

# 불확실성 추론에 기초한 발전설비 진단 시스템 소프트웨어 구조 (Generation Facilities Diagnosis Software Structure Based On Uncertainty Theory)

김창중 이종주  
수원대학교 전기전자정보통신공학부

## 1. 서론

최근 들어 경제의 성장과 함께 이에 따라 전력 수요가 크게 증가되었고, 이에 따라 발전설비 특히 회전 기기도 고전압, 대용량화되어왔다. 회전 기기 설계 및 제작 기술의 향상과 설비 재료의 개발을 통해 발전기기의 성능이 향상되었고 계획적인 발전을 통하여 발전의 신뢰성이 지속적으로 향상되어 왔다. 반면 운전 조건이 보다 가혹화되고 또한 기기의 장기 운전으로 인해 사고 발생이 우려되며, 특히 터빈 등의 중요 기기의 돌발 사고 시는 발전 출력의 정지 또는 감소등 경제적인 손실을 끼치므로 이들 발전설비의 고신뢰성 운전이 한층 더 요청되고 있는 실정이다. 그러므로 신뢰성 있는 전력을 생산하고 공급하기 위해서는 발전설비에 대한 정확한 진단과 그 진단이 조기에 이루어져서 발전설비에 대한 고장 예방과 보전이 이루어져야 하겠다.

하지만 발전설비에서 발생하는 이상은 발생 원인 및 현상이 다양하고, 각각의 원인들이 또 다른 이상을 발생시킨다. 이처럼 여러 가지 이상 형태의 발전설비 상태를 파악하기 위해서는 어느 한 두 가지의 진단법에 의해서는 정확한 진단이 불가능한 상태에 있다[1].

다양한 시스템과 환경에 따라 대부분의 발전설비들은 여러 종류의 이상과 고장들이 복합적으로 나타나는데 이런 고장 징후에 대하여 어떠한 진단법을 사용해야 하며, 또한 진단의 결과를 어떠한 방법으로 운전자에게 알려 주어야 하는 것이 발전설비의 유지 보수에 있어서 중요한 문제이다. 최근에 발전설비 진단에는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 인

공 지능을 이용하는 전문가(expert system) 개념이 도입되고 있다. 이러한 인공 지능적인 방법의 도입을 위해서는 지능적 진단법의 처리가 필요하다. 그러므로 상황과 조건에 따른 정확한 진단법의 선택, 복수 개의 진단법의 동시 적용에 의한 진단법의 시너지(synergy)결합의 방법이 필요한 실정이다[2]. 본 논문은 발전설비의 진단에 있어서 다수의 진단법이 동시에 적용될 경우에 대한 결합법을 Dempster-Shafer 불확실성 추론법에 근거한 증거 이론에 의하여 제시하고 이 이론을 토대로 하여 윈도우즈 기반의 발전설비 진단 시스템 소프트웨어를 PC 환경에서 실현하기 위해서 전문가 시스템 툴(tool)인 CLIPS (C-Language Integrated Production System) 와 비주얼 씨(Visual C++)를 사용하여 구성하였다[3].

## 2. 발전 설비 진단 적용 현황

현재 발전 설비에 대한 예측 보전과 고장의 조기 발견을 위한 미국 전력 회사에서 적용 또는 적용을 고려하고 있는 진단 방법을 표 1에 정리하였다[4]. 최근의 움직임은 이러한 여러 진단 방법을 결합하여 사용하면 그 효과(Cumulative Effect)가 커서 발전소 설비의 운전 중단을 크게 줄일 수 있을 것으로 보고 있다. 이러한 새로운 방법의 적용에 있어서는 다양한 여러 진단법의 조건과 환경에 따른 선택 문제, 그리고 선택된 복수개의 진단법의 결과를 어떻게 효과적으로 종합하여 최종 진단 결과를 얻어내느냐는 문제가 존재하고 있다. 하지만 상태와 환경에 따른 진단법의 동시 적용 및 결합 방법에 대한 연구는 아직

이루어지지 않은 상황이다. 또한 복수개의 진단법을 동시에 사용할 경우 이러한 다른 성능과 다른 환경에서의 진단 결과를 어떻게 결합하여 시너지(synergy) 효과를 거두며 최적의 진단

표 1. 발전설비 고장 진단 현황  
Table 1. Status of Plant Diagnosis

적용대상	예측 보전 기술	적용 기관
터빈축 균열	진동 신호 분석	플로리다 전력
터빈 블레이드 진동	음향 도플러	필라델피아 전력
발전기 아킹	RF 신호 검출	텍사스 전력
터빈/보일러 부식	방사형 감쇄 현상	테이턴 전력
터빈 응축	초음파	Penelec
보일러 관 누출	음파	볼티모어 전력
위험 부위의 진동	레이저	엘러게니 전력
보일러 피로 누적	스트레스 분석	콘 에디슨
회전부위 손상	진동 신호 분석	필라델피아 전력
펜 배어링 고장	진동 및 음향	Penelec

결과를 나타낼 수 있으나 하는 문제도 제기되는 것이다.

### 3. 발전 설비 진단 시스템 구조

본 발전설비 진단 시스템 소프트웨어는 전문가 시스템을 구성하는 툴(tool)인 CLIPS을 사용하여 발전 설비를 진단하는 룰, 진단 조건, 그리고 개체를 형성하여 순차적 진단을 하도록 하였다. 또한 복수개의 진단법을 사용하고 이들의 결과들을 조합하여 최종 결론은 유도하기 위하여 불확실성 추론 이론인

Dempster-Shafer 이론을 적용하여 비주얼 씨(Visual C++)내에서 윈도우즈 환경의 소프트웨어로 구현 하였다.

본 발전설비 진단 시스템은 그림 1과 같은 구조에 기반을 두고 만들어져 있다. 기본적인 구성은 대상분야를 진단하기 위한 전문지식을 CLIPS를 사용하여 룰(rule)로 표현하고 이것을 종합적으로 관리하는 지식 베이스를 데이터 베이스로 구성하였다. 그리고 이 지식 베이스에 저장된 지식을 이용해서 추론을 실행하는 추론기구 불확실성 추론법인 Dempster-Shafer 이론을 적용하여 구성하였으며, 사용자와 시스템 사이를 연결하는 사용자 인터페이스는 보다 편리한 사용을 위하여 윈도우즈 기반의 프로그램으로 구성되었다.

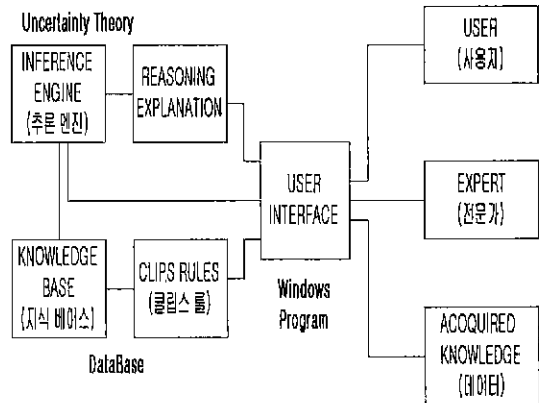


그림 1. 발전설비 진단 시스템의 구조  
Fig 1. Structure of Turbine-Generator Diagnosis System

### 4. 발전 설비 고장 진단 지식 베이스

발전설비의 대부분을 차지하는 고압의 회전 기기는 매우 복잡한 구조로 구성되어 있으므로 사고부위 및 형태가 매우 다양하다[5]. 터빈 발전기의 구조는 일반적으로 그림 2와 같이 터빈 부분과 발전기 부분으로 나뉘는데, 터빈 부분과 발전기 부분은 공통적으로 회전 기기를 가지고 있으며, 터빈 부분과 보일러 부분은 스팀이나 열에 의한 이상 현상이 발생하고, 주로 기계적 진단이나 진동 진단을 사용하여 이상을

찾아내고 있다. 터빈 발전기의 발전 부분은 주로 고정자와 회전자로 구성되고 이에 대하여는 주로 전기적 절연 진단과 진동 진단을 적용하여 이상 유무를 진단한다.

발전설비로부터 얻어진 입력 데이터를 지식베이스에 기초하여 비교 분석하며 발전설비의 이상이 검출되었을 시에는 현재의 이상 현상이 일시적인 것인지, 지속적(장기적) 이상인지 또는 이상 현상의 심각한 정도와 이상 현상의 진전 정도를 단계별로 구분하여 경고하며, 이상 현상으로 인하여 발전 설비의 손상이나 피해에 대한 결과와 각각의 손상정도에 따른 적절한 대처법을 사용자에게 출력하도록 하였다.

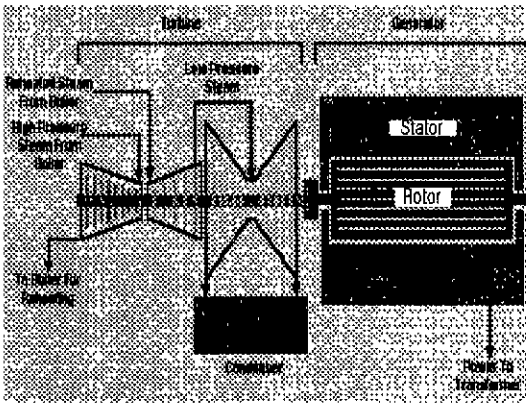


그림 2. 터빈 발전기의 구조  
Fig 2. Turbine-Generator Structure

본 발전설비 진단 시스템에서는 기존의 고압 회전기 진단, 발전설비 진단에 대한 결과를 수집 연구하여, 터빈 발전기에 공통적으로 연결된 회전축 상에서 일어나는 진동 진단과, 회전축과 기기를 연결 지지하는 베어링 진단, 그리고 발전기 부분의 중요한 요소인 고정자와 회전자의 절연을 전문가 시스템에 의하여 설비진단이 이루어지도록 하기 위하여 본 논문에서는 진단 방법과 진단 대상 그리고 공통적으로 나타나는 이상현상들에 대하여 다음과 같이 지식베이스를 구성하였다.

본 시스템에서 사용된 절연진단의 지식 베이스는 현재 널리 사용되고 있는 진단법 즉, 메거 시험법, 직류 고전압 시험법, 교류 전류 시험법, 부분 방전 시험법 등의 진단 방법들을 조사하여 절연 진단 지

식 베이스를 형성하였다[6,7]. 진동 진단의 지식 베이스는 대표적인 진동 이상 현상인 축 불일치, 축 불균형, 축 마찰, 오일 회전등으로 구분하여 형성하였다[ 8,9,10]. 마지막으로 베어링 진단의 지식 베이스는 베어링 손상의 정도나 원인을 밝혀 내는데 널리 사용되고 있는 음파(Acoustic Emission)를 이용한 진단법을 기반으로 하여 베어링 진단의 지식 베이스를 구성하였다[11].

## 5. 터빈 발전기 진단용 전문가 시스템의 실현

본 시스템에서는 각각의 진단 방법을 지식 베이스로 하여 증상이나 주어진 조건에 알맞은 진단을 채택하여 진단할 수 있게 구성하였다. 또한 이상 현상이 발생하면 어느 정도의 이상현상이 진행 중이라는 메시지와 함께 보수 지시를 내리는 메시지를 화면에 출력하여준다. 예를 들면, 현재 고정자내의 온도가 절연물의 한계값 이상으로 상승중일 경우 현재 고정자내의 절연에 문제가 생겼다는 메시지와 함께 보다 자세한 진단을 위한 다음 물을 찾고 그 물로 넘어 가게 된다. 그러한 절차를 거쳐, 고정자에 대한 절연 진단을 마치고 난 뒤 현재 발생한 이상 현상에 대한 고정자의 상태와 적절한 처리 요령을 지시하고 난 뒤 고정자와 연결된 베어링이나 회전축의 진단으로 넘어 가게 된다. 이러한 과정을 거쳐 각 진단의 결과를 불확실성 추론법을 사용하여 최종 진단을 하게 된다.

### 5.1 최적 진단법 설정 알고리즘

많은 방법 중에서 주어진 조건과 환경에서 최적의 진단법을 선택하기 위해서는 기본적으로 결정 이론이 구비되어야 한다. 결정이론의 기본 원리는 많은 다른 방법들 중에서 하나의 길을 택하기 위한 분석적 방법을 제공하는데 그 목적이 있다. 전통적인 결정 이론은 결정을 내리는 사람 또는 시스템 앞에 주어진 여러 것 중에서 하나를 선택하는 것을 전체로 하여왔다. 이런 경우 선택을 위하여서는 비교조건(attributes)을 비교하여 가장 좋은 것을 선택하게 된

다. 한편, 각각의 진단법의 성능이 주어진 조건에 따라 다르다면, 즉, 불확실(uncertain)한 경우에는 선택된 진단의 성능 또는 결과는 앞으로 또는 주어진 조건과 환경에 따라 결정이 된다. 예를 들어 3개의 진단법(D)과 3개의 각 다른 환경 조건(E)이 있는 경우 3개 진단법은 각 환경 조건에 있어서의 진단 성능(O)은 아래와 같이 주어지게 된다. 즉,

$$\begin{matrix}
 E_1 & E_2 & E_3 \\
 D_1 & \begin{pmatrix} O_{11} & O_{12} & O_{13} \\ O_{21} & O_{22} & O_{23} \\ O_{31} & O_{32} & O_{33} \end{pmatrix} \\
 D_2 \\
 D_3
 \end{matrix}$$

이러한 결정 이론 모델을 채용하여 진단법의 선택은 다음과 같은 3 단계를 거쳐 이루어지게 된다. 즉, 진단법 선택 데이터 베이스를 위한 초기화 단계, 진단법 결정 단계, 그리고 마지막으로 진단법 결정 update 단계로 이루어진다. 초기화 단계에서는 주어진 환경 조건에 따라 좋은 성능을 보이는 순서대로 진단법을 저장한다. 진단법 선택 단계에서는 주어진 환경 조건에 따라서 가장 진단 성능이 좋은 진단법을 선택하는 단계이다. 선택 update 단계는 중요한 변수가 바뀌었을 때 선택을 새롭게 할 때 적용된다.

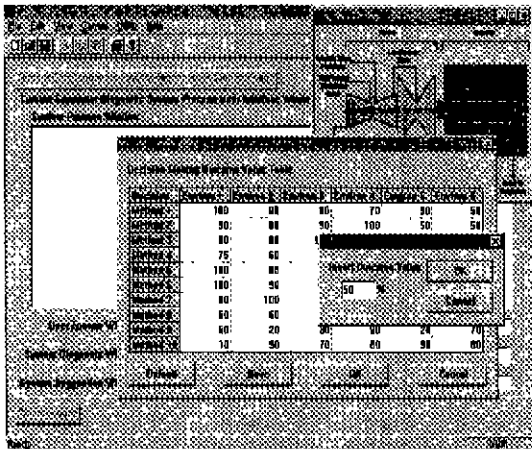


그림 3. 최적 진단법 설정 다이얼로그 박스  
Fig 3. Decision Making Theory Dialogue Box

본 시스템에서는 그림 3와 같은 방법으로 시스템 사용자가 윈도우 환경에서 다이얼로그 박스를 이용하여 보다 편리하게 결정 이론을 사용하며, 운전자에 의지에 따라 결정 이론의 변수를 바꿀 수 있도록 구성하였다.

선택의 결정을 내릴 수 있는 프레임 또는 상태에는 보통 3 가지가 있다. 첫째는 결정을 내리는 시스템이 미래에 대하여 전혀 확실성을 갖고 있지 않는 경우이다. 즉, 확률적으로도 그 정보가 전혀 없는 경우를 말한다. 둘째는 앞으로의 사건에 대한 정보가 확률론적으로 특별한 값으로 존재하는 경우이다. 세 번째는 위의 두 경우의 중간에 해당하는 것으로 일부의 정보가 주어지 있으나 확실한 확률은 주어지지 않은 불완전한 지식의 경우를 말한다. 이러한 경우를 '불완전 지식하의 결정(decision making under incomplete knowledge)'이라고 한다.

불완전 지식하의 결정에 있어서는 다음과 같은 것을 전제할 수 있다. 즉, 결정을 내리는 당사자는 그 주위환경에 대하여 그 중요도를 순서로 정할 수 있다는 전제이다. 즉, 주어진 환경 E에 대하여  $E_1 > E_2 > \dots > E_n$ 에 대한 전제이다. 예를 들어 발전설비에 대하여 두 가지의 진단법이 가능한 경우, 이 두 진단법을 적용할 여러 환경에 대하여 선행적(a priori)인 중요도가 정해져 있다는 것이다. 그리하여 이러한 전제에 대하여 두 가지 방법에 의하여 진단법에 대한 기대치를 구하게 된다[12].

## 5.2 Dempster-Shafer 이론 적용

발전설비의 진단 특히 회전기의 절연 진단과 터빈의 진동 진단에 있어서는 여러 진단법들에 의한 진단을 바탕으로 진단 결과 hypothesis 대한 결합이 요구된다. Dempster-Shafer이론은 이러한 복합적인 hypothesis의 결합에 대한 좋은 방안을 제시하고 있다. 즉, 주어진 복수개의 진단 결과에 대하여 그 증거에 기초한 새로운 최종의 신뢰치를 생성시켜 주는 것이다.

Dempster-Shafer이론은 불확실성이 존재하는 상

황에서 신뢰도 정도(degree of belief)에 근거하고 있다. 이 이론은 다른 이론 이라면 Bayesian 이론과는 다르게 어떤 hypothesis에 대하여 그 hypothesis의 subset에 대해서 이 분포를 규정하게 된다[13]. 예를 들면 터빈 진동 진단에 있어서 진동 원인을 구명하는 경우 balance 조정 불량, 커플링 불량, 또는 구조물의 공진 또는 자계권선 층간 단락의 원인을 규명하고자 하는 경우 이러한 알려진 원인 이외에도 위의 원인을 두 가지 이상 포함하는 원인이 있을 수 있는 것이다. 즉, 원인이 잘 구분이 안되는 현상 이라면 단순히 '진동 불량'으로 할 경우 이것은 balance 조정 불량, 커플링 불량을 동시에 포함하게 되는 것이다. 그리고 이 진동 불량은 급유나 유압의 문제에서도 올 수도 있는 일이다. 그러므로 진동 불량에 대한 증거의 확률이 이라면 0.6이라면 이 0.6 확률이 (balance 조정 불량, coupling 조정 불량)의 Set에 규정되지 위의 어느 한 개체에 국한하여 규정되는 것은 아니다.

Dempster-Shafer 이론은 각 진단 결과와 원인 요소에 대한 증거를 [1, 0] 사이의 숫자로 나타내며 이것을 기본 신뢰도(basic belief)라고 부른다. 그리고 복수개의 기존 신뢰도가 모여서 하나의 신뢰 함수(belief function)를 이루게 된다. 그리고 이러한 신뢰 함수를 결합하는 것을 신뢰 결합(Belief Combination)이라고 부른다. 이 결합에 있어서는 어떤 원인을 지지(support)하는 증거 (즉, "어떤 요인 B에 의한 진동이다") 뿐만 아니라 어떤 원인을 지지(support)하지 않는 증거 (즉, "이 진동은 요인 A에 의한 것이 아니다")도 같이 결합할 수 있어서 복수개의 증거에 대한 종합적 진단을 가능하게 한다. Dempster-Shafer 증거 이론에 의하여 진동 원인 i 에 대한 최종 신뢰 함수는 다음과 같은 결합식에 의하여 구할 수 있다.

$$Bel([i]) = K [p_i \prod_{j \neq i} d_j + r_i \prod_{j \neq i} c_j]$$

여기에서  $p_i$  는 이 진동 원인을 지지하는 증거이며,  $c_i$  는 이 진동원인을 지지하지 않는 증거이고  $r_i$  는 중립적인 증거를 나타낸다.

본 시스템에서는 이러한 불완전한 지식하에

서의 진단법의 선택을 위한 방법과 이를 위한 데이터 베이스를 설정하는 알고리즘을 이용하였다. 다음 단계에서는 불확실성 추론법의 하나인 Dempster-Shafer이론을 이용하여 다음에 설명할 복수개의 진단법에 의한 요인에 대한 증거를 결합하여 최종 진단결과를 산출하는 시스템을 구성하였다.

## 5.2 발전 설비 진단 시스템의 실현

본 발전설비 진단 시스템은 윈도우즈 환경을 기반으로 하여 문답식의 형식으로 만들어진 다양한 진단 룰을 통하여 사용자로부터 얻어진 데이터, 불완전한 지식하의 결정된 진단 방법들, Dempster-Shafer 이론으로부터 나온 복수개의 진단법에 의한 요인에 대한 증거를 결합하여 동작하며 최종 진단 결과를 산출하게 된다. 또한 본 시스템은 그림 4에서 보는 바와 같이 진단해

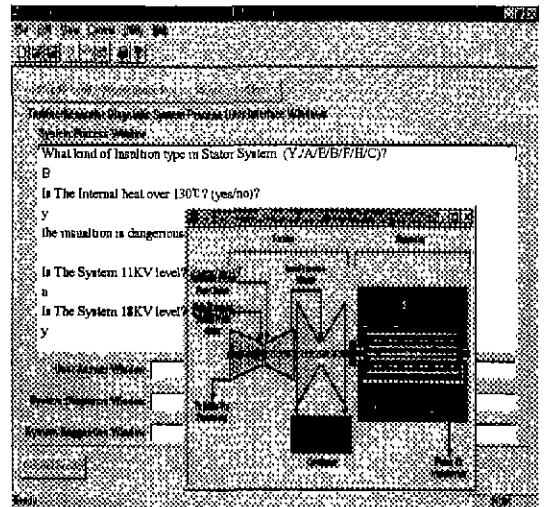


그림 4. 발전설비 진단 시스템 실행 화면  
Fig 4. Execution of Diagnosis System

나가는 과정을 사용자에게 보여주고, 현재의 진단 대상이나 장치의 변화 상태를 출력 또는 모달리스 다이얼로그 그림으로 나타내어 주며 이에 따른 적절한 대책이나 지시도 사용자에게

하여 사용자 혹은 설비 관리자로 하여금 적절한 대책을 마련하거나, 보다 정확한 판단은 할 수 있도록 도와준다.

## 6. 결론

발전소 건설의 문제와 함께 기존의 발전 설비에 대한 의존도가 높아가고, 또한 발전 설비의 예상치 못한 정지는 생산현장과 조업에 큰 영향을 미치므로 발전설비에 대한 조기 고장 진단과 예측 보전을 위한 요구가 일어나고 있고 아울러 각종 진단법이 소개되고 있다. 그러나 각 진단법은 상황에 따라 그 진단 성능에 차이가 있어서 최근에는 이러한 진단법을 결합하여 전문가 시스템에 의하여 사용하고자 하는 요청이 일고 있다.

본 발전설비 진단 시스템은 다수의 진단법을 동시에 채용할 때의 진단 결과를 Dempster-Shafer의 불확실성 추론법에 근거하여 구성되었으며, 지식 베이스가 진단 방법 즉, 진단룰로 구성되어 있고 발전설비 진단 시스템이 윈도우즈 기반으로 작성되었기 때문에 계속적인 진단 방법의 추가와 사용자가 취사선택한 룰의 사용으로 보다 정확하고 편리한 진단을 할 수 있으며 복수개의 진단 방법을 동시에 적용함으로써 발전기의 회전 기기에서 발생하는 이상 현상들에 대한 조기 고장 진단과 이에 따른 진단 결과의 시너지(synergy)효과도 가능할 것으로 기대 된다.

본 연구는 과학재단의 연구비 지원 (과제 "발전소의 고신뢰 운전 및 고장 조기 진단을 위한 계측 신호 해석 기법에 관한 연구 (세부과제: 불확실성 추론법에 기초한 발전소 진단시스템에 관한 연구)", 과제번호: 96-0102-02-01-3) 에 의하여 수행되었음.

## 7. 참고문헌

- [1] Proceedings of the Third EPRI Incipient Failure Detection Conference, EPRI, August 1988.
- [2] 김칭중, "발전설비 예측 보전을 위한 Evidence Theory의 적용", 대한전기학회 전기기기 연구회 학술 발표회 논문집, 1997년 4월 pp.72-75
- [3] "CLIPS Reference Manual" Software Technology Branch, Lyndon B. Johnson Space Center, vol. I, June 2nd 1993
- [4] Proceedings of Incipient Failure Detection for Fossil Power Plant Components, EPRI, March 1983.
- [5] Feasibility study of on-line vibration diagnosis of Steam Generators, EPRI report, RP-S141-01, 1981.
- [6] 김길용, 김택수, 이승학, "회전 전기기기의 절연진단기술 연구," 전력연구, 1990년 5월, pp. 9-22.
- [7] 이현, 이정수, "진동신호처리에 의한 터빈 상황 진단 및 결함 탐지기술 연구," 전력연구, 1990년 5월, pp. 23-33.
- [8] 일본전기학회 편저, 전기설비의 진단기술, 한국전기협회, 1994.
- [9] Vibration monitoring and analysis for auxiliary rotating machinery at the J.A. Fitzpatrick Nuclear Station, EPRI report TR-284, 1987.
- [10] 김종락 "A Study on a Fault Diagnosis of Rotating Machinery by an Experimental Method", 한양대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1992. 12
- [11] 정민희, 송규천, 조용삼 "회전기 베어링 AE 진단 기술 개발", 전력연구 pp.37-40
- [12] Z. W. Kmietowicz, A. D. Pearman, Decision Theory and Incomplete Knowledge, Hampshire, UK: Gower Publishing, 1981.
- [13] J. Gordon, E.H. Shortliffe, "The Dempster-Shafer Theory of Evidence", in Rule-Based Expert System (B. G. Buchanan, E. H. Shortliffe (eds.)), Reading, MA: Addison-Wesley, 1984, chapter 13, pp.272-292.

- [1] Proceedings of the Third EPRI Incipient Failure Detection Conference, EPRI, August 1988.
- [2] 김칭중, "발전설비 예측 보전을 위한 Evidence Theory의 적용", 대한전기학회 전기기기 연구회 학술 발표회 논문집, 1997년 4월 pp.72-75
- [3] "CLIPS Reference Manual" Software Technology