 2.2.1 정규화(Normalization)

표 1 입력변수의 종류 및 정의

TABLE 1 Input variables

No.	기호	변수	Definition
1	SP	$I'$	회전체의 회전속도 (rpm)
2	MAG	$M_{1X}$	회전속도의 주파수(1X)에서의 진폭
3	Q1	$M_{Q1}$	1X의 0-40% 주파수에서의 진폭 평균
4	OW	$M_{OW}$	1X의 40-50% 주파수에서의 진폭 최대값
5	Q2	$M_{Q2}$	1X의 50-60% 주파수에서의 진폭 평균
6	2X	$M_{2X}$	2X의 주파수대의 진폭
7	3X	$M_{3X}$	3X의 주파수대의 진폭
8	4X	$M_{4X}$	4X의 주파수대의 진폭
9	B1	$M_{B1}$	볼 베어링 결함 주파수 1에서의 진폭
10	B2	..	볼 베어링 결함 주파수 2에서의 진폭

표 2 출력 변수의 종류 및 정의

TABLE 2 Output variables

No.	기호	변수	Definition
1	MA	$D_{MA}$	Misalignment
2	UB	$D_{UB}$	Unbalance
3	LS	$D_{LS}$	Loosness
4	BD	$D_{BD}$	Ball bearing Defect
5	RB	$D_{RB}$	Rubbing
6	OW	$D_{OW}$	Oil Whirl
7	SHI	$D_{SHI}$	Subharmonic Instability

퍼지 진단기의 출력변수로는 회전축 시스템의 결함이 되고, 입력변수로는 회전체의 결함 진단을 위해 전문가가 참조하는 시스템 상태에 관한 정보인 회전속도와 변위 센서, 가속도계에 의해 측정된 회전체의 상태값이 된다. 회전축 진동 신호의 특성은 시간 영역에서보다 주파수 영역에서 용이하게 관찰될 수 있으므로, A/D변환된 센서 신호를 FFT처리하여 각 주파수 성분으로 분해한 후 회전체의 결함과 관련이 있는 주파수 성분들의 값을 입력변수로 하였다. 표 1은 이러한 입력변수들의 종류와 정의를 나타내며, 표 2는 퍼지 진단기로부터 얻고자 하는 진단의 결과로서 퍼지 출력 변수의 종류 및 정의를 보여 준다.

회전체의 회전속도는 그 응용에 따라 매우 다양한 값을 갖으므로, 그 절대값을 직접 퍼지 추론기의 입력변수로 사용하기에는 부적합하다. 본 연구에서는 입력된 대상 시스템의 최대 회전속도 ( $I'_{max}$ )에 대한 현재 운전 회전 속도의 상대적인 비를 퍼지 추론기의 입력변수로 삼았다. 따라서 퍼지 추론기로 입력되는 회전 속도의 값  $\tilde{I}'$ 는 다음과 같이 변환되어진다.

$$\tilde{I}' = G_{I'} \times I' = \frac{I'}{I'_{max}} \quad (1)$$

1X성분은 회전체 진동의 주된 성분이며 회전 속도에 동기하는 성분이므로 그 크기가 진단에 중요한 기준이 된다. 그러나, 시스템의 구성과 운전 조건에 따라 그 절대적인 크기는 변하므로 그 절대값을 직접 입력 변수화할 수 없다. 본 연구에서는 대상 시스템의 경고 수준(warning level)에 해당하는 진폭 크기를 입력받아 그 값에 대한 상대비를 퍼지 추론기의 입력변수로 삼았다. 따라서 퍼지 추론기로 입력되는 1X의 진폭 값  $\tilde{M}_{1X}$ 은 다음과 같이 변환되어진다.

$$\tilde{M}_{1X} = G_{M_{1X}} \times M_{1X} = \frac{M_{1X}}{M_{warning}} \quad (2)$$

위의 SP와 MAG를 제외한 입력변수의 경우에는 그 입력의 절대적인 값보다는 회전체의 회전속도에서의 상대적인 크기의 비율과 형태가 진단에 많은 정보를 주게 된다. 따라서 Q1, OW, Q2, 2X, 3X, 4X, B1, B2은 1X에서의 진폭  $M_{1X}$ 에 대한 비율로서 변환되어진다.

$$\tilde{M}_i = G_{M_i} \times M_i = \frac{M_i}{M_{1X}} \quad (3)$$

$$i = Q_1, OW, Q_2, 2X, 3X, 4X, B1, B2$$

#### 2.2.2 입력변수의 퍼지화(Fuzzyfication)

입력변수들은 퍼지 추론규칙의 언어적 표현을 위하여 그 값에 따라 적절한 언어적인 형태로 표현하여야 한다. 본 연구에서는 삼각형의 형상을 갖는 퍼지 소속함수로 각 입력공간을 퍼지 분할

하였다. 이때 각 입력공간에 대한 퍼지 분할을 행한 소속함수는 5개(ZE:Zero, SM:Small, ME:Medium, LA:Large, VL:Very large)의 언어적 값을 갖고 있으며, 입력변수에 따라 분할의 수를 달리 하였다. 대부분의 입력변수는 4개의 소속함수로 분할하였으며, 보다 세밀히 영향을 살필 필요가 있는 변수에 대해서는 5개의 소속함수를, 그 영향이 작은 것은 3개의 소속함수를 사용하였다.

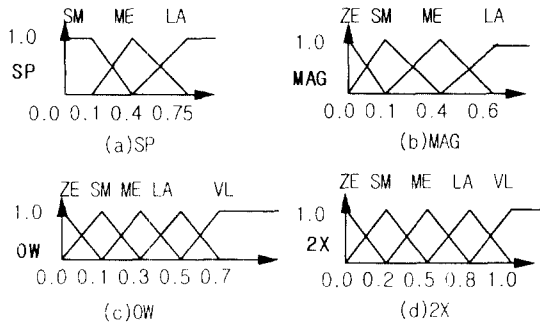


그림 3 저어널베어링에 설치된 변위 센서 신호의 입력 변수별 소속 함수의 예

Fig. 3 Membership functions of the input variables for the gap sensor signal on the journal bearing

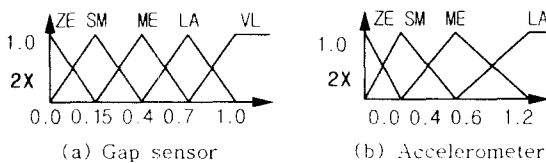


그림 4 볼 베어링에 설치된 센서 종류별 2X 입력 변수에 관한 소속 함수

Fig. 4 Membership functions of the 2X input variable for each sensor type on the ball bearing

그림 3은 변위 센서를 저어널 베어링에 근접하여 설치하였을 때 각 입력 변수들에 대한 퍼지 분할의 예를 보여준다. 회전체의 진동진단에 대한 전문가의 지식을 토대로 구해지는 각 퍼지 소속함수의 중심값은 언어적인 표현으로 바뀌었을 때 그 언어적인 값을 대표하는 것으로서 같은 입력변수라 해도 상황에 따라 다른 값을 가질 수 있다. 측정 센서의 종류, 즉 변위 센서와 가속도 센서에 따라 같은 주파수 성분에 대한 응답 특성이 다르므로 그 중심값의 크기도 달라야 하며, 센서의 설치 위치 즉, 볼 베어링과 저어널 베어링, 회전축에 따라라도 달라지게 된다. 이러한 센서의 설치 조건에 따른 소속함수의 차이를 그림 3.4에서 알 수 있다.

퍼지 진단기의 출력에 대한 소속함수는 회전체 진동의 진단에 대한 결과로써 나타나는 결함이 되며, 결함의 종류는 표2에 나타낸 바와 같이 모두 7개로 구성된다. 각 결함에 대한 소속 함수의 예는 그림 5와 같다.

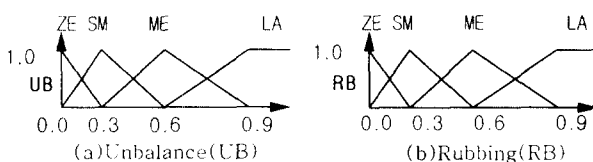


그림 5 추론 결과에 대한 각 결함의 소속함수의 예

Fig. 5 Membership functions of the the faults

### 2.2.3 진단을 위한 퍼지 추론 규칙의 작성

본래는 표1의 10개의 모든 입력 변수를 동시에 고려하여 퍼지 추론 규칙을 작성해야 하나, 그 경우에는 필요한 추론 규칙의 수가 매우 방대해진다. 따라서, 본 연구에서는 표3과 같이 1X성분을 기

준으로 슈퍼하모닉(superharmonic) 성분들(2X, 3X, 4X, B1, B2)로부터 MA, UB, LS, BD에 대한 출력 결과를 구하고, 서브하모닉(subharmonic) 성분들(Q1, OW, Q2)로부터 RB, OW, SHI에 대한 출력 결과를 구한다. 또한 변위 센서와 가속도 센서의 추론 규칙을 구분한다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 두 센서 종류가 이상 신호에 반응하는 특성에 차이가 있기 때문이다.

본 연구에서는 퍼지 추론을 위한 방식으로 Mamdani의 Min-Max 방법을 이용하였다.

표 3 변위 센서에 대한 퍼지추론규칙

TABLE 3 Fuzzy inference rule for a gap sensor

(a) superharmonic

	SP	MAG	2X	3X	4X	B1	B2	MA	UB	LS	BD
R1	SM	ME	ZE	LA	ME	ZE	ZE	SM	ME	SM	ZE
R2	SM	ME	ME	ME	ME	ME	ME	ZE	SM	ZE	SM
R3	SM	ME	ME	LA	ME	ME	ME	ZE	SM	SM	ME

(b) subharmonic

	SP	MAG	Q1	OW	Q2	RB	OW	SHI
R1	SM	SM	LA	SM	VL	ZE	ZE	SM
R2	SM	ME	ME	LA	SM	SM	SM	SM
R3	SM	ME	ME	VL	ME	SM	ME	ZE

### 2.3 2차 진단

대부분의 회전체 이상 원인은 2.2.3절에 서술한 바와 같이 주파수 영역에 구분을 두어 추론할 수 있으나, 특정 이상 원인의 경우에는 해당 특정 주파수 이외의 주파수 영역에도 상당한 영향을 미치는 경우가 있으므로 이러한 경우에는 추론되어진 서브하모닉 영역의 이상 원인과 슈퍼하모닉 영역의 이상 원인에 대하여 가중치를 설정하여 상호 간에 영향을 주도록 한다. 표4와 같이 변위 센서의 경우, 서브하모닉 영역에서 오일 휠(OW)은 그 진동이 시스템의 축 정렬 불량(MA)과 같은 슈퍼하모닉 영역의 다른 이상원인을 유발시키므로, 직접적인 원인인 오일 휠에 비중을 두어 다른 이상 원인의 확률에 가중치를 곱한다.

표 4 변위 센서의 가중치

TABLE 4 Weighting factors for a gap sensor

sub	super	MA	UB	LS
OW	MA	0.8		
OW	UB		0.6	
OW	LS			0.7

이상의 과정을 거친 각 센서들의 개별적인 진단 결과들에 대해 표 5의 예와 같이 변위 센서와 가속도 센서, 각각의 센서 종류별로 그 결과를 종합한다. 센서의 수가 많을수록 판단의 신뢰도를 높일 수 있도록, 입력 센서 수 별로 각 센서에서 추론된 결과의 조합에 대해 서로 가중치를 주어 그 신뢰도를 조절하도록 한다. 예를 들어 변위 센서4개의 입력에서 한 개의 센서에 오일 휠이 추론되고, 나머지 3개의 센서에서 축정렬 불량이 추론되었다면, 오일 휠의 전체 시스템에 대한 영향을 고려하여 축정렬 불량 확률을 조절한다.

최종적으로 변위 센서들로부터 얻어진 진단 결과와 가속도 센서들로부터 얻어진 진단 결과의 상호 비교가 필요하다. 예를 들어 오일 휠(OW)의 경우는 축의 직접적인 거동을 측정하는 변위

센서를 통한 검출이 용이하며, 기계적 풀림(LS)의 경우는 하우징(Housing)에 설치되는 가속도 센서가 유리하므로 이러한 각 센서 종류의 특성을 고려한 표 6과 같은 가중치를 적용하여 최종적인 진단을 내린다.

표 5 복수 변위 센서에 관한 가중치

TABLE 5 Weighting factors for multiple gap sensors

1	2	MA	UB	LS	1	2	3	UB	RB	SUB
MA	BA	0.8			MA	MA	UB	0.7		
LS	BA			0.7	UB	UB	OW	0.8		
UB	OW		0.5		OW	SUB	SUB			0.8

(a) 센서가 2개일 때

(b) 센서가 3개일 때

1번	2번	3번	4번	MA	LS	RB
MA	MA	MA	OW	0.8		
LS	LS	LS	BA		0.8	
RB	RB	OW	OW			0.7

(c) 센서가 4개일 때

표 6 센서 특성을 고려한 가중치

TABLE 6 Weighting factors considering the characteristics of gap sensor and accelerometer

		변위 센서		가속도 센서	
변위	가속도	MA	UB	MA	UB
MA	LS	0.8			
UB	LS		0.8		
UB	MA			0.8	
MA	UB				0.8

이상의 2차 진단의 가중치는 회전체 이상 진단에 관한 전문가에 의하여 작성되며 적용 시스템의 특성에 맞게 수정될 수 있다.

### 3. 진단 시스템의 적용 예

본 연구의 진단 시스템의 검증을 위해 6개의 센서를 설치한 간단한 실험 장치를 그림 6과 같이 구성하였다.

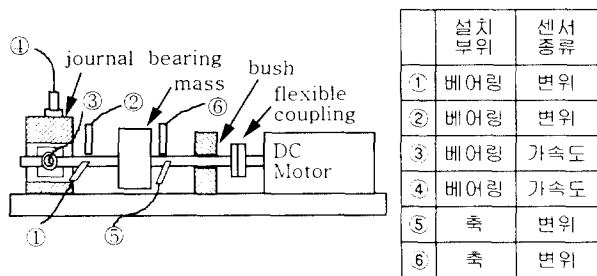


그림 6 진단 실험 장치

Fig. 6 Test rig for a diagnosis system

본 실험 장치에 임의로 오일 휠 현상을 일으키고 이에 대해 획득된 각 센서 신호의 정규화된 데이터는 표 7과 같다. 이 데이터에 관한 퍼지 추론을 통한 1차 진단 결과는 표 8과 같다. 이 추론 결과에서 보면 변위 센서의 경우, 슈퍼하모닉 영역에서는 불평형 질량(UB)이, 서브하모닉 영역에서는 오일 휠(OW)이 이상 원인으로 진단되고 있다. 또한, 가속도계의 경우는 하우징의 기계적 풀림(LS)의 가능성을 진단하고 있다. 오일 휠은 적어질 베어링으로 지지되는 회전체 시스템의 경우, 발생 시 전체 시스템의 진동에 매우 큰 영향을 미치는 중요한 이상 결합 중의 하나로서, 이러한 진

단 결과는 오일 휠에 의해 축과 하우징의 결합 원인들(UB, LS)에 관한 주파수 성분들이 더욱 증폭되었을 가능성이 높음을 의미하며, 오일 휠이 전체 이상 진동의 근본적인 원인임을 의미한다.

표 7 정규화된 센서 입력 신호

TABLE 7 Normalized sensor signals

센서	SP	MAG	Q1	OW	Q2	X2	X3	X4	B1	B2
1	0.8796	0.1442	0.03	3.28	0.08	0.02	0.09	0.06	0.0	0.0
2	0.8796	0.4248	0.03	2.83	0.07	0.02	0.08	0.06	0.0	0.0
3	0.8796	0.0433	0.09	0.20	0.08	0.23	0.21	0.23	0.0	0.0
4	0.8796	0.0500	0.08	0.21	0.08	0.17	0.20	0.15	0.0	0.0
5	0.8796	1.7366	0.00	0.38	0.01	0.08	0.06	0.01	0.0	0.0
6	0.8796	1.1361	0.00	0.32	0.02	0.03	0.03	0.03	0.0	0.0

표 8 퍼지 추론 결과

TABLE 7 The Result Of fuzzy inference

		superharmonics				subharmonics		
센서		MA	UB	LS	BD	RB	OW	SHI
1		0.0462	0.4867	0.0000	0.0	0.0	0.900	0.0
2		0.0429	0.4267	0.0000	0.0	0.0	0.900	0.0
3		0.0000	0.1299	0.4500	0.0	0.0	0.000	0.0
4		0.0000	0.1500	0.4500	0.0	0.0	0.000	0.0
5		0.1200	0.9000	0.0000	0.0	0.0	0.680	0.0
6		0.0450	0.9000	0.0000	0.0	0.0	0.660	0.0

표 9 최종 진단 결과

TABLE 9 Final diagnosis result

OW	0.900
LS	0.350

표9는 가중치를 적용하는 2차 진단을 통한 최종적인 진단 결과이다. 최종 진단에서는 가장 높은 진단 확률 순서로 두 가지를 선정한다. 개별적인 신호의 종합 과정에서 기계적 풀림과 불평형 질량의 확률이 조정되어 오일 휠의 진단 확률이 상대적으로 강화되었음을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 연구를 통하여 다중 센서를 사용하여 회전체 시스템의 이상 진동을 진단하는 방법의 유용성을 확인하였다.

- (1) 회전체 진동 신호의 진단에 있어서 퍼지 추론의 적용의 유용성을 확인하였다.
- (2) 다중 센서로부터 추론된 각각의 fuzzy 진단 결과를 각 센서의 특성을 고려한 가중치를 적용하여 종합함으로써, 최종적인 진단의 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### 참고 문헌

[1] W. Wowk, "Machinery Vibration", McGraw-Hill, Inc., USA, 1991

[2] 김성동, 홍성욱, 오길호, "가변 속도 회전체의 퍼지 고장 시스템의 개발", 한국정밀공학회지, 제14권제5호, pp.66-75, 1997

[3] 양보석, 전순기, 김호중, "퍼지 이론을 이용한 회전 기계의 진동 진단법", 대한기계학회논문집(A), 제20권제5호, pp.1411-1418, 1996