원전설비 결함진단을 위한 전문가시스템 개발

우 희곤, 최 성수, 최 °병재

한국전력공사 기술연구원

Development of an Expert System for Steam Generator Tube Inspection of Nuclear Power Plants

Hee-Gon Woo, Seong-Su Choe, °Byung-Jae Choi

KEPCO Research Center

Abstract

The inspection for steam generator tubes of nuclear power plants is performed by eddy current test method. In the current, human experts should check enormous amounts of eddy current(EC) signals to find abnormal ones on the computer screen. This method could cause a few problems. The purpose of this paper is to develop an expert system which can automatically evaluate EC signals of steam generator tubes. Since this expert system can replace or help human experts, the reliability in EC signal evaluation can be improved, and the required man-power can be reduced. Additionally, application of this system can shorten the overhaul period, contribute to a safe operation of the nuclear power plant.

1. 서 론

원자력 발전의 안전성에 대한 공감대가 확산되면서 근래 원자력 분야에서는 사람의 실수로 인한 사고 가능성의 배제, 전문기술의 안정적 공급 및 원자력 발전의 안전성에 대한 신뢰도 배가의 측면에서 인공지능(Artificial Intelligence, AI)기술의 도입이 활발히 이루어지고 있다.

전문가 시스템이란 전문가의 해석 또는 전문가의 지식을 요구하는 분야에 대해 컴퓨터를 이용하여 전문가의 진단에 도움을 주거나 전문가를 대신할 수 있도록 구성된 소프트웨어 시스템을 의미한다. 따라서 전문가의 전문지식이 요구되는 모든 분야에 이를 적용할 수 있으며, 특히 원자력 분야에서의 전문가 시스템은 사람의 실수가 발생하기 쉽고, 경험에 바탕을 둔 전문지식이 요구되는 고장진단 분야 등 여러 분야에 널리 적용될 수 있다.

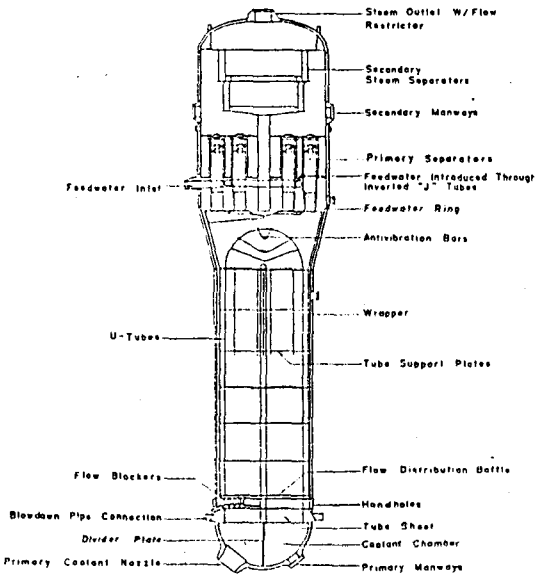
원자력 발전소는 간혹 예기치 못한 운전정지가 발생하는데 그 원인중에서 증기발생기 전열관 파손에 따른 1차 냉각수 누수에 의한 경우가 종종 존재한다. 따라서 여기서는 발전효율 증대 및 원전의 안전운전에 중대한 영향을 미치는 증기발생기의 전열관 검사를 전문가 시스템 기술을 적용하여 자동화하는데 그 목적이 있다.

먼저 지금까지 시행하고 있는 검사방법 및 그에 따른 문제점을 지적하고 이러한 제반 문제점을 해결하기 위하여 전문가 시스템의 개념을 적용 증기발생기 전열관 검사를 자동화 하였다.

2. 증기발생기 전열관 검사

2.1 증기발생기란

증기발생기(Steam Generator, SG)는 원자력 발전소의 격납용기 내부에 존재하며 호기당 2 ~ 4 개를 보유하고 있다. 일반적인 구조는 (그림 2-1)과 같다. 그림에서 알수 있듯이 증기발생기 내부에는 두 종류의 물이 흐르고 있는데 그 하나는 원자로에서 발생한 열을 받아서 고온 고압을 유지하며 증기발생기 내부의 U자형 전열관 내부로 흐르는 1차측 냉각수이고, 다른 하나는 이들 전열관 사이 사이로 흐르면서 1차측의 열을 공급받아 증기로 바뀐후 발전기에 가해지는 2차측 냉각수이다. 즉 원자력 발전소의 증기발



<그림 2-1> 증기발생기의 일반적인 구조

생기는 화력발전소의 보일러와 같은 기능-열교환 기능-을 수행하는 설비이다.

2.2 와전류 탐상법에 의한 증기발생기 전열관 검사

각 증기발생기에는 3,000여개 이상의 U자형 전열관이 있으며 이들의 재질은 inconel 600이다. 이들 전열관의 결함 여부는 와전류 탐상법(Eddy Curent Test, ECT)을 사용하여 검사하고 있으며 증기발생기 전열관의 검사 장비 및 검사절차는 대략 (그림 2-2)와 같다. 이들 전열관에 손상이 생길 경우 고준위 방사능에 오염되어 있는 1차 계통의 물이 2차 계통으로 침투하여 2차 계통 냉각수를 오염시킬 수 있다. 이 현상은 돌발 가동중지를 유발할 수 있기때문에 발전소에서는 이를 사전에 방지하기 위하여 정기보수공사시 각 증기 발생기 전열관의 결함 여부를 검사하고 있다.

검사절차를 간단히 요약하면 다음과 같다. 먼저 증기발생기 전열관의 번호를 확인하기 위하여 tube sheet 하단에 template를 부착하고 chamber 내부에 탐촉자, manipulator 등 제반 데이타 수집 장비를 설치한다. 검사 데이타의 수집은 격납 용기 외부의 데이타 취득실에서 chamber 내부에 있는 장비들을 원격 조정하여 수행한다. 검사 주파수는 보통 800KHz, 600KHz, 300KHz 및 100KHz의 4개를 사용하지만 증기발생기 모델에 따라 변한다. 또한 내삽형 탐촉자를 사용하여 자기 비교형 차동법(differential)과 표준 비교형 절대법(absolute)에 의해 신호를 동시에 수집한다. 따라서 4개의 검사 주파수와 2개의 수집방식의 조합에 의해 보통 하나의 sampling point에 대해 동시에 8개channel의 데이타가 수집된다(그림 2-2).

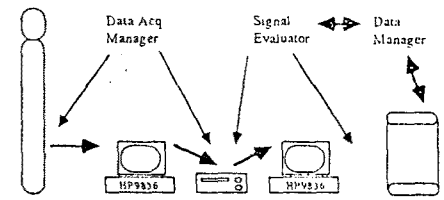
신호평가는 신호 위상각에 의한 결함 깊이 평가방법과 신호진폭에 의한 결함길이 평가방법을 결함 발생 위치에 따라 분리하여 적용한다. 또한 전열관 지지판(Tube Support Plate, TSP)등과 같은 특정위치에서는 해당 구조물에 대한 신호와 결함신호가 합성되어 나타나므로 두개 이상의 검사 주파수 신호를 혼합하여 해당 구조물에 대한 신호를 소거한 후 그 결함의 깊이를 평가하는 등 위치에 따라 다른 평가방법이 행해진다. 신호 평가 전문가는 이론적인 지식과 축적된 경험을 바탕으로해서 연속적으로 변하는 (그림 2-3)과 같은 화면을 주시하다가 결함으로 추정되는 이상신호를 추출해낸다. 이 추출된 신호에 대하여 여러가지 방법을 이용하여 결함의 위치, 종류, 깊이 그리고 길이 등을 평가하고 결함의 정도에 따라 관 막음(plugging), 관 재생(sleeving)등의 전열관 보수작업을 수행한다.

2.3 문제점

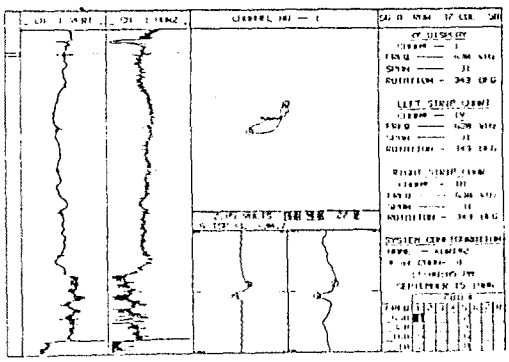
2.2절에서 언급했듯이 현재까지 사용중인 증기발생기 전열관의 결함 검사법은 자격을 갖춘 전문가가 컴퓨터 화면을 통하여 연속적으로 나타나는 전열관 신호에 대한 그래프를 일일이 주시하면서 육안으로 이상이 있는 신호를 추출했었다. 이러한 검사법은 다음과 같은 문제점을 안고 있다.

1. 지루한 작업으로 인한 이상신호의 소홀 가능성
2. 전문가의 주관적 판단에 따른 견해차 및 판단착오의 가능성
3. 방대한 자료 처리에 따라 요구되는 많은 시간과 인원
4. 와전류 검사 전문기술의 안정적 공급 미보장

따라서 인공지능 기술의 원자력 분야 응용중 그 활용도가 가장 높은 전문가 시스템을 적용하여 증기발생기 전열관의 와전류 신호 검사를 자동화하는 연구는 시급한 과제였다.



<그림 2-2> 증기발생기 전열관 검사 절차



<그림 2-3> ECT 신호평가에 사용되는 실제화면

3. 전문가 시스템의 설계 및 구현

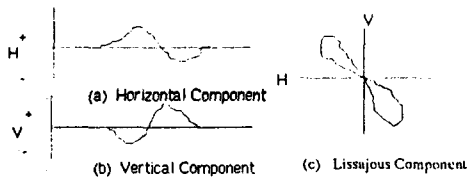
3.1 개요

본 와전류 탐상 전문가시스템은 X-window를 이용한 사용자 인터페이스등 비 인공지능 개념과의 접속이 필요하며 또한 그 수행성능도 크게 개선되어야 한다는 요구에 따라 모든 인공지능 program 뿐만 아니라 graphics, real time data acquisition 그리고 external data base program등을 모두 C 언어를 이용하여 구현하므로 인해 module 간의 interface 상의 overhead를 최소화 하고 시스템 통합이 용이하도록 하였다. 이를위해 도입된 전문가시스템 kernel 구성을 위한 개념들은 우선 와전류 신호 평가를 위한 지식들을 production rule의 형태로 표현하고 입력되는 신호 자료에 따라 해당되는 rule이 수행되는 자료 흐름 방식(data-driven)에 의한 순방향(forward) 추론을 하도록 구성했다. 또한 위와같은 순수한 rule based production system을 구현하는 데에

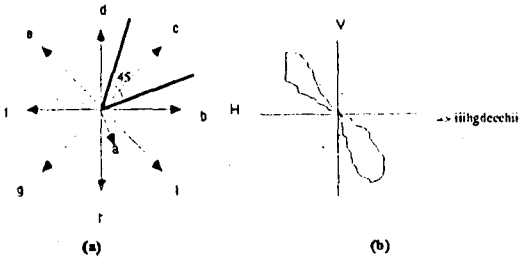
는, 지식(knowledge)들의 연관 관계를 표현하는데 강한 객체 지향형(object-oriented) 지식 표현 방법을 이용 하므으로써, IF .. THEN ..의 순수한 production rule의 형태로 지식을 표현하는데서 기인하는 약점을 보완할수 있도록 하였다.

3.2 와전류 신호의 표현

와전류 신호는 (그림3-1)과 같이 컴퓨터 화면에 나타나며 사람이 그것을 보고 결함이 있는 신호인지 아닌지를 판별하는데, 전문가 시스템을 이용하여 자동 평가할시에는 (그림 3-1)의 신호를 Freeman 의 chain code [1] 를 사용하여 string 모양으로 바꾸며 (즉, (그림 3-2(a)) 의 위상 정의를 이용하여 (그림 3-2(b)) 에서 처럼 실제 신호를 string 모양으로 바꾼다), 그 string 모양 신호를 문법적으로 또는 구문적 (syntactic) 으로 분석, 분류하여 결함 신호인지 정상 신호인지 구별한다.



<그림 3-1> 와전류 파형 해석에 이용되는 3 가지 요소



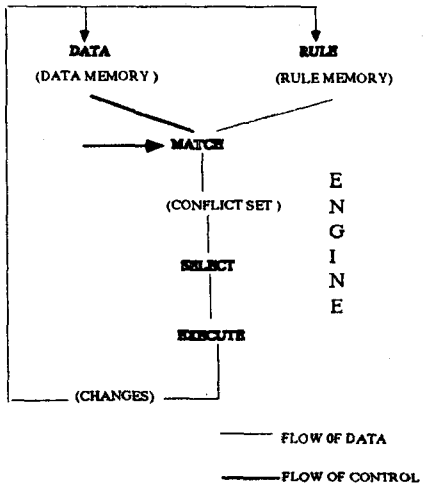
<그림3-2> (a) 정의된 기본패턴에 대한 lissajous 평면상의 위상
(b) string으로 표현된 실제신호

3.3 지식 추출 및 표현

와전류 신호를 평가하는데 필요한 모든 지식들,즉 short term knowledge (와전류 자동 해석을 위한 전문가 시스템에 존재하는 지식)와 long term konwledge (시스템 내에 표현되는 모든 지식 - data knowledge, rule knowledge 들에 대해 그들간의 group, priority, hierachy 등의 연관성을 구조적으로 표현 할수 있는 4 가지의 meta-rule GLOBAL_ RULE_ GLOUP, GROBAL_ RULE, LOCAL_ RULE_ GROUP, LOCAL_ RULE) 들을 object로 표현하고 이렇게 표현된 object들간의 여러 종류의 관계 (relationship)를 해당 object의 property list에서 표현할 수 있도록 전문가 시스템 kernel을 구축하였다. 이와같이 본 실용 전문가시스템에 도입된 object-oriented 지식 표현 방식은 전문가 시스템에서 존재하는 모든 지식들을 object, property, 그리고 value의 형태로 표현할수 있고 이 요소들로 표현되어 storage에 저장된 지식을 knowledge base라고 표현 한다.

3.4 추론 구조

본 시스템에서의 추론 기능 즉 inference engine 은 (그림 3-3) 과 같이 production system의 기본구조를 따른다[2-3].



<그 림 3-3> 전문가 시스템 추론 구조

3.5 사용자 인터페이스

사용자 인터페이스는 C 언어와 UNIX 환경 하에서 X-window, 즉, X lib 와 Motif 를 사용하였으며 보조 평가 시스템용으로 19" color monitor 위에서 구현되었다.

4. 검증 및 결론

본 전문가 시스템은 실용 시스템을 목표로 하여 설계되었으며 HP/UX 상에서 C 언어를 이용하여 구현 하였다. 이 시스템에 대한 검증은 calibration standard를 위한 데이타로 이용되는 인공 결함 신호에 대한 자료와 고리 2호기 증기 발생기 전열관에 대한 신호 자료를 사용했다. 본 시스템에서는, 상용되고 있는 검사 장비가 보편적으로 8 channel에서 얻어진 와전류 파형을 분석하여 분류및 결함 깊이를 평가하는 방식이므로, 그에 준하여 다중 channel의 자료를 이용한 정밀한 분석을 할수 있도록 구현되었다. 그러나 이 전문가 시스템의 가장 핵심 부분이라 할수 있는 지식 기반(knowledge base), 즉 와전류 파형을 해석하는데 필요한 지식들은 학습에 의해 점진적으로 누적되는 것으로, 현재 까지 누적되어있는 지식은 실제 증기 발생기 전열관의 모든 이상 신호를 감지 분류 하기에는 빈약한 실정이다. 따라서 본 시스템의 검증으로 비교적 신호의 성질이 뚜렷한 구조물(Tube Support Plate,Tube Sheet, Baffle Plate, Anti-Vibration Bar 등) 신호에 한하여 신호의 정확한 추출 여부 및 처리 속

도에 중점을 두어 검진을 한 결과 신호의 정밀한 추출 및 분석이 신속 정확히 이루어짐을 확인할 수 있었다.

앞으로 본 전문가 시스템 실용화의 관건은 지식 기반의 확충에 있다. 즉 지식 기반은 신호 해석에 필요한 축적된 지식을 의미하며, 이 지식은 신호 해석 전문가로 부터 구조적으로 수집하여 정밀한 검증을 거친후에 본 전문가 시스템에 기계 학습(machine learning)적 방법으로 지식 기반에 수록하게 된다. 그러나 이 작업은 정밀한 신뢰도를 바탕으로 충분한 기간 동안에 걸쳐 점진적으로 이루어 져야 하므로 이 분야에 대한 계속적인 연구 및 지원이 요구된다. 이 지식 기반이 충분히 축적된 후에 역시 충분한 시간에 걸친 현장 검증 및 적용이 점진적으로 이루어 질것이다.

정의된 기본 패턴을 분할 (segmentation)된 입력 파형에 적용하여 얻어지는 입력 파형 string의 추출로 이어지는 구문적 표현(syntactic representation) 방식의 도입은 시스템 내부에서의 신호 표현 및 처리를 용이하게 하여, 실제 신호 값을 이용하는 방식에 비해 처리 속도 및 storage overhead를 최소화할 수 있었다. 또한 이로인해 전문가 시스템에서 검사 전문가의 중요한 습관인 신호의 모양과 궤적을 이용한 이상신호의 우선추출 방식의 구현이 용이했다.

참 고 문 헌

[1] K. S. Fu, "Syntactic Pattern Recognition and Applications", Prentice-Hall, 1982.

[2] H. David, "C/C++ for Expert Systems, MIS Press",1989.

[3] M. Richer,"AI Tools and Techiques", Ablex Publishing Corp.,1989.

[4] "Advanced Eddy Current Data Analysis Techniques for Steam Generator Tubing", EPRI NDE Center, 1984.

[5] R. Shanker, C. L. Brown, A. N. Mucciardi and T. J. Davis, "Feasibility of Using Adaptive Learning Networks for Eddy Current Signal Analysis," NP-723, Electric Power Research Institude, Palo Alto, Cal. 1978.

[6] P. G. Doctor, T. P. Harrington, T. J. Davis, et al., "Pattern Recognition Methods for Classifying and Sizing Flaws Using Eddy-Current Data," Pacific Northwest Laboratory, PNL-SA-7984, Battelle, Sep. 1979.

[7] S. S. Udpa and W. Lord, "A Fourier Descriptor Classification Scheme for Differential Probe Signals," Materials Evaluation Vol 42, Aug. 1984, pp 1136-1141.

[8] R. Palanisamy and W. Lord, "Prediction of Eddy Current Probe Signal Trajectories," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-16, No.5, Sept. 1980, pp 1083-1085

[9] E. Skordalakis and P. Trahanias,"Primitive Pattern Selection and Extraction in ECG Waveform," Proc. of 8th intl' conf. on Pattern Recognition, Paris, Oct., 1986, pp 380-382

[10] 허영환외, "전문가 시스템의 원자력 분야 응용을 위한 연구", 한국에너지 연구소, KAERI/RR-662/87, 1988.

[11] 허영환외, "원전 증기발생기 전열관 진단을 위한 프로토 타입 전문가 시스템 개발에 관한 연구," 1989년도 한국정보과학회 봄 학술발표집, Vol.16, No1, 4월, 1989년, pp 197-200

[12] "원자력 2호기 제3차 가동중검사 (증기 발생기 와전류 탐상) 최종보고서", 한국에너지 연구소, 비파괴 실험실, 1988. 8.