

자기센서를 이용한 증기발생기 전열관  
손상평가 기술개발

Nondestructive evaluation of steam generator  
tube using magnetic sensor

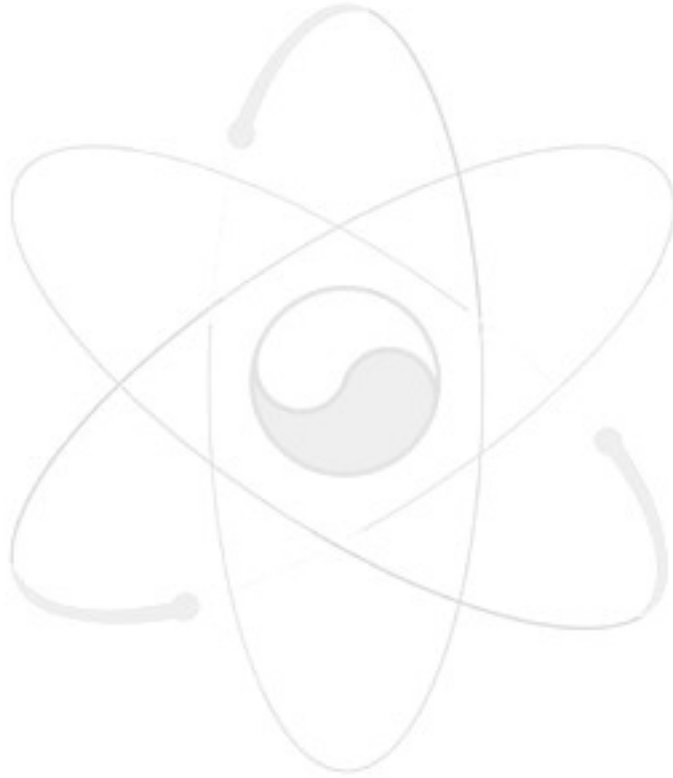
*KAERI*

한국원자력연구소

# 제 출 문

## 한 국 원 자 력 연 구 소 장 귀 하

본 보고서를 2003-2004 년도 기관고유사업 “자기센서를 이용한 증기발생기 전열관 손상평가기술개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2005. 2

연구수행기관명 : 원자력연구소  
연구책임자 : 박 덕 근  
연구원 : 권 상 철  
연구원 : 김 성 수

# 요 약 문

## I. 제 목

자기센서를 이용한 증기발생기 전열관 손상평가기술 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

원자력발전소의 증기발생기 전열관은 인코넬 600 이라고 불리는 니켈합금으로 이루어져 있다. 경수로형 원자력발전소의 증기발생기 가동 중 검사나 가동전 검사에는 와전류를 사용하고 있다. 와전류 검사는 증기발생기의 결함을 검사하는 강력한 도구이지만 몇가지 중요한 결점을 가지고 있다. 와전류는 임피던스 평면상에서 저항과 리액턴스 사이의 위상차로 표시되므로 자성상에 의한 투자율 변화와 같은 잡음과 결함을 구별할 수 없다. 전열관 재료인 인코넬 600은 비자성체 임에도 불구하고 증기발생기의 가동 환경에 의해 자성상이 발생하게 되며, 이 자성상은 와전류 신호를 왜곡시켜 울진 4호기와 같은 파단사고를 초래할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 현장에서는 강력한 영구자석을 삽입한 보빈형 탐촉자를 이용하여 전열관을 자기포화 시키고 있다. 자기포화에는 관 내부의 탐촉자가 전열관 외부표면의 결함을 탐지할 수 있도록 적절한 와전류 투과 깊이를 보장하여야 하며, 불분명한 결함신호로부터 자기투자율 변화에 의한 신호왜곡을 제거하여야 한다. 본 연구에서는 와전류 신호의 결점을 보완하는 새로운 기술이 소개하였으며 이 기술을 이용하여 인코넬 600 시편의 인공결함을 측정하였다. 와전류는 코일의 일차 자기장과 상호작용 하는 자신의 자기장을 생성 시킨다. 일반적인 와전류 검사에서는 코일의 저항과 리액턴스의 변화로부터 결함에 대한 정보를 얻는다. 그러나 본 연구에서는 결함에 의해 유도된 자기장을 자기홀 센서를 이용하여 직접적으로 측정하였다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 증기발생기 전열관의 가동조건을 모사할 수 있는 열처리 시편 제작
  - 열처리된 인코넬 600 시편에서 유도된 자기장 측정
  - 동일한 시편에서 국소부위의 자기이력곡선 측정
2. 각기 다른 길이, 깊이 및 폭을 가진 EDM 표준시편을 제작하고 결함에 따른 자속누설 측정

- X-Y sage 제작 및 제어프로그램 작성
- Hall 소자 구동 전자회로 구성
- EDM 으로 가공된 결함을 이용한 결함 진단 방법 개발

#### IV. 연구개발결과

1. 각기 다른 조건에서 열처리된 시편을 GMI 와 VSM을 이용하여 자기신호를 측정
2. 열처리된 시편에서의 자기이력곡선 측정
3. 자기센서를 이용하여 증기발생기 전열관의 결함을 탐상하는 새로운 기술 개발
  - 홀센서를 이용하여 결함의 자속밀도를 측정
  - 각기 다른 길이, 깊이와 폭을 가진 인공 결함시편을 이용하여 결함에서 유도된 자기장의 자속밀도 측정
  - 결함에 의해 유도된 자기장을 표시된 신호는 ECT 신호보다 해석하기 용이함
  - 교류자속 누설법을 이용하여 직경이 0.2 mm 깊이 0.1mm 인 결함 까지 탐지

#### V. 연구개발결과의 활용계획

교류자속 누설법은 통상적인 와전류 탐상보다 속도와 분해능을 향상시킬 수 있다. 증기발생기 전열관의 결함에 대한 정보는 와전류에서의 위상차 대신에 결함에 의해 유도된 전압의 크기로 표시될 수 있다. 이 새로운 기술은 통상적인 와전류 평가에 있어서의 신호해석 문제로부터 자유로울 수 있으며, 통상적인 와전류 신호왜곡의 원인으로 지목되는 자성상에 의한 투자율 변화 문제를 해결할 수 있으며 와전류 탐촉자 에서 탐지 불가능한 원주균열을 측정할 수 있다. 따라서 이 기술은 와전류 시험을 대체하거나 보완할 새로운 기술로서 사용될 수 있다.

# S U M M A R Y

## **I. project Title**

Nondestructive evaluation of steam generator tube using magnetic sensor

## **II. Objectives and Importance of the Project**

The steam generator(SG) tube in nuclear power plant (NPP) are composed of nickel based alloy called Inconel 600. Eddy current testing (ECT) has been widely used in in-service inspection as well as pre-service inspection of the SG tubes in NPP of pressurized water reactor type. ECT is power technique detecting defects in SG tubes, it has several significant handicaps. Since the ECT signals represented by the phase difference between resistance and reactance on the impedance plane, it is difficult to separate defect signals from other noise source such as permeability variation clusters. Although this material is paramagnetic in nature, ferromagnetic phases are created by the SG operating environments. These ferromagnetic phases significantly alter the eddy current signals, which result in the significant tube failure like UCN 4. Because of these ferromagnetic phases, powerful permanent magnets need to be integrated into eddy current tube designs to magnetically saturate the tube material. Magnetic saturation is required to ensure adequate eddy current depth of penetration in order for internal probes to detect defects that initiate from outer diameter (OD) surface of the tube. It is also needed to eliminate probe signal distortions from magnet permeability variations that can obscure defect signals.

In this study, new detecting technology complement the handicaps of ECT has been introduced, and tested in the Inconel 600 specimen having artificial cracks. The eddy currents produce their own magnetic fields that interact with the primary magnetic field of the coil. In conventional eddy current test, information can be gathered about the test material by measuring changes in the resistance and inductive reactance of the coil. However, in this study, the induced magnetic field by the defects can be measured directly by the magnetic Hall sensor.

### **III. Scope and Contents of the Project**

1. Fabrication of thermal annealed specimen simulating operation condition of ST tube
  - Measuring of induced magnetic field by thermal annealed Inconel 600 specimens.
  - Measuring the hysteresis loop of the local parts in the same specimen
2. Fabrication of EDM standard defect specimen with different length, depth, width, and proximity to be used for the evaluation on magnetic flux leakage signal of each defect
  - Construction of X-Y stage and preparation of control soft ware by Lab View
  - Construction of signal acquisition electronic circuit for Hall probe
  - Development of precise diagnosis on defect using fabricated DEM standard flaws

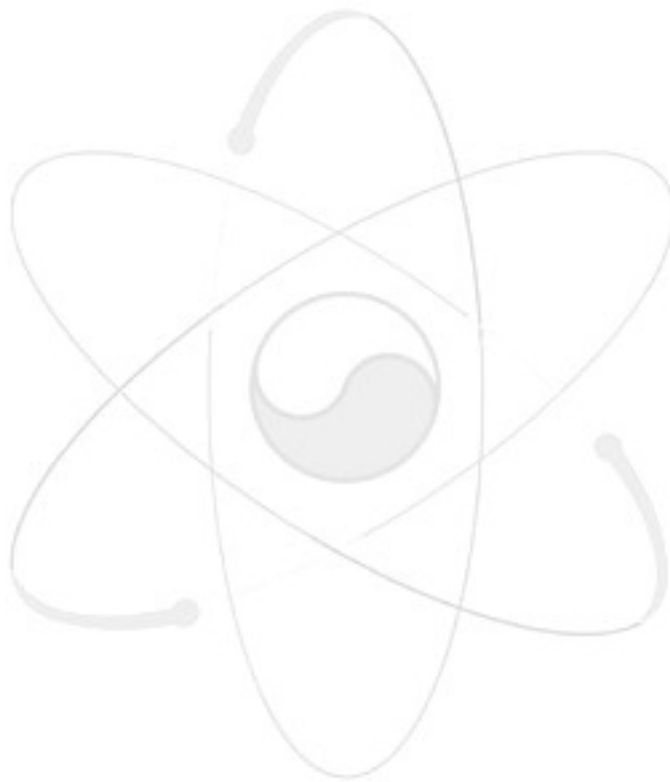
### **IV. Results of Project**

1. Successful detection of magnetic signal in the thermal annealed specimen by GMI and VSM with different heat treatment conditions
2. Successful detection of the hysteresis loops in the thermal annealed specimen
3. Development of new technology detecting SG tube defects with magnetic sensor,
  - This technology measures change of magnetic flux density due to defects by Hall sensor
  - Detection of magnetic flux density of induced field in the standard defect specimen with different length, depth, width.
  - The signals represented as a induced field in the flaws are easier to understand than ECT.
  - It is possible to measure the defect having size of 0.2 mm diameter and 0.1 mm depth.

### **V. proposal for application**

The method of AC magnetic flux leakage can offers improvement in speed and resolution compared to the conventional ECT. The information

about the defects in the SG tube can be represented as a degree of induced voltage by the defects instead of the phase difference of ECT. The new technology is free from the signal analysis problems in the conventional ECT. This new technology can solve the permeability variation clusters which is the main source of ECT signal distortion, and can measure circumference cracks with high velocity which is impossible in the ECT bobbin probe. Therefore this technology can be used as a new technology substituting or supporting conventional ECT.



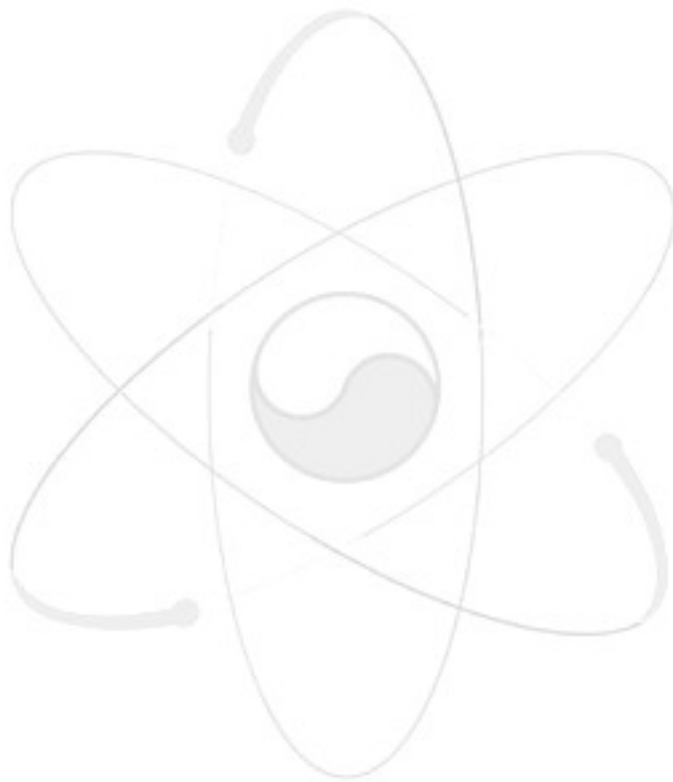
# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구 개발의 목적 및 필요성 .....	1
제 2 장 국내·외 기술개발 현황 .....	3
제 1 절 국내·외 기술개발 현황 .....	3
제 3 장 연구개발수행내용 및 결과 .....	5
제 1 절 자성비파괴 방법에 대한 개요 .....	5
1. 누설자속탐상의 이론적 배경 .....	5
2. 점(Point)자기쌍극자에 의한 자기장 .....	5
3. 선(Line)자기쌍극자에 의한 자기장 .....	6
4. 띠(Strip)자기쌍극자에 의한 자기장 .....	7
5. 홀(Hall)센서 .....	9
가. 홀(Hall)구조 .....	9
나. 홀센서의 구동 .....	9
제 2 절 실험적접근방법 .....	11
1. 측정시스템구성 .....	11
2. Labview 인터페이스 .....	13
3. 시편준비 .....	15
제 3 절 연구내용 .....	17
1. 실험방법 .....	17
2. 주파수에 따른 신호측정 .....	18
3. Voltage에 따른 신호측정 .....	20
제 4 절 연구결과 .....	22
1. 열처리 시편의 자기신호변화 .....	22
2. 인공결함의 크기에 따른 신호 .....	24
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....	25
제 1 절 연도별연구목표 .....	25
제 2 절 연구개발목표의 달성도 .....	25
제 3 절 관련분야의 기술발전예의 대외기여도 .....	26
제 5 장 기술개발결과의 활용계획 .....	29
제 6 장 참고문헌 .....	31



표 목 차

Table1 인공결합크기 ..... 16



## 그 림 목 차

Fig. 1 표면결함의 모형도 .....	8
Fig. 2 홀소자의 구조 .....	9
Fig. 3 홀 센서를 결함 탐지 측정개략도 .....	10
Fig. 4 실험 모식도 .....	11
Fig. 5 홀 센서부 설계 .....	12
Fig. 6 측정 장치 사진 .....	12
Fig. 7 측정시료 scanning 방법 .....	13
Fig. 8 실험장치 구동 Labview 화면구성 .....	14
Fig. 9 실험장치 구동 Labview 프로그램 .....	15
Fig. 10 인코넬 600의 가속열처리 시편 .....	16
Fig. 11 inconel600 표준 시편의 결함위치 .....	16
Fig. 12 U-type Ferrite core 센서 설계 .....	17
Fig. 13 자기잡음 차폐를 위한 장치 .....	18
Fig. 14 정전원 공급 장치 및 증폭회로 설계도 .....	18
Fig. 15 주파수에 따른 인공결함 출력 신호 .....	19
Fig. 16 주파수에 따른 인공결함 출력 신호 .....	19
Fig. 17 주파수에 따른 인공결함의 크기 비교 .....	20
Fig. 18 Voltage 에 따른 인공결함 출력신호 .....	21
Fig. 19 Voltage 에 따른 인공결함 출력신호 크기 비교. ....	21
Fig. 20 열처리 온도와 시간에 따른 Barkhausen noise의 변화 .....	22
Fig. 21 열처리 온도와 시간에 따른 GMI 출력변화 .....	23
Fig. 22 동일한 시편에서 부위가 서로 다른 부분에서 추출한 시편에서의 자기이력곡선의 모양 .....	23
Fig. 23 결함 A에서의 출력신호 .....	24
Fig. 24 결함 B에서의 출력신호 .....	25
Fig. 25 결함 C에서의 출력신호 .....	25
Fig. 26 결함 D에서의 출력신호 .....	26

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구개발 목적 및 필요성

현재 증기발생기 전열관의 손상평가를 위해서 와전류 탐상을 수행하고 있다. 와전류 탐상은 원자력발전소 증기발생기 전열관의 결함의 검출 및 위치 추정, 종류 유추, 크기 산정 등이 가능한 매우 강력한 비파괴 탐상 기술이다[1]~[4]. 와전류탐상시험은 전자기유도 법칙에 따라 교류가 흐르는 코일을 시험하고자하는 전도체인 시험체 가까이 가져가면 교번자장에 의해 와전류가 유도된다. 와전류의 흐름은 전도도, 투자율, 불연속, 도체와의 거리 등에 따라 변화하고 이 변화된 와전류에 의한 임피던스의 변화를 검출하여 기록장치로 파형을 기록하고 판독하여 시험체의 적부를 판단하는 시험법이다. 와전류는 표면에 집중하는 표피효과가 있고 이 표피효과는 교류 주파수와 재질의 전기전도도와 투자율에 의존하는 특성이 있으며, 표면 또는 표면근처에 있는 결함 검출에는 유리하나 깊은 곳에 있는 결함 검출에는 불리하다. 그러나 이러한 이론에 따른 결과를 얻기 위하여 와전류 탐상으로 얻은 측정 결과와 재료의 전자기적 특성을 고려하여야 하기 때문에, 실제 평가를 하는 것은 매우 복잡하다. 따라서 숙련되지 않은 검사자의 경우 신호를 평가하는데 많은 어려움이 따르게 된다. 이는 와전류 탐상의 측정 결과가 와전류 탐측자의 대역폭 및 중심 주파수, 결함의 깊이 및 방향 등과 같은 많은 변수들에 의해 좌우될 뿐만 아니라 무엇보다도 재료의 전자기적 특성에 의존하기 때문이다.

실제 현장에서는 작업자가 육안으로 와전류 신호를 확인하여 결함에 대한 위치, 크기 등을 판단하고 있다. 이때 작업자는 와전류 수신 신호를 임피던스 변화에 의하여 나타나는 위상차와 같은 전통적인 와전류 시험방법으로 결함을 판단하고 있다. 그러므로 와전류 시험의 전체적인 수행을 위해서는 작업자의 매우 풍부한 경험이 요구되며 또한 작업자의 경험과 주관적인 판단에 따라 시험 결과가 달라질 수 있어 객관성이 결여되기 쉽다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 결함 크기 산정 및 분류 같은 작업에서 전산 software 로 작업자를 도와줄 수 있는 방법이 모색되고 있으나, 증기발생기의 전열관은 가동조건에 의해 와전류 시험에서는 불변의 상수로 가정하고 있는 전기전도도나 투자율의 변화를 software에서는 고려하지 않고 있다. 이는 증기발생기의 가동조건에 의하여 전열관 재료인 Inconel이 고온 고압의

냉각수에 의하여 재료의 특성이 변화하거나 압력용기와 같은 자성체 재질의 미세분말이 결합에 붙어 자성상과 같이 나타나기 때문이다.

현재 원자력 발전소 증기발생기 전열관 검사에서 수행하고 있는 일반적인 와전류 탐상은 코일에 교류전압을 인가하여 전열관에 유도된 임피던스 변화를 측정하고 이를 모니터에서 위상차로 확인하고 있다. 와전류는 전자기 유도를 이용하는 것이므로 특성상 전열관의 투자율에 영향을 받는다. 원래 증기발생기 전열관의 투자율은 1.01로서 상자성체이나, 고온고압의 가동조건에 의하여 전열관의 특정 부위가 국부적으로 자성상의 상변화가 일어나는 현상이 발생한다. 자성상이 생성되면 그 부위의 투자율이 증가하게 되고 이는 결국 와전류 신호에 영향을 미쳐, 마치 자성상이 결합인 것처럼 관측될 수 있다. 그 결과 검사자는 실제의 결합과 무관한 자성상에 의한 유사결합을 결합으로 오인하거나, 실제의 결합을 자성상에 의한 유사결합으로 간주하여 무시하는 현상이 발생하게 되며, 이는 직접적인 사고에 연결되기도 한다. 이러한 자성상에 의한 효과를 제거하기 위해서는 피검체를 탈자 시키거나 자기포화 시킴으로서 자성체를 상자성체처럼 만들어 주는 것이 필요하다. 따라서 자성상을 포화시켜 자성상의 효과를 제거하기 위하여 와전류 탐상 코일 전면에 영구자석을 삽입한 탐촉자가 개발되어 있거나 여러 가지 문제점으로 실제 작업현장에서는 거의 사용되지 않고 있다.

본 연구는 이러한 와전류 탐상의 근본적인 문제점을 해결할 수 있는 신기술로, 고속의 탐상속도 하에서도 탐상오류를 원천적으로 제거하는 것을 목표로 하고 있다. 본 연구에서 개발하고자하는 기술은 증기발생기 가동에 의하여 전열관에 생성되는 자성상의 투자율을 측정하여 와전류효과에 의한 임피던스 변화를 보상함으로써 투자율 변화에 의한 신호왜곡 문제를 근본적으로 해결하여 준다. 또한 전자기유도의 결과로 일어나는 자속변화를 자기센서로 직접 측정함으로써 임피던스의 위상차를 판독하는데서 발생하는 신호해독에 의한 오차문제를 근본적으로 해결할 수 있게 하여준다. 무엇보다도 이 새로운 기술은 MRPC이상의 정밀도를 가지고 보빈형 탐촉자의 속도로 결합을 탐상할 수 있기 때문에 검사 속도를 획기적으로 단축할 수 있다.

## 제 2 장 국내·외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내·외 기술개발 현황

원전 증기발생기 전열관 평가기술은 와전류 탐상(ECT)에 전적으로 의존하고 있으며 아직 새로운 기술은 개발되지 않았다. 와전류를 이용하여 증기발생기 전열관을 평가하는 기술은 우리나라도 세계적인 수준에 도달하고 있다. 그러나 장비제작 및 신호처리에 관한 원전기술은 거의 보유하고 있지 못한 형편이다. 그러나 대상체가 증기발생기 이외의 재질일 경우에는 국내에서 개발된 장비가 사용되고 있으나 아직 국제적인 수준과 비교하면 초보적인 단계이다. 현재 증기발생기 ECT 검사기술 및 관련특허는 대부분 Zetec에서 독점하고 있으며, 신호처리 알고리즘 및 source code 등은 엄격히 기술통제를 하고 있는 형편이다. Zetec 등 외국기관에서는 ECT 탐촉자의 개선에 노력하여 X-probe 등 새로운 탐촉자 개발과 새로운 탐지 코일의 삽입 등에 집중하고 있다.

와전류탐상 결과는 다른 비파괴 시험에 비해 보다 많은 정보를 제공하나, 피검체가 자성체일 경우 적용하기 어려우며, 증기 발생기 전열관과 같이 국부적으로 자성상이 존재할 경우에는 자성상에 의한 신호의 왜곡이 발생하여 판정에 어려움이 많다. 이와 같이 와전류는 단순한 해석으로 결과를 평가할 수 없는 경우가 많아 실제 적용 시 다소의 어려움이 따르며 또한 다른 비파괴탐상에 비해 오류를 범할 수 있는 가능성이 높다. 이 같은 와전류탐상의 단점은 작업자의 높은 자질을 요구할 뿐만 아니라, 와전류탐상을 산업 전반으로 확산시키는 데 있어서 저해 요인이 된다. 와전류탐상은 유사한 목적으로 수행하는 초음파탐상[5]~[8]에 비하여 신속하고 저렴하다는 장점들을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 높지 않은 신뢰성으로 인하여 적용이 제한되고 있는 상황을 해결하기 위해서는, 이를 극복할 수 있는 신기술이 개발되어야 한다. 이러한 신기술이 자리 잡기 위해서는 복잡한 와전류 잡음 신호 정보로부터 결함 신호를 분리하는 기술을 정립하여야 하며, 또한 결함을 분석하는 프로그램을 개발함으로써 보다 단순하면서도 기계적인 작업으로 이를 수행할 수 있도록 하여야 한다. 이 같은 작업은 작업자에 의한 탐상 분석의 오류를 최소화시키는 효과도 얻을 수 있으므로, 탐상 오류에 의한 경제적 손실을 막을 수 있을 뿐만 아니라 높은 자질의 요구로 인한 작업자의 양성, 사용 및 관리상의 경제적 손실도 줄일 수 있다. 자기센서를 이용하여 자성상의 투자

율을 측정하고 이를 이용하여 순수한 가동결함만을 분리하는 기술은 아직 선진국에서도 개발되지 않은 기술로서, 현재 뒤떨어진 와전류 탐상에 대한 기반기술을 확충함과 아울러 신기술개발에 의한 기술수출을 가능하게 할 것이다.

그러나 자기센서를 도입하여 전열관에 생성되는 자성상의 투자율을 측정함으로써 전열관의 결함 탐지에 있어서 오류를 없애는 방법은 아직 전 세계에서 어디에서도 고안된 적이 없다. 현재 증기발생기 전열관 손상을 평가하는데 있어서는 일반적으로 보빈형 탐촉자를 사용하고, 탐상결과 의심스러운 부분이 있을 경우에는 MRPC를 사용하고 있다. 그러나 보빈형의 탐촉자가 초당 40 inch 정도의 고속으로 탐지할 수 있는 반면 확관 부위에는 적용하기 힘들며, 반면 MRPC는 정확하기는 하나 초당 0.2 inch 로 매우 속도가 느려 전열관의 모든 부위에 적용하기는 힘들다. 따라서 만일 보빈형 와전류 탐촉자의 속도와 MRPC 정도의 정밀도로 전열관의 결함을 탐상할 수 있는 기술이 개발된다면, 검사시간을 획기적으로 단축할 수 있을 것이다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 자성비파괴방법에 대한 개요

#### 1. 누설자속탐상의 이론적 배경

누설자속탐상에 관한 연구는 실질적인 면에서는 많은 발전을 이루었으나 그 이론적인 면에 대해서는 아직도 초보적인 수준을 벗어나지 못하고 있다. 자기적인 성질을 가진 대부분의 대상체의 자화곡선(B-H curve)이 강한 비선형성(nonlinearity)을 가지고 있으며 풀어야 할 문제의 수식은 2차 편미분방정식인 맥스웰(Maxwell) 방정식으로 주어지므로 이 둘을 합할 경우 그 해를 구하는 것이 일반적인 경우 거의 불가능하기 때문이다. 주어진 문제의 해결을 위한 엄밀하게는 해가 없으므로 경향성에 대한 이해가 어려운 실정이다. 이러한 문제에 대한 초기의 접근은 1960년대에 러시아의 Zatspein 등의 이론그룹에 의해 쌍극자 모델을 이용하여 시도되었으며 상당히 좋은 결과를 보여준 바 있다. 그러나 기본적인 현상에 대한 몇 가지 가정에 대한 근본적인 이해가 이루어지는 데는 20년 이상의 시간이 지난 후 영국의 Edwards 와 Palmer에 의해 이루어졌다. 그러나 아직 이에 대한 일반적인 접근은 거의 시도되어 있지 못하고 제한적인 경우에 한해 upwinding이라는 기법을 사용한 FEM 기법으로 시도되고 있는 실정이다.

실제의 결합의 형상은 마구잡이식으로 되어있으므로 수학적 해석이 거의 불가능하다. Zatspein 과 Shcherbinin은 이것을 간단한 형태로 모델링하였다. 즉 점, 선, 면(띠)의 형태로 단순화한 후 이것에 자기장이 인가되어 누설자속이 발생하는 것을 쌍극자 모델(dipole model)로 환원시켰다. 이렇게 함으로써 복잡한 수학적 계산을 단순한 선적분 또는 면적분의 형태로 만들었다. 또한 이러한 선이나 면에 분포하는 표면자기전하밀도(surface magnetic charge density)를 일정한 상수로 간주하였다. 이것은 수학적으로 단순화할 수 있는 이점이 있었으나 이들은 그 물리적 근거를 제시하지는 못했다. 그러나 그 계산의 결과는 많은 실험결과를 설명할 수 있다는 점에서 이 모델은 이후에 많은 연구자들에 의해 받아들여졌다.

#### 2. 점(point) 자기쌍극자에 의한 자기장

우선 그림 1과 같은 형상을 가정한다. 자기전하(magnetic charge, 크기를

$m$ 이라 한다.)에 의한 자기장은 다음과 같다. 이러한 자기전하가  $2b$  만큼 떨어져있는 자기쌍극자(magnetic dipole)에 의해 임의의 위치  $(x,y)$ 에 발생하는 자기장은 다음과 같다.

$$\vec{H} = \frac{m}{r^3} \vec{r}$$

여기서, 자기쌍극자에 발생한 벡터양  $H$ 의 각 성분을 보면 다음과 같다.

$$H_x = m \left\{ \frac{x+b}{[(x+b)^2 + y^2]^{3/2}} - \frac{x-b}{[(x-b)^2 + y^2]^{3/2}} \right\}$$

$$H_y = m \left\{ \frac{y}{[(x+b)^2 + y^2]^{3/2}} - \frac{y}{[(x-b)^2 + y^2]^{3/2}} \right\}$$

### 3. 선(line) 자기쌍극자에 의한 자기장

자기전하를 갖는 무한하게 긴 선에 의한 자기장은

$$\vec{H} = \frac{2\sigma_l \vec{r}}{r^2}$$

로 주어진다. 여기서  $\sigma_l$  는 선에 있는 자기전하의 선밀도(linear density)이다. 외부에서 얻는 자기장은 두 개의 선에 의한 자기장의 대수적 합으로 주어진다.

$$H_x = -\frac{4\sigma_l b(x^2 - y^2 - b^2)}{[(x+b)^2 + y^2][(x-b)^2 + y^2]}$$

$$H_y = -\frac{8\sigma_l bxy}{[(x+b)^2 + y^2][(x-b)^2 + y^2]}$$

여기서  $2b$ 는 쌍극자의 길이이다. 실제의 경우에는  $x \gg b$  and  $y^2 - x^2 \gg b^2$  이며 이 경우 다음과 같이 주어진다.



$$H_x = -4\sigma b \frac{(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$H_y = -\frac{8\sigma bxy}{(x^2 + y^2)^2}$$

#### 4. 띠(strip) 자기쌍극자에 의한 자기장

$\sigma(\eta)$ 의 표면 자기전하밀도를 갖는 폭이  $2b$ , 길이  $h$ 인 띠쌍극자의 면적요소  $dS$ 에 의한 전하요소  $dQ$ 에 의한 자기장성분은

$$dQ = \sigma(\eta) dS_n, \quad 0 < \eta < h$$

로 주어진다. 관측점 M에서, 폭  $d\eta$ 인 자기쌍극자의 면적요소에 의한 자기장성분은

$$dH_1 = \frac{2\sigma(\eta)d\eta r_1}{r_1^2}$$

이다.

$$\cos \theta_1 = \frac{x+b}{r_1}; \quad \sin \theta_1 = \frac{y+\eta}{r_1}; \quad \cos \theta_2 = \frac{x-b}{r_2}; \quad \sin \theta_2 = \frac{y+\eta}{r_2}$$

$$r_1^2 = (x+b)^2 + (y+\eta)^2; \quad r_2^2 = (x-b)^2 + (y+\eta)^2$$

으로부터

$$dH_{1x} = \frac{2\sigma(\eta)(b+x)d\eta}{(x+b)^2 + (y+\eta)^2}, \quad dH_{1y} = \frac{2\sigma(\eta)(y+\eta)d\eta}{(x+b)^2 + (y+\eta)^2}$$

마찬가지로 음전하에 의한 효과를 고려하고,  $\sigma(\eta) = \sigma_s = \text{const.}$ 일 경우

$$H_x = 2\sigma_s \left[ \arctan \frac{h(x+b)}{(x+b)^2 + y(y+h)} - \arctan \frac{h(x-b)}{(x-b)^2 + y(y+h)} \right];$$

$$H_y = \sigma_s \ln \frac{[(x+b)^2 + (y+h)^2][(x-b)^2 + y^2]}{[(x+b)^2 + y^2][(x-b)^2 + (y+h)^2]}$$

가 된다. 여기서  $h \rightarrow 0$  일 때  $\lim_{h \rightarrow 0} \sigma_s = \sigma_s$  가 되고 이것은 앞에서 살핀 선쌍극자의 경우로 환원된다.  $h \rightarrow \infty$  일 경우

$$H_x = 2\sigma_s \left( \arctan \frac{(x+b)}{y} - \arctan \frac{(x-b)}{y} \right); \quad H_y = \sigma_s \ln \frac{(x-b)^2 + y^2}{(x+b)^2 + y^2}$$

이며  $x \gg b$  일 경우 위의 식은 다음과 같이 된다.

$$H_x = \frac{4\sigma_s b}{y} \quad \text{for } x \ll y;$$

$$H_x = \frac{4\sigma_s b y}{x^2} \quad \text{for } x \gg y;$$

$$H_y = \frac{4\sigma_s b x}{x^2 + y^2}$$

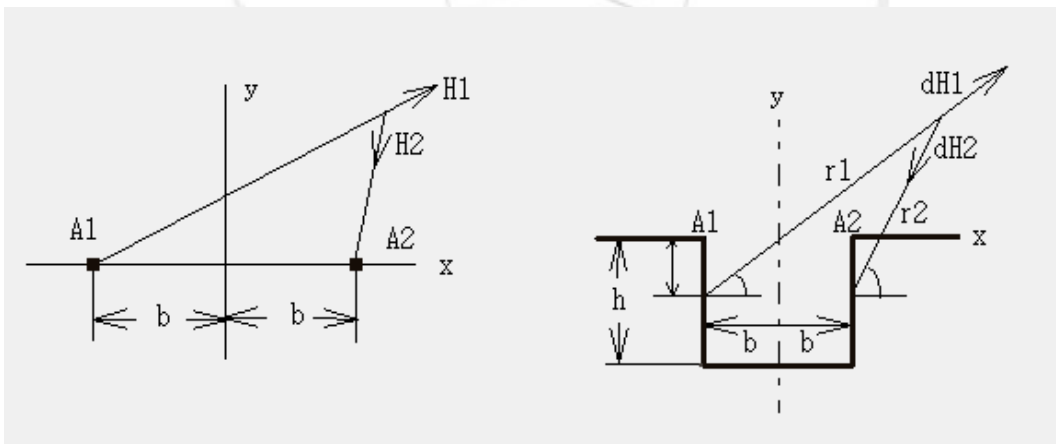


그림 1. 표면결함의 모형도.

## 5. 홀(Hall) 센서

홀 센서는 홀효과를 이용하여 제작된 센서이며, 일반적으로 자기장을 측정하는데 가장 널리 사용되고 있으며, 홀소자에 가해주는 전류와 출력전압을 증폭하는 회로가 있어야 한다.

### 가.홀(Hall) 구조

홀(Hall)센서는 홀 효과를 이용한 자기센서로 종류로는 InSb, InAs, Ge, GaAs 등을 재료로 한다. 홀 소자는 자기에 응답하는 센서로 알려져 있고 근접 스위치나 모터 제어용으로 많이 사용되고 있다.

홀 소자는 출력 전압이 자계에 직접 비례한다. 홀 소자는 일반적으로 그림 2과 같으며 전류  $I_c$  를 흘리고 홀 소자의 직각으로 자기장  $B$  를 가하면 홀 효과에 의하여 전압차  $V_H$  가 나타나는데, 이 전압차를 홀 전압이라고 하며, 홀 전압  $V_H$  는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_H = K \times I_c \times B$$

여기서,  $K$  는 감도라 부르며,  $I_c = 1 \text{ mA}$ ,  $B = 1(\text{KG})$  에서의 홀전압으로, 단위는  $1(\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{GK})$  로 나타낸다.

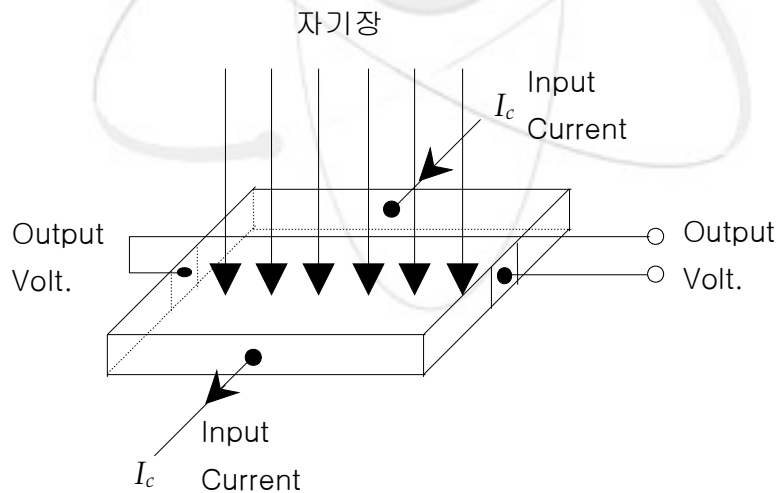


그림2. 홀 소자의 구조.

### 나. 홀 센서의 구동

홀 센서 구동방식에는 정전류 방식과 정전압 방식이 있다. 그 용도에 따

라 제어전류를 공급하는 방식에 따라 각각의 장, 단점이 있다. 정전류 방식은 감도의 변화에 비해 온도 변화가 적은 대신 회로가 복잡하고 불평형 전압은 온도 변화에 크다. 정전압 방식은 회로가 간단하고 불평형 전압의 온도 변화가 작지만 홀 전압의 온도의 변화가 커진다. 이 실험에서는 회로가 간단하고 사용이 간편하여 정전압 구동 방식을 선택해서 사용하였다. 그림 3는 정전압 방식을 사용 한 측정개략도다.

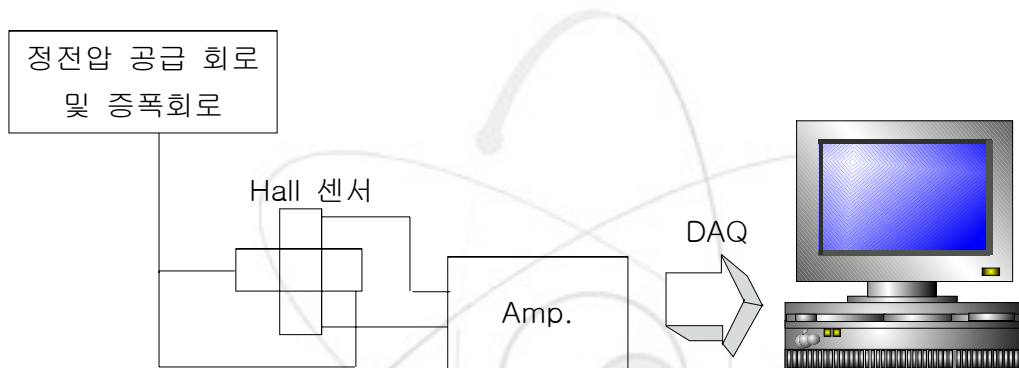


그림 3. 홀 센서를 결합탐지 측정개략도.

## 제 2 절 실험 방법

### 1. 측정 시스템 구성

그림 4은 본 실험에서 사용된 측정시스템의 모식도이다. 측정 시스템은 XY- stage와 controller, function generator, lock-in amplifier, sensor, 증폭회로 및 정전원공급장치, Power Amp 로 구성되며, 증폭회로 및 정전원공급장치에는 홀소자에 정전원을 공급하게 회로를 구성하였다. Function generator의 기능은 일정한 주파수와 Voltage을 setting 값에 맞게 Power Amp. 에 공급하여 U - type Ferriter core(그림 5)에 감겨진 코일에 증폭된 전류를 인가해 자기장을 형성시키면, XY - stage가 이동하면서 결함부위를 탐지하게 되며, 결함부위를 지나가게 되면, 자기적신호의 변화를 보이게 된다. 또한 XY-stage는 정밀하게 움직이게 하기 위해서 마이크로 단위로 움직일 수 있게 제작 설계하였으며, 모든 장비는 Labview 6.1 프로그램은 이용하여 컴퓨터에서 제어가 가능하며, 측정된 모든 데이터는 컴퓨터에 자동 저장되도록 하였다.

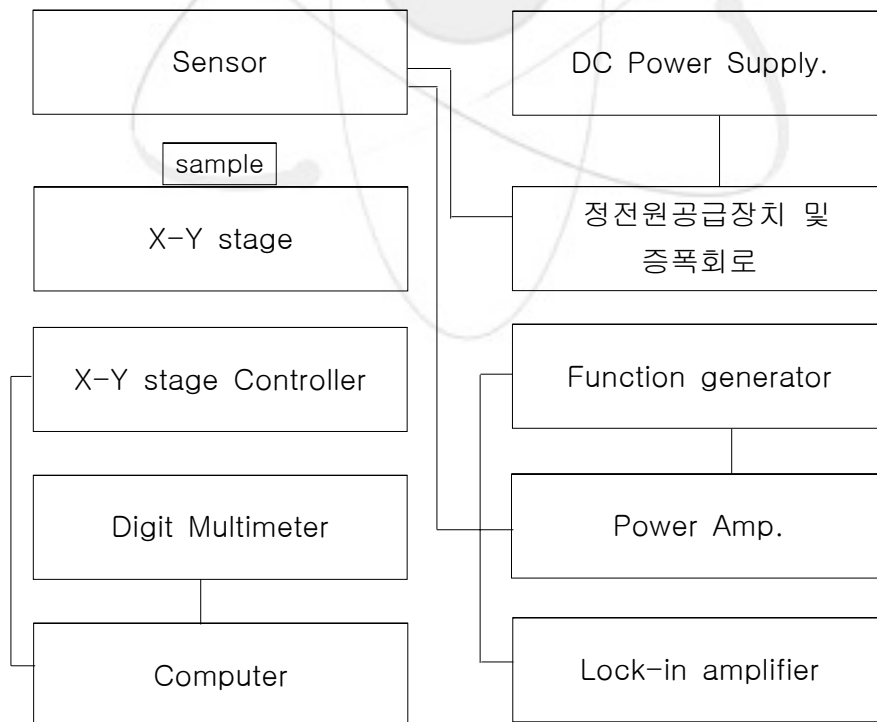


그림 4. 실험 모식도.

U-type Ferrite core

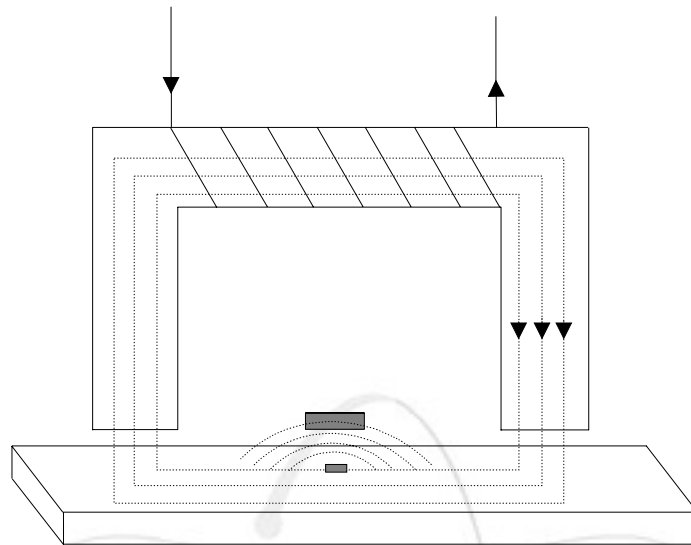


그림 5. 홀 센서부 설계.

그림 6는 측정을 위해 구축된 시스템의 실제사진이며 그림 7에 표시된 것처럼 XY- stage 는 결함을 검출하기 위해서 X 축으로 일정거리를 이동한 후에 다시 Y축으로 이동하여 인공결함 B축으로 이동한 후에 다시 X축을 스캔하게 된다. 이러한 방식으로 C 결함 축과 D 결함축을 반복적으로 측정하여 결함에 대한 자기적신호를 측정하였다.

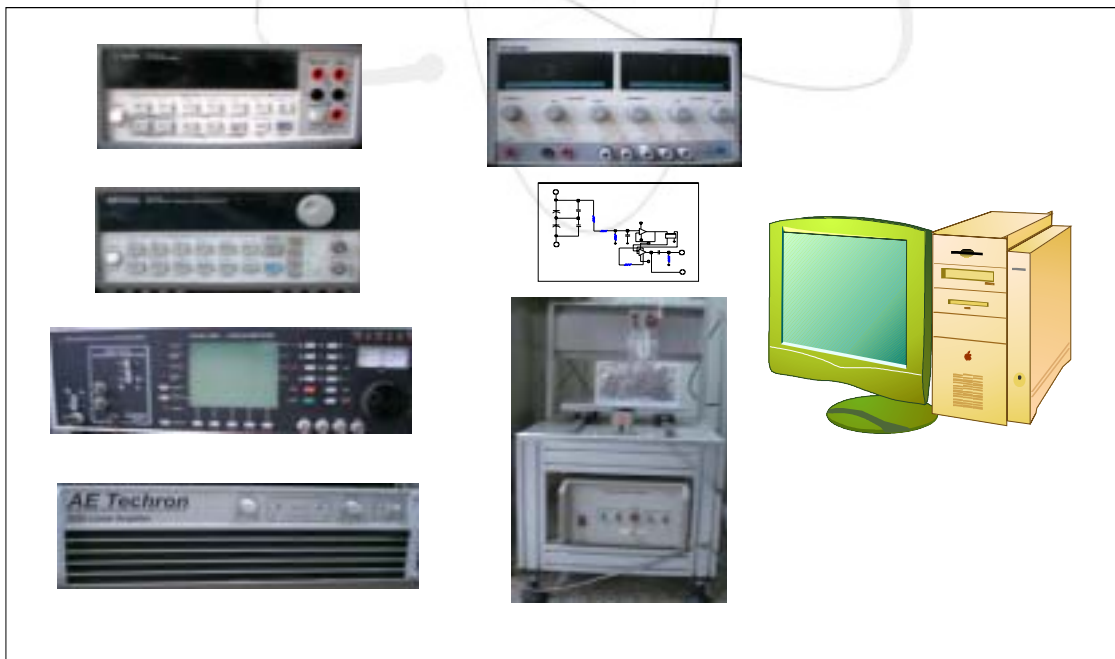


그림 6. 측정 장치 사진.

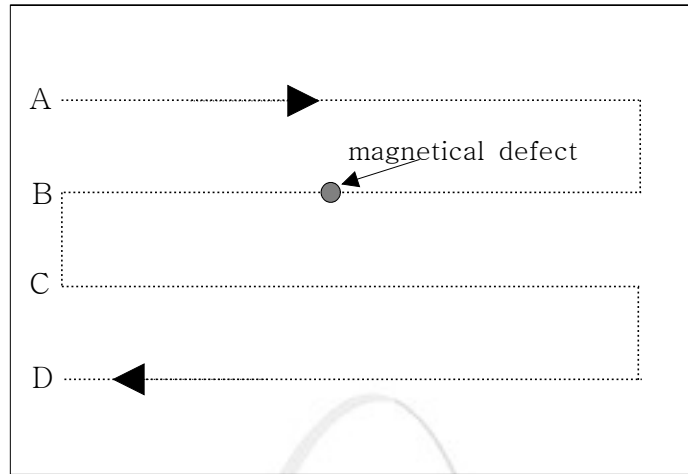


그림 7. 측정시료 scanning 방법.

## 2. Labview 인터페이스

LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)는 DAQ board, GPIB, Serial Port 등을 이용하여 계측장비와 PC와의 인터페이스를 통하여 PC에서 가상 계측을 쉽게 할 수 있게 하는 대표적인 측정/해석 소프트웨어의 하나이다. Visual C++과 Visual Basic 등이 통상 Text 기반 언어인 것에 반하여 LabVIEW는 변수, 함수, 연산, 디버그 및 Data 처리 등을 그림으로 처리하는 G 언어(Graphical Programming)로서 Flow Chart 개념을 이용하여 프로그래밍하기 때문에 비교적 단시간에 안정적인 강력한 계측 및 분석 프로그램을 작성할 때 매우 유용한 툴이다.

그리고, PC를 사용한 산업 자동화(PC-based Industrial Automation)는 최근에 개인용 컴퓨터의 성능과 연결성이 발달함에 따라 프로세스 자동화, 공장 자동화, MMI(Man-Machine Interface), SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition), DAQ(Data Acquisition), 통계적 프로세스 컨트롤, 실험실 자동화, 기계컨트롤 및 기계적 비전 등의 광범위한 자동화 영역에 사용되고 있다. PC를 기반으로 한 산업 자동화는 Plug-In DAQ 보드나 PLC(Programmable Logic Control), RS-485, Foundation Fieldbus, Can-based 네트워크 등을 통하여 각종 신호를 측정하거나 제어할 수 있다.

그림 8, 9는 X-Y stage를 control 할 때 쓰이는 Labview 프로그램으로 이는 비파괴장비의 자동화를 위한 필수 프로그램들이다. Digit Multimeter

(DMM)서 측정된 신호를 GPIB 케이블로 컴퓨터와 연결하여 계측하는 프로그램으로서 DMM에서 측정되어지는 여러 가지 신호를 컴퓨터로 받을 수 있는 프로그램이다.

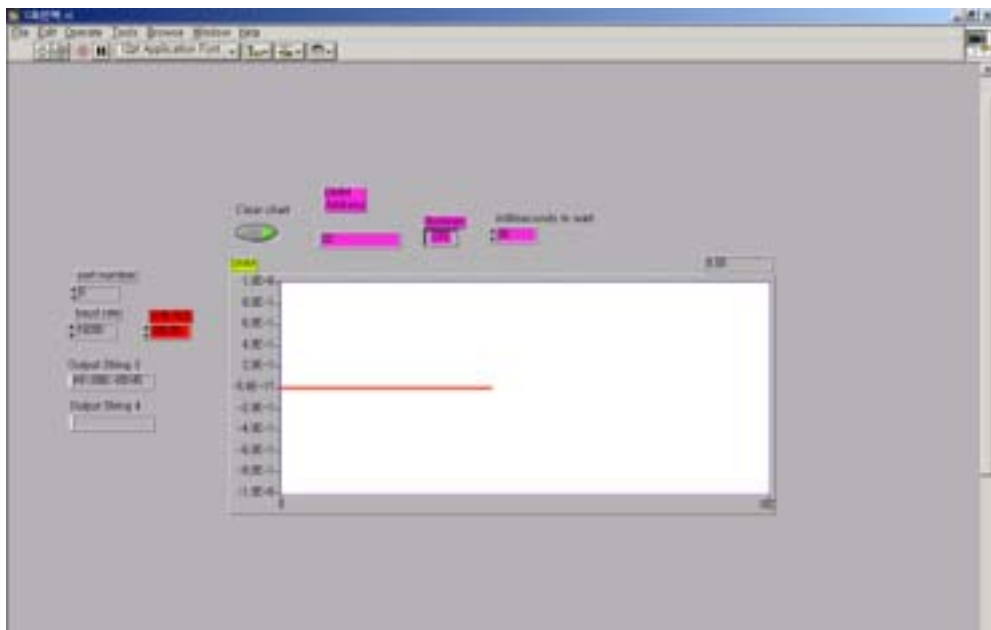


그림 8. 실험장치 구동 LabView 화면구성



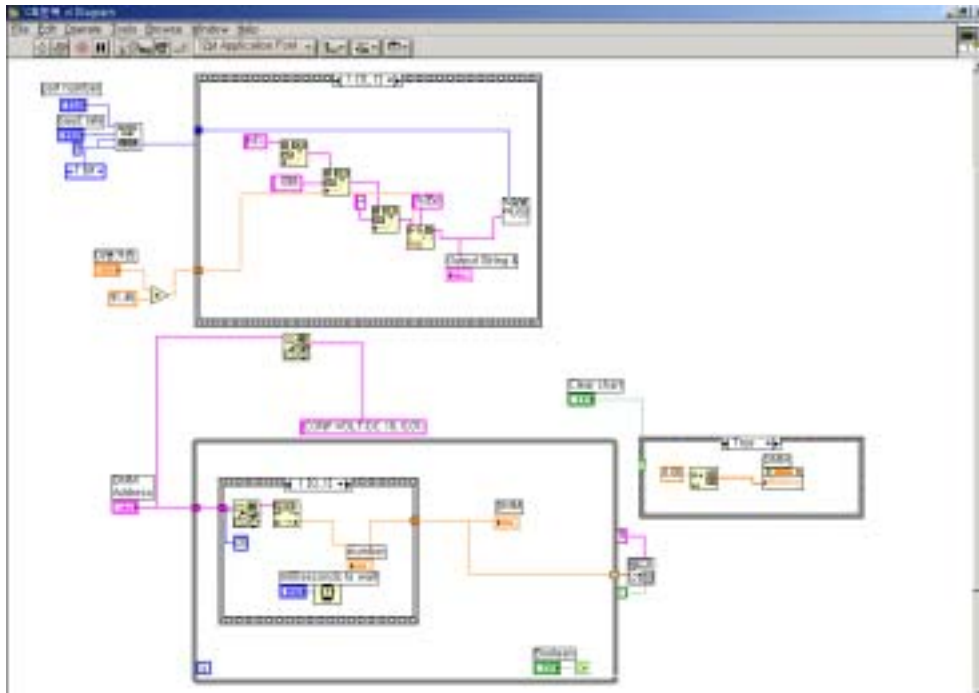


그림 9. 실험장치 구동 LabView 프로그램.

### 3. 시편준비

본 실험에서 사용된 시편은 Inconel 600 으로 된 봉 모양의 시편을 증기 발생기 가동조건을 모사하여 각각 360, 480, 600 와 700 C 에서 가속열처리 한 것과 (그림 10), Inconel 600 평판에 인공결함을 내어 결함이 자기신호에 미치는 영향을 실험하였다. 그림 11은 이 실험에서 사용된 inconel600 시편으로서 표 1와 같이 인공결함을 가공하였다. 결함의 종류는 4종류로 하여 A 라인에 결함은 결함의 크기는 같고, 깊이만 다르게 하여 4개의 인공결함을 준비하였고, B, C, D 라인도 마찬가지로 하여 결함을 가공하였다. 또한 결함과 결함간의 거리는 20 mm 이다.



그림 10. 인코넬 600 의 가속열처리 시편.

	Length (mm)	Width(m m)	Depth(m m)
A1	4	0.2	0.4
A2	4	0.2	0.3
A3	4	0.1	0.2
A4	4	0.1	0.1
B1	2	0.2	0.4
B2	2	0.2	0.3
B3	2	0.1	0.2
B4	2	0.1	0.1
C1	0.5 φ		0.4
C2	0.5 φ		0.3
C3	0.5 φ		0.2
C4	0.5 φ		0.1
D1	0.25 φ		0.4
D2	0.25 φ		0.3
D3	0.25 φ		0.2
D4	0.25 φ		0.1

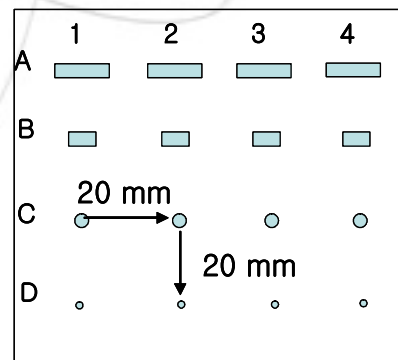


표1. 인공결함 크기.

그림 11. inconel600 표준시편의 결함위치.

### 제 3 절 연구내용

#### 1. 실험방법.

그림 12는 한 개의 홀소자를 사용하여 제작한 교류자속누설탐지용 탐촉자 사진이다. 그림11에서 보듯이 U-type Ferrite core에  $\phi = 0.2$  mm짜리 코일을 250회 정도 감아 제작하였고, U-type Ferrite core 중간에 홀소자가 위치하게 설계하였다. 홀 소자를 통해 나온 신호는 AD Converter (DAQ 장비)를 통해 컴퓨터를 통해 데이터로 저장하였으며, 프로그램은 Lab-VIEW를 사용하였다. 먼저 제작한 센서부를 고정시키고 inconel 600 시편을 X-Stage에 고정을 시킨 다음 DC motor를 구동하게 되면, 결함이 있는 부위에서 변화하는 자기적신호를 홀소자가 검출하게 되고, 이를 정전류 인가 및 증폭회로에 보내지면 필터링 작업 및 증폭되어, Lock-in Amplifier에서 다시 필터링 작업 및 증폭한 신호를 Digital Voltmeter에 보내지고, 이 신호는 컴퓨터에 들어와 측정하게 되어있다. 또한 inconel600 이 움직이는 거리는 (즉 XY-stage가 이동한 거리)또한 컴퓨터로 제어할 수 있게 Lab-VIEW 프로그램을 설계하였다. 또한 inconel 600의 자기적 신호가 미약하기 때문에 주의의 자기적인 영향을 차폐하기 위하여 그림 13 과 같은 차폐체를 제작하여 신호자체의 정확성을 높였다.

그림 13는 이 실험에서 사용된 정전원 공급장치 및 증폭회로로서, 이를 구동하기 위한 인가전압은 각각 +15 V, -15 V 로 DC Power supply를 이용하였다.



그림 12. U-type Ferrite core 센서 설계.



그림 13. 자기잡음 차폐를 위한 장치

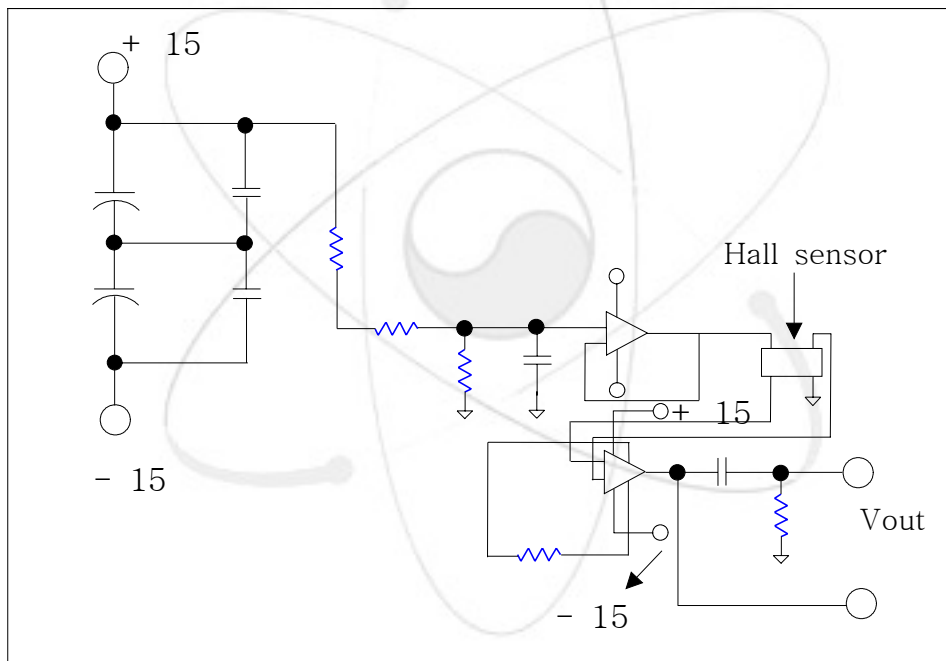


그림 14. 정전원공급장치 및 증폭회로 설계도.

## 2. 주파수에 따른 신호측정

그림 15,16은 본 실험을 하기 전에 가장 최적의 주파수( $f$ )를 알기위해, 주파수를 가변하면서 실험한 결과들이다. 그림에서 보듯이 주파수가 변화하면서 출력되어 나오는 신호( $V_{out}$ )이 크기가 변화함을 볼 수 있고, 또한 파형

에서도 변화를 보이고 있다. 출력되어 나오는 Voltage 의 변화는 주파수가 높아지면서 U-type Ferrite core에서 발생하는 자기장의 세기가 작아지기 때문이라고 사료된다. 이 실험결과 그림 17에서 보듯이  $f = 2$  kHz에서 최적인 상태를 보이고 있다. 주파수가  $f = 2$  kHz 보다 작을 때 (1 kHz)에서 출력 신호는 갑자기 줄어들었으며, 주파수가  $f = 2$  kHz 보다 클때 주파수가 증가함에 따라 출력신호가 작아짐을 보였다. 따라서 본 실험에서는  $f = 2$  kHz로 고정하고 실험을 하였다.

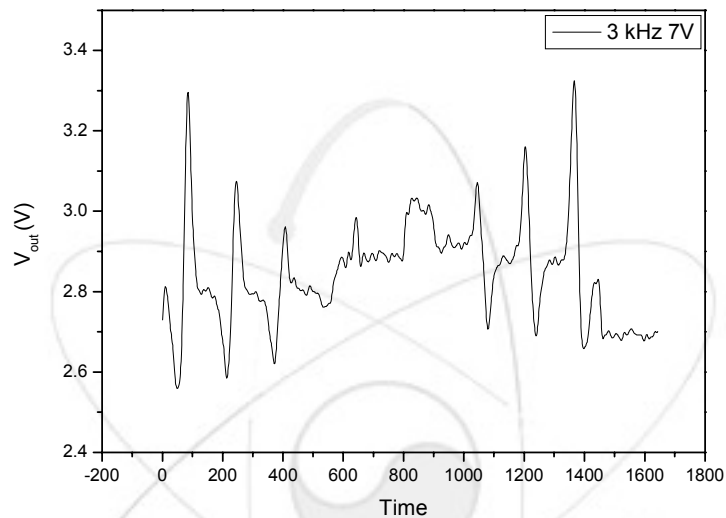


그림 15. 주파수에 따른 인공결함 출력신호.

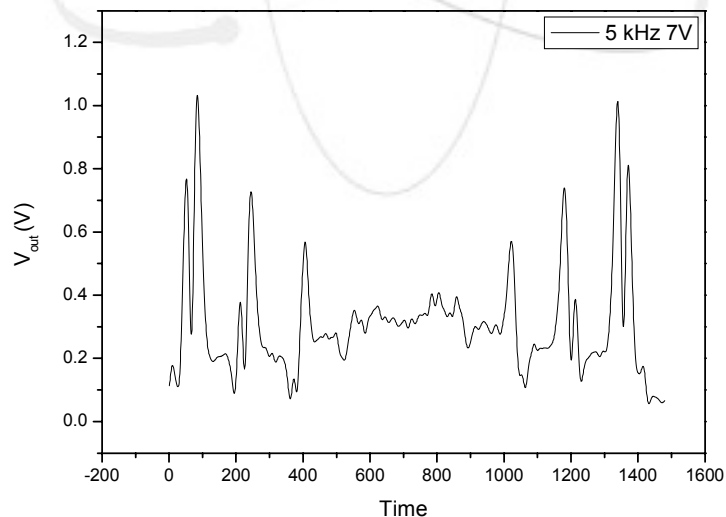


그림 16. 주파수에 따른 인공결함 출력신호.

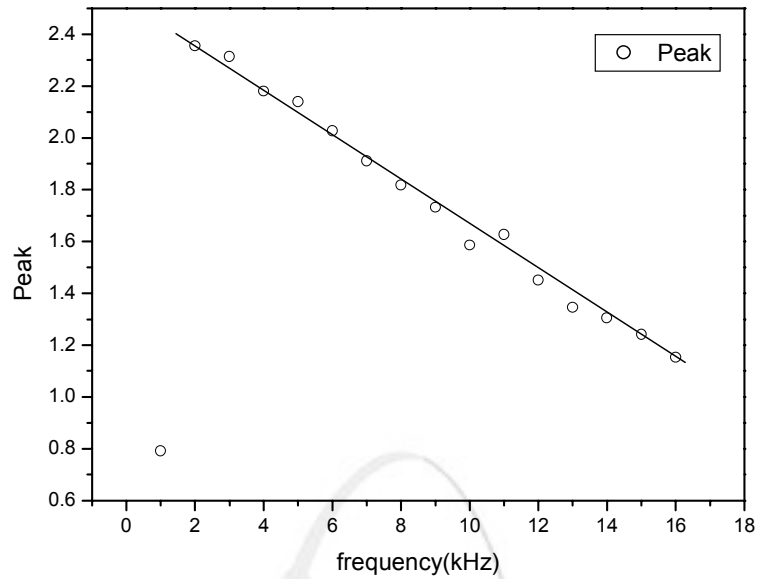


그림 17. 주파수에 따른 인공결함의 출력의 크기비교.

### 3. Voltage 크기에 따른 실험

그림 18은 Function generator에서  $f = 2$  kHz로 고정하고 voltage를 가변 하면서 실험한 결과들이다. 그림에서 보듯이 인가되는 전압 즉 자기장의 세기가 커짐에 따라서 결함에서 검출되어 나오는 자기적인 신호도 커지는 것으로 측정되었다.

그림 19에서 보듯이 인가전압이 커짐에 따라서 출력되어 나오는 신호도 비례적으로 커지는 것으로 측정되었다.

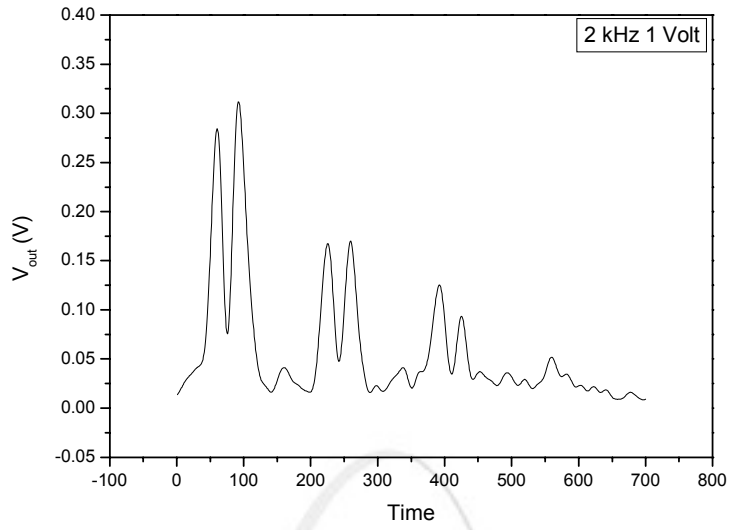


그림 18. Voltage에 따른 인공결합 출력신호.

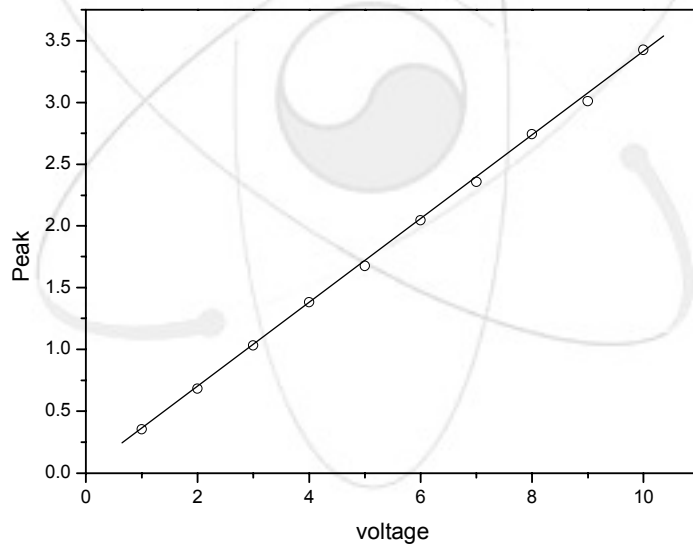


그림 19. Voltage에 따른 인공결합 출력신호크기 비교.

## 제 4 절 연구결과

### 1. 열처리 시편의 자기신호변화

Inconel 600의 봉시편을 열처리하여 자기신호의 변화를 측정한 결과가 다음 그림에 나타나 있다. 그림 2은 열처리한 시편의 BN 측정 결과이고 그림 21은 교류자기저항 소자로 측정한 그림이다. 그림에서 보듯이 열처리 온도에 따라 자기신호가 변하고 있으나, 변화모양에 따라 I, II, III 단계로 구분하여 보았다. 이 모양을 볼 때 특정한 온도에서 자성상이 생성된다는 것을 유추할 수 있다. 자성상이 생성된다는 것을 확인하기 위하여 열처리한 시편을 가로, 세로, 높이 가 각각 1 mm 씩 되도록 잘라서 이 시편을 VSM을 이용하여 자기이력곡선을 측정하였다. 결과 동일한 시편에 있어서도 시편의 추출부위에 따라 아래 그림 22에서와 같이 명확한 자성상이 형성된다는 것을 알 수 있었다. 이 결과로서 판단할 때 자성상은 재료내의 불균일한 구역이 가동 환경에 의하여 상변화가 발생하여 생긴다는 것을 알 수 있다.

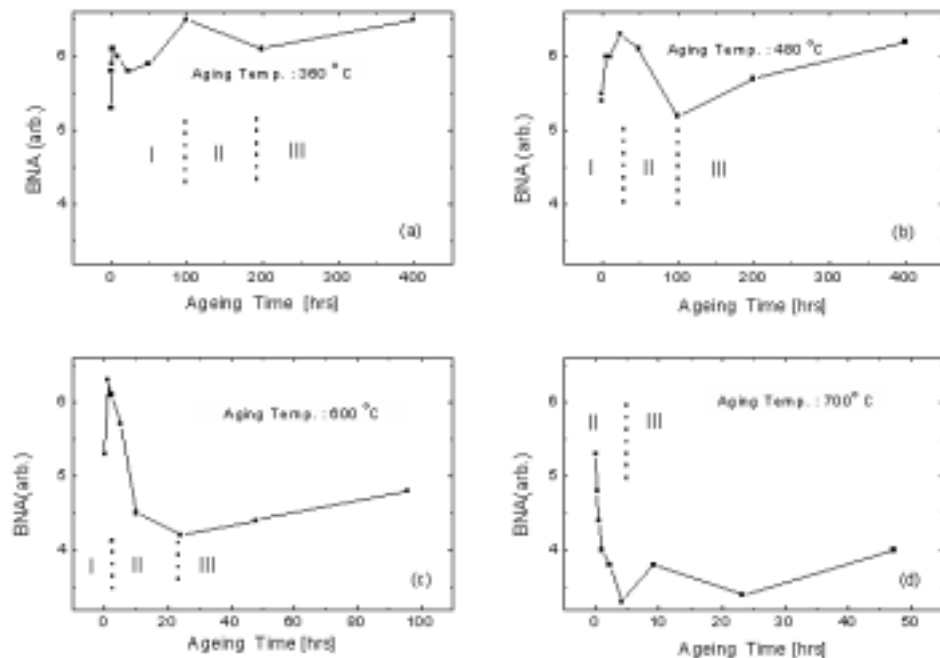


그림 20. 열처리 온도와 시간에 따른 Barkhausen noise 의 변화.



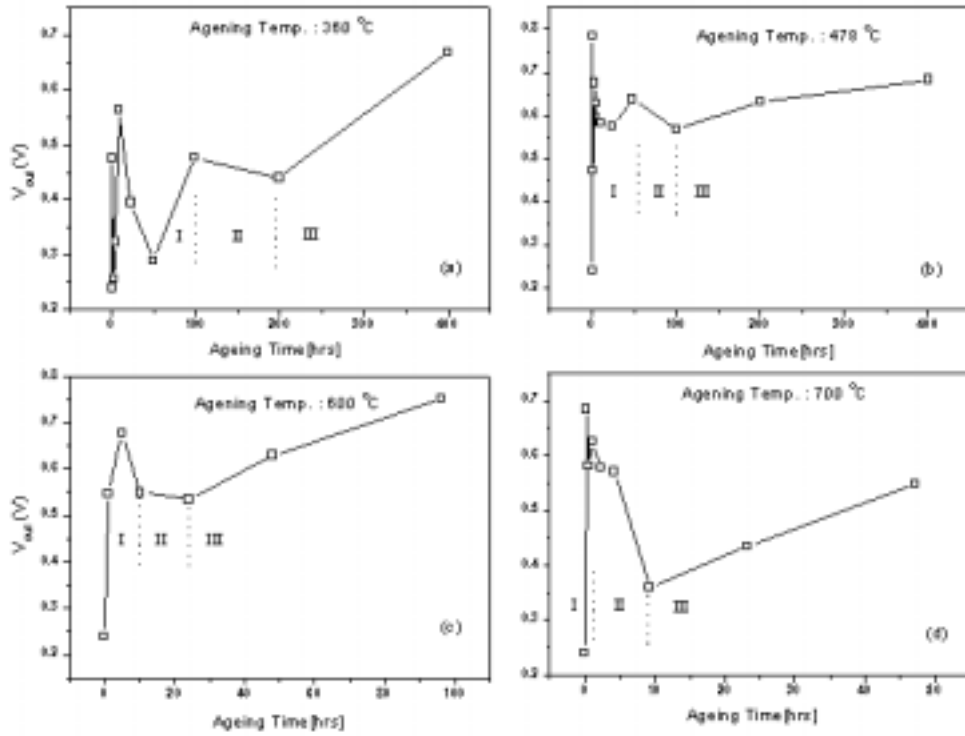


그림 21. 열처리 온도와 시간에 따른 GMI 출력 변화.

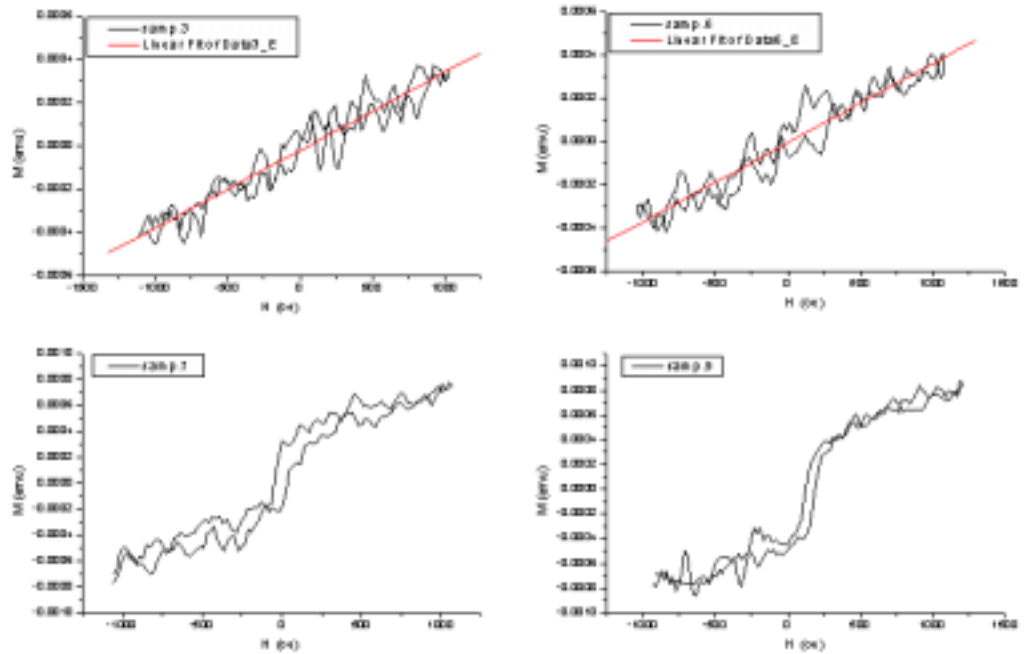


그림 22. 동일한 시편에서 부위가 서로 다른 부분에서 추출한 시편에서의 자기이력곡선의 모양.

## 2. 인공 결함의 크기에 따른 신호

그림 23는 inconel 600에서 인공결함 A 결함에서 측정되어진 신호이다. 그림에서 보듯이, 출력되어 나온 신호의 크기에 따라서 결함 A1, A2, A3, A4 로 순서대로 결함의 크기에 따라서 신호의 출력이 나타나는 것을 보이고 있다. 또한 신호와 신호간의 거리도 결함간의 거리와 같음을 볼 수 있다.

그림 24, 25, 26 도 마찬가지로 방법으로 측정한, 결함 B, C, D의 신호를 보여주고 있다.

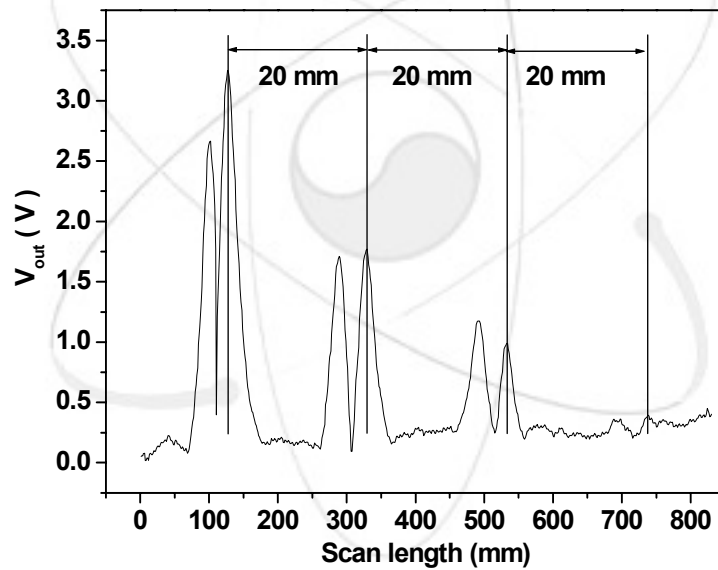


그림 23. 결함 A에서의 출력신호.

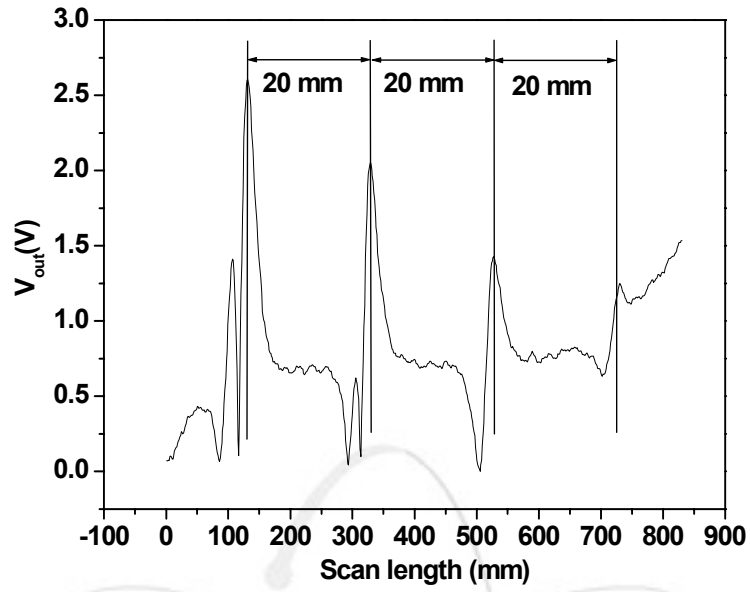


그림 24. 결함 B에서의 출력신호.

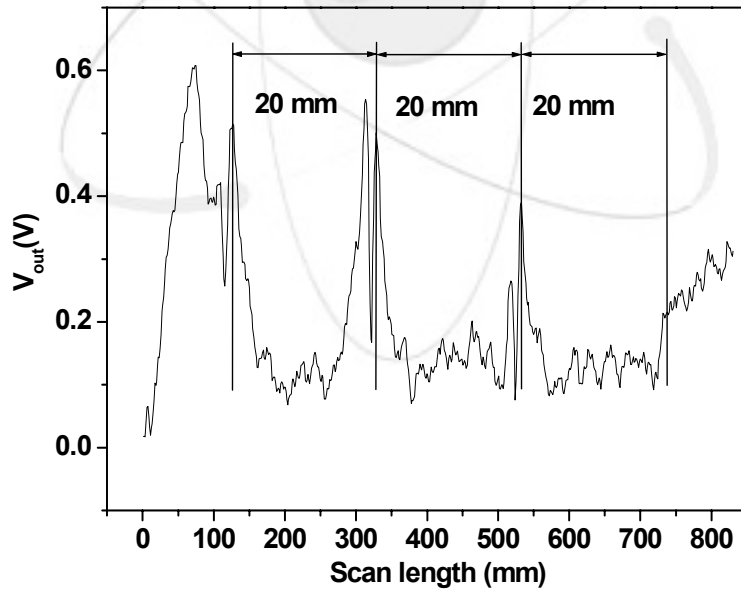


그림 25. 결함 C에서의 출력신호.

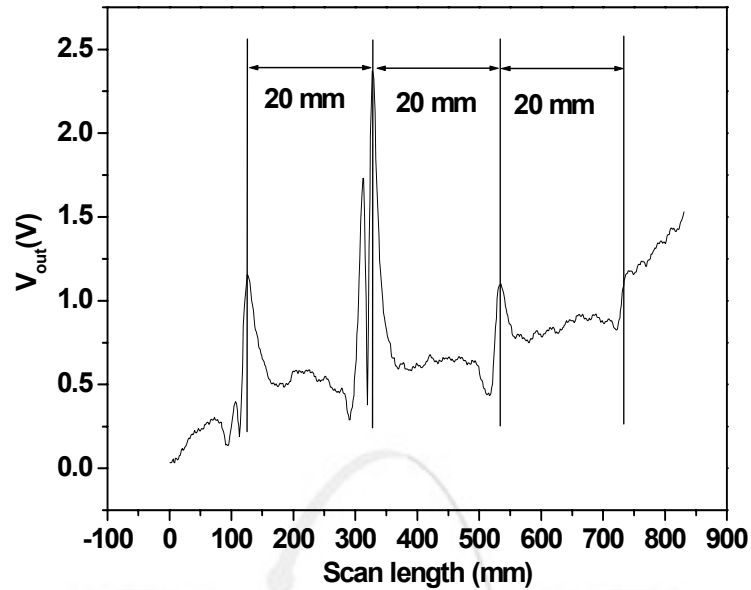


그림 26. 결함 D에서의 출력신호.

그림 23 는 인공결함들 간의 거리가 20mm인 A시편을 측정된 데이터로서, 인공결함들 간의 거리 및 결함의 크기에 따라서 전압의 차이를 나타내고 있다. 이것은 결함으로 인한 유도자속의 변화에 기인하여 전압이 변화한 것으로 X축의 각 전압치를 보면 그에 대응된 시편에서의 결함의 위치를 알 수 있고, 전압의 크기에 따라 결함의 크기 또한 산출할 수 있다.

그림 24, 25, 26 에서 측정된 결과데이터들로 볼 때, 인공결함의 길이, 폭, 깊이와 측정된 전압의 크기가 비례하는 것을 알 수 있다. 따라서, 자기센서에서 검출되는 전압의 크기로부터 증기발생기의 전열관에서 존재하는 결함의 크기를 산출할 수 있다.

이상에서 서술된 교류자기장을 이용한 유도자속 탐상장치 및 그 방법은 발전소 증기발생기의 전열관 재료의 결함을 탐지하는 데 사용되었으나, 스테인레스강으로 이루어진 배관이나 가스관의 결함탐지에도 사용될 수 있으며, 일반적으로 도체 또는 비자성체로 구성된 재료의 결함을 탐지 할 수 있다.

## 제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

### 제 1 절 연도별 연구목표

#### - 1 차년도 -

- I600 전열관 열처리 시편제작
- 열처리에 의한 비정질 자기센서 성능개선
- 거대자기저항센서 제작 및 성능평가 따른 센서의 최적조건 결정
- 신호 탐지용 XY-stage 제작
- 열처리 시편의자기신호 측정

#### - 2 차년도 -

- 1차년도 실험결과에 따른 센서의 성능개선 및 코일 시스템 개선
- I600 평판 시편에 인공결함 제작
- 교류자속 누설법을 이용한 인공결함 시편의 자속밀도변화 측정
- 결함에 의한 자기신호 변화 원인 규명

### 제 2 절 연구개발 목표의 달성도

- I600 전열관 열처리 시편제작 - 100 %
- 거대자기저항센서 제작 및 성능평가 따른 센서의 최적조건 결정 - 100 %
- 신호 탐지용 XY-stage 제작 - 100 %
- 열처리 시편의자기신호 측정 - 100 %
- 1차년도 실험결과에 따른 센서의 성능개선 및 코일 시스템 개선 - 100 %
- 결함에 의한 자기신호 변화 원인 규명 - 95 %
- SQUID 결과와의 상관관계 분석 - 90 %
- 열처리 시편의 자기공명 신호 해석 - 90 %

### 연구성과

#### 1) 학술지 논문게재

1. D.G. Park, E.J. Moon, S.H. Chi, J.H. Hong, "The charge of saturation

- magnetization in neutron-irradiated low-alloy steel" Physica B, 327 (2003) 315-318
2. D.G. Park, E.J. Moon, Y.W. Rheem, C.G. Kim, J.H. Hong, "The GMI profiles of surface-removed amorphous ribbon" Physica B, 327(2003) 357-359
  3. Seung Sik Park, Y.H. Cho, D.G. Park, W.S. Park, C.O. Kim, "applicability of the Ferromagnetic Resonance for Neutron Irradiated Degradation in the Reactor Pressure Vessel" IEEE Tanna. Mag. V. 39 (5) (2003) 3361
  4. 박덕근, "자기적 방법을 이용한 구조재료의 비파괴적 평가", 한국비파괴검사학회지, V.23 (4) (2003) 380
  5. Duck-Gun Park, Sung-Soo Kim, Gi-Deok Kim, Jun-Hwa Hong, "The diagnosis of Thermal Aged Inconel 600 Using Giant Magnetoimpedance Sensor", J. Mag. Mag. Mat. (2004) Vol. 272-276 pp. 1715-1717
  6. D.G. Park, S.S. Park, K.O. Chang, J.H. Hong, "Dependence of Barkhausen Noise in the Neutron Irradiated Reactor Pressure Vessel Steel", J. Mag. Mag. Mat. (2004) Vol. 272-276 pp. 1512-1514
  7. D.G. Park, D.W. Kim, V. Timofeev, J.H. Hong, "Detection of low cycle fatigue in type 316 Stainless Steel using HTS-SQUID", Key engineering Materials,(2004) Vol. 270-273, pp1224-1228
  8. Duck-Gun Park, Seong-Sik Park, Kee-Ok Chang, Jun-Hwa Hong, "The change of magnetic relaxation in the neutron irradiated Ni-Cr-Mo steel", Physica Status Solidi (b), 241, No 7 (2004) pp.1621

## 2) 지적재산권 출원·등록

박덕근, 교류자속누설법을 이용한 증기발생기 전열관평가, 한국, 2004.7.6, 52225

## 제 3 절 관련분야의 기술발전예의 대외기여도

### - 기술적 측면

현재까지 증기발생기 전열관의 손상상태를 결함, 누설 및 운전 등의 여러 측면에서 검토하고 있다. 증기발생기 전열관이 파단에 이르기까지는 기본적으로 결함의 발생 및 성장이 전제되므로 이러한 관점에서 증기 발생기 전열관의 손상을 정의할 수 있고, 결함 관점에서는 전열관 두께가 20 % 까지의

성장 기간은 결점, 전열관 두께 20 ~40 %의 성장 기간은 열화(degradation)로 나타내며, 관두께 40 %를 초과할 경우에는 관막음을 하기 때문에 이를 관막음 기준으로 규정하고 있다. 결함이

벽을 관통할 경우에는 누설이 시작되며, 관통 결함은 일정 부분 안정적이 균열성장후에 불안정 파괴를 유발하고, 최종적으로 전열관의 파단을 초래한다. 또한 누설 관점에서 전열관 거동을 살펴보면, N-16 누설 감시기에 의한 누설 탐지한계, 증기발생기 통합 관리 프로그램에 의한 가동중 누설 기준, 운영기술지침서 누설기준, 그리고 충전(Charging) 초과 누설로 구분될 수 있다.

누설 관점에서 증기발생기 운전은 정상 운전, 누설 발생에 따른 감시 강화 운전, 운영 기술지침서 누설 제한치 초과에 따른 운전 제한, 충전 초과 누설시의 비상 운전 등으로 구분하고, 미국의 경우 충전 초과 누설이 발생할 경우를 전열관 파단으로 정의하고, 그 이전에 대해서는 초기 파단(incipient rupture)으로 정의하고 있다. 이상과 같이 증기 발생기전열관의 결함 거동 및 누설 상태 그리고 운전 상태등에 따라 전열관 손상에 대한 다양한 양상을 보여주고 있다.

현재 증기발생기 전열관의 PSI(Pre-Service inspection,가동전 검사), ISI(In-Service inspection,가동중 검사)에 ECT가 적용되고 있으나, ECT는 신호해석이 어렵고 신뢰도가 낮다. 그 이유는 외부에서 영향을 미치는 인자들이 많기 때문이고, 이에 2002년 4월 울진 4호기 SGTR 사고발생 원인이기도 하다. 따라서 새로운 자기센서의 개발은 현재 각국에서 활발히 연구하고 있는 분야이다. 현재 연구되고 있는 분야는 주로 강자성체의 잔류응력 측정 및 중성자 조사에 의한 조사손상 탐지에 적용되고 있다. 현재 증기발생기의 배관손상은 초음파 또는 와전류 등을 이용하여 탐지하고 있으나 분해능 제약 등으로 손상의 조기 탐색에는 문제점을 노출하고 있다.

비자성체에 가까운 Inconel의 특성상 현재까지 자기적인 방법은 적용하지 않고 있다. 이유는 비자성체에 가까운 증기발생기 전열관의 자기적인 특성을 측정할 수 있는 분해능을 가진 것은 SQUID만 가능하다. 이에 1 pT 수준의 분해능만으로도 현재 위성, 차세대 navigation 자동차 등에 이용되는 fluxgate 센서 및 대부분의 홀 센서를 대치하리라 판단된다.

#### - 경제·산업적 측면

와전류탐상 결과는 다른 비파괴 시험에 비해 보다 많은 정보를 제공하나, 피검체가 자성체일 경우 적용하기 어려우며, 증기 발생기 전열관과 같이 국

부적으로 자성상이 존재할 경우에는 자성상에 의한 신호의 왜곡이 발생하여 판정에 어려움이 많다. 이와 같이 와전류는 단순한 해석으로 결과를 평가할 수 없는 경우가 많아 실제 적용 시 다소의 어려움이 따르며 또한 다른 비파괴탐상에 비해 오류를 범할 수 있는 가능성이 높다. 이 같은 와전류탐상의 단점은 작업자의 높은 자질을 요구할 뿐만 아니라, 와전류탐상을 산업 전반으로 확산시키는 데 있어서 저해 요인이 된다. 와전류탐상은 유사한 목적으로 수행하는 초음파탐상에 비하여 신속하고 저렴하다는 장점들을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 높지 않은 신뢰성으로 인하여 적용이 제한되고 있는 상황을 해결하기 위해서는, 이를 극복할 수 있는 신기술이 개발되어야 한다. 이러한 신기술이 자리 잡기 위해서는 복잡한 와전류 잡음 신호 정보로부터 결함 신호를 분리하는 기술을 정립하여야 하며, 또한 결함을 분석하는 프로그램을 개발함으로써 보다 단순하면서도 기계적인 작업으로 이를 수행할 수 있도록 하여야 한다. 이 같은 작업은 작업자에 의한 탐상 분석의 오류를 최소화시키는 효과도 얻을 수 있으므로, 탐상 오류에 의한 경제적 손실을 막을 수 있을 뿐만 아니라 높은 자질의 요구로 인한 작업자의 양성, 사용 및 관리상의 경제적 손실도 줄일 수 있다. 자기센서를 이용하여 자성상의 투자율을 측정하고 이를 이용하여 순수한 가동결함만을 분리하는 기술은 아직 선진국에서도 개발되지 않은 기술로서, 현재 뒤떨어진 와전류 탐상에 대한 기반기술을 확충함과 아울러 신기술개발에 의한 기술수출을 가능하게 할 것이다.

원자력 발전소는 1일 전력생산량이 약 10억원에 이르고 있으나, 안전상의 이유로 인하여 년중 일정부분 안전성 검사를 위하여 운전을 정지하여야만 한다. 신기술 개발에 의하여 검사기간을 줄일 수 있다면, 이는 즉시 가동시간의 증가에 의한 경제적 이익으로 귀결될 것이다. 뿐만 아니라 본 과제에서 개발하고자 하는 기술은 이미 세계 최고 수준에 육박한 국내의 와전류 신호 분석 기초 기술과 지금까지 국내 원전 와전류 검사를 통해 축적한 풍부한 현장 신호분석 경험, 그리고 세계 최고 수준의 국내 IT 기술을 융합하여 개발한다면, 그 기술적인 수준은 동 분야에서 세계 최고의 선도 기술이 될 것으로 사료된다.

우리나라는 이미 지난 2002년 4월 울진 4호기 SGTR 사고를 통해 증기발생기 전열관 평가를 위한 신기술 개발이 원전의 안전 확보를 위해 가장 먼저 해결해야 할 시급한 과제임을 확인한 바 있다. 따라서 본 기술은 국가가 시급히, 전략적으로 개발해야 할 기술이다.



## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

현재 자기센서를 도입하여 전열관에 생성되는 자성상의 투자율을 측정함으로써 전열관의 결함 탐지에 있어서 오류를 없애는 방법은 아직 전 세계에서 어디에서도 고안된 적이 없다. 현재 증기발생기 전열관 손상을 평가하는데 있어서는 일반적으로 보빈형 탐촉자를 사용하고, 탐상결과 의심스러운 부분이 있을 경우에는 MRPC를 사용하고 있다. 그러나 보빈형의 탐촉자가 초당 40 inch 정도의 고속으로 탐지할 수 있는 반면 확관 부위에는 적용하기 힘들며, 반면 MRPC는 정확하기는 하나 초당 0.2 inch 로 매우 속도가 느려 전열관의 모든 부위에 적용하기는 힘들다. 따라서 만일 보빈형 와전류 탐촉자의 속도와 MRPC 정도의 정밀도로 전열관의 결함을 탐상할 수 있는 기술이 개발된다면, 검사시간을 획기적으로 단축할 수 있을 것이다.

### (1) 산업·경제적측면

전열관 손상탐지에 소요되는 시간을 획기적으로 줄임으로써 경제적 이득을 얻는다. 또한 비파괴 탐상에서 선도적 역할을 하는 원자력 설비에서의 적용이 효과적으로 얻어진다면, 그 결과가 많은 산업 분야로 확대될 것으로 기대된다. 와전류탐상의 신뢰성 및 결함 검출능력의 향상은 와전류탐상 적용범위를 확대시킬 것이므로 와전류탐상 시장의 증가를 가져올 것으로 예상된다.

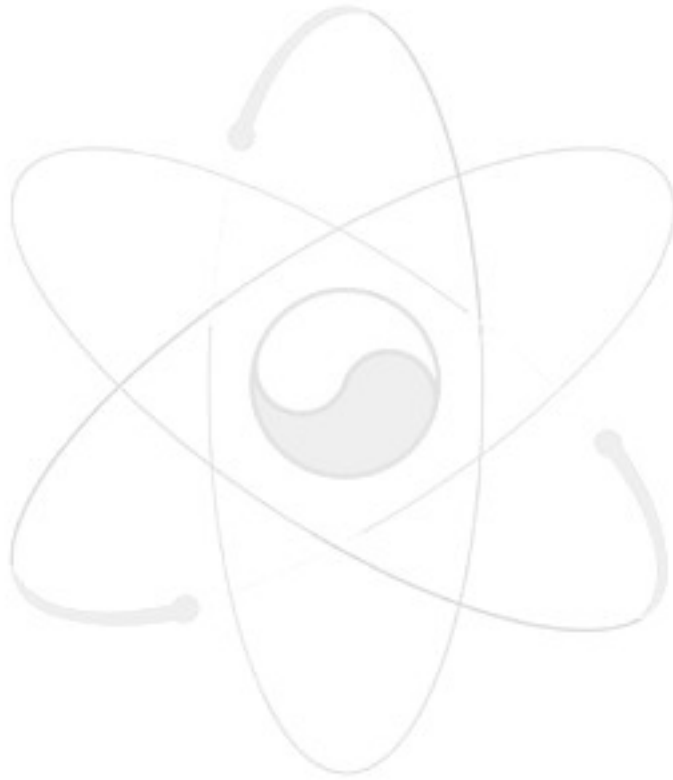
발전 설비 사고의 예방은, 불의의 사고에 의한 발전 중단으로 발생하는 경제적 손실을 절감시킬 수 있다. 자성상 탐지가 추가된 와전류 탐촉자의 개발로 비파괴 검사 분야의 세계적인 선도가 될 수 있으며 이에 따른 수입대체 및 수출 효과로 인한 경제적인 이익이 기대된다. 또한 원자력 발전소 안전진단 기술에 대한 국민의 신뢰를 확보할 수 있을 것이다.

### (2) 정책적측면

현재 원자력 설비에 적용하는 기술은 검증된 거친 기술만 적용하도록 되어있다. 따라서 국내 원자력 발전소에 적용 가능하고 또한 유효성을 보증할 수 있는 절차로 개발하는 것이 필수적이며, 이를 코드화 하는 과정은 WTO/TBT 체제에 적절하게 대응할 수 있는 능력을 향상시킬 것으로 기대된다. 국내 기술의 우수성을 홍보하고 국제사회에 인정받게 된다면 원전 안전성의 향상으로 인한 국민들이 느끼는 심리적 안정을 꾀할 수 있다.

### (3) 활용방안

과제 종료로 새로운 증기발생기 전열관 손상평가방법의 개발되면, 연구성과를 전문업체에 기술 이전하고, 국내외 원전에 확대 적용을 위한 상품화 시스템이 개발 될 수 있으며, 나아가서 증기발생기 외의 열교환기 및 자성체로 되어있는 각종설비에 적용할 수 있다.



## 제 6 장 참고문헌

- [1] K. S. Ryu, S. H. Hahm, Y. B. Kim, K. M. Yu, and D. Son, *J. Magn. Mater.*, Vol. 222, (2000) 128-132.
- [2] K. S. Ryu, S. H. Hahm, Y. I. Kim, K. M. Yu, Y. B. Kim, Y. Sho, and D. Son, *Journal of Magnetism*, Vol. 6, No. 1 (2001) 27-30.
- [3] K. S. Ryu, S. H. Hahm, J. S. Park, K. M. Yu, Y. B. Kim, and D. Son, *J. Magn. Mater.*, Vol. 251 (2002) 196-201.
- [4] 박덕근, "자기적 방법을 이용한 구조재료의 비파괴적 평가", *한국비파괴 검사학회지*, V.23 (4) (2003) 380.
- [5] S. Suyama, and K. Morimoto, " Nondestructive Examination Technology by Electro-Magnetic Acoustic Transducer", *일본비파괴검사 학회* , Vol. 46, No. 5,(1997) 320-325.
- [6] ASTM E1774-96, " Standard Guide for electro-magnetic Acoustic Transducers" *Annal Book of ASTM Standards*.
- [7] M. R Gaerttner, W. D. Wallance, and B. W. Maxfield, *Phys. Rev.* 184(1969).
- [8] Y. Kurozumi and Y. Okano. "Electromagnetic Nondestructive Evaluation" IOS Press, T. Takagi et al. (1997) 121-127.

서 지 정 보 양 식

<b>수행기관보고서번호</b>		<b>위탁기관보고서번호</b>		<b>표준보고서번호</b>		<b>INIS 주제코드</b>	
KAERI/RR-2491/2004							
<b>제목 / 부제</b>		자기센서를 이용한 증기발생기 전열관 손상평가기술개발					
<b>연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)</b>		박덕근 (원자력재료기술개발부)					
<b>연구자 및 부서명</b>		권상철(원자력재료기술개발부) 김성수(원자력재료기술개발부)					
<b>출판지</b>	대전	<b>발행기관</b>	한국원자력연구소	<b>발행년</b>	2005. 1		
<b>페이지</b>	31 p.	<b>도표</b>	있음( o ), 없음( )	<b>크기</b>	26 Cm.		
<b>참고사항</b>							
<b>공개여부</b>	공개( o ), 비공개( )		<b>보고서종류</b>				
<b>비밀여부</b>	대외비( ), — 금비밀						
<b>연구위탁기관</b>				<b>계약번호</b>			
<b>초록 (15-20줄내외)</b>		<p>본 연구에서는 와전류 신호의 결점을 보완하는 새로운 기술이 소개하였으며 이 기술을 이용하여 인코넬 600 시편의 인공결함을 측정하였다. 이 기술은 교류자속 누설을 이용하며, 이 방법은 통상적인 와전류 탐상보다 속도와 분해능을 향상 시킬 수 있다. 증기발생기 전열관의 결함에 대한 정보는 와전류에서의 위상차 대신에 결함에 의해 유도된 전압의 크기로 표시될 수 있었다. 이 새로운 기술은 통상적인 와전류 평가에 있어서의 신호해석 문제로부터 자유로울 수 있으며, 통상적인 와전류 신호왜곡의 원인으로 지목되는 자성상에 의한 투자율 변화 문제를 해결할 수 있다. 또한 와전류 탐촉자에서 탐지 불가능한 원주균열을 측정할 수 있다.</p>					
<b>주제명키워드 (10단어내외)</b>		증기발생기 전열관, 와전류, 교류자속누설, 자성상, 신호 해석, 위상차, 원주균열					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
AERI/RR-2491/2004					
Title / Subtitle		Nondestructive evaluation of steam generator tube using magnetic sensor			
Project Manager and Department (or Main Author)		Deuk-Gun Park, (Nuclear Materials Technology Development))			
Researcher and Department		Sang-Chul Kwon (NMTD), Seung-Soo Kim (NMTD)			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2005. 1
Page	31 p.	Ill. & Tab.	Yes(o), No ( )	Size	Cm.
Note					
Open	Open( o ), Closed( )		Report Type	A4	
Classified	Restricted( ), ___Class Document				
Sponsoring Org.		Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>In this study, new detecting technology complement the handicaps of ECT has been introduced, and tested in the Inconel 600 specimen having artificial cracks. The method of AC magnetic flux leakage can offers improvement in speed and resolution compared to the conventional ECT. The information about the defects in the SG tube can be represented as a degree of induced voltage by the defects instead of the phase difference of ECT. The new technology is free from the signal analysis problems in the conventional ECT. This new technology can solve the permeability variation clusters which is the main source of ECT signal distortion, and can measure circumference cracks with high velocity which is impossible in the ECT bobbin probe.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		steam generator tube, ECT, AC magnetic flux leakage, magnetic phase, signal analysis, phase difference, circumference cracks			

## 주의문작성요령

### 주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가 과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 아니 됩니다.