

# 원자력 발전소 스팀제너레이터의 자동검사를 위한 지능형 로봇 비전 시스템 설계

한 성 현\*

## Design of Intelligent Robot Vision System for Automatic Inspection of Steam Generator of Nuclear Plant

S. H. Han\*



### Abstract

In this paper, we propose a new approach to the development of the automatic vision system to examine and repair the steam generator tubes at remote distance. In nuclear power plants, workers are reluctant of works in steam generator because of the high radiation environment and limited working space. It is strongly recommended that the examination and maintenance works be done by an automatic system for the protection of the operator from the radiation exposure. Digital signal processors are used in implementing real time recognition and examination of steam generator tubes in the proposed vision system. Performance of proposed digital vision system is illustrated by simulation and experiment for similar steam generator model.

**Key Words :** Steam generator, Nuclear power plant, Automatic test and repair, Vision system, DSP(TMS320C31)

### 1. 서 론

증기 발생기 전열관은 원전의 가동 연류 증가에 따라

여러 가지 요인에 의해 결함이 생길 수 있으므로 증기 발생기의 일반적인 구조를 중심으로 한 동작원리와 전열관에 발생할 수 있는 이상 결함 사례 및 전열관 자동검사 방

\* 경남대 기계자동화공학부

법에 대한 연구개발이 절실히 요구되고 있다. 이 검사를 위해서는 와전류 신호를 탐지하는 탐촉자를 이동시키기 위한 로봇을 증기 발생기 하단부에 진입시켜 그 로봇의 움직임을 원격제어하면서 각 전열관 내부에 탐촉자를 삽입하여 와전류 신호를 수집한다. 이 신호가 결함 여부 판독을 위해 2차원 평면인 Lissajous 화면에 표시되면, 탐촉자의 위치에 따라서 특유의 모양을 가지는 신호 패턴을 얻을 수 있으며, 화면에 연속적으로 표시되는 이 신호 패턴을 전문가들이 분석하여 전열관의 전진성 여부를 진단하게 된다.

그러나, 기존 전열관 검사 방법은 각 세부 공정들이 다른 인력과 장비에 의해 독립적으로 수행되고 있고 공간간의 자료 전달도 수작업에 의해서 수행되고 있다. 이는 자료의 방대함으로 인한 비계획적인 검사 계획 수립과 전문가의 판단력에 의존하는 결함평가로 인하여 오류의 가능성이 상존하고 있으며, 또한 공정들 간의 자료 이동이 비체계적 이어서 자료 처리 및 관리에 오류가 발생할 가능성이 있으며, 방대한 작업량으로 인해 최종 감사 결과 보고까지 많은 시간과 전문 인력이 요구되고 있다<sup>1)</sup>.

이러한 기존 증기발생기 전열관 검사 공정의 개선 필요성이 대두되면서 그 동안 많은 연구가 지속적으로 시도되고 있다. 그러나 이러한 노력들의 대부분은 부분공정의 개선이나 자동화를 대상으로 하고 있으며 전체 공정개선을 목표로 수행된 연구는 비파괴검사, 인공지능, 분산처리 및 데이터베이스 기술 등 많은 관련 기술들의 연계되는 복합 지능형 시스템 구조가 필요한 기술임으로 인해 시도되지 못했었다<sup>2-3)</sup>.

본 연구에서 이러한 문제를 해결하기 위하여 client/server 방식의 개방형 분산처리 구조, 인공지능 기술 그리고 데이터베이스 기술을 결합한 새로운 증기발생기 전열관 검사 자동화 시스템을 제안한다.

원자력 발전소의 증기 발생기는 U자형 모양의 금속재질의 관으로 원자로 내에서 태워진 1차 냉각수가 흐르면서 전열관 외부의 2차 냉각수를 증기로 만들어 터빈을 돌게 하는 방사능 차폐와 열 교환의 두 가지 목적을 동시에 수행하는 원자력 발전의 매우 중요한 장치중의 하나이다. 또한, 원전 스템제너레이터의 증기세관은 고온 고압의 방사선 물질을 함유한 유체 분위기에서 운전되며, 사용중 스러지에 의한 튜브 침식, 튜브 진동에 의한 응력부식 파손, 제작시의 가공 잔류 응력에 의한 파손 및 기동, 정지의 반복으로 인한 열피로응력 등으로 증기 발생기 tubesheet와 튜브의 결합부위에 응력부식 파손이 발생하고 있다. 이렇

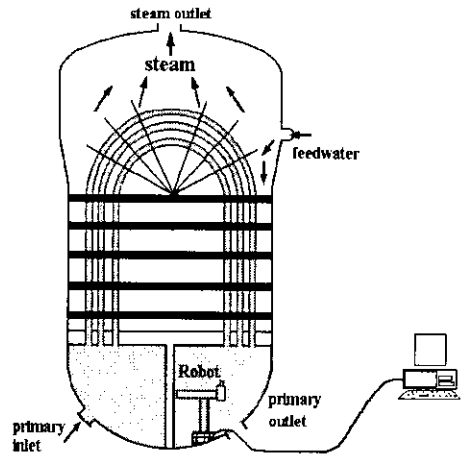


Fig. 1 Tube structure of steam generator

게 파손된 튜브는 플러깅(plugging)되거나 슬리빙(sleeving)되어야만 방사선 누출 없이 열효율을 떨어뜨리지 않고 계속 사용할 수 있게 된다. 플러깅이나 슬리빙 공정은 좁은 입구를 통해 폐공간 내에서 작업이 이루어져야 하기 때문에 보수 작업의 정확성을 보장할 수가 없고, 작업 시간이 길어져 관련 작업자의 피로량이 커지는 등 많은 문제점이 대두되고 있다<sup>4-7)</sup>.

원자력 발전소에서는 핵연료 및 관련 설비의 오염으로 인한 방사능 방출 때문에 인간이 유지 보수작업을 행하기에는 많은 어려움이 있다. 원전은 2~4개의 증기 발생기를 가지고 있으며, 각 증기 발생기 내부는 3000~5000개의 전열관 묶음으로 구성되어 있다. Fig. 1은 증기발생기의 일반적인 구조를 나타내고 있다.

최근에는 로봇을 개발하여 이러한 문제를 해결하는 것이 원자력 발전소의 유지 보수에 필수적인 요소가 되고 있다. 이런 용도의 활용을 위한 로봇은 기존의 산업 현장에서 운용되고 있는 로봇과 같은 단순 반복 작업이 아닌 보다 능동적인 작업을 요구하고 있다. 증기 발생기 세관 검사 및 보수에 필요한 작업은 정해진 반복 작업이 아니라 폐공간 내에서 증기 발생기 하부에 있는 18,000여개의 홀(hole) 중에서 결함이 있는 홀의 위치를 찾아낸 후 그 홀에 대해 플러깅이나 슬리빙 작업이 행해져야 한다. 로봇이 폐공간내에서 18,000여 개의 홀 중에서 결함이 있는 홀의 정확한 위치를 찾아내고 플러깅이나 슬리빙 작업의 정확성과 신뢰성을 보장하기 위해서는 이 작업에 맞는 비전 시스템의 개발이 필수적이라 할 수 있겠다. 본 연구의

가장 중요한 목적은 원자로 스팀 제너레이터의 내부는 방사선이 방출되므로 지금까지의 사람이 직접 들어가서 결손유무를 검사할 경우에는 방사선으로 인한 인명피해가 극심하고, 또한 숙련공들이 원자로 내에 들어가기를 기피하는 실정임으로 원거리 상에서 PC화면에서의 로봇의 원격제어를 이용한 자동검사를 수행함으로써 이의 문제점들을 해결하고자 하는 것이 가장 중요한 목적이라 할 수 있다.

이와 같은 목적을 위하여 컴퓨터 비전을 이용하여 사람들이 들어가지 않고 원거리에서 PC 화면상에서 원형 홀의 공간적인 위치와 형상을 판단할 수 있는 자동검사에 대한 연구를 수행한다. 일반적으로 홀의 정확한 공간 위치를 측정하기 위해서는 두 대의 카메라를 사용하는 스테레오 비전(stereo vision)을 사용하여야 하지만, 계산 과정의 복잡성과, 많은 계산 시간의 소요 그리고 경우에 따라서는 잘못된 해를 구하거나 전혀 구하지 못할 수도 있다. 하지만 대상체가 원형 홀이고 수직 상방향에서 검사가 시행되는 특성을 고려한다면 한대의 카메라만 사용하여도 정확한 위치 측정이 가능하다<sup>10-12)</sup>.

본 연구에서는 원거리에서 스팀 제너레이터 세관의 검사와 보수를 행할 수 있는 로봇을 이용한 자동 비전 시스템을 개발하고자한다. 핵발전소에서는 높은 방사능 환경과 제한된 작업공간으로 인하여, 작업자들이 스팀 제너레이터 내에서 작업하기를 회피하고 있다. 방사선 누출로부터 작업자들을 보호하기 위해 자동 시스템에 의해 검사와 유지 보수작업이 이루어져야 한다는 사실이 제기되어왔다. 제안된 디지털 비전 시스템은 스팀 제너레이터 세관의 실시간 인식과 검사를 실현하기 위해 사용되었다. 제안된 디지털 비전 시스템의 성능은 유사 스팀 제너레이터 모의 모델에 대한 실험적 방법으로 입증한다.

## 2. 통합 시스템

증기 발생기 전열관의 와전류 탐상 업무는 크게 4개의 세부 공정으로 구분된다. 우선 검사대상 전열관 선정 및 검사 순서와 방법을 결정하는 검사 계획 공정, 검사 계획에 따라 탐촉자 이동용 로봇을 검사 대상 전열관으로 이동시켜 와전류 신호를 추출하고 그 신호를 저장하는 신호 입수공정, 신호를 평가하여 전열관의 건전성 여부를 진단하는 신호 평가 공정, 그리고 신호 평가 결과를 데이터 베이스화 하여 관리하는 검사 이력 자료 관리 공정으로 구성된다.

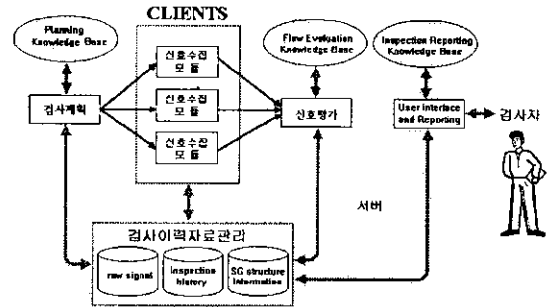


Fig. 2 S/W architecture of proposed system

제안된 증기 발생기 전열관 검사 통합 자동화 시스템 구조는 Client/Server 형으로 고안되어, 전체 공정 중 가장 많은 시간이 소요되고 있는 신호 수집 공정을 Client로 독립시킴으로써 여러 개의 Client에서 병렬로 신호를 입수할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 증기 발생기 전열관 검사 통합 자동화 시스템 운영 구조를 나타낸다. 이 구조는 여러 개의 Client를 이용해서 다수의 증기 발생기 전열관 신호 수집작업을 동시에 병렬로 수행할 수 있도록 지원하고, 각 신호 수집 작업이 Server의 검사 계획 모듈에서 작성된 검사 계획 순서에 따라 수행되도록 제어하며, 수집된 신호를 자동으로 평가할 수 있도록 설계하였다.

특히 가장 복잡한 세부 기능들이 요구되는 신호 수집 공정을 위해서 먼저 검사 계획 순서에 따라 신호 수집 탐촉자를 이동하기 위한 신호 수집용 로봇의 제어 모듈과, 탐촉자를 전열관 내부로 쏘아 올릴 때 정확하게 전열관 중심을 인식하여 탐촉자 손상을 방지하도록 하는 전열관 단면 영상처리 모듈, 그리고 신호 입수 모듈을 개방형 구조인 PC 기반의 MS-Windows 상에서 통합 시스템으로 구현함으로써 이식성과 확장성을 제공할 수 있도록 하였다. 이 구조에서는 수집된 신호가 온라인으로 신호 평가 전문가 시스템에 전송 평가되며, 평가가 끝나고 동시에 평가 자료를 데이터베이스화하고 여러 형태의 보고서가 출력될 수 있다. Server에서 구현되는 모든 공정은 전문가 시스템으로 개발되었으며, 신호 자동 평가 모듈에 의해서 생성된 결과는 인간 전문가에 의한 최종 확인 과정을 거치도록 하여 인간 전문가의 업무를 경감시키고, 인적 오류를 최대한 배제할 수 있도록 설계하였다. 또한 전 공정에서 발생하는 검사 계획자료, 검사 이력 자료, 그리고 신호 자료 등의 종합적인 관리 및 이용을 위해서 DBMS(database management system)를 운영함으로써 검사시 발생하

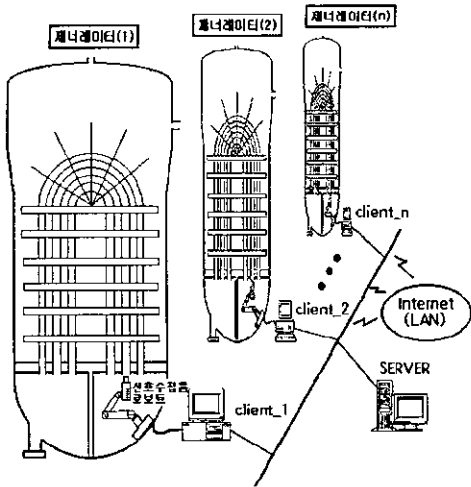


Fig. 3 Structure of Integrating System

는 모든 자료와 과거검사 이력 자료를 각 공정에서 실시간 동시 접근이 가능하도록 구성하였다. Fig. 3은 증기발생기 전열관 검사 자동화통합 시스템의 하드웨어 구성도이다.

다음의 각 절에서는 검사 공정별로 제안된 시스템에 구현된 개념과 상세 설계 내용에 대해서 보다 구체적으로 기술하겠다.

### 2.1 검사 계획 모듈의 설계

증기발생기 전열관 검사는 원전의 가동을 중지하고 수행되는 작업임으로 검사기간은 최소한으로 한정될 수밖에 없다. 따라서 그 기간 내에 검사할 수 있는 전열관 수도 한정된다. 따라서 주어진 기간 내에 반드시 검사해야 할 전열관의 선정, 검사 순서 및 검사 방법 결정 등을 수행하는 작업이 검사 계획 작업이다. 최적의 전열관 검사 계획 수립을 위해서는 각 전열관의 과거 검사 이력 및 현재 상태 파악과정이 선행되어야 하는데, 데이터의 양이 수작업으로 하기에는 너무 방대하다.

이 검사 계획 자동화 모듈은 어떤 전열관의 추정 결합 크기가 임계치까지 이르렀을 경우에 이 전열관을 보수 대상으로 선별하여 검사 대상에 포함한다. 결합의 크기가 지속적으로 성장하는 전열관, 결합이 발생한 전열관이 접합되어있는 부근의 전열관, 최근 일정 기간 동안 검사가 되지 않은 전열관도 검사 대상 전열관으로 선정되는데, 이러한 규칙들은 인간 전문가의 지식을 토대로 작성된 전문가 지식베이스에서 제공하고 있다.

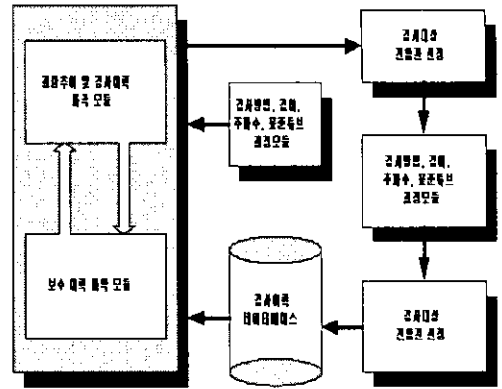


Fig. 4 Architecture of inspection planning module.

Fig. 4에서와 같이 검사 계획 자동화 모듈은 전열관 단면도인 전열관 맵(map)을 이용하여 그 위에 검사 대상 전열관을 표시하도록 고안하였다. 일단 검사 대상 전열관으로 선정된 전열관에 대해서는 검사 방법, 검사의 길이, 그리고 검사를 위한 표준 탐촉자의 종류와 검사 주파수의 결정이 요구되는데, 이는 검사 대상 전열관이 선별된 후 검사 계획시스템의 틀을 이용하여 전문가가 결정하도록 설계하였다.

검사 대상 전열관과 각 전열관의 검사에 필요한 정보가 결정되면 검사 대상 전열관의 위치에 따라 신호 수집을 위해서 탐촉자 이동용 로봇이 이동해야 할 검사 순서를 결정하게 되는데, 이는 신호 수집 시 로봇의 움직임 최소화하여 신호 수집시간을 단축하기 위한 것이다. 이렇게 검사 계획이 완료되면 이 정보는 데이터베이스에 저장함과 동시에 신호 수집 자동화 모듈로 네트워크를 통하여 전달된다.

### 2.2 검사대상 신호수집 자동화 모듈의 설계

인간이 접근할 수 없는 방사능 누출 지역임으로 인해 검사 대상 전열관의 와전류 신호 입수를 위해 탐촉자를 검사 대상 전열관으로 이동시키는데 로봇이 이용되며 탐촉자를 전열관 내부로 삽입하고 와전류 신호를 입수하는 로봇 제어 및 신호 입수용 컴퓨터가 있어야 한다. 또한 탐촉자가 전열관으로 삽입될 때 정확히 전열관 중심으로 삽입되는 것을 확인하기 위한 CCTV 카메라 로봇에 탑재되어 있으며, 이 카메라 영상을 표시하기 위한 모니터가 별도로 존재한다. 그러나 기존 신호 입수 시스템은 로봇 및 모든 제어 장비와 운영 소프트웨어가 산업용 특수 시스템

으로 구성되어 있어 그 구조가 개방적이지 못하여 타 공정과의 온라인 자료 전달이 불가능하였다. 본 연구에서 개발한 신호 입수 시스템의 탐촉자 이동용 로봇은 국내 로봇 모델인 SM-5 로봇을 구조 개선하여 사용하고 이 로봇을 제어하는 소프트웨어만을 IBM 586 PC의 MS-Windows 상에서 수행 될 수 있도록 자체 개발하였다.

Fig. 5는 탐촉자 이동용 로봇 제어와 전열관 단면 영상 처리 기법을 이용한 신호 자동 수집 모듈의 구조를 보여 주고 있다. 먼저 탐촉자 이동용 로봇은 수평 다관절형이며 동시 4축이 구동되도록 제작되어 있다. 로봇의 실제 움직임을 제어하기 위해서 임의의 전열관으로 움직이기, 단위 전열관 간격만큼 움직이기, 그리고 미세 조정하기 등의 세 가지 기본 조정 모드를 구현하여 검사 계획에 따라 자동 및 수동으로 로봇을 움직일 수 있도록 하였다.

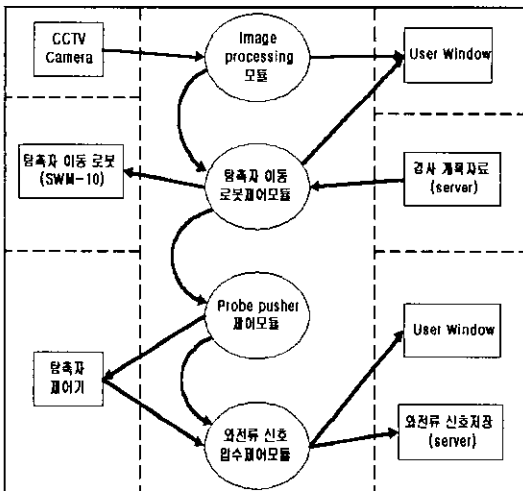


Fig. 5 Data flow diagram of signal acquisition system

탐촉자를 전열관에 밀어 넣기 위해서는 전열관 중심을 정확하게 인식해 주는 기능이 필요하다. 탐촉자의 삽입과 전열관의 중심 위치 파악은 탐촉자 이동용 로봇 상단에 부착되어 있는 카메라를 이용하고 있다. 현재의 방식에서는 이 카메라를 와전류 탐상 장비와는 별도로 독립된 CCTV 모니터에 연결하여 탐촉자의 움직임을 관찰하고 있으나, 제안된 시스템에서는 CCTV 모니터의 기능을 신호 수집시스템에 통합하여 다중 화면 중 하나가 이 기능을 수행하면서 전열관 중심을 인식할 수 있는 기능을 제공하도록 설계하였다. 이 기능은 영상처리 모듈로 통합되어 실

제 동작시에는 독자적으로 화상 데이터를 디스플레이 하도록 하였다. 이러한 기능은 영상 표시 기능을 디지털화한 것으로 여기에 영상 처리 기법을 도입하여 탐촉자의 삽입에 있어 전열관의 중심을 정확하게 인식할 수 있게 함으로써 탐촉자의 손상을 방지 할 수 있도록 하여 신호 수집을 위한 로봇의 움직임제어 공정을 무인 자동화할 수 있도록 설계하였다.

제안한 시스템에서는 신호 수집 모듈의 증기 발생기 전열관의 신호 수집 기능과 수집된 신호의 화면 디스플레이 기능 및 특정 저장 장치로의 기록 기능을 포함하도록 설계하였다. Fig. 5에서와 같이 수집된 신호는 네트워크를 이용하여 server의 디스크에 직접 저장되며, server에서 동작되는 신호 자동 평가 시스템은 신호 입수 시스템의 동작과 무관하게 저장된 신호를 이용하여 신호 평가를 하게 된다.

### 2.3 검사대상 신호자동 평가 모듈 설계

와전류 신호는 비파괴 검사 신호의 일종으로 금속 재질의 결함 판독 혹은 재질 분류 등의 용도에 이용되며, 특히 원자력 발전소 증기 발생기 전열관 결함 판독에 이용되는 경우는 자격증을 가진 전문 검사자에 의해서 수행되어야 하는 고난도의 기술이다. 그러나 이 와전류 신호에 의한 결함 판독 작업은 장시간 동안 연속 표시되는 신호를 미세하게 주시해야 하는 매우 힘든 작업이며, 결함 신호의 소홀과 주관적인 판단에 따른 인적 오류원인이 상존하는 등의 많은 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제를 근원적으로 해결하기 위해 컴퓨터에 의한 와전류 신호 자동 판독 기술을 새로이 고안하여 신호 판독 자동화 모듈을 설계 및 구현하였다. Fig. 6은 이 시스템의 자동 신호 판독 절차를 크게 와전류 신호 판독에 필요한 지식을 컴퓨터에 인식하는 지식 정의 과정과 이 지식을 이용하여 신호를 판독하는 신호처리 과정으로 나누어진다.

지식 정의 과정에서는 세부적으로 첫째 와전류 신호를 컴퓨터로 표현하는데 필요한 기본 부호 정의의 기능이 있으며, 이 정의된 기본 부호를 이용하여 추출하고자 하는 이상 신호 패턴을 정의하는 이상 신호 패턴 문법정의 기능과 이 문법에서 정의된 부분 변수들의 값을 이용하여 신호에 결함 요인의 포함 여부를 진단하는 지식을 정의하는 결함 진단 지식정의 기능으로 이루어진다.

신호 처리 과정은 우선 신호의 특징을 효과적으로 드러나게 해주는 전처리 과정을 거쳐서 정의된 기본 부호를 이용하여 와전류 신호를 부호 패턴으로 변환하는 신호 부

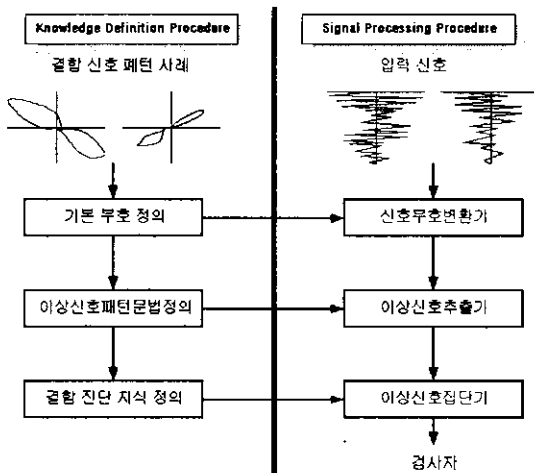


Fig. 6 Flow diagram of knowledge definition and signal processing procedure.

호화 절차, 이 부호화된 와전류 신호에 이미 정의된 이상 신호 패턴 문법을 적용하여 이상 신호를 추출해 주는 이상 신호 추출절차, 이 추출된 이상 신호 패턴에 대해서 결합 진단지식을 적용하여 결합 여부를 판단하는 이상 신호 진단 절차가 있다.

와전류의 특성에 비추어 볼 때 통합 시스템의 성능에 가장 많은 영향을 주는 부분은 신호 평가 자동화 모듈로, 이 모듈을 전체 시스템 성능에 병목 현상을 일으키는 부분으로 볼 수 있다. 이 모듈에서 가장 고려해야 될 사항은 와전류 신호에 섞인 잡음 신호의 처리와 신호의 왜곡 현상 분석, 그리고 방대한 양의 신호 자료 처리 부분이다.

## 2.4 검사이력 자료관리 모듈의 설계

검사 이력 자료 관리 모듈은 증기 발생기 검사 중에 수집되는 방대한 자료에 대한 정확한 유지 및 관리를 위하여 설계되었으며, 증기 발생기에서 수집된 데이터를 정확하게 분석하고 파악할 수 있는 각종 기능들을 포함한 50여종의 복서 작성 기능을 제공하고 있다. 본 논문에서 설계한 검사 이력 자료 관리 시스템은 ORACLE 7.0 RDBMS를 이용하여 데이터베이스를 구축하였으며, 데이터 베이스 시스템 구조 및 질의어에 익숙하지 않은 사용자가 자연스럽게 데이터 베이스를 접근할 수 있도록 다양한 사용자 인터페이스 환경을 구축하였다.

검사 이력 자료관리 모듈은 다른 모든 공정에서 언제든 지 접근할 수 있는 고유 모듈로 설계 및 구현되었으며,

Map, List, Graph, 그리고 Edit의 4가지 사용자 인터페이스 처리 기능을 가지고 있다. 우선 Edit 모듈은 검사 결과 자료의 데이터 베이스화를 위해 증기 발생기 와전류 검사 시 생성된 데이터를 사용자 인터페이스를 통하여 편리하게 데이터 베이스나 파일로 저장하는 기능은 물론, 자료의 검색과 수정도 용이하게 할 수 있는 기능도 제공하도록 설계하였다. Map 모듈은 데이터 베이스에 저장되어 있는 전열관들의 배열 형태와 각 전열관들에 대한 상태 자료들을 도식화하여 사용자가 알아보기 쉽도록 위해 결합의 크기, 위치, 보수 상태 및 검사 계획 자료 등을 전열관 맵 위에 보여줄 수 있도록 설계하였다. List 모듈은 사용자가 필요로 하는 여러 가지 자료들을 데이터베이스로 검색하여 리스트나 표 형태로 화면과 문서로 출력하기 위해 설계되었다. Graph 모듈은 데이터베이스 검색 결과를 텍스트가 아닌 그래프 형태로 표현 할 수 있는 기능을 제공하는 것으로서 검색된 자료의 비교 및 분석을 용이하게 할 수 있도록 한다.

## 3. 비전 시스템 설계

### 3.1 카메라 모델링 및 보정기법

로봇 비전에서의 카메라 모델(camera model)이란 카메라를 공간 좌표계 내의 특정한 위치에 장치하여 공간좌표계(= 기준좌표계)에 기준한 공간상의 점  $w(X, Y, Z)$ 를 투사 변환시켜 카메라 좌표계에 기준한 영상 좌표  $c(x, y)$ 를 얻기 위하여 필요한 파라메타들을 정의하고, 정의된 파라메타들을 이용한 좌표계 변환을 통하여 공간 좌표계와 카메라 좌표계를 일치시킨 후 투사 변환을 적용하여 카메라 좌표계에 기준한 영상좌표를 구하기 위하여 두 좌표계 사이의 대응 관계를 규정짓는 일련의 과정이라 할 수 있다.

카메라로부터 얻어진 영상은 렌즈의 특성과 수광 소자인 CCD의 특성상 다양한 왜곡(distortion)을 나타낸다. 머신 비전을 이용하여 정밀한 측정이나 3차원 형상 및 위치 인식 그리고 제품의 검사 등을 수행하고자할 경우 이러한 왜곡은 측정된 데이터에 내재된 오차로 작용하기 때문에 카메라 모델링시 카메라의 위치와 방향만을 고려하는 기존의 카메라 모델링방법을 개선하여 카메라 모델링시 왜곡항을 포함하는 새로운 카메라 모델링법을 제시한다.

#### 3.1.1 왜곡 없는 카메라 모델

$(x, y, z)$ 는 공간 좌표계 내에서 가시적인 점 P의 좌표를 나타내고  $(x_c, y_c, z_c)$ 는 카메라 중심 좌표계에서 같은 점

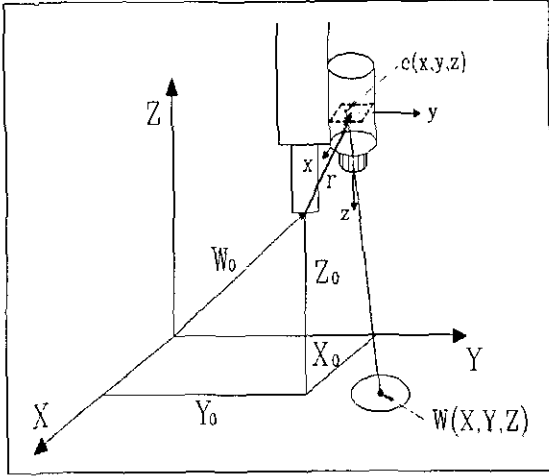


Fig. 7 Coordinate system

을 나타내고있다. Fig. 7에 도시된 것처럼, 카메라 중심 좌표계의 원점은 카메라의 광학적 중심과 일치하고,  $z_c$  축은 광축과 일치한다.

아래의 Fig. 7에서  $(O, x, y, z)$ 는 공간 좌표계(= 기준 좌표계),  $(O_c, x_c, y_c, z_c)$ 는 카메라 좌표계,  $(O', u, v)$ 는 영상 좌표계를 정의한다. 그리고  $O'$ 는 영상평면과 광축의 교점인 영상평면의 주점(principal point)을 나타내고,  $u$ 와  $v$  축은  $x_c$ 와  $y_c$  축에 평행하게 선택된다.

공간 좌표계와 카메라 중심 좌표계 사이의 변환 관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_c = RP + T \quad (1)$$

여기서  $R=(r_{i,j})$ 는 카메라의 방향을 정의하는  $3 \times 3$  회전행렬,  $P=(x, y, z)^T$ 는 공간 좌표계에 기준한 물체 점의 좌표,  $P_c=(x_c, y_c, z_c)^T$ 는 카메라 좌표계에 기준한 물체 점의 좌표, 그리고  $T=(t_1, t_2, t_3)^T$ 는 카메라 위치를 정의하는 병진 벡터를 나타낸다.

점 P의 영상면 좌표는 다음 식 (2)에 의해 주어진다.

$$\begin{aligned} u &= f_x / z_c \\ v &= f_y / z_c \end{aligned} \quad (2)$$

마지막으로, 디지털화된 영상에서 대응하는 픽셀의 위치를  $(r, c)$ 로 표기한다면, 이 픽셀 위치는 다음 식 (3)에 의해서 영상면 좌표와 관계를 규정할 수 있다.

$$\begin{aligned} r - r_0 &= s_u u \\ c - c_0 &= s_v v \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $(r_0, c_0)$ : 주점  $O'$ 의 픽셀위치이고, 좌표  $(r, c)$ 는 CCD 배열에서 행과 열의 개수로 고려될 수 있다. 식 (1), (2) 그리고 (3)를 결합시키면 픽셀위치, 공간좌표 그리고 보정될 여러 가지 파라미터들을 관련시키는 아래와 같은 왜곡없는 카메라 모델링의 결과식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{u}{f} &= \frac{r - r_0}{f_u} = \frac{r_{1,1}x + r_{1,2}y + r_{1,3}z + t_1}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} \\ \frac{v}{f} &= \frac{c - c_0}{f_v} = \frac{r_{2,1}x + r_{2,2}y + r_{2,3}z + t_2}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} \end{aligned} \quad (4)$$

### 3.1.2 기하학적 왜곡

왜곡(distortion)이란 공간상의 물체를 영상화할 때 영상 평면상에 투영되는 물체의 영상 좌표가 렌즈 광학계에서 예상한 이상적 위치를 벗어남으로서 영상이 일그러져 나타나는 현상을 왜곡이라 한다. 기하학적인 왜곡은 영상 평면내에서 영상점들의 위치를 고려한다. 설계 그리고 카메라 광학계를 구성하는 렌즈 조립의 여러 가지 종류의 불완전성의 결과로서, 식(2)의 표현은 그 진실성을 유지할 수 없고, 위치 오차를 정확하게 고려한 다음과 같은 표현으로 바뀌어져야 한다.

$$\begin{aligned} u' &= u + f_u(u, v) \\ v' &= v + f_v(u, v) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $u$ 와  $v$ 는 관찰될 수 없는 왜곡이 없는 상태에서의 영상좌표이고  $u'$ 와  $v'$ 가 왜곡이 있는 상태에 대응되는 좌표이다.

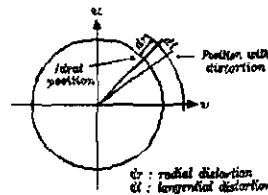


Fig. 8 Radial and tangential distortion

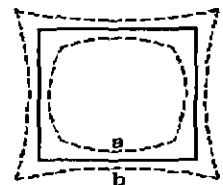


Fig. 9 Effect of radial distortion

① Radial distortion

Radial distortion은 주어진 영상점이 이상적인 위치로부터 안쪽이나 바깥쪽으로의 변위를 생성시킨다. 이런 종류의 왜곡은 주로 렌즈 요소의 반지름 방향 굴곡 곡선의 결합에 의해 생긴다. Fig. 9는 반경방향의 왜곡의 효과를 설명한다.

카티션 영상 좌표의 각각의 축에 따른 반경방향의 왜곡의 량은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \delta_{ur} &= k_1 u(u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \\ \delta_{vr} &= k_1 v(u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $u = \rho \cos \varphi$ ,  $v = \rho \sin \varphi$   $k_1$ 는 반경방향의 왜곡의 계수,  $\rho$ 는 영상평면의 주점으로부터 반지름 방향 거리이다.

② 분산 왜곡(Decentering Distortion)

실제 광학 시스템은 렌즈 요소들의 광학적 중심이 정확히 일치하지 않는 여러 가지 종류의 분산에 영향을 받는다. 이런 결합은 무엇이 분산 왜곡으로 불리는지를 소개한다. 카티션 영상 좌표의 각각의 축에 따른 분산 왜곡의 량은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \delta_{ud} &= p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv + O[(u, v)^4] \\ \delta_{vd} &= 2p_1uv + p_2(u^2 + 3v^2) + O[(u, v)^4] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $p_1 = -j_1 \sin \varphi_0$ ,  $p_2 = j_1 \cos \varphi_0$

③ 얇은 프리즘 왜곡(Thin Prism Distortion)

얇은 프리즘 왜곡은 카메라 조립뿐만 아니라 렌즈 설계와 제조에서의 불완전함(예를 들어 렌즈 요소의 약간의 경사 혹은 영상 센싱 배열)으로부터 생긴다. 카티션 영상 좌표의 각각의 축에 따른 얇은 프리즘 왜곡의 량은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \delta_{up} &= s_1(u^2 + v^2) + O[(u, v)^4] \\ \delta_{vp} &= s_2(u^2 + v^2) + O[(u, v)^4] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $s_1 = -i_1 \sin \varphi_1$ ,  $s_2 = -i_1 \cos \varphi_1$

④ 전체 왜곡(Total Distortion)

위의 왜곡이 모두 존재할 때, 유효한 왜곡은 그기에 해

당하는 수식들을 합함으로써 모델링될 수 있다. 식 (6), (7) 그리고 (8)을 결합하는 것은  $u$ 와  $v$ 축을 따르는 왜곡의 전체량을 제공한다. 3차 이상의 고차항들을 무시함으로써 다음과 같은 두 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \delta_u(u, v) &= s_1(u^2 + v^2) + 3p_1u^2 + p_1v^2 + 2p_2uv + k_1u(u^2 + v^2) \\ \delta_v(u, v) &= s_2(u^2 + v^2) + 2p_1uv + p_2u^2 + 3p_2v^2 + k_1v(u^2 + v^2) \end{aligned} \quad (9)$$

$g_1 = s_1 + p_1$ ,  $g_2 = s_2 + p_2$ ,  $g_3 = 2p_1$ ,  $g_4 = 2p_2$  이므로, 식 (9)의 표현은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \delta_u(u, v) &= (g_1 + g_3)u^2 + g_4uv + g_1v^2 + k_1u(u^2 + v^2) \\ \delta_v(u, v) &= g_2u^2 + g_3uv + (g_2 + g_4)v^2 + k_1v(u^2 + v^2) \end{aligned} \quad (10)$$

3.1.3 전체 왜곡이 고려된 카메라 모델

식(5)에 따라  $u$ 와  $v$ 축을 따르는 왜곡을 고려함으로써, distortion-free 영상점  $(u, v)$ 와 이 영상점에 해당하는 pixel location 사이의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} u + \delta_u(u, v) &= (r - r_0)/s_u \\ v + \delta_v(u, v) &= (c - c_0)/s_v \end{aligned} \quad (11)$$

식(12)와 같이 새로운 변수를 정의함으로써

$$\begin{aligned} \hat{u} &= (r - r_0)/f_u \\ \hat{v} &= (c - c_0)/f_v \end{aligned} \quad (12)$$

식 (11)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{u}{f} &= \hat{u} - \frac{\delta_u(u, v)}{f} \\ \frac{v}{f} &= \hat{v} - \frac{\delta_v(u, v)}{f} \end{aligned} \quad (13)$$

정확한  $u, v$ 는 실제 노이즈가 내포된 관찰로부터 얻어질 수 없기 때문에 모델링된 왜곡항들은  $\hat{u}, \hat{v}$ 에 의해 대체 시킴으로써 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{u}{f} &= \hat{u} + \delta'_u(\hat{u}, \hat{v}) \\ \frac{v}{f} &= \hat{v} + \delta'_v(\hat{u}, \hat{v}) \end{aligned} \quad (14)$$



계수  $k_1, g_1 \sim g_4$ 을 재정의하므로써, 식 (4),(5) 그리고 (14)의 표현은 완전한 카메라 모델 식(15)로 유도된다.

$$\frac{r_{1,1}x + r_{1,2}y + r_{1,3}z + t_1}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} = \hat{u} + (g_1 + g_3)\hat{u}^2 + g_4\hat{u}\hat{v} + g_1\hat{v}^2 + k_1\hat{u}(\hat{u}^2 + \hat{v}^2)$$

$$\frac{r_{2,1}x + r_{2,2}y + r_{2,3}z + t_2}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} = \hat{v} + g_2\hat{u}^2 + g_3\hat{u}\hat{v} + \hat{v} + (g_2 + g_4)\hat{v}^2 + k_1\hat{v}(\hat{u}^2 + \hat{v}^2) \quad (15)$$

식 (15)는 왜곡 계수들  $k_1, g_1, g_2, g_3, g_4$ 에 관해서 선형이라는 것을 알 수 있다.

### 3.1.4 보정기법

로봇 비전에서의 카메라 보정(camera calibration)이란 카메라의 초점 거리, scale factor, 이미지 중심 그리고 렌즈 왜곡(lens distortion)과 같은 고유 변수라 불리는 카메라 내부의 광학적, 기하학적 특성과 외부 변수라 불리는 어떤 기준 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 3차원 위치와 방향 등을 결정하는 과정이다. 본 연구에서는 Margualt의 비선형 최적화기법<sup>(6)</sup>을 적용한 두단계 보정기법을 사용하였다.

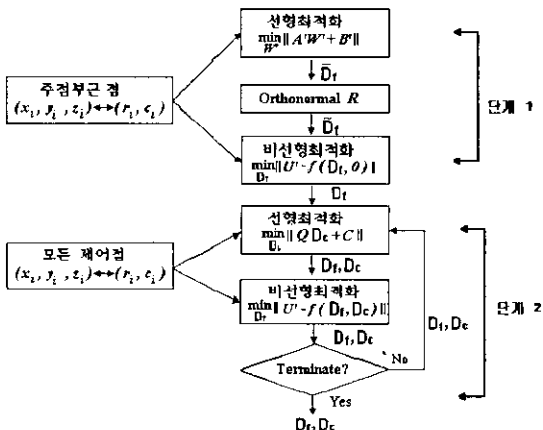


Fig. 10 Flowchart of processing for inference parameter

## 3.2 윤곽선 추출 방법

### 3.2.1 영상 스레시홀딩(Image Thresholding)

영상 스레시홀딩(Image Thresholding)은 그레이 레벨(gray level)의 연속색조(continuous-tone) 영상을 2진 레벨

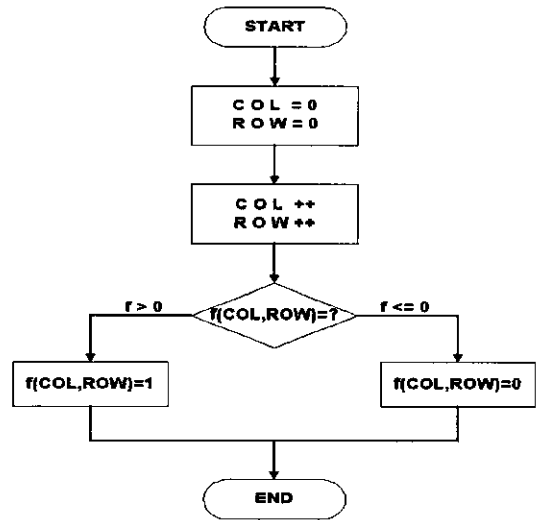


Fig. 11 Flowchart of threshold

(binary level)의 흑백 영상으로 변환하는 기법이다. 지정된 스레시홀딩(threshold) 아래의 픽셀(pixel)값은 모두 블랙(black)으로 변환되고, 스레시홀딩에 있거나 그 위에 있는 픽셀 값은 화이트(white)로 변환된다.

영상 스레시홀딩은 윤곽선 추출(edge detection)을 하기 전에 수행하는 과정으로써, 윤곽선을 추출하는데 혼란을 초래할지도 모르는 정보를 제거하기 위해 이용되는 과정으로, 영상처리과정에서 가장 보편적으로 이용된다.

스레시홀딩의 수식은 다음 식(16)과 같다.

$$g(x, y) = 1 \quad f(x, y) \geq t$$

$$0 \quad f(x, y) < t \quad (16)$$

여기서  $F(X,Y)$ 와  $g(x,y)$ 는 각각 영상처리전후의  $(x,y)$ 에 있는 화소의 농도값을,  $t$ 는 경계값을 나타낸다.

본 연구에서 수행한 스레시홀딩 흐름도는 Fig. 11과 같다.

### 3.2.2 영상분할(Segmentation)

본 연구에서 영상분할은 스레시홀딩에 의해 처리된 흑백영상의 색정보를 이용하여 입력 영상에서 인식에 필요한 제품의 형상이 있는 부분만을 추출하였다. 분할할 부분의 열(column)의 시작 부분을 찾는 알고리즘은 Fig. 12와 같고, 분할할 부분의 줄(row)의 시작 부분의 알고리즘은 Fig. 12를 기본으로 두군데를 수정하면 된다. 즉, 임의의

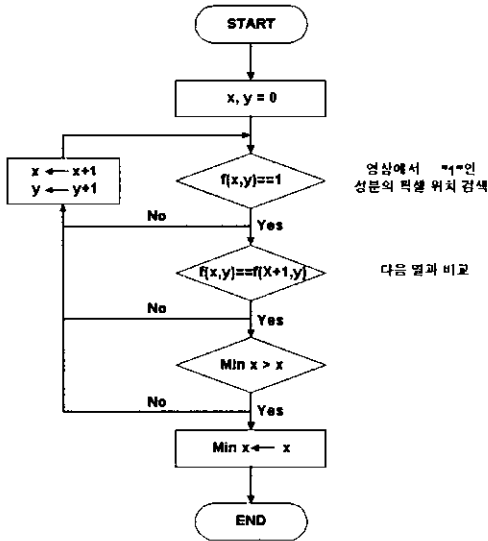


Fig. 12 Flowchart of Initial Column for segment region

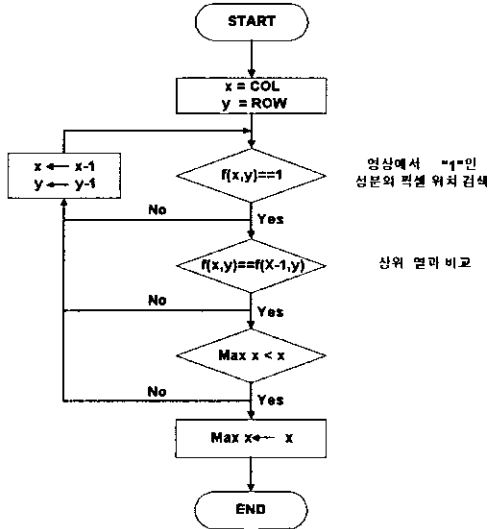


Fig. 13 Flowchart to find the end column for segment region

열(column)과 다음 열의 비교 대신 열의 위치는 같고 임의의 줄(row)과 다음 줄에 위치한 픽셀과의 부분과, Min x 대신 Min y를 구하면 된다.

다음 흐름도는 분할할 부분의 열(column)의 끝 부분 위치를 찾는 흐름도인데, 줄(row)의 끝 부분을 찾는 방법은 Fig. 13에서 임의의 열과 그 앞의 열의 비교 대신 임의의

줄과 그 앞 줄을 비교하고, Max x 대신 Max y를 구하면 된다.

### 3.2.3 영상 피드백 제어

본 연구에서 사용된 영상 피드백 제어기법으로는 Image-based visual servoing 제어기법이 적용된다. 비주얼 피드백 제어 기법은 기존의 비전 시스템의 문제점인 3D정보의 2D화 과정에서의 정보손실에 대한 보상문제가 쉽게 해결될 수 있고, 그리고 캘리브레이션 오차가 존재하더라도 위치 및 자세 등의 건설 제어가 가능한 유연하고 견실한 제어기법이다. 또한 월드 좌표(world coordinates)의 계산 없이 영상정보만으로 서보 시스템 구성이 가능하고, 특히 초기오차가 큰 경우에서도 정확한 피드백 정보의 계산이 가능한 것이므로 기존의 서보제어기법의 문제점을 해결할 수 있는 것이 큰 특징이다.

비주얼 서보잉 기법에는 세가지의 접근 방법이 있다. 첫째는 피드백 변수의 물리적 성질에 의한 방법(①Position-based visual feedback, ②Imaged-based visual feedback)이고, 둘째는 제어구조에 의한 분류 방법(③Closed-loop control, ④Open-loop control)이며, 그리고 셋째는 영상 처리

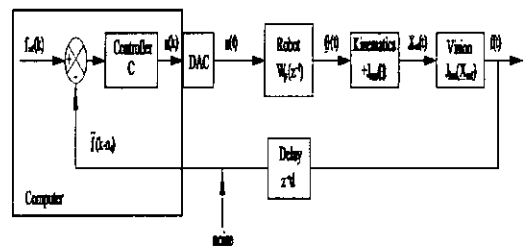


Fig. 14 Imaged-based visual servoing control

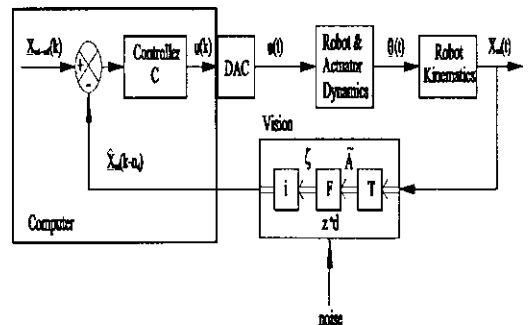


Fig. 15 Position-based visual control technique



설계되었다. 설계된 영상 처리용 하드웨어의 전체 구성을 나타내는 블록선도는 Fig. 16과 같다.

설계된 비전 보드는 CCD카메라와 인테페이스하기 위한 카메라 인테페이스 모듈, CCD카메라로부터의 아날로그 비디오 신호를 디지털 영상 데이터로 변환하기 위한 A/D변환기, 디지털 영상 데이터를 저장하기 위한 영상 데이터 메모리, 영상 데이터를 처리함으로써 유효한 정보를 추출하기 위한 영상 프로세서(Image Processor), 처리된 영상 또는 저장된 디지털 영상 데이터를 모니터에 출력하기 위한 D/A 변환기, 커서 또는 문자 그래픽 형상을 원래의 영상과 겹쳐 디스플레이하도록 하기 위한 그래픽 오버레이 메모리(Graphic Overlay Memory)등의 모듈로 설계되어 있다. 이 비전 보드의 호스트 컴퓨터는 보통 IBM PC, VME System이 사용될 수 있도록 설계되었고, 비전보드 호스트 컴퓨터의 Add-on Board로 사용되도록 설계되었다. Fig. 16은 비전 시스템의 전체 구조를 나타내고 있다.

설계 제작된 비전 보드는 Texas Instrument사의 고성능 디지털 신호 처리기 TMS320C30을 CPU로 사용함으로써 데이터 처리 성능을 획기적으로 향상시킨 것 외에 아래와 같은 특징을 가지고 있다.

- 2비트 고속 데이터 처리 성능(TMS320C30, 16 MIPS)
- 고해상도 영상처리 640(수평)×480(수직), 256(계조)
- 최대 36장(Optional)의 영상 저장 가능(기본 : 4장)
- 그래픽 오버레이 기능
- 최대 4개의 카메라 접속 가능
- 모노크롬 영상 출력
- 최대 16개의 입력/출력 Look-up Table 설정 가능
- 사용자가 직접 DSP PROGRAM을 구현할 수 있는 구조
- 대용량의 프로그램 메모리(최대 128K × 32 bit)
- 대용량의 데이터 메모리(최대 128K × 32 bit)

#### 4.1.2 Software 구성

비전 소프트웨어는 호스트 컴퓨터의 운영체제(Operation System)하에서 동작하며, 호스트 컴퓨터의 한 어플리케이션 소프트웨어로 작동한다. 그러므로, 이 보드는 여러 기능을 가지고 있는 시스템의 한 모듈로서 응용될 수 있기 때문에 시스템 인테그레이션에 의한 특정용도의 시스템 개발이 편리하도록 설계되었다.

본 연구에서 실험에 사용된 비전 보드의 CPU는 TI사의 TMS320C31의 디지털신호처리기로서 데이터 체제가 Floating point 체제로서 명령 수행 시간이 60ns이며

ROM, RAM이 각각 한개 및 두개로 구성된 원칩 프로세서이다. 디지털신호처리기는 신호처리를 디지털적으로 하는 특수한 마이크로 프로세서로서 종래의 아날로그 신호처리기에서는 실현이 곤란하던 기능을 높은 정확도, 고안정성, 고속성으로 실현할 수 있는 특징을 갖춘 프로세서이다. 이러한 특징을 바탕으로 수학적 연산을 많이 필요로 하는 알고리즘의 프로그램화가 가능하고, 고속으로 실시간 처리가 이루어진다. 또한 프로그래밍의 유연성으로 시스템의 유연성 또한 향상됨으로서 비용절감 효과와 신뢰성 향상을 기대할 수 있다.

전체 비전 시스템의 구성은 카메라로부터 취득된 아날로그 영상이 video 멀티플렉서로 4:1 멀티플렉싱을 하여 A/D 변환기에 의해 디지털 영상 데이터로 변환되어 입력 LUT(look up table)로 입력된다. LUT를 통과한 영상 데이터는 비전 버스에 연결되며, <BANK1> 또는 <BANK2>의 프레임 메모리(frame memory, FM)에 입력되기 위해 MUX를 통과하게 된다. 이 멀티플렉서는 FM에 연결되는 어드레스 및 데이터 버스의 신호원 2개, 즉 vision bus와 DSP bus를 선택하는 역할을 한다. 출력 LUT를 통과한 영상 데이터는 D/A 변환기를 통과함으로써 아날로그 비디오 신호로 변환되어 모니터에 출력된다. LUT는 A/D 변환기를 거쳐서 디지털로 변환된 데이터를 프레임 메모리에 저장하기 전에 하드웨어적으로 일차원적인 변환을 하기 위해서 메모리로 구성된 변환 테이블로서 이 LUT를 적절히 사용함으로써 영상 처리 시간을 단축시켜 영상 속 물체의 실시간 윤곽 추출이 가능하게 한다.

586 PC에 비전 보드가 연결되어 서로 통신을 하면서 데이터나 파라메타들을 주고받는데, 비전 보드의 CPU인 DSP와 PC와의 데이터 교신은 듀얼 포트 램(Dual-Port RAM, 1K x 16bit)을 통해서 이루어진다. 두 CPU간에 전달되는 데이터의 내용은 각 비전 함수들마다 정해져 있으며, 인터럽트 핸드레이크에 의해 데이터 교신이 이루어진다.

#### 4.2 실험결과 및 고찰

제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실 영상에 의한 실험을 수행하였다. 실험 방법은 원자로 스템 제너레이터의 홀(hole)의 유사모형을 제작하여 이에 대한 모의 실험을 수행하였다. 유사모형의 모델은 두께 20mm인 철판에 직경 40mm인 180개의 홀을 제작하였다. 각 홀 중심간의 거리는 100mm로 정삼각형 배열로 위치시켰다. 조명은 카메라와 같은 방향에서 300w의 섬유 광학 조명기

를 사용하였고 렌즈는 16mm렌즈를 사용하였다. 카메라는 삼성항공 제품인 CCD 흑백 카메라 모델을 사용하였다.

제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실 영상에 의한 실험을 수행하였다. CCD 카메라는 로봇의 2번째 링크 끝에 부착하고, 제작된 모형용 CCD카메라의 상부에 장착하고 CCD카메라로 홀의 수직 하방향에서 영상을 취득하여 처리하는 방식의 모의 실험을 수행하였다. 각 홀의 중심점을 찾아가는 방법은 180개 홀의 모든 좌표점을 기준 좌표점에 기준하여 제반 좌표점을 메모리시켜서 좌표점  $P_0(0,0)$ 에서  $P_{180}(180,180)$ 을 자동적으로 찾아가서 일정시간동안 한 개의 홀의 형상을 인식한 후, 다음의 좌표 홀을 이동하는 프로그램을 개발하여 사용하였다. 불량 및 정상품의 구별은 우선 정상홀의 데이터를 기준입력으로 시킨 다음 모든 홀의 형상인식을 한 후, 50픽셀 이내의 오차를 기준 허용 오차로 설정하여 그 이상의 오차값을 나타내는 hole은 불량품으로 판별하고, 그 이내의 범위오차

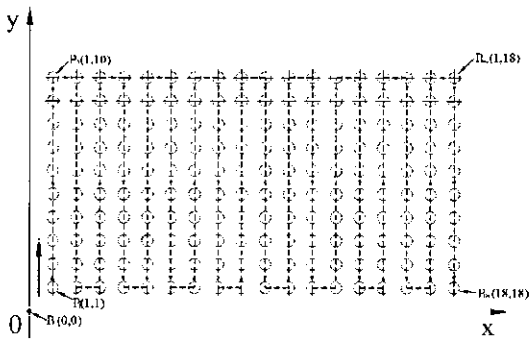


Fig. 18 Coordinates system of steam generator holes

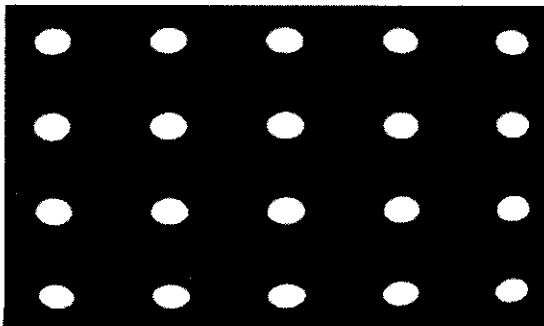


Fig. 19 The reduced model of steam generator hole

를 나타내는 hole은 정품으로 판별하도록 C++을 이용한 S/W를 개발하여 적용하였다. Fig. 18은 실제 스팀 제너레이터 홀의 수가 18,000개인데 대한 축소모형인 180개 홀에 대한 기준좌표계와 진행방향 및 순서를 나타낸다. Fig. 19는 실험에 이용된 원자로 스팀제너레이터의 축소 유사모델로 제작한 실험에 사용된 축소모델의 평면형상에 대한 CCD 카메라 투영에 접하는 부분의 영상을 나타내고 있다. 이것은 50t의 철판으로 제작하였고, 홀의 크기는 실제 홀의 크기의 0.5배 크기로 하였다.

Fig. 20은 실험의 전체 절차를 나타낸다. 로봇이 카메라를 홀의 수직 상방향으로 이동시키면 카메라가 영상을 취득하고 이 영상에 대한 검사의 정도도를 향상시키기 위하여 확대한 후 중위수 필터법에 의해서 영상 평활화처리를 한 후 방정식 (18)에 제시된 영상 처리 알고리즘으로 이진 영상으로 만들어 경계를 추출한다. 경계 추출된 영상에서 홀의 중심점 좌표를 구하기 위하여 방정식 (19)과 (20)에 제시된 알고리즘을 적용하여 각각의 홀에 대한 중심점 좌표를 얻는다. 홀 중심의 수직 상방향에 카메라의 광학중심이 위치하는가를 확인하여 위치하지 않으면 그 벗어난 만큼을 이동시킨 후 홀 중심의 수직 상방향에 카메라의 광학중심이 위치하면 각 중심점 좌표점을 기준하여 수평, 수직 스캔 라인을 따라 방정식 (21)과 (22)를 사용하여 홀의 수평, 수직 지름을 구하고 각각의 홀에 대한

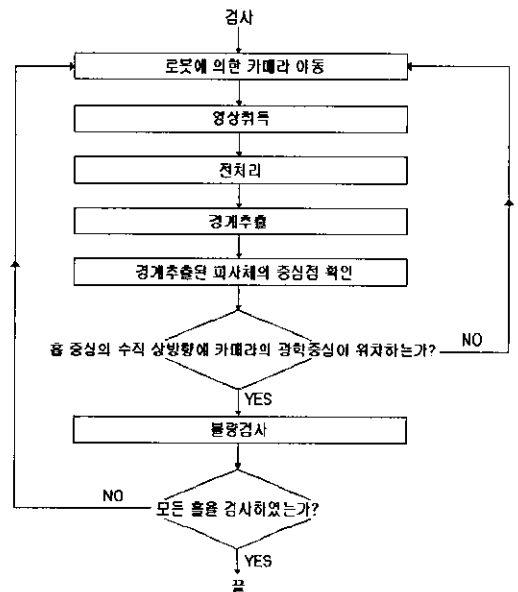


Fig. 20 The flowchart of experimentation

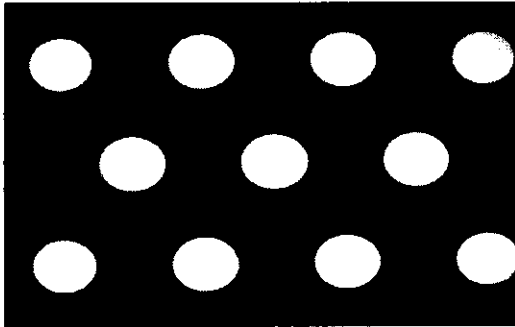


Fig. 21 The acquired image from camera

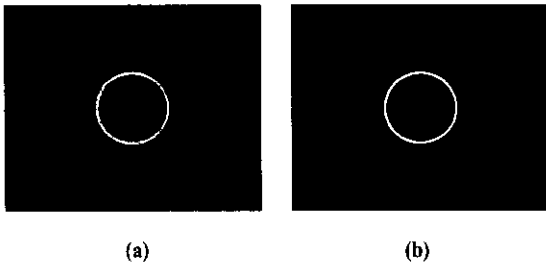


Fig. 22 The recognition result of holes

여 이 두 값을 비교하여 더 큰 값을 선택하여 검사의 기준으로 정한다. 선택된 기준에 대해서 경계를 따라 원 방향으로 회전하면서 10도 단위로 홀을 총 36분할한다. 모든 홀에 의한 검사가 수행되지 않았다면 위에 제시된 과정을 되풀이하여 모든 홀에 대한 검사를 수행하였다.

위의 Fig. 21은 스팀제너레이터 모형으로부터 취득된 영상처리 전의 영상을 나타낸다. Fig. 22는 위에서 제시된 영상처리 알고리즘을 적용하여 얻어진 결과를 나타낸다. 실험에서는 제안된 방법을 사용하여 180개의 홀만을 검사하였다. Fig. 22에서 (a)는 홀의 불량상태를 나타내고, (b)는 정상상태로 판정된 결과를 나타내고 있다. 이때 소요된 시간은 50여분이 필요했고, 검사 결과는 25개의 불량홀중에서 불량상태가 미소한 1개만이 정상홀로 잘못 판별함으로써 99.4% 신뢰성을 입증하였다. 본 연구의 중요한 목적은 우선적으로 지금까지 사람이 직접 원자로 내부에 들어가서 결손유무를 확인하는 방법은 방사능의 유출로 인한 인명피해(국내외적으로 상당히 심각한 실정임)가 크므로, 사람이 원자로 내부에 입실에 하지 않고, 원거리 사무실에서 비전을 통한 PC상에서 이의 검사를 수행하고자 하는데 가장 큰 목적이 있다. 따라서, 이 방법의 첫

번째 과제는 기존의 수작업의 신뢰도와 비전처리를 통한 자동검사의 결손유무 판단의 신뢰도의 비교하는 방법이 중요하다. 실험 모의 모델의 몇개의 홀에 결손을 부여한 상태에서 100번의 검사를 반복 진행시킨 결과 거의 완벽한 처리 결과를 보여 주었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 사람이 직접 원자로에 입실하여 원자로 스팀 제너레이터의 홀의 결손상태의 유무를 검사하던 것을 로봇을 이용해 원자로 내부의 자동검사를 수행하는 로봇비전 기술에 대한 연구를 수행하였다. 유사 모델에 대한 실험 결과, 제안된 디지털 비전 시스템은 유사실험을 통하여 스팀 제너레이터 홀의 파손 및 변형 상태 등의 자동 인식 성능이 보다 더 정밀하고 신속하게 처리됨을 예증하였으며, 제안된 방법을 사용함으로써, 스팀 제너레이터 홀의 파손 및 결손에 대한 형상 인식의 실시간 실현 가능성을 제시할 수 있었고 또한 원자로 방사선 누설로 인한 사고 예방에 크게 기여하리라 사료된다.

향후 연구 방향은 원자로 스팀 제너레이터의 실시간 원격 제어용 전체 디지털 통합 제어 시스템에 대한 연구 및 신뢰성 향상에 대한 연구를 수행하고자 한다.

## 참 고 문 헌

- (1) L. Shingang, S. Tsuji, and M. Imai, "Determining of 3-D Structure of Environment from Lines Viewed Continuously by a Moving Camera", Trans. IEICE of Japan, D-Ⅱ, vol.J74- D-Ⅱ, No.2, pp. 175~192, 1991.
- (2) K.S. Fu, R.C. Gonzalez, and C.S.G. Lee, Robotics : Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill, 1987.
- (3) S.W. Wijesma, D.F.H. Wolfe, and R.J. Richards, "Eye-to-Hand Coordination for Vision-Guided Robot Control Application", Int. Jour. of Robotics Research, Vol. 12, No. 1, pp. 65~77, 1993.
- (4) G. Parrick, "Matching and Clustering: Two Steps Toward Automatic Object Modeling in Computer Vision", Int. Jour. of Robotics Research, Vol. 14, No. 6, pp. 633~642, 1993.
- (5) K. Kinoshita and K. Deguchi, "3-D Recognition by

- Active Vision", Trans. SICE of Japan, vol.28,no.1, pp.144~153, 1992.
- (6) P.N. Suganthan, E.K. Teoh, and D.P. Mital, "Pattern Recognition by Matching the Potts MFT Neural Networks", Pattern Recognition Society, Vol. 28, No. 7, pp. 997~1009, 1995.
- (7) 고국원, 박원식, 조형석, "생산시스템 자동화 분야에서의 시각인식장치", 제어시스템자동화 공학회지, 제2권, 제6호, pp. 38~49, 1996.
- (8) R.C. Gonzalez and R.E. Woods, Digital Image Processing, Addison Wesley, 1992.
- (9) S.S. Iyengar and W. Deng, "An Efficient Edge Detection Algorithm using Relaxation Labeling Technique", Pattern Recognition Society, Vol. 28, No. 4, pp. 519~536, 1995.
- (10) 강순주, 최유락, 최성수, 우희곤, "원전 증기 발생기 전열관 검사 자동화를 위한 지능형 통합 시스템 개발", 제어·자동화·시스템공학논문지, 제2권, 제3호, pp. 236~241, 1996.
- (11) 김동화, 이원규, "신경망 2-자유도 PID제어기를 이용한 원자력 발전소용 증기 발생기 수위제어", 제어·자동화·시스템공학논문지, 제4권, 제3호, pp. 321~328, 1998.
- (12) 김동욱, "영광#3,4호기 시뮬레이터의 노심보호 및 감시계통 모델링", 제어·자동화·시스템공학논문지, 제4권, 제3호, pp. 400~405, 1998.