

# 거동 반응을 이용한 전동공구 고장진단

## Fault Diagnosis of an Electric Tool using Automaton

이승목\*·최연선†

Seung-Mock Lee and Yeon-Sun Choi

**Key Words** : Model-Based Fault Diagnosis(모델기반 고장진단), Automaton(거동반응), Quantized System(양자화 시스템), Electric Tool(전동공구)

### ABSTRACT

For fault diagnosis of machines and equipments, knowledge-based method has been used widely but has some limitations for complex systems. These can be covered by model-based method. As one kind of model-based method, qualitative modeling diagnosis method is developed in this research. The developed method uses output signal only. In this method quantization of the output signal makes automata which can characterize the flow of the signal pattern to normal and fault respectively. As an example of the qualitative diagnosis method, an electric tool which has faults at gear and bearing were examined in this research. The result shows that the developed method can diagnose the fault clearly for the two fault cases.

### 1. 서론

기계에 고장이 발생하면 진동과 소음이 발생하고 고장 부위에 따라서 발생하는 신호가 달라진다. 지식기반(knowledge-based) 고장진단은 발생하는 신호를 분석하는 방법으로 비교적 간단하게 진단할 수 있다는 장점이 있으나, 고장부위의 정확한 진단을 하기 어렵어 뿐만 아니라, 경우에 따라서는 진단 자체가 불가능해지기도 한다. 따라서 지식기반 고장진단의 적용이 어려운 구조물에 대하여 측정 가능한 신호와 수립된 모델을 해석을 통하여 고장을 진단하고 고장의 위치 및 특성을 파악할 수 있는 모델 기반(model-based) 고장진단이 필요하다.

Lunze<sup>[1]</sup>는 거동반응(automata)이론을 정성적 모델(qualitative modeling) 기법에 적용하여 하이브리드 동적 시스템의 거동에 대한 연구를 수행하였다. 최연선<sup>[2]</sup>은 모델기반 고장진단(model-based fault diagnosis)기술에 기반을 둔 연속변수시스템의 입력과 출력신호의 양자화(quantized) 변환을 통한 설비의 고장을 진단하는 정성적 모델 진단법을 개발하여 베어링

의 고장진단에 적용하였다. 그러나 이 방법은 고장의 종류가 한가지인 경우에 고장을 진단하는 방법으로 고장부위가 다수일 경우에는 고장 원인을 진단하는 데에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 전동공구를 통하여 고장이 2가지인 경우에 대하여 진동신호의 양자화(quantization)를 해서 얻은 거동반응을 이용한 정성적 모델 진단법을 개발하였다. 이를 기어와 베어링에 고장이 있을 수 있는 전동공구의 고장진단 및 고장 부위 판별에 적용하였다. 이를 위해 2가지의 독립된 진동 신호를 이산화하고, 양자화 하여 전동공구의 기어와 베어링의 고장 및 정상, 즉 각각 4가지 모델에 대한 거동반응식을 도출하여 오토매톤(automaton)을 작성하였다. 이를 바탕으로 각 상태의 전동공구의 출력 신호를 적용하여 고장진단을 하였다.

### 2. 모델 기반 고장진단

#### 2.1 모델 기반 정성적 고장진단

모델기반 고장진단은 센서의 입력과 출력 신호를 바탕으로 수립 모델을 분석하여 고장을 진단하게 된다. 그러나 감시되는 설비에서 발생하는 신호는 연속 변수로서 많은 양의 데이터를 요구한다. 이때 신호의

† 책임저자, 성균관대학교 기계공학부  
E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr  
Tel: (031)290-7440, Fax : (031)290-5849

\* 정회원, 성균관대학교 기계공학과 대학원

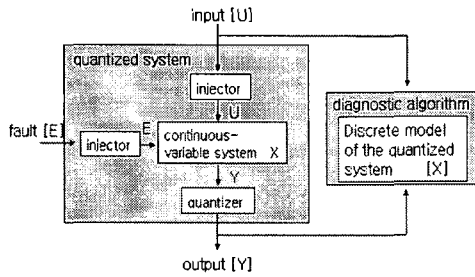


Fig. 1 Qualitative diagnosis system.

양을 줄이기 위해서는 연속 변수를 이산화 변수로 바꾸어 양자화 하는 과정이 필요하다. 또한, 복잡한 시스템에 대한 수학적 모델의 수립이 상당히 난해하므로 출력신호를 바탕으로 진동공구의 각각의 4가지 상태에 대한 이산 신호 상태 방정식을 유도하여 고장진단에 적용하여야 한다.

### 2.2 양자화 시스템

연속 변수 시스템의 양자화를 통한 고장진단 과정을 Fig. 1에 도시하였다.<sup>[3]</sup>  $X$ 는 상태 변수,  $U$ 는 입력 변수,  $M$ 는 수립되는 모델 변수,  $Y$ 는 출력 변수를 각각 나타낸다. 만약 시스템의 출력  $Y$ 가 측정된다면, 이 출력치는 출력 상태를 나타내는 유한한 정수  $N_y = \{0, 1, 2, \dots, R\}$ 로 표현되어 출력 상태공간을 만들 수 있다. 입력과 모델에 대해  $N_u = \{0, 1, 2, \dots, P\}$ ,  $N_m = \{0, 1, 2, \dots, S\}$ 의 입력과 모델의 상태공간으로 각각 표현할 수 있다. 즉 양자화 시스템의 거동은 이산화된 시간인  $1 \sim T$ 에 대하여 정성적 입력, 모델, 출력에 대해 각각 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} [U_0 \dots T] &= ([U_0], [U_1], \dots, [U_T]) \\ [M_0 \dots T] &= ([M_0], [M_1], \dots, [M_T]) \\ [Y_0 \dots T] &= ([Y_0], [Y_1], \dots, [Y_T]) \end{aligned} \quad (1)$$

즉 양자화 시스템은 입력  $U$  혹은 특정 모델  $E$ 에 대해 특정 출력  $Y$ 를 생성하게 되나  $U, E, Y$ 가 어떤 범위내의 값을 입력은  $P$ 개, 모델의 공간은  $S$ 개, 출력은  $R$ 개로 각각 대표하므로 완전 확정적(deterministic)인 값은 될 수가 없다. 그러나 시스템의 특성은  $U$ 와  $Y$  혹은  $M$ 과  $Y$  사이의 확률적 관계로는 표시할 수 있다. 진동공구에서의 전부 정상인 기본 모델에 관하여 먼저 입력  $U$ 와 정상 출력  $Y$ 의 관계는 식 (2)와 같이 정의된다.<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} \text{model 1. } L(z', w, z, v) &= \text{Prob}(z', w, z, v) \\ z', z &\in N_z, w \in N_w, v \in N_v \end{aligned} \quad (2)$$

현 상태  $z$ 에서 다음 상태  $z'$ 로 변하는 과정은, 즉 시스템 상태 변수,  $x$ 가 실제 입력 변수  $u$ 에 대한 입력 상태공간에의 유한 정수  $v$ 가 주어질 때, 출력 상태공간에서의 유한 정수  $w$ 가 되는 확률  $L$ 로 거동관계를 나타낼 수 있는 것이다. 이때 시스템의 상태  $z$ 는  $N_z$  상태공간을 만들고 출력 상태공간, 정수  $w$ 는  $N_w$  상태공간, 입력 상태 공간 정수  $v$ 는  $N_v$  상태공간을 각각 형성하는 것이다. 그리고 현재 상태  $z$ 에서 다음 상태  $z'$ 으로 가는 모든 확률의 합은 1이 되어야 한다. 또한, 특정 시스템에 대한 경우 특정 시스템의 추가적인 입력 변수가 고려되어, 베어링만 고장, 기어만 고장 그리고 전부 고장의 3가지 모델 시스템의 거동관계는 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{model } i. L: N_z \times N_w \times N_z \times N_v \times N_i &\rightarrow [0, 1] \\ L(z', w, z, v) &= \text{Prob}(z', w, z, v, m) \\ z', z &\in N_z, w \in N_w, v \in N_v, m \in N_i \quad (i=2 \text{ to } 4) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $m_i$ 는 모델 변수의 상태공간정수를 의미하는  $N_i (i=2 \text{ to } 4)$  상태공간의 형성을 의미한다.

### 2.3 진동 신호에 대한 양자화 시스템

시스템의 출력신호를 측정하면 연속적인 시간에 대한 진동이 측정된다. 모델 기반 정성적 고장진단을 위해서는 이 연속된 신호를 양자하여야 한다. 본 연구에서는 연속적인 흐름으로써 진동공구의 가속도 신호를 사용하였다. 이 흐름을 일정 시간간격으로 이산화시켜 그 시간 내의 가속도의 RMS값을 계산하였다. 여기서 이산화시키는 시간 간격이 짧으면 좀 더 정량적인 결과를 얻을 수 있지만 너무 짧으면 처리하는 데이터양이 증가하여 처리시간이 길어져 이산화하는 의미가 줄어든다. 반면에 이산화시키는 시간의 간격이 너무 길게 되면 처리해야 하는 데이터의 양이 줄어들어 처리 시간은 짧게 되지만 정량적인 신호의 변화와 차이가 크게 되어 잘못된 결과를 얻을 수도 있다. 따라서 이산화 과정에서 데이터의 적절한 결정을 통해 정량적인 신호 변화와 처리 시간을 적절하게 유지하는 것이 필요하다.

### 2.4 2차원 양자화 시스템

2가지 이상의 독립된 신호에 대하여 하나의 모델을 정의하기 위해서는 서로 다른 독립된 신호를 양자화시킨 뒤 하나의 흐름으로 재구성성이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 진동공구의 기어와 베어링에 발생하는 2가지 고장을 동시에 진단하기 위해 2차원 양자화 신호를 1차원 양자화 신호로의 변환이 필요하였고, 그 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 양자화 시키고자 하는 2

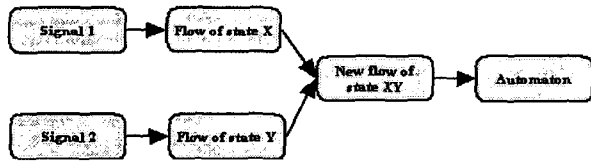


Fig. 2 Two dimensional quantized system.

가지의 독립된 신호를 측정된 뒤 2가지 신호를 각각 이산화 과정과 양자화 과정을 거쳐서 양자화된 데이터의 흐름을 구하였다. 하나의 흐름으로 나타내기 위하여 새로 정의된 좌표의 x축은 첫 번째 신호의 양자화 과정에 의해 정해진 n 개의 구간을 대입하고 좌표의 y축은 두 번째 신호의 양자화에 의해 정해진 m 개의 구간을 대입한다. 그러면 총  $n \times m$  개의 새로운 격자가 형성되는데, 각각의 격자에 차례로 일정한 값을 정의하여 새롭게 정의된 격자의 흐름을 구성하였다. 이 일련의 과정을 통하여 2차원 양자화 시스템을 1차원 양자화 시스템으로 변환시킬 수 있다.

### 2.5 양자화된 신호의 흐름을 이용한 거동반응

고장진단을 위해서는 각 모델의 거동반응을 만들어야 한다. 변환된 1차원 양자화 시스템의 흐름을 바탕으로 처음 상태에서 변화된 상태로 변환될 수 있는 확률을 계산하는 것이 거동 확률을 계산하는 과정이다. 예를 들어 진동 신호의 새로운 흐름을 만들어 내기 위해 두 신호를 3개의 구간으로 정의하였다면 총 9개의 격자가 만들어지고, 각각의 격자를 1~9로 명명한다. 그러면 격자 1에서 이동할 수 있는 경우의 수는 1~9로 9가지가 되고, 이는 격자 9까지 동일하므로 총 81개의 경우의 수가 있다. 거동 확률을 구하기 위하여 새로 만들어지는 흐름에서 각 단계마다 이전 상태와 다음의 변화된 상태를 측정하여 변화된 횟수를 계산하여야 한다. 이제 각각 1에서 1로 변화된 경우에서부터 1에서 9로 변화된 경우의 횟수를 구하여 상태 1에서 상태 1~9로 변화된 횟수의 총합으로 나눔으로써 상태 1에 대한 거동 확률이 계산된다. 이러한 과정으로 81개의 거동 반응을 계산할 수 있다. 이 거동 확률이 오토메톤이라 하며, 이 거동 확률이 곧 모델의 거동반응이 된다.

### 2.6 거동반응에 의한 고장진단 알고리즘

거동반응에 의한 고장진단 알고리즘을 Fig. 3에 나타내었다. 여기서  $P$ 는 계 이산구간이 진행함에 따라 각 모델의 확률을 의미하며, 최초 상태가 어떤 모델인지 알 수 없으므로 1을 총 모델의 개수  $n$ 으로 나눔

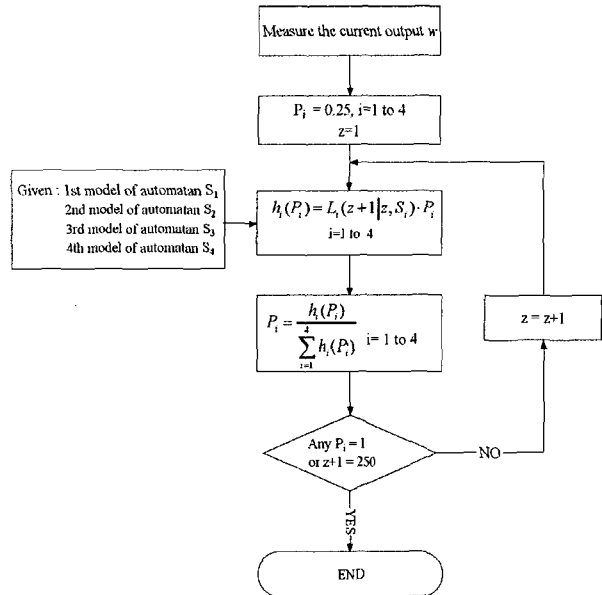


Fig. 3 Fault diagnosis algorithm using automaton.

으로써 처음 상태의 각 모델의 확률이 정의된다. 현재 상태에서 다음 상태가 확정됨에 따라 그에 따른 거동 관계 L값이 모델에 따라 다르며, 이 값을 현재 상태의 오토메톤에 곱하여, 각각의 값을 다시 비로 표현하면 다음 모델의 확률이 구해진다. 이에 대한 계산 과정은 모델의 확률 중 하나가 1이 되거나 모든 이산화 시간의 단계가 완료될 때까지 계속 수행한다.

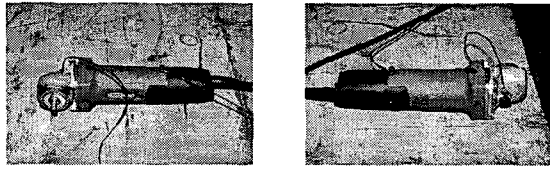
## 3. 전동공구 고장진단

### 3.1 전동공구 진동 실험

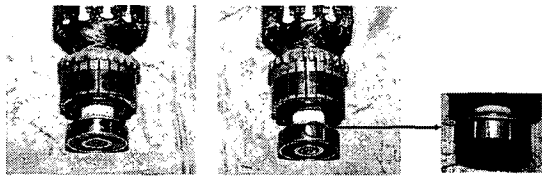
전동공구의 베어링과 기어의 진동 측정에 사용된 가속도계의 부착 위치는 Fig. 4와 같다. 손잡이 부위가 베어링 신호 측정 부위이며 머리 부분이 기어 신호의 측정부위이다. 베어링의 기계적 고장은 주로 피로, 마모 소성변형 등에 의해 발생한다.<sup>[5]</sup> 따라서 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 정상 베어링의 측면에 약간의 충격을 가하여 베어링의 결함을 발생시켰다. 진동에 의한 기어의 고장은 충격에 의한 기어 치의 파손으로 발생함에 따라 Fig. 6과 같이 정상 기어 치의 한 부분을 충격을 가하여 손상시켜 결함을 발생시켰다.

### 3.2 실험 결과

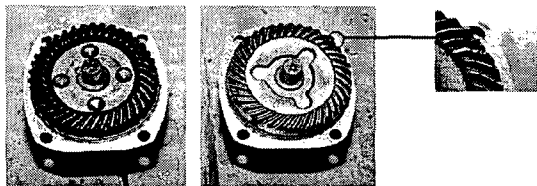
본 연구에서는 정상을 O, 고장을 X라 표기하여 기어와 베어링 전부 정상을 GOBO, 베어링만 고장을 GOBX, 기어만 고장을 GXBO 그리고 전부 고장을 GXBX 라고 각각 정의하였다. 각각 베어링과 기어의 진동 신호를 5초씩 10회를 측정하였다. 각각의 모델에



(a) Front side. (b) Back side.  
Fig. 4 Location of accelerometers.



(a) Normal. (b) Fault.  
Fig. 5 Bearing fault.

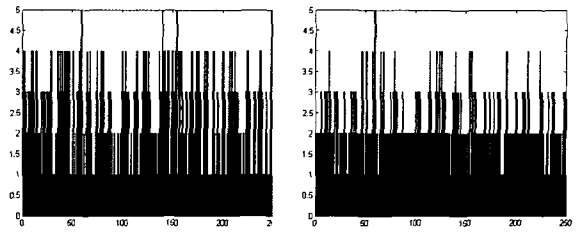


(a) Normal (b) Fault  
Fig. 6 Gear fault

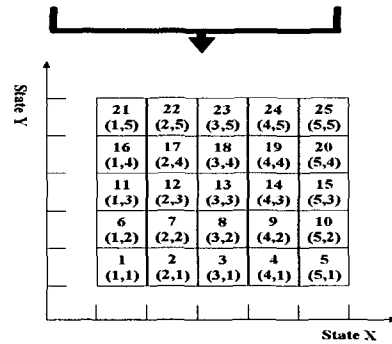
대한 RMS의 평균값은 Table 1과 같다. 기어와 베어링이 전부 정상일 때의 RMS값이 하나 이상 고장일 경우보다 상대적으로 낮은 값을 보임에 따라 고장 유무를 판단할 수도 있다. 그러나 기어나 베어링이 한 부분 이상의 결함이 있을 경우의 RMS값이 근접해 있으므로 어느 부위가 고장인지는 판단하기 불가능하다. 즉 고장의 유무는 판단할 수는 있었으나 고장의 부위는 알기 어렵다. 따라서 정확한 고장진단 및 고장 부위를 식별하기 위하여 앞장에서 설명한 오토메톤을 이용한 정성적 고장진단이 필요하다.

### 3.3 전동공구 신호에 대한 정성적 모델링

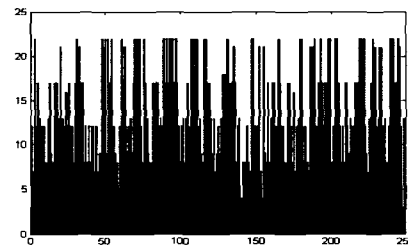
오토메톤을 작성을 위한 이산화된 RMS 값의 계산을 위하여 이산화 시간 간격은 0.02초로 정의하였고 기어의 가속도 신호를 signal 1, 베어링의 가속도 신호를 signal 2로 각각 정의하였다. 전동공구의 오토메톤을 구하기 위해서는 4가지 모델을 모두 포괄할 수 있는 구간이 설정되어야 한다. 이에 전 구간을 살펴보기 위하여 10회의 측정을 통하여 얻은 기어와 베어링의 이산화 된 RMS값의 최대, 최소범위를 Table 2에 나타내었다. signal 1범위는 22~166m/s<sup>2</sup>이고 signal 2범위는 25~224m/s<sup>2</sup>이다.



(a) Flow of states X. (b) Flow of states Y.



(c) New cells by two signals



(d) New flow of states XY.

Fig. 7 Process of making new flow.

Table 1. The RMS values of each case(m/s<sup>2</sup>)

	GOBO	GOBX	GXBO	GXBX
Gear	41.79	68.08	75.56	70.76
Bearing	55.70	111.87	93.84	110.70

본 연구에서는 측정된 신호를 양자화하기 위하여 각각의 signal의 전 구간을 5등분 하여 state를 구분하여 정의하였고 그 결과는 Table 3과 같다. 두 가지의 독립된 신호의 흐름을 하나의 흐름으로 만들기 위하여 각각 5개의 구간으로 signal 1을 양자화 하여 얻은 state X를 x축에 대입하고 signal 2를 양자화하여 얻은 state Y를 y축에 대입하여 2차원 좌표를 만들었다. 위 좌표에서 정의된 25개의 격자를 시간에 따라 나열함으로써 새로운 흐름을 만들었다. 위의 일련의

Table 2. Range of discrete RMS values

		GOBO	GOBX	GXBO	GXBX
Gear (m/s <sup>2</sup> )	min	22	50	24	53
	max	133	111	164	166
Bearing (m/s <sup>2</sup> )	min	25	91	45	97
	max	113	184	224	183

Table 3. Boundary of states for quantization.(m/s<sup>2</sup>)

Boundary		State 1	State 2	State 3	State 4	State 5
signal 1 (gear)	Lower	22	50.8	79.6	108.4	137.2
	Upper	50.8	79.6	108.4	137.2	166
signal 2 (bearing)	Lower	25	64.8	104.6	144.4	184.2
	Upper	64.8	104.6	144.4	184.2	224

과정을 Fig. 7에 나타내었다. 오토매톤은 이전 상태에서 다음 상태로 변환될 수 있는 확률이다. Fig. 7(d)의 새로운 상태의 흐름인 12-22-12-17...을 살펴보면, 첫 번째 단계의 이전 상태는 12이고, 다음 상태는 22이다. 두 번째 단계에서도 마찬가지로, 이전 상태는 22이고 다음 상태는 12이다. 위의 단계는 5초간 데이터를 받고 이산화 시간이 0.02초 간격으로 취했으므로 총 250단계가 반복된다.

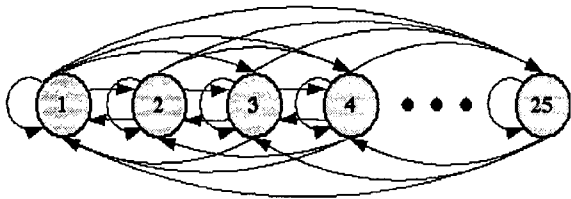


Fig. 8 Schematic diagram of automaton.

Table 4. Automaton of GOBO and GOBX

Changed	Before	GOBO	Changed	Before	GOBX
16	7	0.3333	17	8	1.0000
21	7	0.6667	13	12	0.3889
16	11	0.3333	18	12	0.6111
17	11	0.3333	8	13	0.0052
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
16	22	0.0928	14	19	0.5200
17	22	0.1443	18	19	0.0800
21	22	0.6495	19	19	0.3200
22	22	0.0928	18	22	1.0000

Table 5 Automaton of GXBO and GXBX.

Changed	Before	GXBO	Changed	Before	GXBX
8	3	0.2500	13	3	1.0000
12	3	0.5000	8	4	0.2000
13	3	0.2500	13	4	0.4000
7	4	0.0625	17	4	0.2000
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
21	22	0.0688	13	18	0.2656
22	22	0.2579	14	18	0.0071
12	23	0.5000	17	18	0.1613
22	23	0.5000	18	18	0.5360

모든 흐름의 경우의 수에 대한 특정 거동의 확률 분포를 계산하기 위하여 250단계를 분석하였다. 전동공구의 오토매톤은 확률 분포에서 거동의 시작지점이 같은 경우에 대하여 확률밀도를 계산한 것이다. 전동공구의 두 독립된 기어와 베어링의 가속도 신호를 바탕으로 구성된 오토매톤의 개요도를 Fig. 8과 같이 나타내었다. 전동공구의 4가지 모델의 오토매톤을 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

3.4 전동공구 신호에 대한 정성적 고장진단

전동공구의 고장진단을 위하여 진단하고자 하는 4가지 모델의 기어와 베어링 신호를 동시에 측정하였다. 고장진단 알고리즘에 적용하기 위하여 오토매톤을

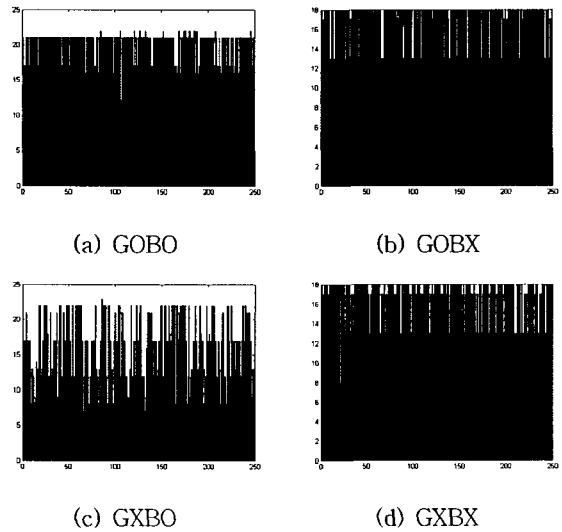


Fig. 9 Flow states of each case.

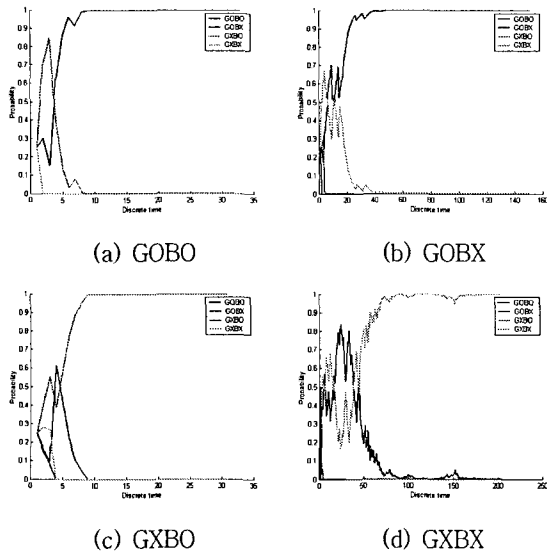


Fig. 10 Fault diagnosis by automaton.

구할 때와 같은 조건을 사용하여 각각 4가지 모델을 Fig. 7과 같은 방법으로 기어와 베어링의 두 독립된 신호의 흐름을 하나의 새로운 흐름으로 나타낸 결과 Fig. 9와 같다. 각각의 출력 신호의 흐름을 바탕으로 전동공구의 고장 부위를 판별하기 위하여 총 4가지 모델의 오토매톤이 사용되었다. 처음에는 전동공구의 고장 여부를 판단할 수 없기 때문에 4가지 모델의 확률을 각각 해당 고장 확률이 4가지 중 하나라는 의미로 0.25라 가정하여 고장진단을 시작하였다.

고장진단 과정을 살펴보면 GOBO 신호의 흐름은 21-17-17-21...이다. 첫 번째 단계로 이전 상태 21에서 다음 상태 17로 이동할 수 있는 앞서 구한 각각의 오토매톤 GOBO : 0.1215, GOBX : 0, GXBO : 0.2831, GXBX : 0을 첫 번째 확률분포인 0.25에 곱하였다. 이 과정에서 얻은 값은 각각 0.0304, 0, 0.0708, 0이 되었다. 다음 단계에 쓰이는 확률은 위 값들의 확률 밀도이다. 즉 다음 단계에 사용될 확률분포는 0.3003, 0, 0.6997, 0이 된다. 이와 같은 과정으로 MATRAB<sup>[3]</sup>을 사용하여 작성한 고장진단 프로그램에 대입하여 한 가지 모델의 확률분포가 1이 되거나 250 단계에 도달할 때까지 반복하였다. 그 결과 한 가지 경우의 확률만 높게 유지되고 나머지 다른 경우들은 낮거나 0에 수렴하는 것이 Fig 10에 나타나 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 전동공구의 고장진단 및 고장 부위를 판별하기 위하여 모델기반 고장진단 기술인 연속변수시스템의 신호를 양자화 시스템 변환의 정성적 진단법을 제안하였다. 이를 위하여 2차원 진동 신호의

RMS 값의 크기를 구간별로 나누어 각 상태를 정의한 후 새로운 좌표를 만들어 격자를 정의하였다. 이를 바탕으로 이산화 시간에 따른 1차원 상태의 흐름으로 변환시켜 전동공구의 오토매톤을 작성하였다. 전동공구의 고장진단을 위하여 측정하고자 하는 진동 신호를 이산화 구간별로 RMS값을 양자화시킨 신호를 바탕으로 새롭게 정의된 25개의 격자의 흐름으로 나타내었다. 이를 GOBO, GOBX, GXBO, GXBX의 총 4가지 모델의 오토매톤을 사용하여 고장진단 알고리즘에 적용한 결과 신호마다 단지 특정한 모델 한 가지만 1에 수렴함으로써 전동공구의 고장 여부를 알 수 있었다. 따라서 본 연구는 구조물의 상태를 정확히 판별하여 고장진단은 물론이고 고장의 위치까지 찾아낼 수 있는 진단 기술로 응용될 수 있으리라 기대된다.

#### 참고 문헌

- [1] J. Lunze, B. Nixdorf, H. Richter, 2001, "Process supervision by means of a hybrid model," Journal of Process Control, Vol. 11, pp. 89-104.
- [2] 최연선, 2005, "Model-based Fault Diagnosis Using Quantized Vibration Signals", 한국소음진동공학회 2005년도 추계학술대회는문집, pp. 279 ~ 284.
- [3] J. Lunze, 1998, "Qualitative modeling of dynamical system Motivation, methods, and prospective applications," Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 4, pp. 465-483.
- [4] J. Lunze, F. Schiller, J. Schroder, 2001, "Diagnosis of transient faults in quantised systems," Engineering Applications of Artificial Intelligence 14, pp. 519-536.
- [5] H. Martin, 1992, "Detection of Gear Damage by Statistical Vibration Analysis," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, pp. 395-401.
- [6] Using Matlab version 6.1, The Math Works Inc. 2001.