

蒸氣發生器傳熱管 檢査工程 自動化시스템 開發의 意義

원자력발전소의 사고예방정비를 지원하는 원전전문가시스템이 개발돼 최근 실용화에 들어갔다. 한국전력공사 기술연구원 전자응용연구실 우희곤 박사팀이 지난 89년 9월부터 3년동안 개발한 이 시스템은 인공지능기술을 응용한 것으로 원전의 안전성검사이 종전에는 전문기술인력만이 수행할 수 있었던 증기발생기 전열관의 와전류검사를 패턴인식기술을 이용, 컴퓨터가 쉽게 해낼 수 있도록 했다.

우희곤 최성수 최병재

한국전력공사 기술연구원 전자응용연구실

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

서 론

전문가시스템이란 전문가의 해석 또는 전문가의 지식을 요구하는 분야에 대해 컴퓨터를 이용하여 전문

가의 진단에 도움을 주거나 전문가를 대신할 수 있도록 구성된 소프트웨어 시스템을 의미한다. 따라서 전문가의 전문지식이 요구되는 모든 분야에 이를 적용할 수 있으며, 특히 원자력분야에서의 전문가시스템은 사람의 실수가 발생하기 쉽고, 경험에 바탕을 둔 전문지식이 요구되는 고장진단분야 등 여러 분야에 널리 적용될 수 있다.

원자력발전에는 많은 중요한 설비와 기술이 조합, 적용되며 그 중에서도 증기발생기는 중추적인 역할을 담당하고 있다. 증기발생기 전열관의 건전성 확보는 원자력발

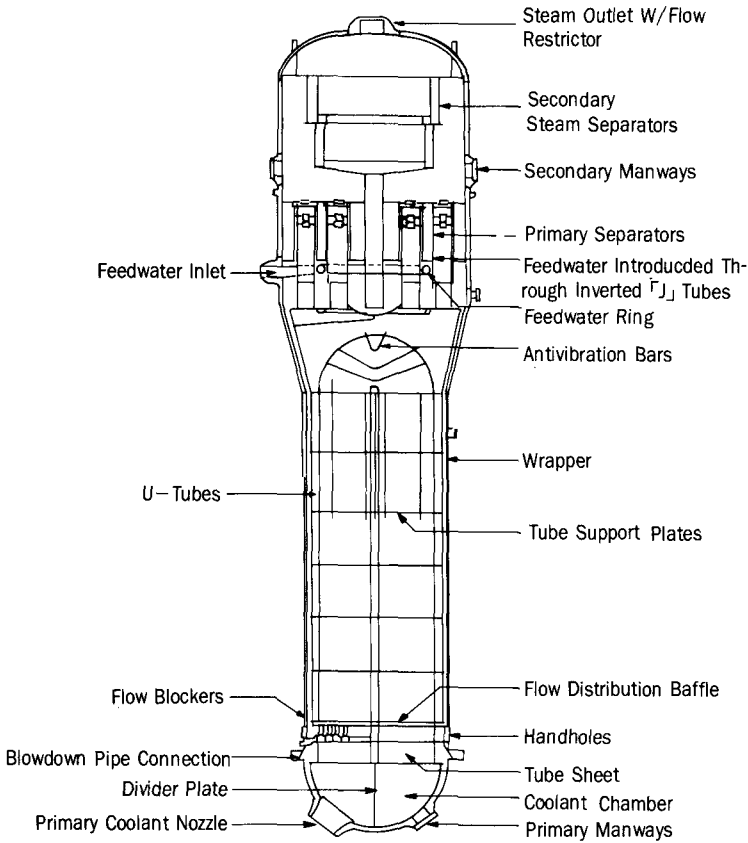
전설비에 의한 전력생산 뿐만 아니라 1차측 방사능누출을 차단하는 원자력안전성 측면에서도 매우 중대한 문제이다. 현재 이 증기발생기 전열관의 검진을 위해서 원자력발전소 계획예방정비시 와전류에 의한 비파괴검사(Eddy Current Testing, ECT)를 수행하는 것이 보편화되어 있다. 그러나 현재의 ECT에 의한 진단방식은 고도로 훈련된 ECT 신호해석 전문가에 의해 평가가 수행되고 있으며, 국내에 유자격자가 한정되어 있고 공정의 복잡성 및 방대한 양의 신호자료로 인해 많은 시간과 인원이 요구된다.

따라서 여기서는 원자력발전소의 증기발생기 전열관 검사공정에 인공지능기술을 도입함으로써, 기존의 증기발생기 전열관 검사공정이 갖는 문제점을 해결할 수 있는 와전류 신호평가 전문가시스템에 관하여 소개한다.

증기발생기 전열관의 ECT 검사공정

1. 증기발생기

증기발생기(Steam Generator, SG)는 원자력발전소의 격납용기 내부에 존재하며 원자력발전소 한 호기당 2~4기를 보유하고 있다. 또한 1기의 증기발생기에는 5,600여개의 전열관을 가지고 있으며 일반적인 구조는 <그림 1>과 같다. 증기발생기 내부에는 2종류의 물이 흐르고 있으며, 그 하나는 원자로에서 발생한 열을 받아서 고온, 고압으로 증기발생기 내부의 U자형



〈그림 1〉 증기발생기의 일반적인 구조

전열관 속으로 흐르는 1차측 냉각수이고, 다른 하나는 이들 전열관 사이로 흐르면서 1차측의 열을 공급받아 증기로 바뀌어 발전기에 가해지는 2차측 냉각수이다. 즉, 원자력발전소의 증기발생기는 화력발전소의 보일러와 같은 기능(열교환 기능)을 수행하는 중요한 설비이다.

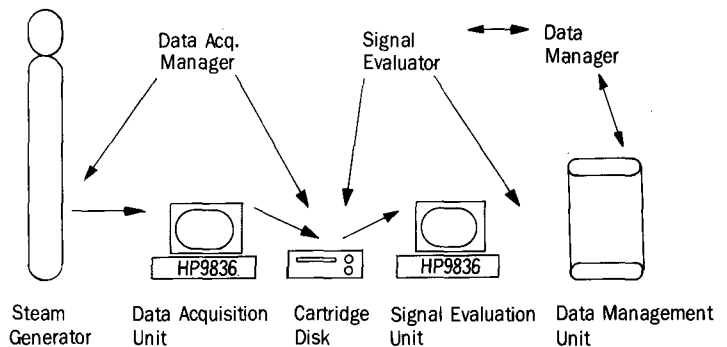
2. 검사현황

증기발생기 전열관의 결함 여부는 미연방 원자력규제법에서 규정하고 있는 와전류검사법(ECT)을

사용하고 있으며, 검사장비 및 검사절차는 〈그림 2〉와 같다. 와전류

검사란 인가된 전류에 의해 전열관의 표면에 형성되는 소용돌이 전류의 변화를 이용해서 결함 여부를 판별하는 비파괴검사의 한 방법이다.

검사절차를 간단히 요약하면 다음과 같다. 먼저 증기발생기 전열관의 번호를 확인하기 위하여 Tube Sheet 하단에 Template를 부착하고 Chamber 내부에 탐촉자, Manipulator 등 제반 데이터 수집장비를 설치한다. 검사데이터의 수집은 격납용기 외부의 데이터 취득실에서 Chamber 내부에 있는 장비들을 원격 조정하여 수행한다. 검사주파수는 보통 100, 300, 600 그리고 800kHz의 4개를 사용하지만 증기발생기 모델에 따라 변한다. 또한 내삽형 탐촉자를 사용하여 자기비교형 차동법(Differential)과 표준비교형 절대법(Absolute)에 의해 신호를 동시에 수집한다. 따라서 4개의 검사주파수와 2개의 수집방식의 조합에 의해 보통 하나의 Sampling Point에 대하여 동시에 8개 Channel의 데이터가 수집된다. 신호평가는 신호 위상각



〈그림 2〉 증기발생기 전열관 검사절차

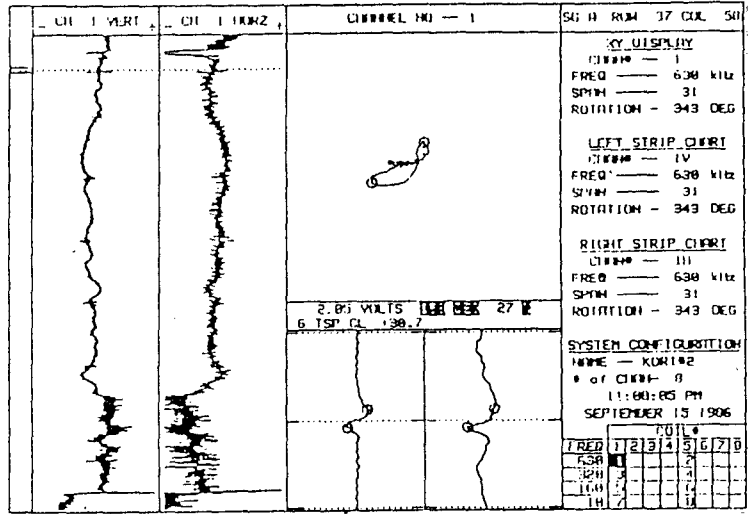
에 의한 결함깊이 평가방법과 신호 진폭에 의한 결함깊이 평가방법을 결함 발생위치에 따라 분리하여 적용한다. 또한 전열관 지지판(Tube Support Plate, TSP)과 같은 특정 위치에서는 해당 구조물에 대한 신호와 결함신호가 합성되어 나타나므로 2개 이상의 검사주파수 신호를 혼합하여 해당 구조물에 대한 신호를 소거한 후 그 결함의 상태를 평가하는 등 위치에 따라 다른 평가방법이 행해진다. 신호평가 전문가는 이론적인 지식과 축적된 경험을 바탕으로 해서 연속적으로 변하는 <그림 3>과 같은 다양한 패턴의 신호를 육안으로 주시하다가 결함으로 추정되는 이상신호를 추출해 낸다. 또한 이 추출된 신호에 대하여 결함의 위치, 종류, 깊이 및 길이 등을 평가하여 결함의 정도에 따라 관막음(Plugging), 관재생(Sleeving) 등의 결함보수계획을 결정한다.

3. 검사공정 및 문제점

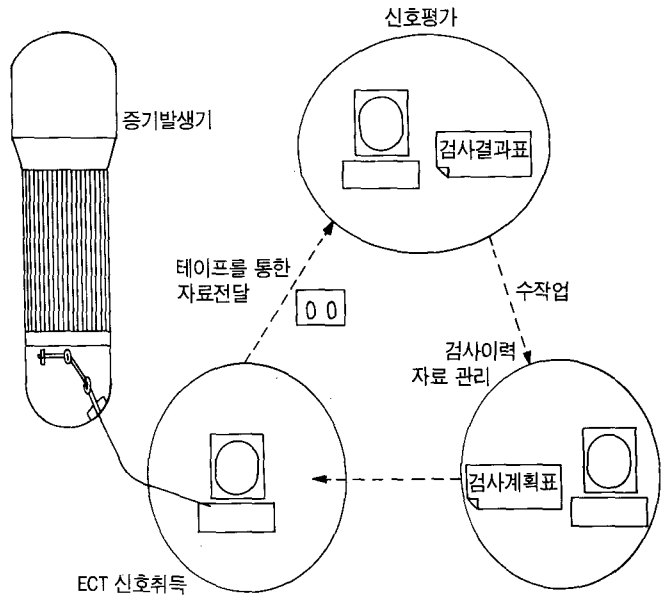
증기발생기 전열관의 검사공정은 <그림 4>와 같이 증기발생기 전열관으로부터 ECT 신호를 취득하는 신호취득공정과 ECT 신호평가자들이 취득된 데이터를 처리, 분석하면서 결함 유무를 판별하는 신호평가공정 그리고 검사결과를 정리, 보관하거나 새로운 검사계획을 수립하는 검사이력자료 관리공정으로 구성된다.

이들 공정중에서 신호평가공정은 다음과 같은 문제점을 갖고 있다.

(1) 지루한 작업으로 인하여 이상신호를 소홀히 할 가능성이 존재



<그림 3> ECT 신호평가에 사용되는 실제 화면



<그림 4> 증기발생기 전열관 검사공정

한다.

(2) 전문가의 주관적 판단에 따른 견해차 및 판단착오의 가능성이 존재한다.

(3) 전문지식을 가진 전문가가

안정적으로 확보되어야 한다.

또한 검사이력자료 관리공정에서는 원자력발전소의 운전일수가 증가함에 따라 급격하게 증가하고 있는 결함자료의 체계적인 관리 및

이들 자료를 바탕으로 한 검사계획 수립에 많은 어려움이 있다.

와전류신호평가 전문가시스템 개발

1. 개발 시스템 개요

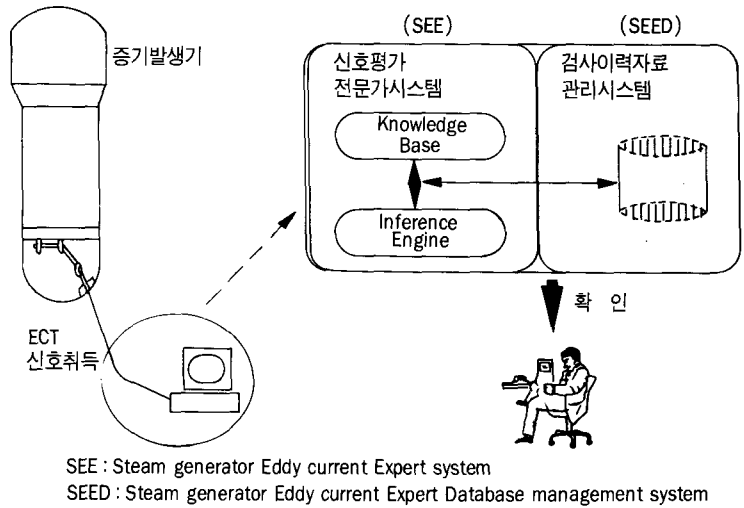
개발한 전문가시스템은 <그림 5>에서 보여주고 있듯이 「검사공정 및 문제점」에서 설명한 검사공정중 신호평가공정과 검사이력자료 관리공정을 자동화한 시스템이다.

신호평가 전문가시스템은 ECT 신호평가 전문가의 지식과 경험 및 각종 자료를 지식베이스로 구축하여 추론 엔진부의 각종 규칙에 의해 신호평가작업을 자동으로 처리해준다. 더욱이 전문가시스템은 조금이라고 결함이 있는 신호는 모두 추출하게 하는 1차적인 신호평가작업을 수행하고, 사람인 ECT 신호평가 전문가는 전문가시스템이 추출해준 신호만을 대상으로 정밀 분석하게 함으로써, 작업량을 대폭 감소시키는 물론 2단계 평가로 인하여 검사 신뢰도를 크게 증진시킬 수 있도록 하였다.

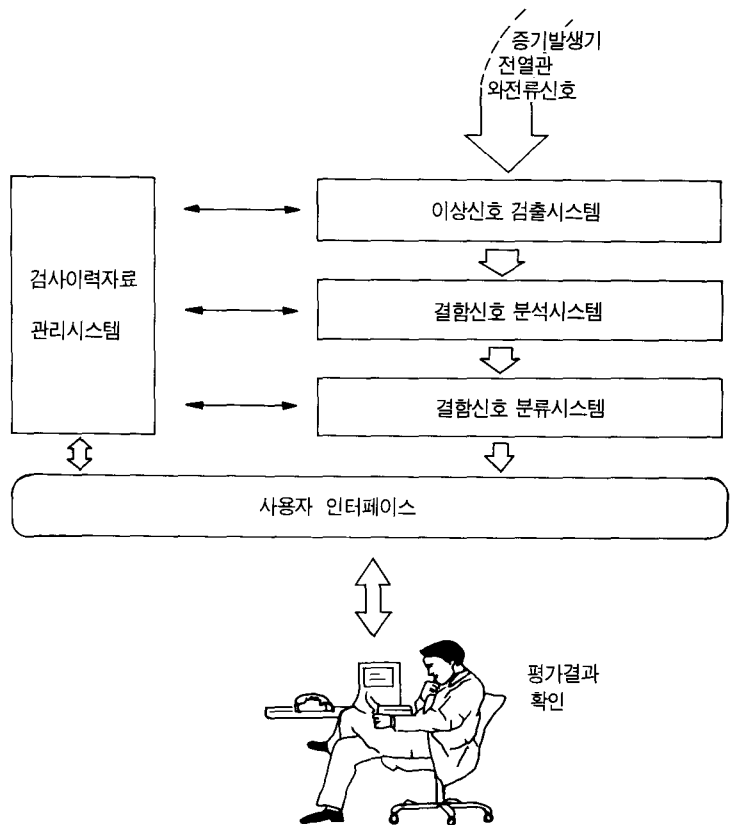
그리고 검사이력자료 관리시스템은 전문가시스템과 온라인으로 연결되어 각종 검사결과가 즉시 저장됨은 물론 각종 통계자료의 신속한 처리 및 효율적인 검사계획 수립에 활용할 수 있도록 개발하였다.

2. 전문가시스템 설계개념

전문가시스템의 설계개념은 <그림 6>과 같이 방대한 Raw Data를 능률적으로 처리하고 검사 신뢰도를 높이기 위하여 3단계로 나누어



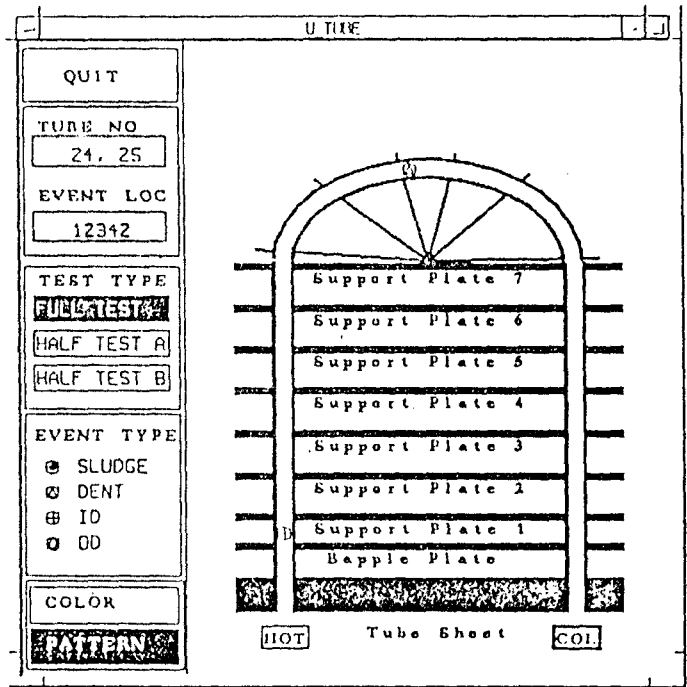
<그림 5> 개발된 시스템을 사용했을 때의 검사공정



<그림 6> 전문가시스템 설계개념

서 결합신호를 판별도록 하였다.

이상신호 검출단계에서는 구분적 패턴인식개념을 도입하여 약간의 이상이 있는 신호라도 모두 검출하게 하였고, 결합신호 분석단계에서는 이상신호 검출단계에서 검출해낸 이상신호 중 결합에 의한 신호와 잡음에 의한 신호를 분류하여 결합에 의한 신호만을 추출하게 하였다. 결합신호 분류단계에서는 추출된 결합신호를 표준 결합신호와 비교, 평가하여 결합의 정도를 판별하게 하였다. 그리고 이들 결합신호는 다시 사람인 신호평가 전문가로 하여금 확인 및 검증하도록 함으로써 검사 신뢰도를 크게 향상시켰다.



〈그림 7〉 결합정보 표시화면

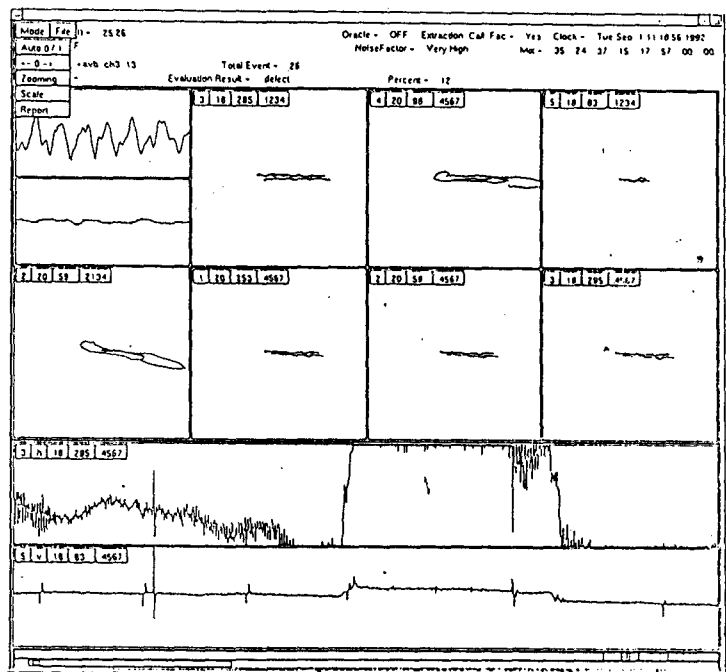
3. 지식베이스 구축

ECT 신호평가 전문가(Level II, III)로부터 추출한 지식과 경험을 전문가시스템 개발도구에 알맞도록 Worksheet를 작성하였으며 이들 내용을 바탕으로 하여 컴퓨터가 인식, 처리할 수 있도록 600여개의 Rule Object와 1,000여개의 Data Object 그리고 20,000여 Line에 이르는 신호검출 프로그램으로 지식베이스를 구축하였다. 이렇게 구축된 지식베이스는 신호평가 전문가와 지식 공학자에 의해 수차례 확인, 검증과정을 거치도록 하였다.

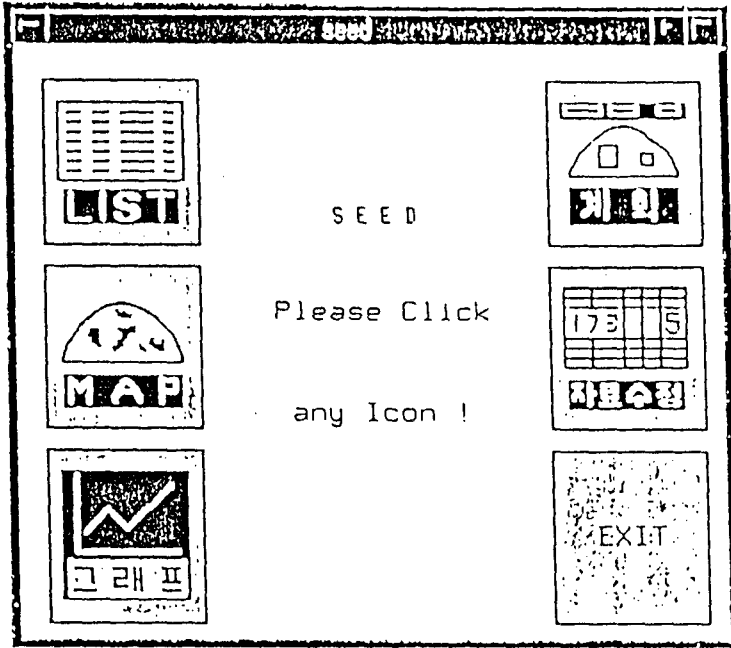
4. 전문가시스템 화면 예

여기서는 개발한 전문가시스템이 제공하는 몇가지 화면을 보여주고 그 기능을 설명한다.

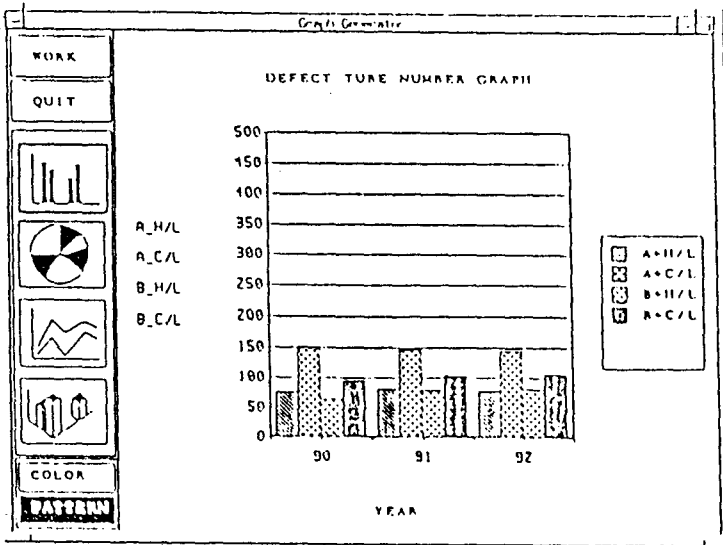
먼저 〈그림 7〉은 특정 증기발생



〈그림 8〉 신호평가 전문가의 확인 및 검증지원화면



〈그림 9〉 검사이력자료 관리시스템의 주화면



〈그림 10〉 검사이력자료 관리시스템의 그래프 화면 예

기 전열관에 각종 결함정보를 표시해 주는 화면이다. 이 화면으로부터

터 신호평가 전문가는 전열관의 어느 부위에 무슨 결함이 생겼는지를

쉽게 알 수 있다.

〈그림 8〉은 전문가시스템이 결합 신호로 분류한 신호를 사람인 신호평가 전문가가 최종 확인할 수 있도록 하나의 화면에 다양한 Channel의 신호를 나타내주어 정확한 결합정도를 판별할 수 있도록 하였다.

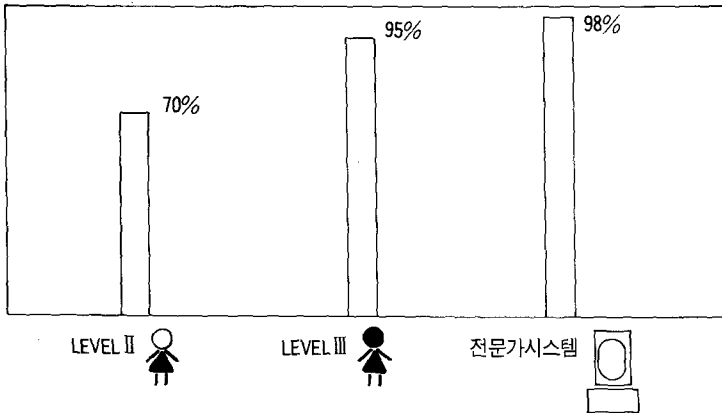
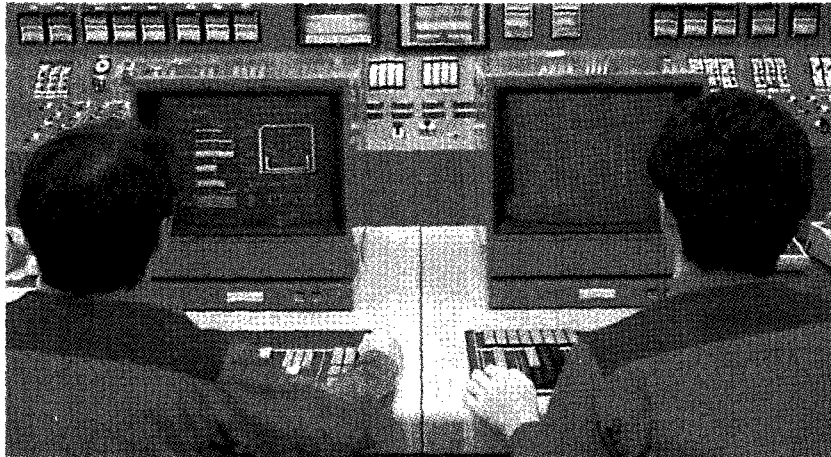
〈그림 9〉 및 〈그림 10〉은 검사이력자료 관리시스템의 주화면과 그래프 화면을 보여주고 있다. 〈그림 9〉에서 알 수 있듯이 검사이력자료 관리시스템은 각종 통계자료 처리 및 효율적인 검사계획 수립을 지원 하는 시스템이다.

시스템 성능비교

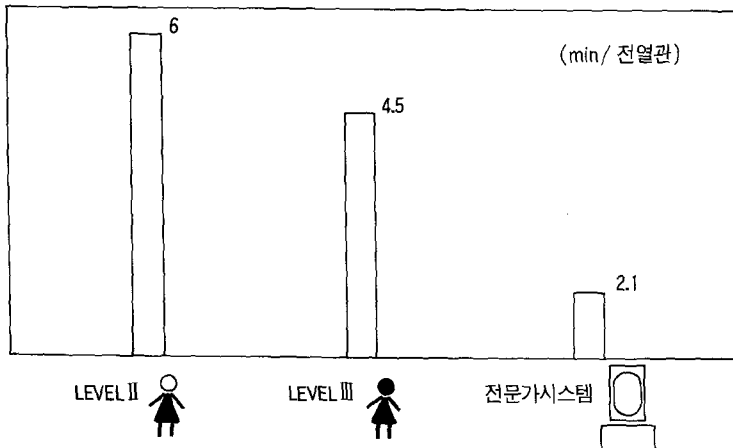
신호평가 전문가인 Level II 및 Level III 전문가와 개발한 전문가시스템의 결합 추출능력 및 검사 소요시간을 비교한 도표가 〈그림 11〉 및 〈그림 12〉에 나타나 있다. 결합 추출능력과 검사 소요시간 둘다에서 전문가시스템의 능력이 우수함을 입증할 수 있다.

결론

전문가시스템이란 전문가의 해석 및 전문가의 지식을 요구하는 분야에 컴퓨터를 이용하여 전문가의 진단에 도움을 주거나 전문가를 대신할 수 있도록 구성된 소프트웨어 시스템을 의미한다. 원자력분야에서의 전문가시스템은 사람의 실수가 발생하기 쉽고, 경험에 바탕을 둔 전문지식이 요구되는 고장진단 분야나 전문인력의 확보가 곤란한



〈그림 11〉 결함 추출능력 비교표



〈그림 12〉 검사 소요시간 비교표

분야 등 여러 분야에 널리 적용될 수 있다.

이번 와전류 신호평가 전문가시스템의 개발로

1. 검사 신뢰도가 증가되어 원전의 이용률 및 안전성 증가에 기여할 것이며

2. 신호평가 전문기술의 안정적 확보가 가능하고

3. 인공지능기술에 의한 검사공정 개선으로 검사기간 단축 및 검사비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라

4. 실용 전문가시스템을 개발하여 현장 적용할 수 있는 기술을 축적함으로써 원전설비의 유지관리 자동화와 외화절감에도 크게 공헌하리라 본다. ▣