〈논 문〉

페트리 네트를 이용한 사례기반 추론 진동진단시스템의 개발

Development of Case-based Reasoning Vibration Diagnosis System Using Petri Net

양 보 석† · 오 용 민* · 정 석 권**

Bo-Suk Yang, Yong-Min Oh and Seok-Kwon Jeong

(2001년 6월 19일 접수 : 2001년 10월 17일 심사완료)

Key Words : Case-based Reasoning System(사례기반추론시스템), Petri Net(PN : 페트리 네트), Case Retrieval(사례검색), Case Addition(사례추가), Case Revise(사례수정)

ABSTRACT

If a machine has some faults, we can detect them using vibration or noise signals. However some maintenance engineers who don't have expert knowledge, need the help of vibration experts for diagnosing the machine. In this paper a case based reasoning (CBR) system is developed which is able to manipulate the past experiences of vibration diagnosis experts. In the CBR system, the maintenance engineers can retrieve the information from previous cases which are most similar to new problem so that they can solve new problem using solutions from the previous cases. In this paper, a new case retrieval method of CBR system using Petri net is proposed and also applied to diagnosis for electric motors as a practical problem.

1. 서 론

각종 기계는 산업현장에서 다양한 작업을 수행하면서도 중요한 위치를 차지하고 있다. 기계의 특성상 진동이 없이 운전될 수 없으며, 허용치를 벗어나는 과대한 진동이 발생할 경우, 진동현상을 조사하여 진동의 원인을 파악하고, 이 원인을 바탕으로 수정대책을 수립하여 수리를 실시할 것인지 또는 새로운 기계로 대체할 것인지 등을 결정하게 된다. 그러나 현재 발생하고 있는 현상을 바탕으로 원인을 발견하고, 그 대책을 수립하는 데에는 상당한 기간의 경험과 지식이 요구된다. 진동은 기계의 이상 혹은 결함을 진단할 때 중요한 인자로 고려되고 있지만, 진동신호를 이용한 기계의 이상 및 결함진단을 수행할 수 있는 진동진단 전문가는 매우 부족한 것이 오늘의 현실이다.

이에 저자는 전문가의 지식과 경험을 공유하기 위해 인공지능(artificial intelligence)의 한 분야인 사례기반추론(case-based reasoning)[1,2]을 이용한 사례기반추론 진동진단시스템을 개발[3,4]하였다. 진동진단 전문가가 현장에서 발생했던 다양한 현상을 관찰하여 진동 원인을 발견하고, 이에 따른 대책수립을 수행하였던 많은 양의 기술보고서를 표준사례(standard-case)의 형태로 정리하고, 사례기반추론이 가능한 형태의 라이브러리로 구축하였다. 그리고 유사사례검색을 위한 평가함수로써 수정된 여현일치함수(MCMF: modified cosine matching function)를 이용하였다. 그러나, 이 평가함수는 사례검색에만 이용될 뿐 새로운 사례에 대한 추가, 삭제 및 수정에는 아무런 도움을 주지 못하였다. 사례구축에 있어서 사례의 추가,

† 책임저자, 정회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : bsyang@dolphin.pknu.ac.kr
Tel : (051) 620-1604, Fax : (051) 620-1405
* 부경대학교 대학원
** 부경대학교 기계공학부

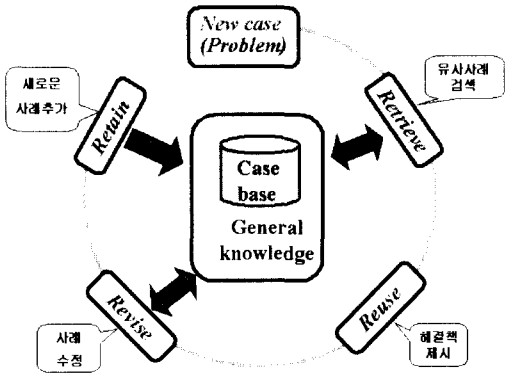


Fig. 1 Case-based reasoning cycle

삭제 및 수정은 좀 더 전문가에 가까운 해결책을 제시해 줄 수 있기 때문에 이는 매우 중요하다.

따라서 본 논문에서는 페트리 네트(PN : Petri Net)를 이용하여 사례의 검색, 추가, 삭제 및 수정이 가능하도록 사례기반추론시스템을 확장하였다. 그리고 예로 전동기에서 발생하였던 실제 사례를 이용하여 기존의 검색도구와 PN에 의한 검색결과를 비교하여 성능을 비교·검증하고 사례의 추가와 수정을 추가하여 CBR시스템의 신뢰성을 높이도록 하였다.

2. 사례기반추론

Riesbeck과 Schank의 정의에 의하면, 「사례기반추론이란 과거의 어떤 문제를 해결하기 위해 사용했던 해결방법(경험)을 적용시킴으로서 새로운 문제를 해결하는 방법」이라고 할 수 있다.[1, 2]

Fig. 1은 사례기반추론의 기본적인 추론과정을 나타낸다. 먼저 새로운 문제(new case)가 발생했을 경우, 예전의 비슷한 상황을 기억(remember)하고 있는 유사사례를 검색(retrieve)하여 검색된 사례를 바탕으로 해결책(solution)을 얻는다. 만일 기존의 사례가 잘못되었다고 판단될 경우, 사례를 수정(revise)하여 새로운 사례로 저장(retain)하게 된다.

3. 페트리 네트[5, 6]

1962년 Carl Adam Petri가 제안한 페트리 네트(Petri Net: PN)는 이산사건시스템을 표현하기 위한 시각적이고 수학적인 도구이다. 지금까지 PN은 정보통신, 제어분야 등에서 많은 연구[7, 8]가 수행되어 왔으며, 본 연구에서는 CBR시스템의 사례검색에 PN을 적용하였다. 각 표준사례들을 PN으로 모델링하고 가중치는 아크(arc)의 개수로 표현하며, 사용자의 입력시 사용하는 가중치는 토큰(token)을 이용하였다. 상태방정식을 이용하여 토큰의 최종 발화개수를 파악하고 유클리디언(euclidian)함수에 기초하여 새로 제안된 평가식으로 유사도(similarity)를 평가함으로써 사례검색을 수행한다. 그래서 새로운 문제에 대한 해결책을 제공하고, 사례의 추가 및 수정도 PN으로 가능하도록 하였다.

3.1 PN의 정의

PN N은 다음의 7개의 요소로 구성되어 있다.

$$N = \{P,\ T,\ A_i,\ A_o,\ A,\ E,\ M_0\}$$

여기서

M_0 : 초기 마킹(marking)

$P = \{P_1,\ P_2,\ P_3,\ \cdots,\ P_m\}$: $m(>0)$개의 유한한 플레이스(place)의 집합

$T = \{T_1,\ T_2,\ T_3,\ \cdots,\ T_n\}$: $n(>0)$개의 유한한 트랜지션(transition)의 집합

$A_i = T \rightarrow P^{m}$: T로부터 P로의 아크를 나타내는 입력행렬(input matrix)

$A_o = P \rightarrow T^{m}$: P로부터 T로의 아크를 나타내는 출력행렬(output matrix)

$A = \{A_1,\ A_2,\ A_3,\ A_4,\ A_5\}$: 가중치 1~5까지에 대한 아크의 집합

$E = \{E_1,\ E_2,\ E_3,\ E_4,\ E_5\}$: 가중치 1~5까지에 대한 토큰의 집합

M(marking) : 각 플레이스에 있는 토큰의 개수

또한, 플레이스와 트랜지션집합 사이에는 $P \cap T = \phi$, $P \cup T = \phi$의 관계가 있고, 플레이스 집합 P는 사건의 상태나 조건에 대응하며 기호로는 "○"로 나타낸다. 트랜지션 집합 T는 사건의 진행이나 명령수행을 의미하고 기호로는 "□" 또는 "| (bar)"로 나타낸다. 그리고 사건흐름의 방향성을 표시하는 아크는 "→"로 나타내며, 플레이스와 트랜지션을 결합한다. 시스템의 상태현황을 토큰으로써 "·"으로 나타내며, 플레이스 내부에 표시하여 상태의 활성(enable)을 정의한다(Fig. 2). 정보의 흐름을 나타내는 토큰은

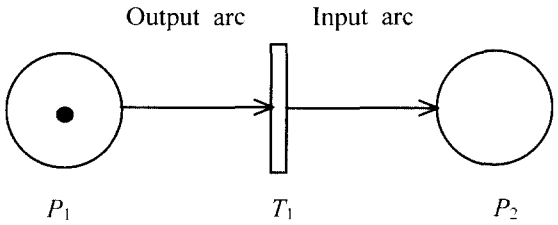


Fig. 2 Definition of Petri net

시스템의 동적이고, 동시 발생적인 상황과 활동의 모의실험에 유용하게 사용된다.

3.2 실행 규칙[5~8]

(1) 활성화 규칙(Enabling Rule)

트랜지션의 모든 입력 플레이스에 토큰이 있을 때, 그 플레이스는 활성화되고 발화할 수 있다.

(2) 발화 규칙(Firing Rule)

(i) P_i로부터 T_j로의 아크 수만큼의 토큰이 P_i내에 존재할 때, T_j가 발화 가능하다.

(ii) 트랜지션의 발화는 순간적이므로, 다른 2개의 트랜지션이 동시에 발화할 가능성은 0이다.

(iii) 트랜지션 T_j의 발화에 따라 플레이스 P_i로부터 T_j로의 아크 수와 동일한 토큰이 이동된다.

(iv) 트랜지션 T_j의 발화에 따라 T_j로부터의 출력 아크 수에 동일한 토큰 수를 생성하고 T_j로부터 P_i로의 아크 수와 동일한 토큰을 할당한다.

3.3 상태 방정식 (State Equation)[5, 6]

상태 방정식은 트랜지션의 발화에 의한 토큰 분포의 변화를 나타내고, 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\boldsymbol{M}(k+1)=\boldsymbol{M}(k)+\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{T}(k)\,k=0,1,2,\cdots \quad (1)$$

여기서, $\boldsymbol{M}(k)$과 $\boldsymbol{T}(k)$는 k단계에 있어서 토큰의 개수 및 트랜지션의 발화순서이며, $\boldsymbol{B}$는 식 (2)로 표현되는 접속행렬(incidence matrix)[5, 6]이다.

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{P},\boldsymbol{T})=\boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{P},\boldsymbol{T})-\boldsymbol{A}_o(\boldsymbol{P},\boldsymbol{T}) \quad (2)$$

여기서 접속행렬 $\boldsymbol{B}$는 PN의 플레이스의 수가 m이고, 트랜지션의 수가 n인 $m\times n$인 행렬로서, 토큰의 분포에 대한 정보를 제공하는 역할을 한다.

4. 시스템의 구성

본 연구에서는 적용대상으로 산업현장에서 사용되고 있는 전동기(electric motor)에서 발생하였던 실제 진단사례를 이용하여 보다 구체적으로 시스템의 구성을 설명한다.

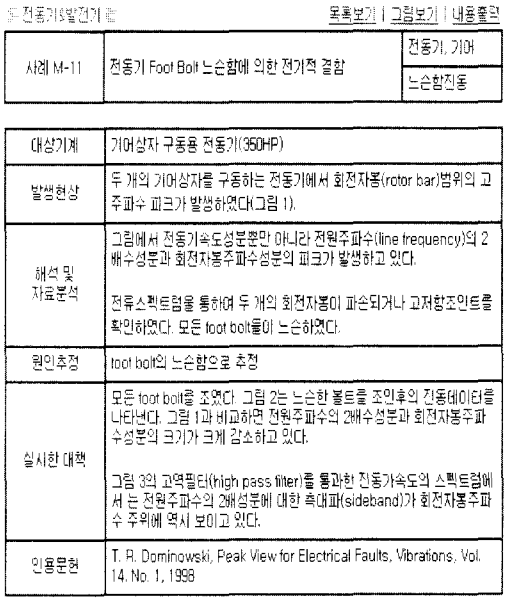
4.1 표준사례의 구성

표준사례는 국내·외의 각종 기술자료[9]에 보고된 현장에서 실제 경험한 전동기 관련 이상진단사례를 이용하여 정리하였으며, web browser를 통해 읽을 수 있는 HTML(hyper text mark-up language) 형식으로 사례베이스를 구축하였다. 각각의 사례는 Fig. 3과 같이 사례제목, 대상기계, 발생현상, 해석 및 자료분석, 실시한 대책, 교훈 및 인용문헌의 형태로 총 37건의 전동기에서 발생한 사례를 정리하였다.

4.2 라이브러리의 구성

라이브러리는 하나의 사례를 하나의 줄(line)로 표현하고, 기존의 라이브러리에서 키워드를 문자 그대로 구성하였다. 일 예로 사례 M-01에 대해 나타내면, 다음과 같은 형식으로 표현된다.

M-01 O4=1 R1=1 A1=1 F1=1 M0=1 E2=1 …



전동기&발전기 목록보기 | 그림보기 | 내용출력

사례 M-11	전동기 Foot Bolt 느슨함에 의한 전기적 결함	전동기, 기어
		느슨함진동

대상기계	기어상자 구동용 전동기(350HP)
발생현상	두 개의 기어상자를 구동하는 전동기에서 회전자봉(rotor bar)범위의 고주파수 피크가 발생하였다(그림 1).
해석 및 자료분석	그림에서 전동기속도성분뿐만 아니라 전원주파수(line frequency)의 2배수성분과 회전자봉주파수성분의 피크가 발생하고 있다. 전류스펙트럼을 통하여 두 개의 회전자봉이 파손되거나 고저항조인트를 확인하였다. 모든 foot bolt들이 느슨하였다.
원인추정	foot bolt의 느슨함으로 추정
실시한 대책	모든 foot bolt를 조였다. 그림 2는 느슨한 볼트를 조인후의 진동데이터를 나타낸다. 그림 1과 비교하면 전원주파수의 2배수성분과 회전자봉주파수성분의 크기가 크게 감소하고 있다. 그림 3의 고역필터(high pass filter)를 통과한 진동가속도의 스펙트럼에서는 전원주파수의 2배성분에 대한 측대파(sideband)가 회전자봉주파수 주위에 역시 보이고 있다.
인용문헌	T. R. Dominowski, Peak View for Electrical Faults, Vibrations, Vol. 14, No. 1, 1998

Fig. 3 An example of standard case

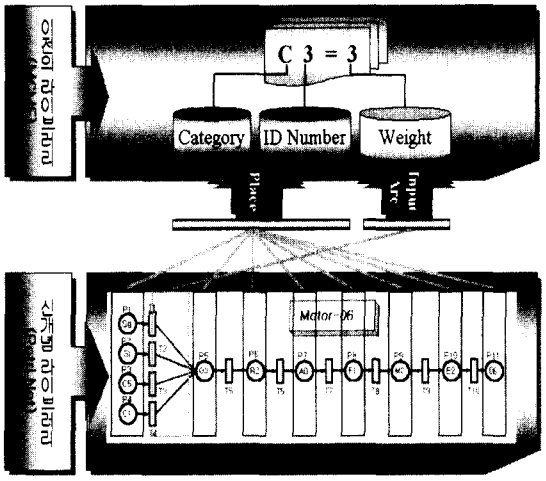


Fig. 4 Presentation of library with Petri net

각 줄의 첫 째 항목은 사례베이스에 저장된 사례의 일련번호를 나타내고, 빈칸으로 구분된 우측의 각 항목들은 키워드(좌변)와 가중치(우변)의 짝으로 구성된다. 각 항목은 Fig. 4의 위 그림과 같은 의미를 가진다. 예로 O4=1은 O는 영역(category), 4는 ID번호, 1은 가중치(weight)를 의미한다. 본 논문에서는 Fig. 4와 같이 PN을 이용하여 각 표준사례를 모델링하여 새로운 라이브러리로 구성하였다. 즉, 그림에서 보면, 영역과 ID번호는 각각의 플레이스를 각 사례에 대한 키워드로 표현했고, 트랜지션은 발화조건을 나타낸다. 각 키워드 사이를 연결하기 위해 방향성을 가지는 아크를 사용하였고, 또한 각 키워드가 가지고 있는 가중치 A_i ($i = 1 \sim 5$)는 입력아크의 개수로 표현하고, 입력가중치 E_i ($i = 1 \sim 5$)는 토큰으로 표현하고, 이를 1~5의 5단계로 나누었다. 여기서 각 사례에 대한 가중치 A_i와 입력에 대한 가중치 E_i를 표현하기 위해 칼라(colored) PN[7]을 이용하였고, 그 정의를 Table 1에 나타내었다. 가중치의 부여는 각 항목들이 각 사례에 미치는 영향의 중요도에 따라 다음과 같이 5단계, 즉 1: 낮음, 2: 보통, 3: 조금 높음, 4: 높음, 5: 아주 높음으로 나누어 부여하였다. 그러나, 이러한 가중치 부여방법은 시스템 설계자의 임의 지식이 포함되므로 사용자의 입장에서 엄밀히 말하면 객관적인 자료가 될 수 없다. 그러므로 이러한 단점을 보완하기 위해 시스템 설계 시 사용자 입장에서 각 항목의 중요도를 위에서 언급한 바와 같이 5개의 단계로 표현할 수 있도록 하였다. 따라서 사용자가

Table 1 Expression of weighting arc and token

Weight	Transition		Token
	Ordinary	Advanced	
5 (yellow)		(A_5)	(E_5)
4 (green)		(A_4)	(E_4)
3 (red)		(A_3)	(E_3)
2 (blue)		(A_2)	(E_2)
1 (black)		(A_1)	(E_1)

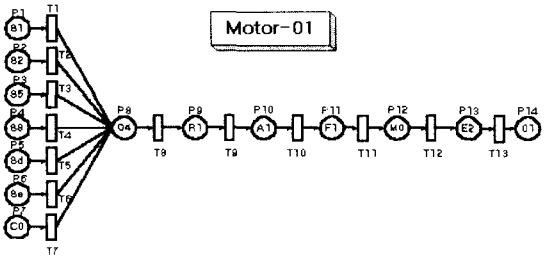


Fig. 5 Petri net modeling about case M-01

중요하게 생각하는 항목에 높은 단계의 가중치를 부여함으로서 사용자 관점에서 유사도 평가가 가능하게 된다. 하지만, 향후 보다 객관적인 중요도의 부가방법에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

4.3 사례의 모델링

각 사례들을 모델링하는 과정은 먼저 Table 2와 같이 증상, 원인, 주요 사양, 발생된 기계 및 시간 등에 대응하는 각각의 플레이스 P_i를 정의하고, 트랜지션 T_j는 Table 1과 같이 입력가중치로 나타내면, Fig. 5와 같이 모델링이 된다. 접속행렬 $\boldsymbol{B}$는 식 (2)와 같이 입력행렬과 출력행렬에 의해 Fig. 6과 같이 구해지고, 이 행렬은 일단 PN으로 모델링되면 행렬 내의 각각의 키워드가 가지는 가중치 표현이 되어 있기 때문에 각 사례가 가지는 가중치를 바꾸지 않는 이상

변하지 않는다. 이러한 방법으로 각 사례에 대해 적용하면 PN으로 표현되는 새로운 라이브러리가 구축된다. 여기서 전체에 대한 라이브러리의 표시는 지면 관계상 생략한다.

Table 2 The meaning of each place

Division Category/ID number		Description	Place
Symptom	S1	베어링의 수직방향진동	P1
	S2	베어링의 수평방향진동	P2
	S5	전동기 기초에서의 진동	P3
	S8	유량에 따라 진동증가	P4
	Sd	운전속도 성분	P5
	Se	운전속도의 분수 및 배수 조화 성분	P6
Cause	C0	불평형	P7
Power	O4	1000 HP 이상	P8
RPM	R1	1000~1800 rpm	P9
No. of pole	A1	4 Pole	P10
Line frequency	F1	60 Hz	P11
Occurring machine	M0	펌프	P12
Occurring time	E2	전동기 기동 중	P13
No. of case	M-01	전동기의 이물질부착에 의한 불평형 진동	P14

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
P1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
P8	3	3	3	3	3	3	3	-1	0	0	0	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0
P11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
P12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
P13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
P14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fig. 6 Incidence matrix B

4.4 사례의 검색

유사사례의 검색을 위해 기존의 각종 유사도 평가에 널리 사용되는 유클리디언 함수 $(OW_j - NW_j)^2$를 이용하여 표준 라이브러리의 키워드가중치 OW_j와 새로운 사례의 입력키워드가중치 NW_j사이의 유클리디언 함수 및 PN에 의한 최종 마킹된 토큰의 수 FM_i를 포함한 새로운 평가식을 식 (3)과 같이 제안하였다. 이 식은 유사도를 0~1 사이의 실수 값으로 정량화하기 위해 역수 형태로 표현하였다. 따라서 검색된 기존 사례의 유사도가 1에 가까울수록 새로운 사례와 유사하다는 것을 의미한다.

$$RCV = \frac{FM_i}{\sqrt{(FM_i)^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (OW_j - NW_j)^2}} \qquad (3)$$

$$(i = 0, 1, 2, \cdots, m,\ j = 0, 1, 2, \cdots, n)$$

여기서 RCV(retrieval case value): 검색된 사례의 유사도 값, FM(final marking): 최종 마킹된 토큰의 수, OW(old weight): 기존사례에 대한 키워드의 가중치, NW(new weight): 새로운 사례의 입력키워드의 가중치이다.

FM_i는 유사사례를 검색하는 역할로써 입력 값에 대해 각 사례마다 발화를 시작하여 최종 마킹된 값이 0이상의 값으로 얻어진 사례는 일단 유사사례로 판정을 한다. 그리고 유사사례로 판정된 사례들을 식 (3)을 이용하여 최종적으로 평가하고, 유사도의 크기순으로 결과를 출력한다.

4.5 시스템의 구성

시스템은 visual basic을 이용하여 Fig. 7과 같이 4

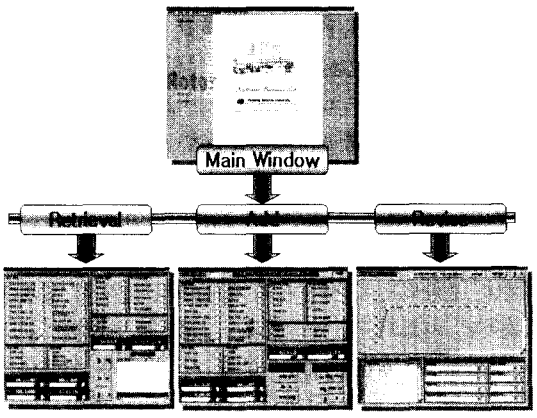


Fig. 7 Composition of system

개의 창(window), 즉 메인창(main window), 검색창(retrieval window), 추가창(add window) 및 수정창(revise window)으로 구성되어 있다.

5. 시뮬레이션 결과

5.1 사례 검색

검색창은 Fig. 8과 같이 발생현상, 추정원인, 전동기 사양, 구성기계 및 발생시점 등으로 구성되고, 입력방법은 화면에서 각 항마다 해당 키워드를 체크하고 가중치를 입력한 다음 검색버튼을 클릭하면 된다. 즉, 사용자는 Fig. 8과 같이 해당 키워드를 체크하고 가중치를 입력하면 라이브러리에 있는 각 사례들 중 일치하는 키워드 즉, 각 플레이스에 토큰이 생성된다. 이 때 그 사례는 3.2절의 활성화규칙에 따라 활성화되고, 발화규칙에 의해 트랜지션을 통해 발화된다. 이러한 발화과정은 식 (1)의 상태방정식으로 표현된다.

유사사례의 검색성능을 검증하기 위해서 기존의 MCMF를 이용한 검색결과[4]와 비교하였다. Fig. 9는 증상(symptom)의 가중치가 유사도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. PN(Fig. 9(a))과 기존의 MCMF (Fig. 9(b))의 결과를 비교하면, 사례 M11, M30, M22 및 M4는 가중치가 증가할수록 유사도가 감소하는 경향을 보이고, 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, PN이 MCMF에 비해 가중치변화에 따른 유사도의 변화가 크지 않고 일정한

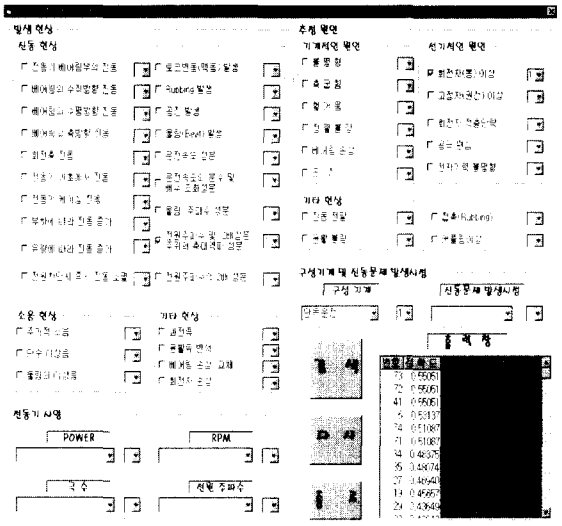
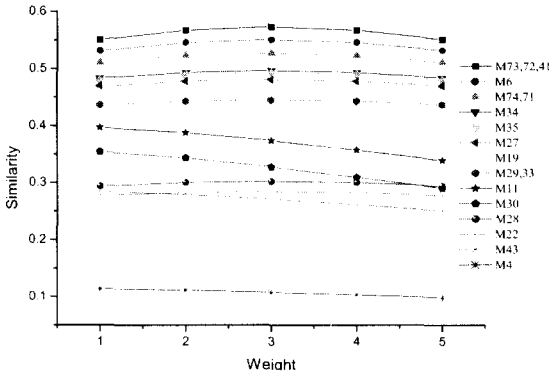
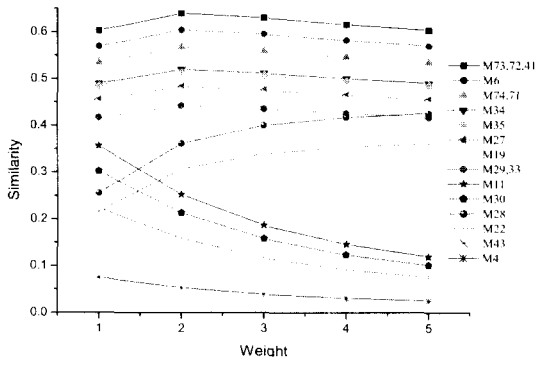


Fig. 8 Data input for case retrieval



(a) Petri net



(b) MCMF

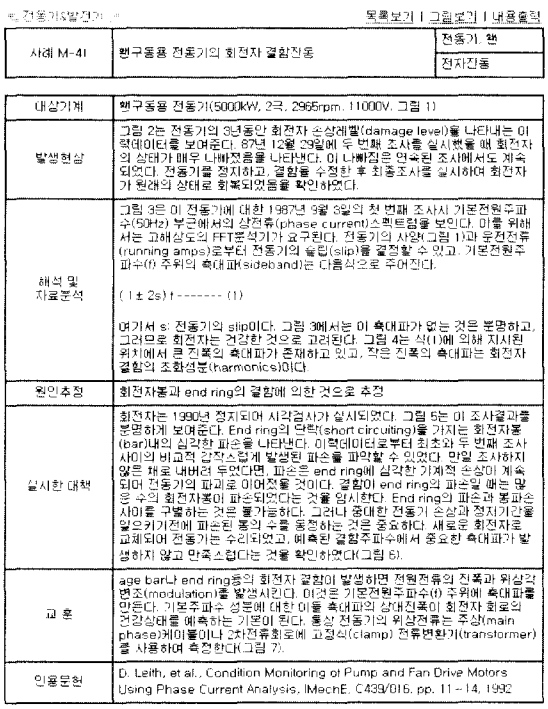
Fig. 9 Effect of symptom weight on similarity

경향을 나타내고 있어, 사례검색에 효과적임을 알 수 있다. 새로운 사례와 표준사례 사이의 유사성에 대한 정량적인 기준은 정해진바가 없으나, 일반적으로 유사도가 0.5 이상으로 유사도가 큰 순서로 얻어지고 따라서 유사도가 제일 큰 사례부터 검토하면 된다.

Fig. 10은 그 일 예로 검색된 사례들 중 가장 높은 유사도를 나타낸 휀(fan)구동용 전동기에서 발생한 회전자 결함 진동에 대한 표준사례인 사례 M41을 나타낸다. 현재 발생된 진동트러블의 새로운 사례(new case)를 검색된 표준사례들로부터 실시한 대책 등의 자료를 참조하여 해결책을 찾아 문제를 해결하게 된다.

5.2 사례 추가

새로운 문제가 해결되었을 때, 이 사례를 표준사례로 등록하는 기능으로, 보다 많은 사례를 추가함으로서 시스템의 신뢰성을 높여 주게 된다. 물론, 이 단계는 전문가의 충분한 검토 후에 시행되어야 한다. 사



사례 M-41	랭구동용 전동기의 회전자 결함진동	전동기 : 랭
		전자진동

대상기계	랭구동용 전동기(5000kW, 2극, 2965rpm, 11000V, 그림 1)
발생현상	그림 2는 전동기의 3년동안 회전자 손상레벨(damage level)을 나타내는 이력데이터를 보여준다. 87년 12월 29일에 두 번째 조사를 실시했을 때 회전자의 상태가 매우 나빠졌음을 나타낸다. 이 나빠짐은 연속된 조사에서도 계속되었다. 전동기를 정지하고, 결함을 수정한 후 최종조사를 실시하여 회전자가 원래의 상태로 회복되었음을 확인하였다.
해석 및 자료분석	그림 3은 이 전동기에 대한 1987년 9월 3일의 첫 번째 조사시 기본전원주파수(50Hz) 부근에서의 상전류(phase current)스펙트럼을 보인다. 이를 위해서는 고해상도의 FFT분석기가 요구된다. 전동기의 사양(그림 1)과 운전전류(running amps)로부터 전동기의 슬립(slip)을 결정할 수 있고, 기본전원주파수(f) 주위의 측대파(sideband)는 다음식으로 주어진다. $(1 \pm 2s)f$ ------- (1) 여기서 s: 전동기의 slip이다. 그림 3에서는 이 측대파가 없는 것은 분명하고, 그러므로 회전자는 건강한 것으로 고려된다. 그림 4는 식(1)에 의해 지시된 위치에서 큰 진폭의 측대파가 존재하고 있고, 작은 진폭의 측대파는 회전자 결함의 조화성분(harmonics)이다.
원인추정	회전자봉과 end ring의 결함에 의한 것으로 추정
실시한 대책	회전자는 1990년 정지되어 시각검사가 실시되었다. 그림 5는 이 조사결과를 분명하게 보여준다. End ring의 단락(short circuiting)을 가지는 회전자봉(bar)내의 심각한 파손을 나타낸다. 이력데이터로부터 최초와 두 번째 조사 사이의 비교적 갑작스럽게 발생된 파손을 파악할 수 있었다. 만일 조사하지 않은 채로 내버려 두었다면, 파손은 end ring에 심각한 기계적 손상이 계속되어 전동기의 파괴로 이어졌을 것이다. 결함이 end ring의 파손일 때는 많은 수의 회전자봉이 파손되었다는 것을 암시한다. End ring의 파손과 봉파손 사이를 구별하는 것은 불가능하다. 그러나 중대한 전동기 손상과 정지기간을 알아차리기전에 파손된 봉의 수를 결정하는 것은 중요하다. 새로운 회전자로 교체되어 전동기는 수리되었고, 예측된 결함주파수에서 중요한 측대파가 발생하지 않고 만족스럽다는 것을 확인하였다(그림 6).
교 훈	age bar나 end ring등의 회전자 결함이 발생하면 전원전류의 진폭과 위상각 변조(modulation)를 발생시킨다. 이것은 기본전원주파수(f) 주위에 측대파를 만든다. 기본주파수 성분에 대한 이들 측대파의 상대진폭이 회전자 회로의 건강상태를 예측하는 기본이 된다. 통상 전동기의 위상전류는 주상(main phase)케이블이나 2차전류회로에 고정식(clamp) 전류변환기(transformer)를 사용하여 측정한다(그림 7).
인용문헌	D. Leith, et al., Condition Monitoring of Pump and Fan Drive Motors Using Phase Current Analysis, IMechE. C439/016, pp. 11 - 14, 1992

Fig. 10 Reasoning result(case M-41)

Table 3 Definition of each place with arbitrary case

Division Category/ID number		Description	Weight
Symptom	S0	전동기 베어링부의 진동	3
	S2	베어링의 수평방향 진동	3
Cause	C3	헐거움(looseness)	3
Power	O4	25 HP 이하	1
RPM	R1	1000 rpm 이하	1
No. of pole	A0	2 Pole	1
Line frequency	F0	50 Hz	1
Occurring machine	M4	단독운전(Solo test)	1
Occurring time	E2	전동기 기동 중	1
No. of case	M-100	헐거움 현상	0

례의 추가과정은 사례 검색과정과 비슷하다. 기존의 CBR시스템에서 익명의 사용자가 인터넷을 통해 보내온 자료의 일 예인 Table 3을 이용하여 설명하면, Fig. 11과 같은 사례 추가창에서 각 항목에 대해 해당 키워드를 입력하고 가중치를 입력하면 모든 사례추가

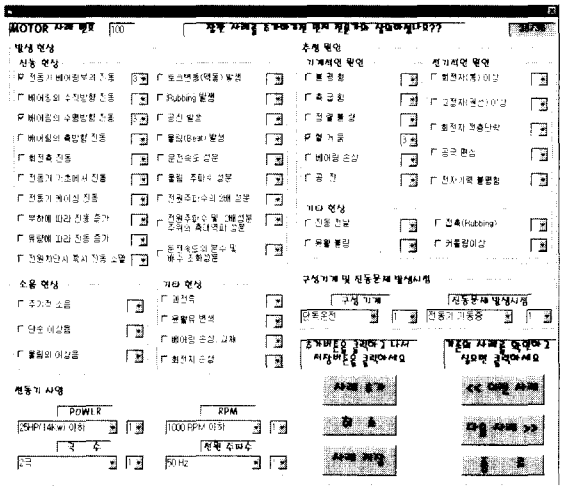


Fig. 11 Data input of case add

과정이 완료된다. 그리고 추가과정이 끝나면, 사례 수정창에서 PN으로 모델링된 라이브러리를 통하여 추가사례가 올바르게 입력이 되었는지를 확인할 수 있다.

5.3 사례 수정

사례의 수정은 기존 사례들 가운데에서 잘못 입력된 사례들을 수정할 수 있는 기능이다. 수정 입력과정은 Fig. 11의 사례추가과정과 유사하다. 사례수정 또한 보다 많은 사례들을 올바른 자료형태로 축적함으로써 사례검색의 신뢰성을 향상시키고, 따라서 시스템의 신뢰도를 높여주기 때문에 전문가에 가까운 해결책을 제시해 줄 수 있다.

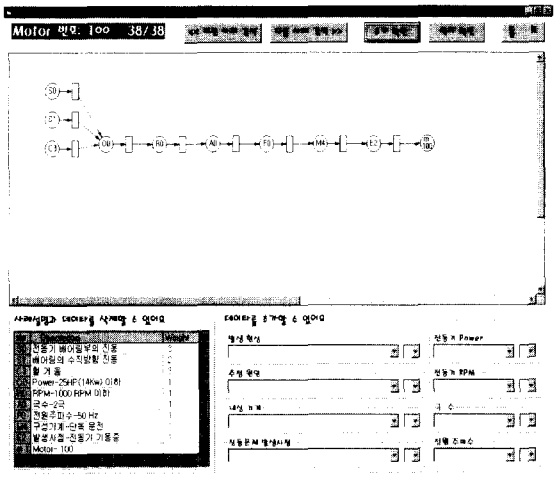


Fig. 12 Result of case revise

만일 예로 Table 3에서 발생한 현상 중 베어링하우징에서 측정한 수평방향의 진동을 수직방향의 진동으로 잘못 입력하였을 경우, 그리고 가중치가 3이 아닌 2인 경우는 수정창에서의 수정과정을 거쳐 사례수정결과는 Fig. 12와 같이 표시되고, 이를 통하여 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 Petri net을 이용하여 사례검색, 사례데이터의 추가 및 수정이 가능한 CBR시스템을 제안하고, 실제 전동기에서 발생한 각종 진동사례에 적용하였다. 사례기반추론시스템은 지식을 복잡한 규칙이나 특정한 형태로 일반화할 필요가 없다는 장점을 가지고 있다. 그리고 학습을 통해 성공 혹은 실패의 사례를 지속적으로 추가함으로써 사례 수를 증가시킬 수 있으며, 이로써 좀 더 전문가의 조언에 가까운 해결책을 제시할 수 있다.

MCMF를 이용한 기존의 CBR시스템은 web기반이라 단지 사례검색만 가능할 뿐 새로운 사례 데이터에 대한 수정 즉, 추가 및 삭제 기능이 없으며, 또한 local PC에서는 구동되지 않는 단점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 Petri net을 이용하여 사례검색, 추가 및 수정과정을 포함한 보다 유연하고 사용자의 편의성을 고려한 CBR시스템을 구축하였다. 특히 사례데이터 수정 시 사례데이터를 문자가 아닌 그림으로 표현함으로서 사용자의 데이터 관리가 더욱 편리하게되고, 이로 인해 사례데이터를 손쉽게 수정, 보강함으로써 좀 더 전문가에 가까운 조언이 가능하도록 하였다. 또한 실시간 진단(real-time diagnosis)과 인터넷을 통한 진단도 가능하며, 이는 향후의 연구과제가 될 것이다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참 고 문 헌

(1) Aamodt, A. and Plaza, E., 1994, "Case-based Reasoning : Foundation Issues, Methodological Variation, and System Approaches", IOS Press, Vol. 7, No. 1, pp. 39~59.

(2) Bergmann, R., et al., 1999, "Developing Industrial Case-based Reasoning Application : The INRECA Methodology", Lecture Note, Springer Verlag.

(3) 이창묵, 양보석, 2000, "회전기계의 이상진동진단을 위한 사례기반 추론시스템의 개발", 소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 1046~1050.

(4) Yang, B. S., Lim, D. S. and Lee, C. M., 2000, "Development of a Case-Based Reasoning System for Abnormal Vibration Diagnosis of Rotating Machinery", Proceeding of International Symposium of Machine Monitoring and Diagnosis, JSME, Aug. 2~3, Nagoya Japan, pp. 42~48.

(5) Peterson, J. L., 1981, Petri Net Theory and The Modeling of Systems, Prentice-Hall, Inc.

(6) Murata, T., 1989, "Petri Nets : Properties, Analysis and Applications", Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 4, pp. 541~580.

(7) Nam, Y. H., 1997, "Recognition of Hand Gesture for Virtual Environments Using Hidden Markov Model and Colored Petri Net", MS Thesis, KAIST.

(8) Hwang, C. S., Lee, J. M., 1991, "An Algorithm for Determining Firing Sequence of Safe Petri Net Using Its Matrix Equation", Trans. KIEE, Vol. 40, No. 3, pp. 299~307.

(9) 양보석, 1998, 기계건강진단사례집, 효성출판사.