

1978年度 研究結果報告書

非破壞檢查技術開發 (渦電流試驗法)

Development of Non-Destructive Testing  
(Eddy Current Testing)

KAERI

韓國原子力研究所

007095  
92909

## 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

이 보고서를 1978년도 연구결과보고서로 제출합니다.

과제명 : 비과외검사 기술개발 (와전류 시험법)

1979년 2월 15일

연구책임자	박	대	영
연구원	문	용	식

# 독 차

요 약 .....	5
I. 서 론 .....	7
II. 결론 및 건의사항 .....	9
1. 결 론 .....	9
2. 건의사항 .....	11
III. 본 론 .....	12
1. 와전류시험의 원리 .....	12
가. 시험 coil의 특성 .....	14
나. 침투깊이 ( Penetration depth )와 감도 및 유효 투자율 .....	15
다. 위상선택과 신호대 잡음비 .....	18
라. 와전류시험법의 특성 .....	20
2. 응용 분야 .....	21
가. 탐상시험 .....	21
나. 재질검사 .....	22
다. 피막두께의 측정 .....	23
라. 기타 특수용도 .....	23
3. 실험 .....	25

가. 실험 1 - FD-5110-ERM에 의한 실험	25
나. 실험 2 Condenser 배관탐사	27
다. 실험 3 Steam generator의 열교환배관탐사	29
IV. 참고 문헌	64

## 그림 목차

1. 탐촉 Coil과 시험체의 구성방법.....	33
2. 전자유도 현상의 원리.....	34
3. 시험 Coil의 구성법및 형태.....	35
4. Impedance 평면상에서 시험 Coil의 특성표시 .....	36
5. 1차및 2차로 된 관통형시험 Coil 내에서의 시험체의 개략도.....	37
6. 유효투자율이 1보다 작고 일정자장의 세기 $H_0$ 의 조건하에서 시험 Coil내에 있는 시험체 속에서의 자력선 상태에 대한 개략도 .....	38
7. 비자성 환봉에 있어서 주파수 변화에 따른 감도의 변화 .....	39
8. 차동형 와류탐상기의 기본구성도.....	40
9. Braun 판 상에서 vector 표시를 이용한 위상결정 .....	41
10. 전도율, 투자율, 결합의 크기에 따른 위상변화 .....	42
11. 위상특성 graph.....	43
12. 탄소강에 있어서 탄소량과 magnatest 지시 .....	44
13. 철강재료의 단조, 소둔, 소준상황의 관별 ( magnatest ) .....	45

14. 와전류탐상기 FD-5110-ERM의 본체 및 recorder .....	46
15. Brass test tube 및 stainless steel tube와 brass bar .....	47
16. 평면형 probe coil 및 내삽형 probe coil .....	48
17. 동일 결함의 주파수 변화에 따른 위상의 변화 .....	49
18. 각종 주파수에 있어서 결함의 크기 .....	50
19. Stainless steel tube 내에 충전물이 있을 경우 위상의 변화 .....	52
20. Pressurized water reactor의 개략도 .....	53
21. Phase 조절에 따른 기록지 표시 .....	54
22. 결함 파형의 판별 .....	55
23. PWR steam generator에 대한 와전류탐상법 .....	56
24. 관통구멍의 CRT 파형과 기록파형 .....	57
25. 내면결함의 CRT 파형과 기록파형 .....	58
26. 외면결함의 CRT 파형과 기록파형 .....	59
27. dent의 CRT 파형과 기록파형 .....	60
28. 관지지판의 CRT 파형과 기록파형 .....	61
29. 외면결함과 관지지판의 복합된 CRT 파형과 기록파형 .....	62
30. 여러가지 복합신호의 CRT 파형 .....	63

## 요 약

원자력발전소 가동중 검사에 필요한 와전류시험에 의한 비파괴 시험법의 원리를 구명했고 와전류시험 장치인 FD-5110-ERM (日製)를 구입해서 이를 장치하고 작동시켜서 각종 계측법을 연구하였다.

특히 와전류시험법은 이 방법이 갖고있는 고유특성때문에 배관형의 탐상시험에는 타 비파괴시험법들의 추종을 불어해서 원자력발전소의 가동중 검사에 있어서 Steam generator의 열교환 배관이나 Condenser 배관검사에는 현재로서 가장 적당한 시험법이며 거의 유일한 시험법으로 이용되고 있다.

지난해 11월에 고리발전소 가동중 검사에 직접 참여하여 실용 분야에 많은 기술축적을 했으며 거기서 얻어진 결과들을 여기에 보고하겠다.

## Abstract

The principle of the eddy current testing which became one of the essential nondestructive testing for the inservice inspection of nuclear power plant was studied. A eddy current testing instrument, FD-5110-ERM (made in Japan) was purchased in August, 1978 and was used for studying the various eddy current testing methods.

Because of its inherent advantage over other nondestructive testing methods for tube test, the eddy current testing became almost unique testing method for the heat exchange tube and the condenser tube in the inservice inspection of nuclear power plant.

In November we had participated in the inservice inspection of Kori nuclear power plant and had accumulated the technical experiences in the practical application of eddy current testing and some of the result will be shown in the section III.



## I. 서 론

전자유도(電磁誘導)현상의 하나인 와전류(渦電流)현상이 1824년에 물리학자 D.F.Arago에 의해서 소위 Arago disc이란 이름으로 관찰된 이후 많은 물리학자에 의해서 흥미를 끌어들였다.

그러나 금속재료시험의 계측기원리로서의 이용시도는 약 100년전에 영국과학자 D.E.Hughes<sup>1)</sup> (1879)가 행했던 금속재료의 판별시험으로 비롯된다. 그가 고안했던 장치는 최근 사용되는 장치와 그 핵심적인 요소는 거의 같으며 다만 신호발생기로서 교류(Sine Wave)대신 시계와 Microphone을 써서 맥류(脈流)를 발생시켰다는 것이 다른점이다.<sup>2)</sup>

그러나 와전류시험법이 오늘날과 같이 편리한 비파괴시험의 주무기로 등장한것은 제 2차세계대전 전후(前後)의 전자장치 발전과 독일의 과학자 F.Förster의 공로에 힘입은바 크다 할수있다.

시험대상이 도체이면 어느물질이고 시험가능하므로 모든 금속제품에 적용가능하며 그 응용범위도 대단히 크다. 또 다른 시험법에 비하여 시험속도가 빠른 것과 자동화가 용이한 특징이 있으나 잡음영향을 제거하는데 기술이 요하는것이 단점이기도 하다.

오늘날 미국 영국 독일 일본 소련등에서 발전산업 항공산업 조선산업 송유(送油)업등 여러 분야에서 이 시험법의 응용이 날로 증가됨에 따라 앞을 다투어 그 기술개발을 추진하고 있는데 그 중에서도 직경이 그리 크지 않은 선(線), 봉(棒), 관(管)의

생산 및 보수시의 검사법으로서 그 시험속도 면에서는 물론 정확성 면에서도 타 비파괴시험의 방법보다 월등하게 우수하다.

최근 우리나라에서도 기술적인 공업화가 되면서 그에 수반하는 제품의 품질보증문제가 대두되어 이 와전류시험법이 비파괴검사법의 한 방법으로서 주목을 끌게 되었다.

예를 들면 현재 전선(電線)회사에서 전선생산의 품질보증을 하는 수단이나 항공회사에서의 기계부품(機件部品)의 보수검사시에도 이 와전류시험이 쓰이고 있으며 본 연구소의 주요 기술개발 대상은 원자력발전소의 배관검사에 관한 이 시험법의 적용이다.

즉, 원자력 발전소의 가동중 검사시에 PWR의 1차 계통의 Steam generator의 열교환 배관이나 터빈을 거쳐서 나오는 증기를 냉각하는 condenser 배관의 탐상검사로 쓰이며 또 핵연료개발에서는 연료피복관 검사에도 쓰인다.

그 외에도 고속시험속도와 자동화가 봉이한 성질 때문에 그 응용을 타 분야에 적용함도 연구할 만한 가치가 있다.

## II. 결론 및 전의사항

### 1. 결 론

서론에서 언급한바와 같이 와전류탐상법의 원리는 백여년전에 알고 있었으며 오늘날과 같이 비파괴탐상의 주무기로 등장한것도 2·30년 되지만 원자력발전소의 Steam generator의 열교환 배관의 가동중 검사에 ASME에서 정식으로 채용된것은 pipe 탐상에서 나오는 신호의 phase analysis가 충분히 발전된 후, 즉 불과 3~4년전 밖에 되지않는다. 정확히 말해서 1976년 여름 처음으로 ECT를 이용한 ISI규정(ASME B&PV Code Section XI Appendix IV)이 나왔다.

탐상장치도 해마다 더 편리하고 더 정밀한 신형이 나오며 앞으로 연구개발에 많은 여지가 있는 분야라고 할수있다.

그러므로 우리는 아직 기술도입단계에 있지만 앞으로 연구개발도 적극 추진해 볼만한 가치가 충분하다고 본다.

지난해의 실적을 보면 8월 하순에 전임자(前任者)가 주문했던 와전류탐상장비를 입수한후 그원리와 사용법을 우선 습득하고 기본 부속품으로 할수있는 모든 가능한 실험을 수행하였다.

11월 21일 고리발전소의 가동중 검사에 참여하여 Steam generator의 열교환 배관과 condenser 배관의 와전류 탐상법을 실습했다.

현재 우리가 갖고있는 장비 FD-5110-ERM (日製)은 여러면

에서 우리가 하고 싶은 실험을 하기에는 부족한 점이 많다.

특히, 원자력발전소의 가동중 검사에 사용하기에는 부적당하다.

예를들면 발전기 신호주파수가 적어도 2 MHz는 되어야 하는데 128 KHz 밖에는 올릴수 없다면가, Strip Chart record가 적어도 2 Channel은 되어야 하는데, Single Channel밖에 없다면가, X-Y storage display oscilloscope가 Eddy Current tester에 갖춰져 있어야 하는데 그렇지 못하다던가 하는등이다.

본 과제는 연속사업이므로 앞으로 기술개발의 추진 방향은 우선 갖고 있는 기기에 모든 필요한 Optional accessory를 구입해서 우리 장비에 봉도를 더욱 다양화하여 그에대한 기술축적을 하는것이다.

원자력발전소의 가동중 검사에 요하는 기술축적은 본 연구소의 현재장비로서는 어려우며 현지인 고리발전소에 가서 할수 밖에 없다. 그리고 앞으로 장비구입은 원자력발전소의 가동중 검사에 쓰이는 와전류탐상장비를 위주로 구입해야 한다.

즉, ASME Mandatory Appendices에서 규정한 Eddy Current Test 필수조건(즉, ASME Appendix IV)에서 요구되는 기본장비들은 X-Y Storage display Oscilloscope를 갖춘 tester, 적어도 2 channel의 strip chart recorder, 적어도 2 channel을 가진 magnetic tape recorder 등이다.

이들을 갖추게 되면 가동중 검사에 대한 기술축적을 대부분 본 연구소에서 할수있다. 더우기 steam generator 내부는 방사능 조

사량이 심한 관계로 원격조정 장치를 첨가해야 효과적인데 이 원격조정 장치도 TV camera 와 모타만 구입하면 본 연구소내 공작과 기술로서 충분히 제작이 가능하리라고 믿는다.

## 2. 건 의 사 항

1. 우리가 하는 일이 국가발전에 직결된다는 사명감 책임감 및 자부심을 갖고 연구에 임하게 되는 분위기를 조성하여 주기 바란다.
2. EDL.SwRI 기술봉역 Program등을 적극 추진하며 IAEA, Colombo 기술협조, 한일(韓日) 기술협조등을 충분히 이용한 해외훈련으로 최신기술을 습득하여 요원의 자질향상을 함.
3. 가동중 검사에 참여하는데 한전(韓電)에 더욱 긴밀한 협조를 고위층에서 환기시켜 줄것.
4. 본 연구소가 사기업체의 품질관리 임무와 다른데가 있어야 하므로 본 연구소가 Center of the technical excellence 를 지향함에 있어서 최신장비와 우수한 요원확보를 위한 충분한 예산이 필요하다.

### Ⅲ. 본 론

#### 1. 와전류시험법의 원리 및 특성

와전류현상을 이용한 비파괴시험법은 금속의 형태 재질 결함등을 알아내는데 매우 중요하게 쓰이고있다.

교류가 흐르는 Coil 가까이에 금속도체를 갖어오면 이 금속도체로 인하여 코일에 원래전류외에 2 차적인 전류가 유도된다.

금속도체에 결함이 있거나 또는 재질등에 변화가 있으면 유도되는 2 차 전류에 변화가 있다. 이 현상을 이용하여 시험체의 결함 또는 재질등을 알아내는 방법이 와전류시험법이다.

와전류시험법은 금속도체의 전기적 자기적성질이 변하는데 따른 코일에 주는 영향을 측정 한것으로서 시험대상물의 크기 형태 결함의 존재, 재질의 변화등을 측정하는데 이용된다.

와전류시험법은 Faraday, Maxwell 등이 이룩하여 놓은 전자기학 이론에 그 기초를 두고있다. 코일에 교류전류가 흐르면 코일주위에 (특히 코일내부의 종축방향으로) 교류자장을 만들고 이것을 검사하려는 금속표면 가까이하면 그 금속표면에 전자유도현상에 의해 전류가 흐른다. 이때 이 유도된 전류는 이 금속의 영향을 받는다. 따라서 이것은 전자유도 Coil에 흐르는 전류에 영향을 주어서 전자유도 코일의 impedance를 변화시키므로 이것을 측정하여 검사하려는 대상물의 특성을 알아낼수 있다.

코일의 impedance 변화는 코일의 design, 사용주파수, 시험품

의 특성 등에 따라 달라지며 이것을 적당히 조정하여야 한다.

이것에 대하여 좀더 구체적으로 생각해 보겠다.

(그림 1)에서 코일에 전류  $I_1$  을 보냈다고 하자, 이 전류  $I_1$  은 자장  $H_1$  을 만든다. 자장  $H_1$  은 시험체를 지나게 된다. 이때 시험체에는 전류  $i$  가 유도되는데  $i$  의 방향은  $H_1$  을 방해하는 방향으로 유도된다. (Lentz의 법칙)

시험체의 전류  $i$  은 역시 자장  $H_2$  를 만들고 이 자장  $H_2$  는 자연히 자장  $H_1$  과 반대방향이 된다.

시험체의 전류  $i$  에 의한 자장  $H_2$  는 코일에 전류  $I_2$  를 만든다.  $I_2$  는  $H_2$  를 방해하는 방향으로 유도되며 따라서  $I_1$  과  $I_2$  는 같은 방향이 된다. 위에서 언급한 모든 전류 및 자장은 최초의 전류  $I_1$  이 교류이면 모두 이 전류  $I_1$  에 의해서 유도된 것이므로 교류 전류 및 교류 자장이다. 이들이 일어나는 시간은 거의 동시지만 일어나는 원인에 따라 순서를 적는다면  $I_1 \rightarrow H_1 \rightarrow i \rightarrow H_2 \rightarrow I_2$  이라고 할수있다. 시험 Coil에 흐르는 전류는 최종적으로  $I_1 + I_2$  이므로 이것은 시험 Coil의 impedance가 변화를 받는 것과 동일하다.

(그림 2)

대부분 사용되고 있는 Coil장치는 근본적으로 impedance b-ridge를 이용한 것이다. 실제로 시험체의 기하학적 및 재료의 성질, 용도 등에 따라서 여러가지 Coil형이 고안되어 쓰이고 있으며 그중에 관통형, 내삽형, 평면형 혹은 probe형 코일들의 일부를 그렸다. (그림 3).

가. 시험 Coil의 특성

시험 Coil의 특성은 Coil의 impedance를 알면 기술할수 있다.

교류에서 impedance는 2차원적인 vector 량이므로 복소수를 쓰면 매우 간결해진다. 지금 Coil의 저항을 R, reactance를  $X_L$ , impedance를 Z 라하면

$$Z \cong R + jX_L \quad (1)$$

여기서  $j = \sqrt{-1}$ ,

reactance X에는 Capacitance가 포함되나 Coil에선 Inductance L에 비하여 Capacitance C의 기여도가 무시되므로  $X = X_L$ 로 대체한다.

(그림 4)는 impedance 평면상에서 coil내에 시험체가 없는 공심 상태와 시험체가 있는 상태 그리고 시험체에 결합부위가 있는 3가지 상태에 대한 Coil의 impedance 값이다.

$P_0, P_1, P_2$ 의 impedance 값은 계기의 특성과 시험체의 특성에 의하여 결정되는 값이다. 계기의 특성은 Coil의 크기와 모양, Coil에 보내주는 주파수 및 Coil과 시험체간의 기하학적 위치등의 함수이다.

시험체의 특성은 시험체의 전도율  $\sigma$ , 투자율  $\mu$ , 결합의 크기 D, 균열, 형태, 등의 함수이다.

따라서 impedance의 변화를 통하여 시험체의 특성을 조사하는 것이 가능하다. impedance의 변화는 곧바로 계기에 나타날수 있게



하였다. 실제 와전류시험에서 고려해야될 중요한 요소는 시험주파수의 선택으로 이주파수는 시험의 침투깊이와 감도에 밀접한 관계가 있으므로 적절한 값을 선택하여야 한다.

나. 침투깊이 ( Penetration depth )와 감도 및 유효투자율

와전류의 밀도는 보통의 전류처럼 표면에서 크고 내부로 갈수록 감소한다. 이때 절대치가 표면값의  $1/e$ 로 감쇄하는 깊이를 침투깊이( $\delta$ )라고 하며 다음과 같다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (2)$$

이식은 Maxwell 방정식에서 출발해서 간단히 구할수있다.<sup>2)</sup>

다음에 검출감도를 설명하기 위하여 유효투자율  $\mu_{eff}$ 란 개념을 도입하기 위하여 (그림 5)와 같은 진원통 시험체의 경우를 생각하여보자. 2차 Coil이 1차 Coil내에 들어있다.

2차 Coil의 권수를  $n$ , Coil의 단면적  $S = \pi D^2/4$  ( $D$ 는 2차 Coil의 직경)라고 하자. 공심일 경우 2차 Coil에 유도되는 전압  $E_{sec}$ 를 구하자. 1차 Coil에 주파수  $f$ 의 전류  $I$ 가 흐르면 이 전류는 교번자장  $H_0$ 를 만든다. 자장의 세기를  $H_0$ , 자속 밀도를  $B$ , 자속을  $\phi$ 라고 하고 cgs emu 전자단위를 쓰자.

$$\psi = \psi_0 e^{j\omega t}, \quad \omega = 2\pi f, \quad B = \mu_{rel} H_0 \text{로 하면}$$

$$\begin{aligned} E_{sec} &= -n \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \text{ Volts} \\ &= jn\omega\psi \times 10^{-8} \text{ Volts} \\ &= jn\omega s \cdot B \cdot 10^{-8} \text{ Volts} \\ &= jn \cdot 2\pi f \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \mu_{rel} \cdot H_0 \times 10^{-8} \text{ Volts} \end{aligned} \quad (3)$$

$\mu_{rel}$ 은 상대투자율로서 진공상태에서 1이며 공기중에서도 거의 1이다. 비자성금속의 경우에도 거의 1에 가깝다.

(3)식에서 2차전압  $E_{sec}$ 가 1차 자장  $H_0$ 보다 위상이  $90^\circ$  앞서 있음을 알수있다. 1차 코일내에 시험체가 있으면 시험체에 와전류가 유도 되어 자장의 강도는 약화된다.

시험체 외부에서 자장이  $H_0$ 였던것이 와전류의 표피효과에 의해 중심쪽으로 갈수록 크기의 감쇄가 크며 또 위상의 변화도 크다. 따라서 자장은 그 크기 및 위상이 변하므로 복소수함수라고 할수 있다. 그러나 실제 계산을 할때 자장의 값은 일정하다고 보고 그 대신 투자율의 값이 복소수함수로 변한다고 계산함이 훨씬 편리한 것으로 알려져있다. 4)

(그림 6)은 복소수 함수인 유효투자율을 설명한것이다.

$H_0$ 는 시험체 전 단면에 균등하게 작용한다고 보고 한편으로 절대치가 1보다 작은 복소수로 된 유효투자율  $\mu_{eff}$ 를 다음과 같이 정의하자

$$E_{sec} = j2\pi fn \frac{\pi D^2}{4} \cdot \mu_{rel} \cdot \mu_{eff} \cdot H_0 \cdot 10^{-8} \text{ Volts} \quad (4)$$

검출감도를 말할때 한계주파수  $f_g$ 란 인수가 들어있는데 이는 바로 유효투자율  $\mu_{eff}$ 를 이용해서 정의된다.

$\mu_{eff}$ 가 복소함수이어서  $f_g$ 를 구하는것은 그리 간단하지 않으며 여기 그 결과만을 쓴다면 5) 그 계산과정에서 나오는 Bessel 함수의 Argument A에 근거해서 정의한다.

$$\text{즉, } A = \frac{f \cdot \mu_{rel} \cdot \sigma \cdot d^2}{5066} \quad (5)$$

여기서  $\sigma$ ,  $d$ ,  $\mu_{rel}$  등이 주어졌을때  $A$ 가 1 되게하는 주파수를 한계 주파수  $f_g$  라고 하며  $f_g$  의 값은 (5)식에서

$$f_g = \frac{5066}{\mu_{rel} \cdot \sigma d^2} \quad (6)$$

Sensitivity를 논할때 주파수  $f$  대신  $f/f_g$ 의 배수값을 쓴다.

(4)식을 다시 음미해보면 유효투자율  $\mu_{eff}$ 이 복소함수이므로 2차 코일에 유기된 전압  $E_{sec}$ 도 복소함수다. 따라서  $E_{sec}$ 의 실수부와 허수부를  $E_{real}$ ,  $E_{imag}$ 라고하면 다음과 같이 된다.

$$E_{real} = 2\pi f n \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \mu_{rel} \cdot \mu_{eff}(imag) \cdot H_0 \cdot 10^{-8} \text{ volts} \quad (7a)$$

$$E_{imag} = 2\pi f \cdot n \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \mu_{rel} \cdot \mu_{eff}(real) \cdot H_0 \cdot 10^{-8} \text{ volts} \quad (7b)$$

이상은 시험체와 Coil의 직경이 같은 이상적인 경우이고 실제로는 시험체의 직경( $d$ )는 Coil의 직경( $D$ )보다 작다.

이때 시험체와 Coil 간의 환상공간을 생각하면 넓이는  $\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$ 이고 투자율은 실수부만 존재하고  $\mu_{rel} = 1$ ,  $\mu_{eff} = 1$ 이다.

따라서 이 환상공간의 전압은

$$E_{sec} \text{ (air ring)} = j2\pi f \cdot \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot H_0 \cdot 10^{-8} \text{ volts} \quad (8)$$

시험체 내에서는

$$E_{sec} \text{ (test object)} = j2\pi f \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \mu_{rel} \cdot \mu_{eff} \cdot H_0 \cdot 10^{-8} \text{ volts} \quad (9)$$

2차 Coil의 총전압은 (8)식과 (9)식의 vector 합이다.

$$E_{sec}(\text{total}) = j2\pi f \cdot n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \left[ 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 + \left(\frac{d}{D}\right)^2 \mu_{rel} \cdot \mu_{eff} \right] \cdot H_0 \cdot 10^{-8} \text{ volts} \quad (10)$$

여기서  $\left(\frac{d}{D}\right)^2$  을 충전율 (fill factor)  $\mu$  라고 한다.

공심일 경우에는  $d = 0, \eta = 0$  이며  $\mu_{rel}, \mu_{eff}$ 도 모두 1이다. 공심일 경우의 전압을  $E_0$  라고 하면

$$E_0 = j2\pi f \cdot n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H_0 \cdot 10^{-8} \text{ volts} \quad (11)$$

비자성체인 시험체가 있을 경우에는  $\mu_{rel} = 1$ 로 하면 이때의 전압  $E$ 는

$$E = E_0 (1 - \eta + \eta \mu_{eff}) \quad (12)$$

자성체 시험체가 있을 경우에는 (10)식에서

$$E = E_0 (1 - \eta + \eta \mu_{rel} \cdot \mu_{eff}) \quad (13)$$

여기서  $1 - \eta + \eta \mu_{eff}$  는 유용한 인자이다.  $1 - \eta$  는 환상공간 부분으로 형상등에 영향을 받는 인자로서 재질과는 무관하다.

$\mu_{rel}, \mu_{eff}$ 만이 재질과 관계가 있다.  $1 - \eta + \eta \mu_{eff}$  를 알면  $E$ 의 값을 알수있다. 따라서 이 값은 감도 (Sensitivity)와 직접적인 관계가 있다. (그림 7)에  $\mu_{eff}$ 와  $(f/f_g)$ 와의 관계식을 그림으로 그렸다.  $\Delta \mu_{eff}$  대신 sensitivity로 표시한 것도 (13)식 때문이다. 최적주파수  $f$ 는  $(f/f_g)$ 의 단위로 15이고 보통 10 ~ 50 정도의 범위내에서 쓰인다.

다. 위상선택과 신호대 잡음비

(그림 8)에 전형적인 와전류시험기의 block-diagram을 그렸다.

발전기에서는 시험품의 재질 및 결함의 검사요구등에 따라 적당한 주파수를 발생시키도록 한다.

bridge에서는 시험품에 결함 및 재질변화가 있으면 시험 Coil의 impedance 변화가 있도록하여 전기 signal을 뽑아낸다.

증폭기에서 증폭한 뒤 동기검파기에서는 특정위상성분의 signal을 검출하고 자동평형기는 증폭기에서 feed back되어 bridge의 불평형을 곧 해소하는 기능을 하며 이상기는 발전기로 부터의 위상을 변화시킨다.

filter에서는 probe의 속도에 따라 적당한 band pass filter로 setting하여 필요한 영역 이외의 주파수 대역을 제거시킨다.

rejection은 최종 signal에서 일정치 이하를 제거하는 것으로서 일종의 noise cutting level 설정이다.

marker는 일정치 이상의 신호가 오면 표시할수있게 되어있다. 경보기는 marker 대신 소리로 알려준다.

출력 signal과 함께 잡음 signal이 나오는데 이때 잡음의 위상은 일반적으로 출력의 위상과 다르므로 잡음 signal의 위상을 적당히 조절하여 잡음제어를 한다.

실제로 (그림 9)에서 Braun 판상의 signal이 그의 X 성분만 recorder에 나타나므로 (그림 b)에서 처럼 위상을 적당히 돌려 잡음의 위상이 X축과  $90^\circ$  되게 하면 제거할수있다.

이렇게하여 signal대 noise의 비를 최대가 되게 할수있다.

또, 위상의 변화를 이용하여 결함의 종류를 판별할수 있다.

(그림 10)에 전도율( $\sigma$ ), 투자율( $\mu$ ), 결함의 크기(D)의 변화에 따른 위상의 변화를 보였는데 이것은 결함의 종류를 알아 내는데 매우 중요하다. 이상은 시험주파수가 일정할때이며 주파수가 변하면 같은 종류의 결함도 위상이 다르게 나타난다.

(그림 11)은 brass pipe를 내삽형 Probe로 검사한 경우이다.

내면상, 외면상, 관통구멍등의 위상이 모두 다르다.

관통구멍의 위상을  $45^\circ$ 로 정하였을때 외면상은 X축쪽에 있고 내면상은 Y축쪽에 있다. 이들 결함의 두께가 클수록  $45^\circ$  방향으로 각각 접근한다. 관통구멍은 이들 결함의 최대치의 경우라고 할수 있다.

#### 라. 와전류시험법의 특징

와전류시험법의 장단점을 일괄해보면

##### 1) 장점

- 가) 와전류시험법의 가장 큰 장점은 고속자동화가 가능한데 있다. 검사속도는 tube의 경우 5m/sec에서 100m/sec 까지 가능하다.
- 나) 시험체가 tube, 환봉, 가는 선등 구조가 간단하면 다른 시험방법보다 훨씬 우수하다.
- 다) 표면결함의 경우에는 검출감도가 타 시험법보다 우수하다.

- 라) 넓은 두께, 가는 선, 구멍의 내면, 고온에 있어서의 탐상등 타시험법을 적용하기 곤란한 대상에도 쓸수있다.
- 마) 탐상시험, 재질시험, 크기및 형상에 관한 시험등 응용분야가 광범위하고 또 동시에 시험이 가능하다.
- 바) 소모품비등 유지비가 적게 든다.

## 2) 단점

- 가) 표면에서 깊이 있는 결함은 검출이 어렵다.
- 나) 형상이 복잡하면 매우 비능률적이다.
- 다) probe coil 또는 시험체를 움직일때 생기는 진동에 의한 잡음이 생기기 쉽고 응용범위가 많은 만큼 signal 에 영향을 주는 요소가 많아 판별이 복잡하다.

## 2. 응용분야

와전류시험법을 이용한 응용분야로서는 탐상시험, 재질시험, 크기및 형태에 관한 시험등이 있다.

### 가. 탐상시험

탐상시험은 판, 봉, 선등에 대하여 할수있으며 제조공정중의 중간에 또는 최종 검사에 사용하여 공정관리를 할수도 있고 제품의 품질보증을 하는데 쓸수도 있다. 또 보일러의 복수관등은 사용중 부식상태를 정기적으로 검사해야한다.

항공기 부품의 경우는 계속 사용으로 피로균열이 생기는데 피

로균열은 일반적으로 표면에서 생기므로 정기적으로 표면검사를 하여 사고를 예방할수있다.

시험품의 재질은 도체이면 모두 가능하며 강자성체이면 자기포화를 한후에 검사가 가능하다.

결함은 모든 결함에 대하여 가능하지만 내부 깊숙히 있는것은 전류의 표피효과 때문에 어렵고 표면결함이어야만 봉이하다.

탐상시험으로 결함의 위치는 물론 tube의 경우 내면상, 외면상, 관통상을 판별할수 있으며 이들 결함의 크기는 물론 결함의 깊이도 측정이 가능하다.

결함의 방향이 시험전류의 방향과 일치할때는 검출감도가 나빠지므로 이런 경우등을 주의하지 않으면 않된다.

#### 나. 재질검사

와전류검사에서 시험에 영향을 주는 요소는 주파수, 전도도, 투자율, 결함의 형태및 크기등 여러가지 요소들이 있지만 이들 여러요소들의 값을 일정하게 유지하고 그중 한가지 값만을 변수로 하고 재질을 변화시켰을 경우 이것들의 함수관계를 미리 알아 놓으면 이것을 이용하여 시험품의 재질등을 알아 낼수있다.

보통의 와전류탐상기로도 가능하지만 특별히 그 목적으로 설계된 sigma-test를 이용하여 재료의 전기전도도를 잰다. 6)

합금의 성분, 열처리등에 의한 전기전도도의 값을 미리 측정한 것이 있으면 이것과 비교하여 그 시험체의 재질을 알아 낼수 있다.

또 어떤재질에 있어서 전기전도도와 항장력과 관계가 있는것이



잘 알려져 있는데 이런 경우 역시 실제 재질의 항장력을 측정하는 대신 전기전도도를 측정하여 항장력의 값을 대신 구할수 있다.

(그림 12)은 역시 magnatest기를 사용하여 탄소강의 경우 탄소량의 변화에 따른 magnatest기의 Braun 판 지시모양의 변화를 그린것이다. 이것을 이용하여 탄소량을 알아 낼수있다.

(그림 13)도 철강재료를 단조, 소둔, 소준등 처리를 하였을 경우에 따른 magnatest의 CRT모양인데 이것을 이용하여 철강재료의 처리상황을 알아 낼수있다.<sup>7)</sup>

위와 같은 실험을 할 경우 특히 주의하여야 할것이 있는데 그것은 재료의 온도, 형태, 재료의 이력등이 일정한 상황하에서 하여야만된다. 초기의 상황이 달라지면 실험결과가 달라짐은 물론이다.

#### 다. 피막두께의 측정

금속또는 비금속 모재에 재질이 다른 금속 또는 비금속 재질을 coating하였을 경우 lift-off효과등을 이용하여 coating의 두께 측정이 가능하다. 이때 모재와 coating은 전기전도도, 투자율등 최소한도 어느 한가지가 달라야함은 물론이다.

두께의 작은 변화에 대하여 감도에 큰 변화를 얻기 위하여는 주파수가 높은것을 선택하여야 한다.

#### 라. 기타 특수용도

- A) 형상변화 측정 : 온도 진동등의 외력에 의한 미소한 형상이나 크기변화 또는 미소운동등을  $5 \times 10^{-6}$  inch의 정도까지 측정 가능하다.
- B) 저도전율 재료 측정 : 흑연이나 반도체 재료는 전기저항이나 순도측정시 self-heating이 문제되는데 와전류시험기술로서 비접촉 방법으로 재료에 거의 교란을 주지않고 측정한다. 이때 시험체 깊은곳까지 자장이 뚫지않게 시험 주파수가 높아야 한다.
- C) 저온학적열 (Cryogenic temperature)에서도 비접촉 방법으로 시험체를 교란시키지 않고  $\sigma$ 나  $\mu$ 에 상관 관계있는 물리적 계량을 측정 가능하다.
- D) 도전액체의 높이 측정 : 와전류는 방기를 뚫고 도전 액체의 높이를 측정하는데 쓰인다. 이 측정은 비접촉 측정이므로 액체가 고온 고압 같은 hostile environments에서까지 적용된다.
- E) 도전기체 측정 : 기체가 어떤 압력, 온도, 전리 농축하에서 전도체가 된다는 것은 잘 알려져 있다. 이 조건하에서는 와전류도 유도되므로 이것을 이용하여 측정수단으로 쓸수있다. 즉 기체의 전자운반력을 측정함으로써 압력, 온도, 기체 농축도 등을 측정할 수 있다. 이 장치는 전리화 기체류를 감시나 제어 (monitor and control)하는데 사용된다. 또 와전류시험법으로써 기체

의 아주적은 도전을까지 측정가능하며 Lift-off 변화까지 탐지 가능하다. 이 lift-off 측정으로 전도기체의 경계를 알아 낼수 있다. 8)

### 3. 실험

와전류에 관한 우리의 실험은 당 연구소에서 수행한것과 고려 원자력발전소에 출장하여 행한 것으로 나눌수있다.

#### 가. 실험 1 FD-5110-ERM에 의한 실험

본 연구소에서 행한 실험은 FD-5110-ERM이란 와전류탐상기로 하였으며 이 기기는 1-channel System으로 Probe는 현재 내삽형과 평면형의 2가지가 있고 평면형은 단일 Probe로 된것과 2개의 probe로 되어 상호 비교하게 되어있는 2가지를 보유하고 있다.

평면형 Probe에서도 내삽형 probe에서와 같이 표면결합과 내부결합은 위상이 다르다. 물론 결함이 커지면 신호의 크기는 비례하여 커진다.

(그림 14)은 와전류탐상기 FD-5110-ERM의 본체및 기록기의 그림이다. 그 회로도에는 이미 그림(8)에서 설명하였으며 탐상 Coil에 포착된 신호는 탐상기 FD-5110-ERM에서 처리된 후 CRT에 나타나며 그 신호의 일부는 기록기(그림 14의 우편에 놓임)에 의해서 기록지에 나타난다.

(그림 15 및 16)는 본 실험에서 쓰인 표준시편. Probe, Cable 이다

여기서 부연하고 싶은것은 우리가 보유하고 있는 와류시험기의 Oscilloscope는 Storage display type 이 아니며 Oscilloscope 에 나타나는 시간이 매우 짧은 시간이므로 Oscilloscope 의 display를 사진으로 찍기가 불가능하였다. 내삽형 probe coil을 이용하였을 경우에는 결함의 종류에 따른 위상의 변화는 앞에서 (그림 11)과 같이 된다.

표준시험편으로 사용한 재료는 brass이며 tube의 외경이 50mm  $\phi$ , 두께는 2mm, 시험주파수는 8 KHz 들 었다.

관통상의 신호파형을 CRT에서 45°로 고정하면 내면상은 45° 이상의 값에서 생기고 외면상은 45°이하에서 생긴다.

내면상 외면상 모두 결함의 깊이가 증가함에 따라 위상은 45°에 접근한다. 따라서 위상으로 결함의 종류 및 결함의 깊이를 알아 낼수있다.

이상은 절대적인 것은 아니다. 주파수가 변하면 관통상도 반드시 45°가 되는것은 아니다. 주파수가 증가하면 같은 관통상이라도 CRT 에 나타나는 그 위상은 변한다.

(그림 17)에 이들의 관계를 그렸다. 이것은 같은 결함이라도 주파수에 따라 그 위상이 변하는 것을 말해준다.

즉, 같은 관통구멍에 대한 결함상이라도 주파수를 증가시킴에 따라 위상이 CRT 상에서 화살표로 표시한것같이 시계방향으로 변한다.

(그림 18)은 각종 주파수의 경우에 결함들의 위상변화이다. 그림에서 8 KHz가 최적주파수임을 알수있고 주파수를 높이거나 낮게 하면 감도가 나빠지는 것을 알수있다.

그래도 내상은 비교적 높은 주파수에서도 분리가 가능하며 한편 외상은 비교적 낮은 주파수에서 분리는 된다.

다시 말하면 외상이 최적주파수보다 높은 주파수에서는 감도가 빨리 나빠지고 내상은 최적주파수보다 낮은 주파수에서 감도가 빨리 나빠지는것을 의미한다.

1 KHz와 같이 주파수가 너무 낮을 경우에는 감도가 너무 나빠 외상, 내상, 모두 분리가 잘되지 않고있다.

(그림 19)은 Stainless tube를 평면 coil로 검사한 경우인데 비능률적이지만 미국 ASTM에서 추천된 방법의 하나이다.<sup>5)</sup>

tube 내부에 brass를 넣어 충진을 시키면 그림과 같이 위상이 변한다.

#### 나. 실험 2 Condenser 배관탐상

다음 고리원자력발전소의 주복수 기관에 대한 와전류 검사는 일본제인 Ultray MD-276으로 하였다.

이 검사는 우리가 보유하고 있는 brass test tube에 대한 위의 설명과 원리는 거의 같다. 주 복수관은 turbine을 돌리고 나오는 Steam을 물로 냉각시키는 condenser 배관이다.

(그림 20 참조)

tube 는 알루미늄 합금으로 된것과 쿠프로-니켈로 된것의 2가지 종류가 있는데 모두 외경은 같은 1 inch이며 길이도 45 ft로 같으나 tube의 두께가 조금 다르므로 내경 또한 다르기 때문에 내삽형 coil의 직경도 다른 것을 사용하고 있다.

주 복수기관은 갯수가 4만4천여개나 되며 또 각각 tube의 길이가 45 ft나 되므로 고속도의 특징을 갖은 와전류검사 이외에 다른 비파괴 검사방법으로서는 수량면에서 거의 불가능하다.

주 복수기관 검사시 작업상 여러문제 때문에 제기나 기록기가 있는 장소는 주 복수기에서 상당한 거리로 떨어져게 되므로 두 장소를 연락하는 interphone을 설치해야 한다.

주복수기관은 방사능이 비교적 적기때문에 사람이 직접 probe coil을 tube에 넣고 당기고 한다. 넣을 때는 압축공기로된 air gun으로 coil을 밀어 넣으며 당길 때에는 사람이 직접 당긴다.

사람이 직접 당기는데 탐촉자의 속도는 5.3~6.9 ft/sac 정도이므로 신호의 변화는 비교적 크지 않은 것으로 보고 있다. 탐촉자의 최대속도는 대략 500 ft/min을 넘지 않게한다.

일정 간격으로 지지판이 있어서 이것에 의한 일정한 기지의 signal이 나오므로 결함의 위치를 정하는데 매우 편리하다.

기기의 calibration은 내삽형 probe coil을 정기적(약 4시간마다)으로 test tube내를 지나게 하므로써 실제의 signal에 대한 결함의 종류나 크기를 Calibration하게 되어 있으며 또한 기기의 성능이 정상적인가를 검사하는 역할도 한다.

점사시 기록지에 표시된 파형이 미세한 wave 를 항상 동반할 때에는 phase dial 을 다시 조절한다. (그림 2P참조)

(그림 22)에서 몇가지 결함의 예와 그 결함의 파형을 그렸는데 baffle plate (지지판)으로서 일정한 signal이 나오고 결함의 종류에 따라 자기 다른 signal이 나와 기록지에 recording 되므로 기록지의 파형으로 부터 결함의 종류를 판별하는 것이 가능하다.

여기서 결함의 위치는 baffle plate의 위치와 비교하여 간단히 알아 낼수 있다. 결함의 크기는 기록지상의 상하눈금을 읽어서 정한다.

#### 다. 실험 3 Steam generator의 열교환 배관탐상

마지막으로 고리원자력 발전소의 steam generator에 대한 와전류검사 방법을 기술하겠다. 고리원자력 발전소는 pressurized water reactor로서, (그림 20)에 PWR의 개략도를 그렸다.

(그림 23)에는 PWR steam generator의 일부와 이에 대한 와전류 탐상기의 remote control system의 개략도를 그렸다.<sup>9)</sup>

Probe coil carrier (Robot의 arm)를 steam generator 내부에 설치하고 여기에 TV camera를 부착하여 Probe coil carrier 및 probe coil의 위치를 TV로 볼수있게 되어있다.

Probe coil에서 나온 signal을 signal processor에서 처리하여 Oscilloscope, 기록기, 녹음기등을 통하여 보거나 들으면서 기록할수 있다.

Steam generator 에 대한 와전류검사기기는 미국 Z E T E C 회사 제품이다.

Z E T E C 제품과 우리가 보유하고 있는 장비와 다른 점은

- 1) Oscilloscope가 storage display 형이여서 파형을 판별하는데 대단히 도움이 되며 결함 판단에 도움이 크다.
- 2) 신호를 저장할수있는 magnet tape recorder가 있어 어느때고 신호재생을 할수있다.
- 3) Strip recorder가 2 channel로 되어 이것 역시 결함 판정에 대단히 도움이 된다.

2-channel로 되어 있어서 vertical 성분과 horizontal 성분을 각각 기록할수 있게 되어있다. 이 두성분을 종합하여 파형을 판단할수 있다.

Steam generator의 열교환 배관의 결함탐상에서 가장 흔한 신호들로서는 지지판 신호, dent 신호, 결함신호(내상, 외상등) 및 그들의 중첩된 신호들이다.

(그림 24)에서 (그림 26)까지 모두 tube에 관통구멍및 내면상, 외면상을 만들어 이 tube를 내삼형 coil로 검사했을 때의 기록파형및 CRT상의 모양이다. (그림 27)은 dent에 대한 파형이다.

관통구멍에 대한 CRT상의 파형을  $45^{\circ}$ 로 정하고 내면상, 외면상의 모양은 같은 조건하에서 구한것이다.

(그림 28)는 역시 같은 조건하에서 관 지지판의 CRT파형과



기록파형이다.

그림 29 )은 관 지지판이 있는 곳에 외면 결함이 있을 경우 이들이 복합된 CRT 파형과 기록파형이다.

( 그림 30 )에 실제 여러가지 복합신호의 CRT 파형을 그렸다. 여기서도 관통구멍은 내면상 외면상 모두 이들 결함의 깊이가 최대인 경우라고 생각할수 있다.

실제 recording에 있어 우리가 보유하고 있는 recorder는 Amplitude만이 나타나지만( 즉, base line 한쪽편에만 신호가 나타나지만 ) Steam generator 탐상에 쓰이는 이 recorder는 base line이 중심에 있어 좌우로 움직이기 때문에 이것도 결함의 종류를 판정하는데 유익하다. 이때도 결함에 대한 위상특성 graph는 ( 그림 11 )과 원리적으로는 같다. 따라서 결함의 종류는 주로 위상으로 판별하며 전체적인 파형이 도움이 되는 물론이다. 결함의 크기를 구하려면 신호의 진폭에 의한 진폭해석법( 振幅解析法 )을 쓰고, 결함의 깊이나 위치를 구하려면 신호의 위상에 의한 위상해석법( 位相解析法 )을 쓴다.<sup>10)</sup> steam generator에서도 tube의 지지판이 있기 때문에 이 지지판의 신호로서 결함의 위치를 찾는 데 매우 유용하다.

지지판은 결함이 없는 한 그 파형이 같으므로 지지부는 곧 알아 낼수있다. 결함의 크기 및 각도 등에 대한 실제의 기기조정 및 Calibration은 표준 test tube를 이용하여야 한다.

여기에서 투자율( $\mu$ )의 변화는 tube에 Cr, Ni 등 자화물질이

함유되어 있는 경우에 나타나게 되는데 위상은 내면결합과 비슷하나 내면결합의 경우처럼의 매끄러운 loop를 형성하지 못하고 직선 또는 길다란 사각형을 이룬다.

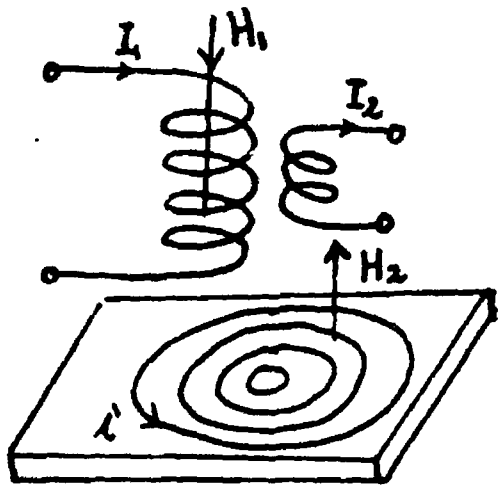
또, X, Y recorder 상에서 up and down의 시간적 interval이 비교적 매우 크다.

X, Y 2 channel로 된 경우 graph지에 recording을 하면 한 channel에는 작은 signal이 나오고 한 channel에는 signal이 매우 적거나 없는 경우가 있는데 이것은 electrical noise에 기인한 것이다.

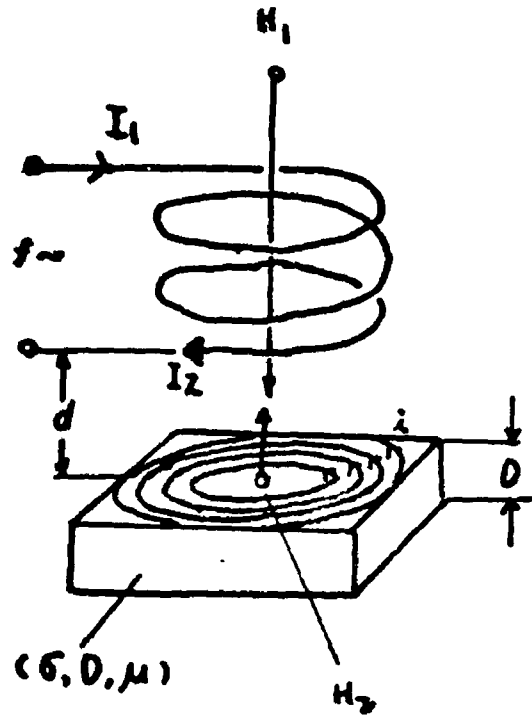
검사중의 signal은 magnetic tape에 기록하였다가 다시 graph지에 재생하여 보는것이 상례인데 이때에도 2 channel중 한쪽 channel만에 signal이 생기면 magnetic tape 자체의 산화 등으로 인한 신호인 것으로 보아야 한다.

graph지 상에 한 channel은 signal이 거의 없고 다른 한 channel에는 작은 signal이 등간격으로 계속 생기면 이 경우는 tube 제조시의 잘못에 기인한 것으로 tube내부에 거친부분이 있으면 이렇게 된다. 이러한 경우를 ridging 또는 mandrel chatter라고 한다.

신호판단중 비교적 어려운 것은 예를들면 결합신호와 지지판 신호의 중첩(그림 29 참조)과 같은 복합신호인데 이것을 판별하는데는 상당한 경험이 요구된다. 근래에는 이러한 신호의 판별을 computer Program을 이용해서 신호분석을 시도하고 있는 중이며 본 연구실에서도 이에 대한 Code를 구상중이다.



(a)



(b)

그림 1. 탐측 Coil 과 시험체의 구성방법

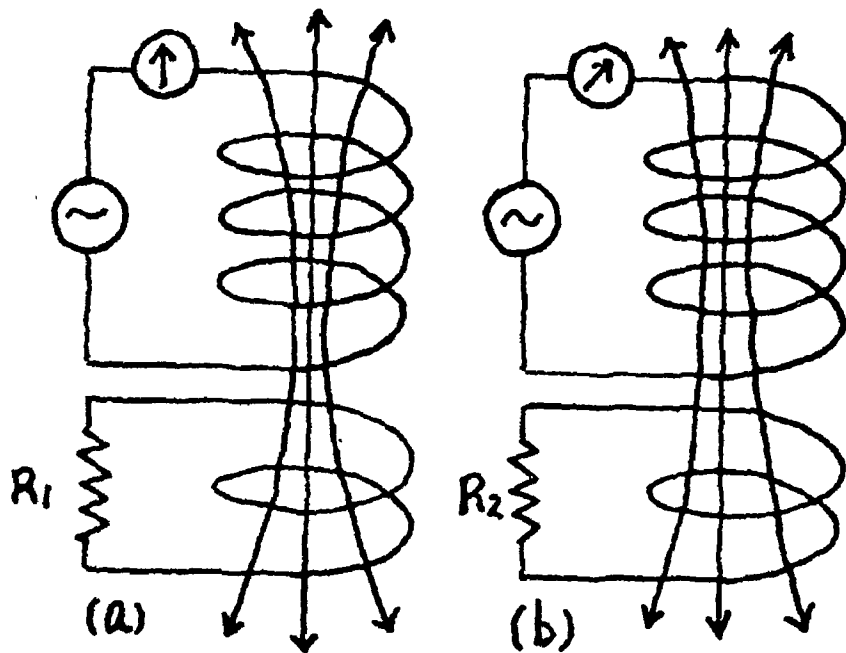
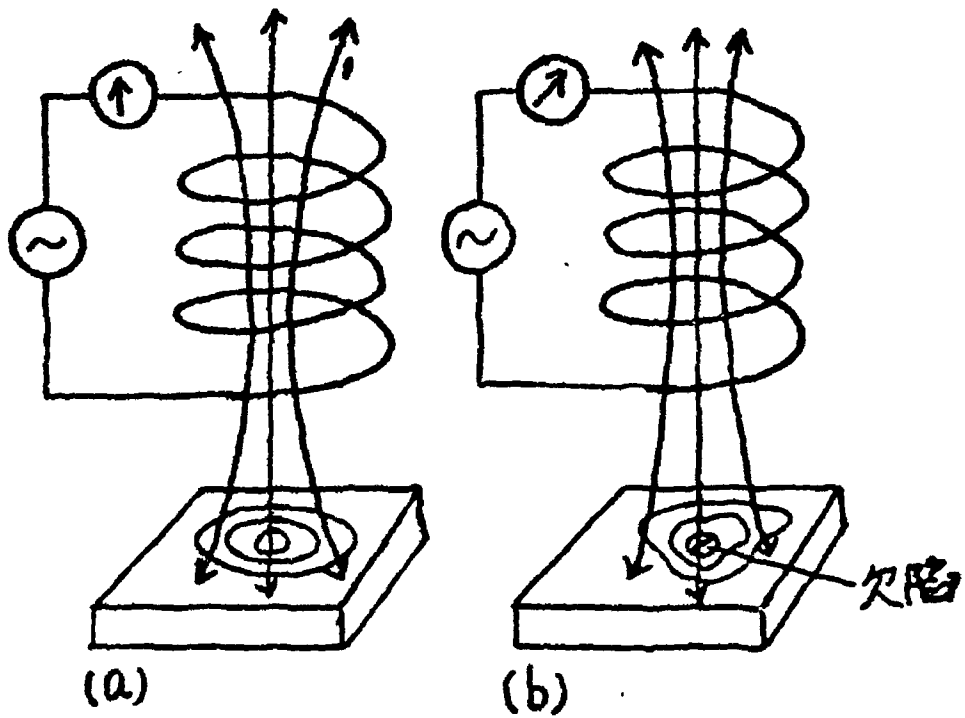
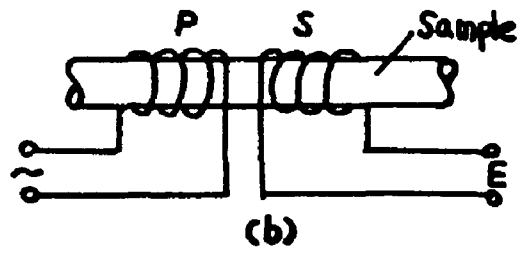
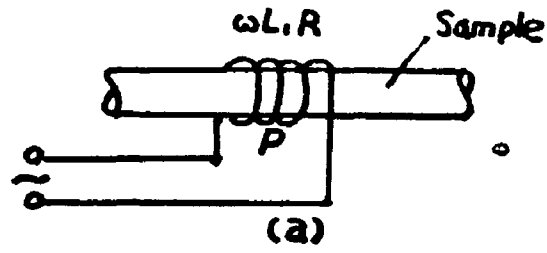
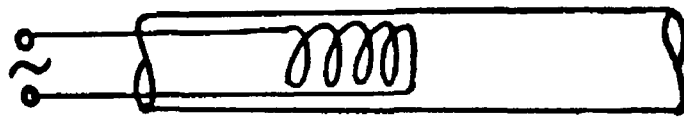


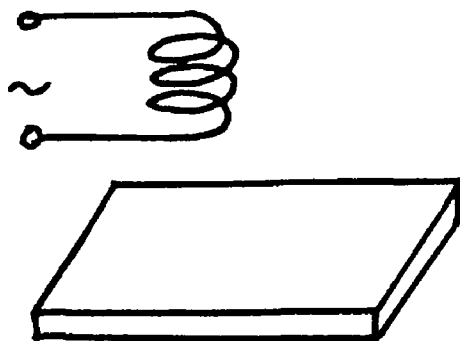
그림 2. 전자유도 현상의 원리



外挿形



内挿形



平面形

그림 3. 시험 Coil 의 구성법 및 형태

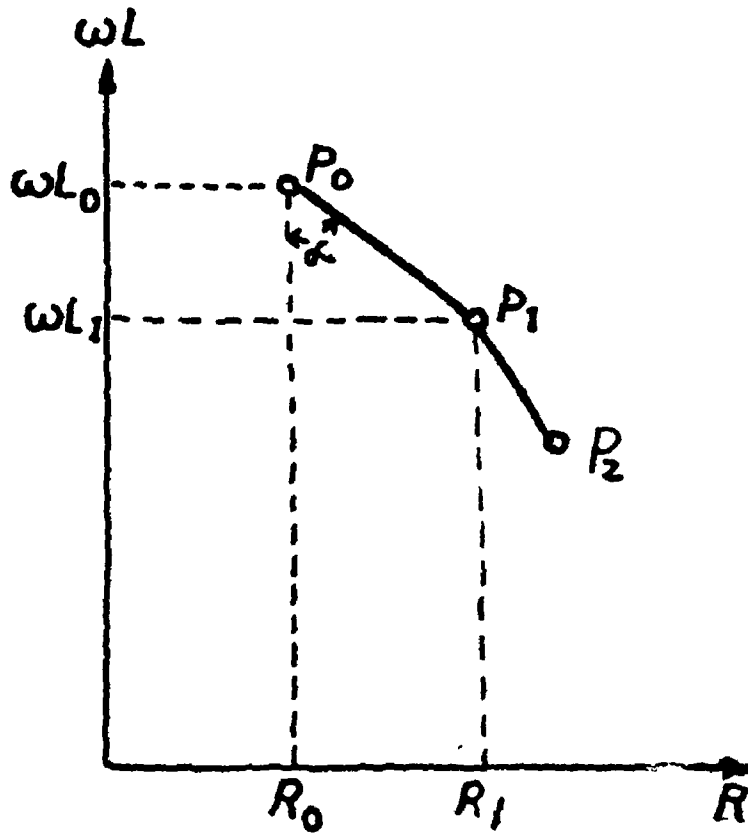


그림 4. Impedance 평면상에서 시험 Coil의 특성표시

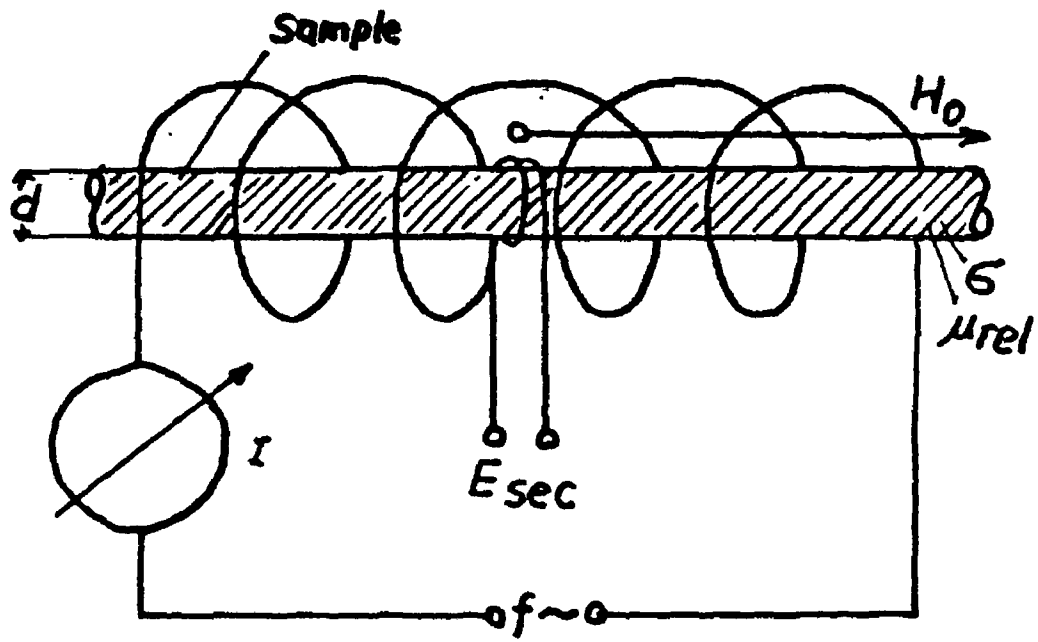


그림 5. 1次 및 2次로된 관통형 시험 Coil 내에서의  
 시험체의 개략도

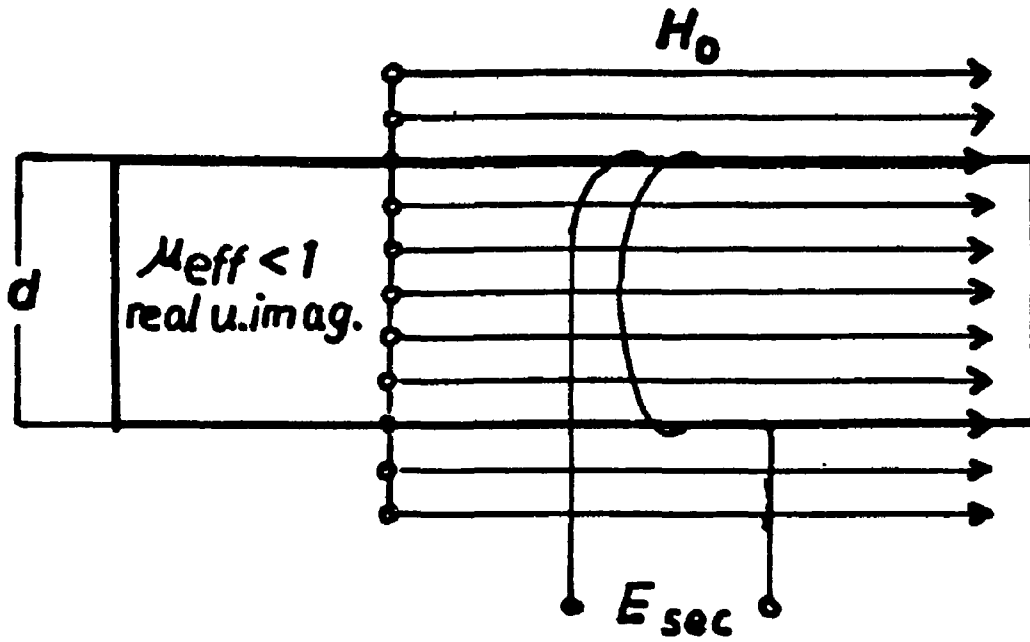


그림 6. 유효 투자율이 1 보다 작고, 일정 자장의 세기  $H_0$  의 조건하에서 시험코일 내에 있는 시험체속에서의 자력선 상태에 대한 개략도.



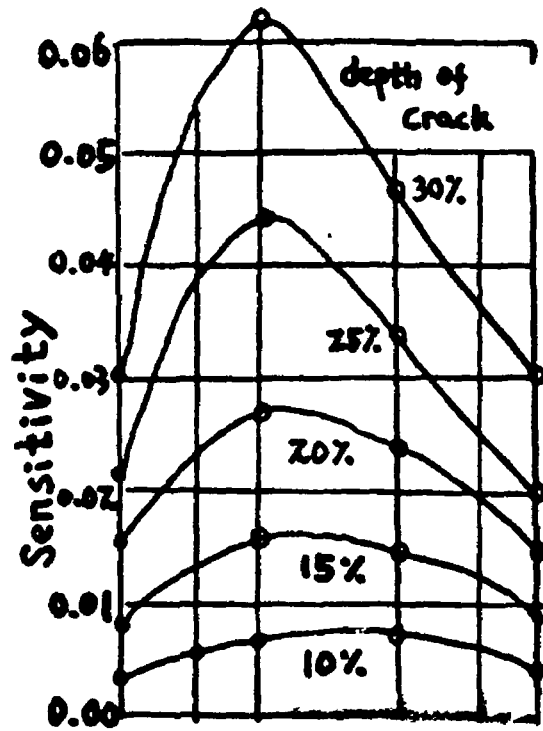


그림 7. 비자성체 환봉에 있어서 주파수 변화에 따른 감도의 변화

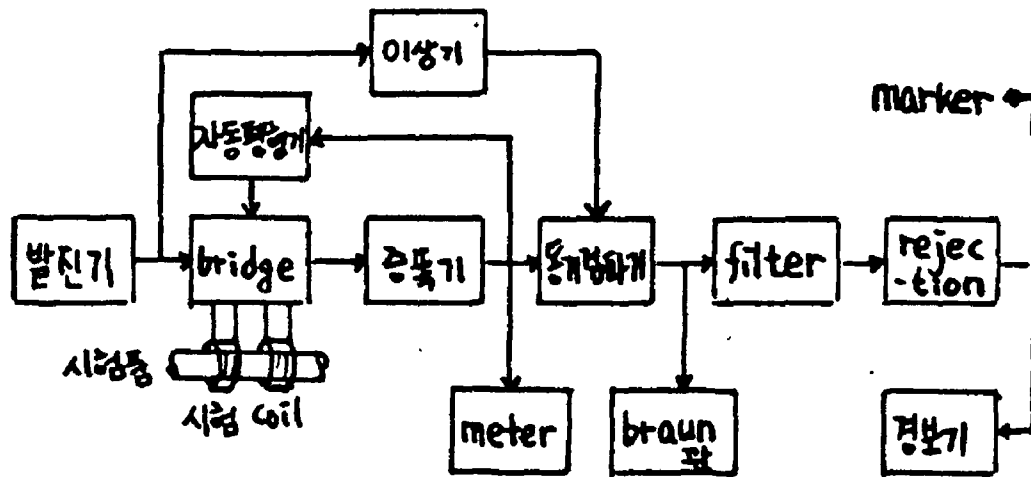
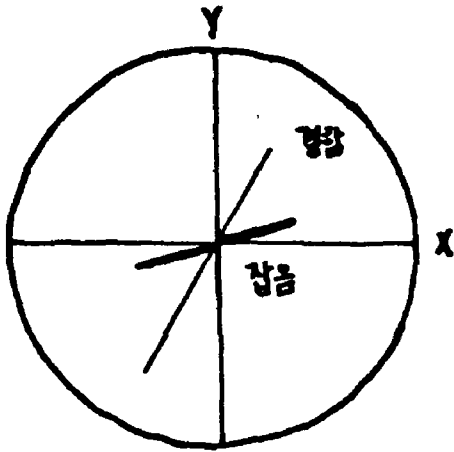
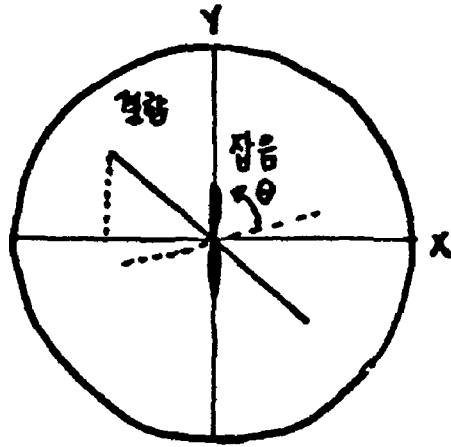


그림 8 . 차동형 와류탐상기의 기본구성도



(a)



(b)

결함신호와 잡음의 위상 관계. 위상을  $\theta$  만큼 들어서 잡음을 제거

그림 9. Braun 관상에서 Vector 표시를 이용한 위상결정

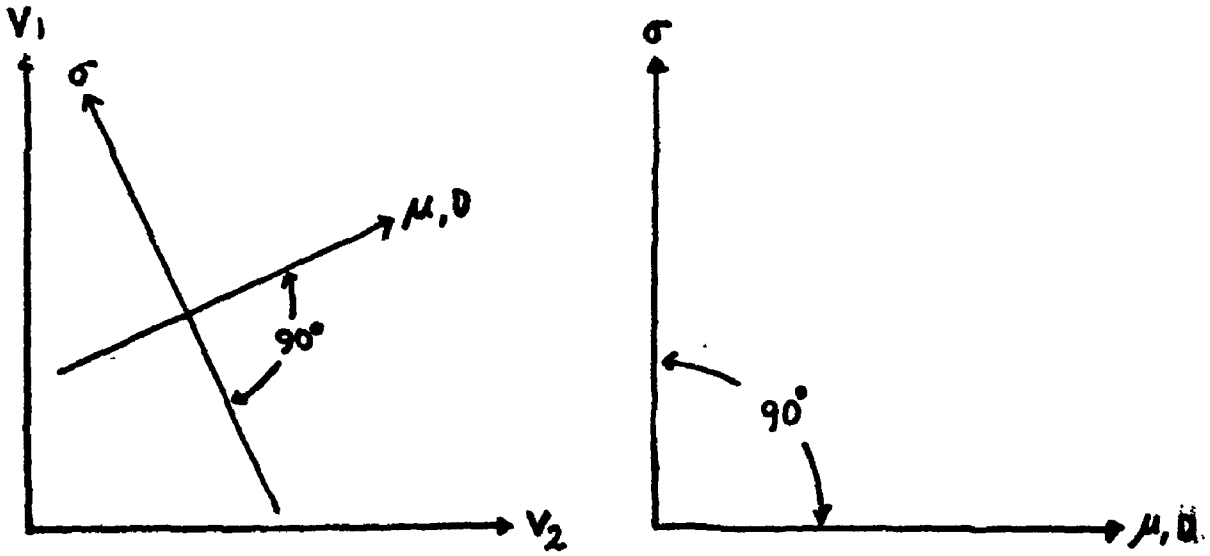


그림 10. 전도율, 투자율, 결합크기에 따른 위상변화

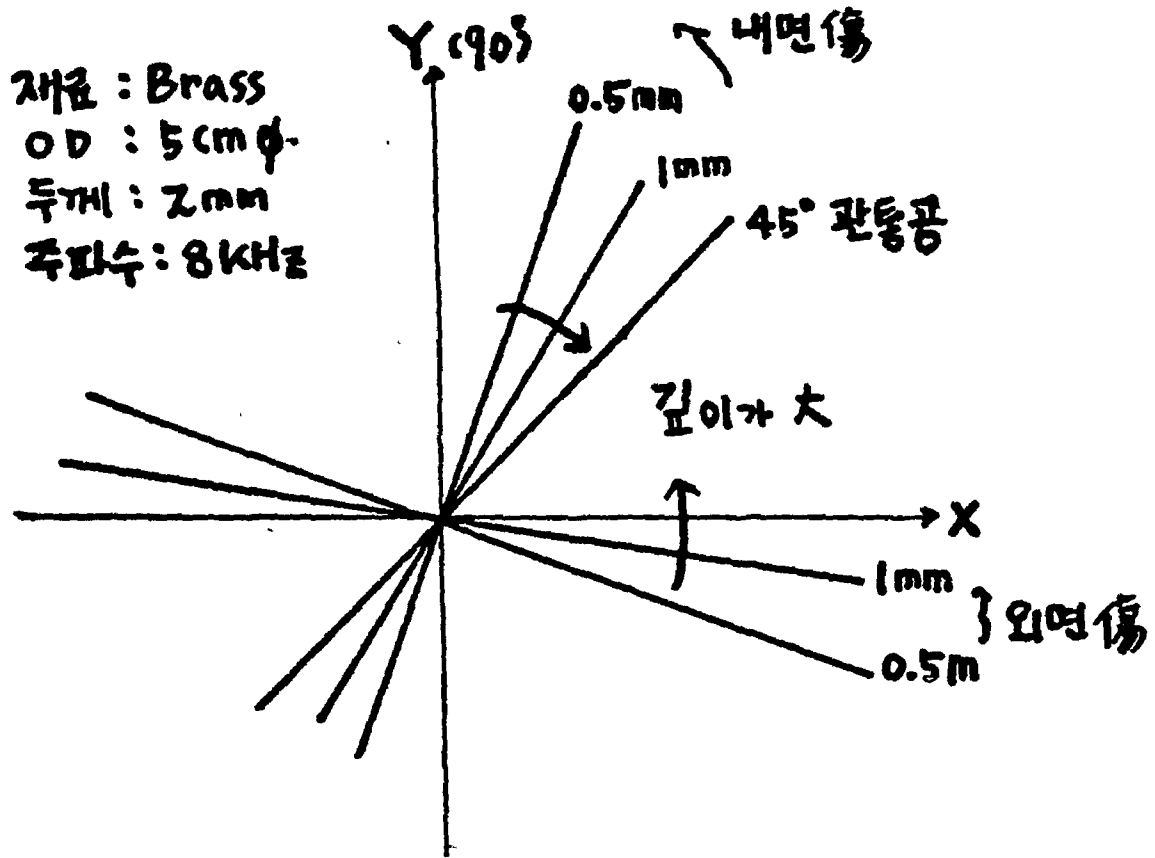


그림 11. 位相特性 Graph

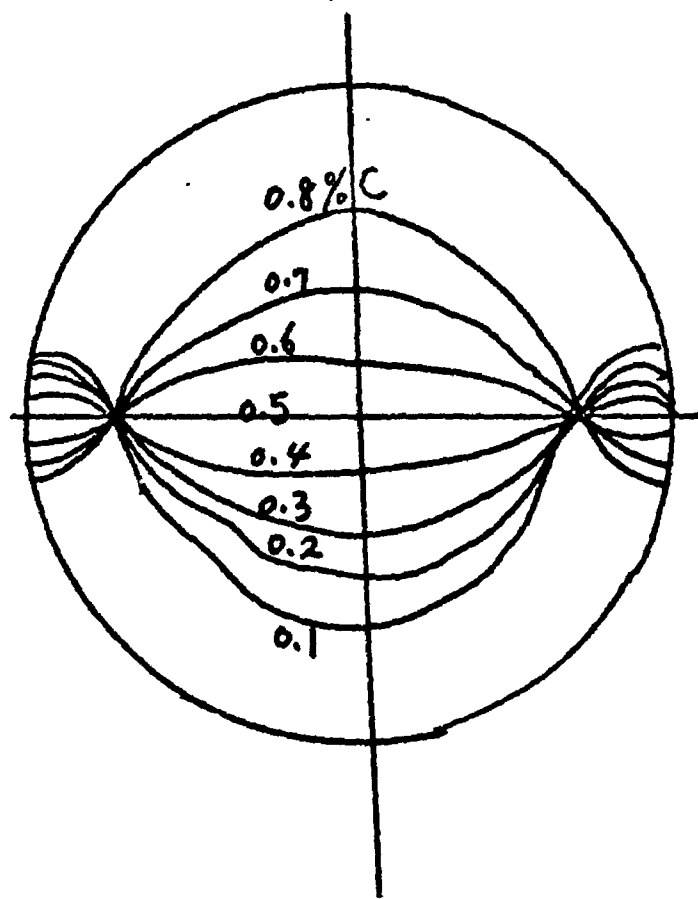


그림 12. 탄소상에 있어서 탄소량과 magnatest 지시

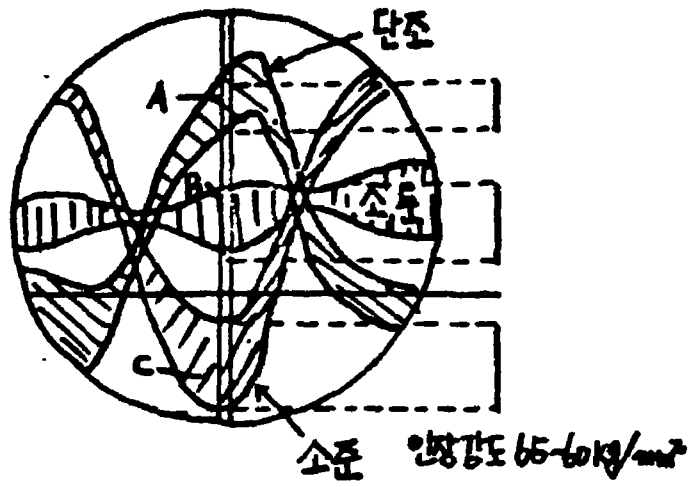


그림 13. 철강재료의 단조, 소둔, 소준, 상황의 판별 (magnat est)

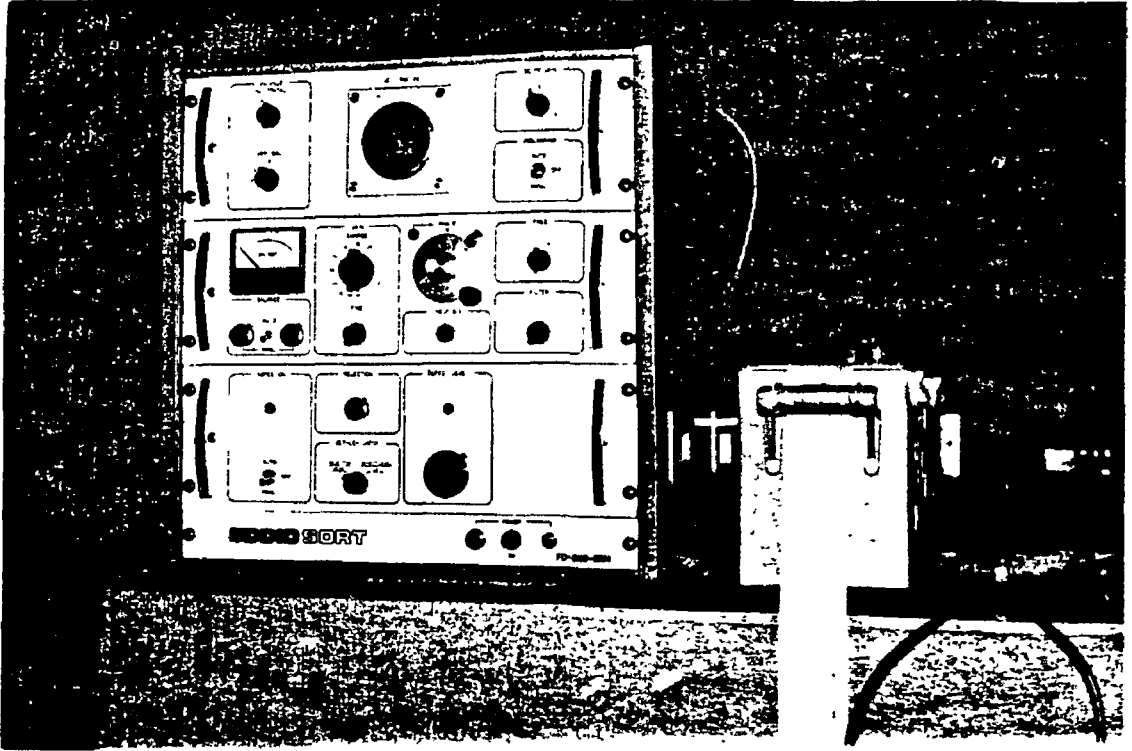


그림 14. 와전류탐상기 FD-5110-ERM의 본체 및 recorder



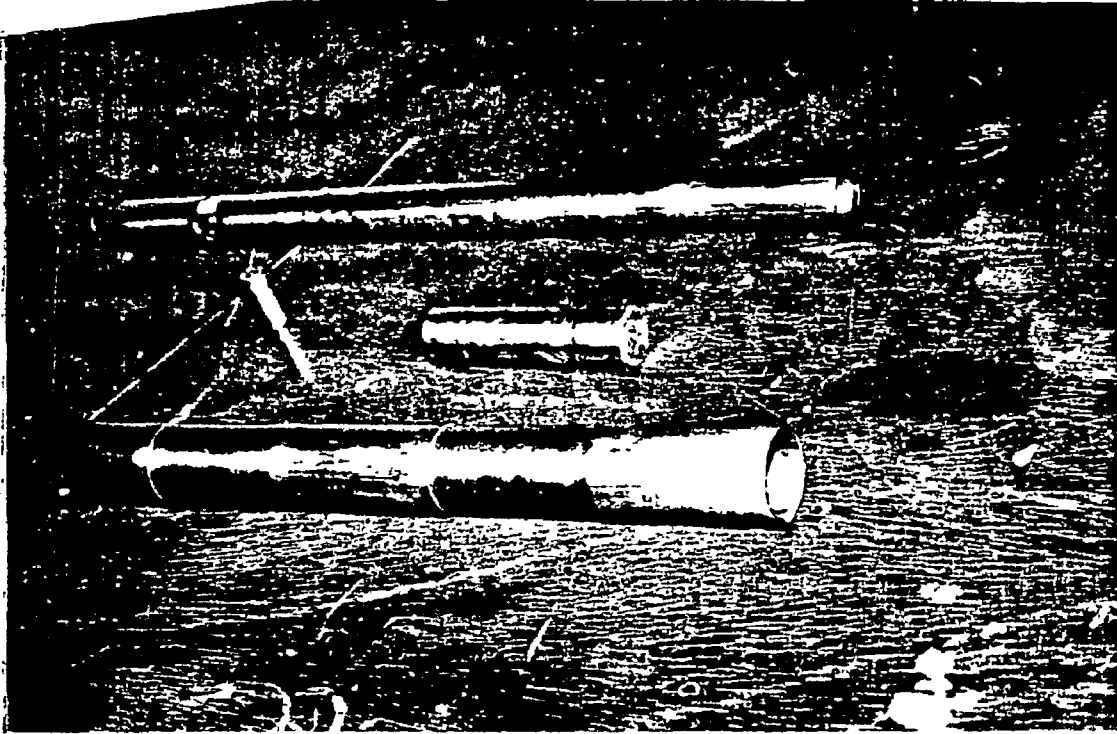


그림 15. Brass test tube 및 stainless steel test tube 와  
brass bar

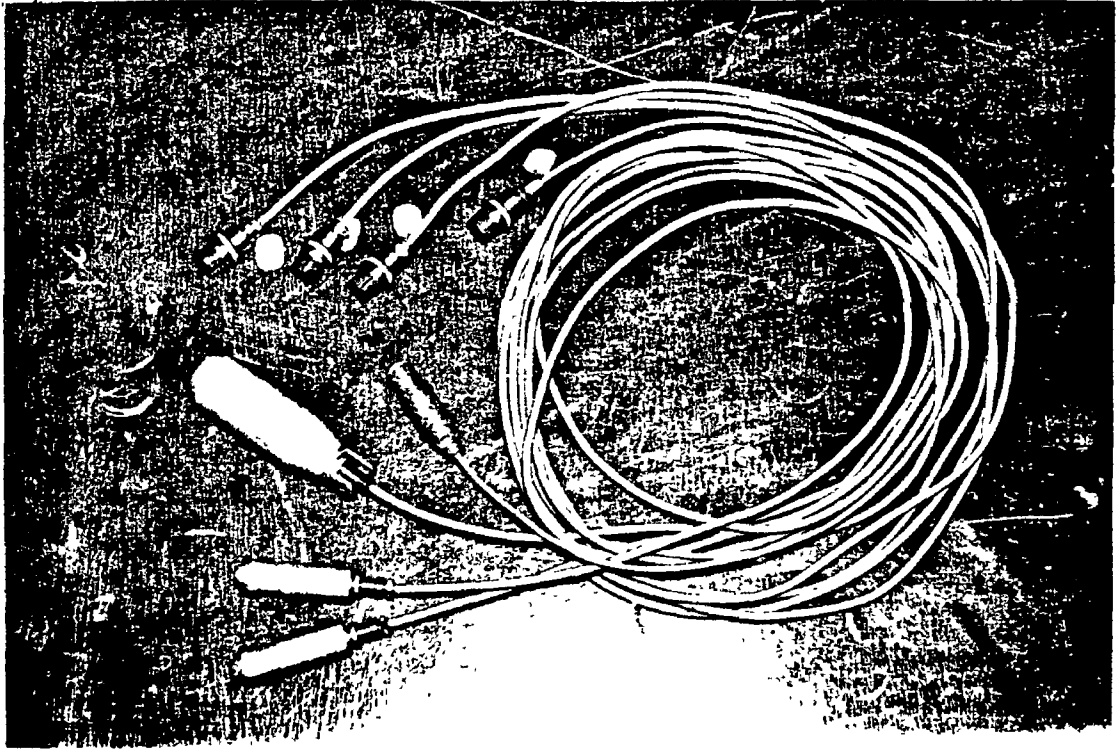


그림 16. 평면형 probe coil 및 내삽형 probe coil

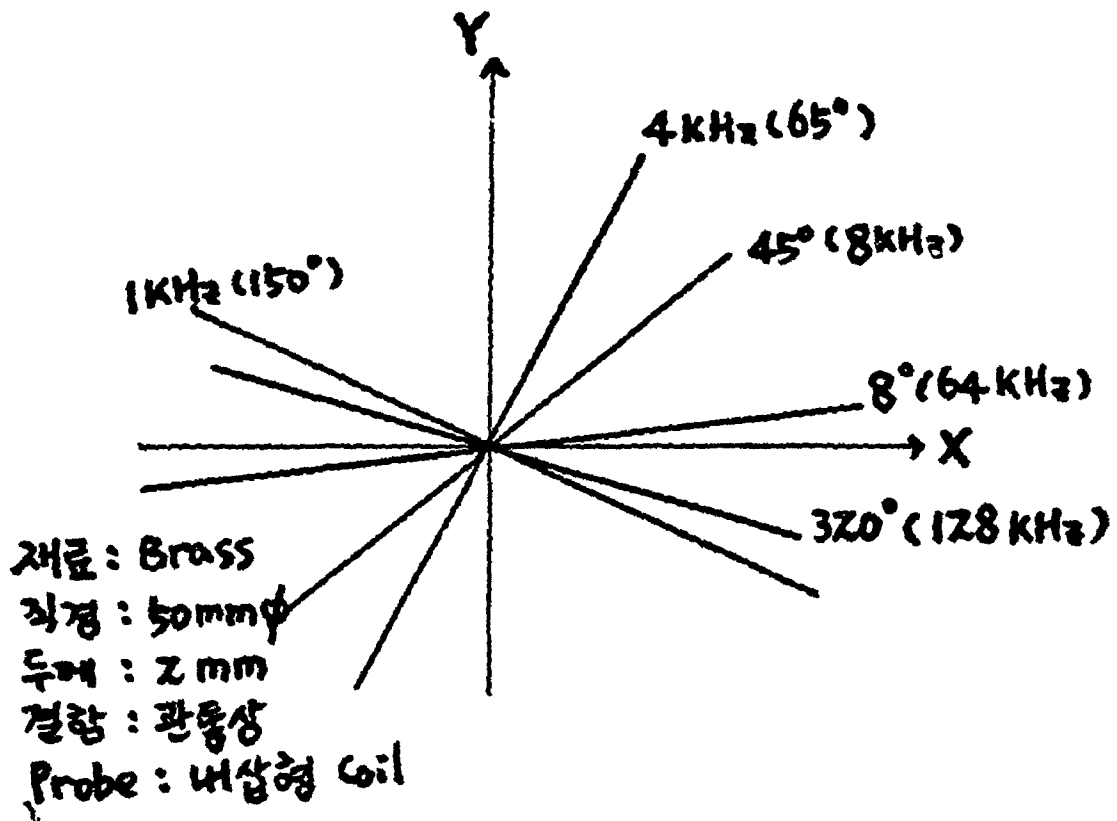
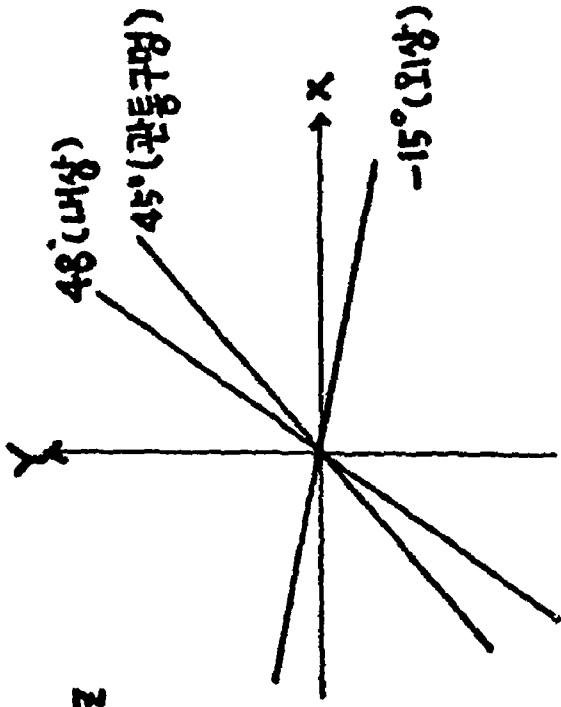
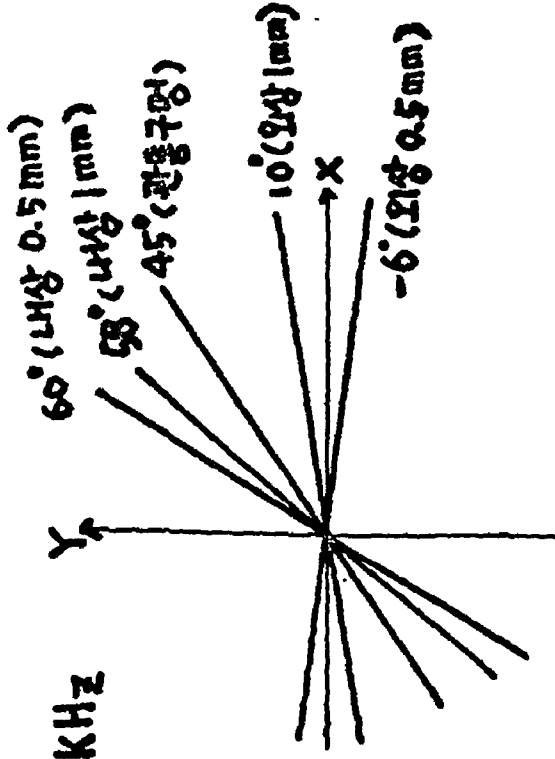


그림 17. 동일 결함의 주파수 변화에 따른 위상의 변화

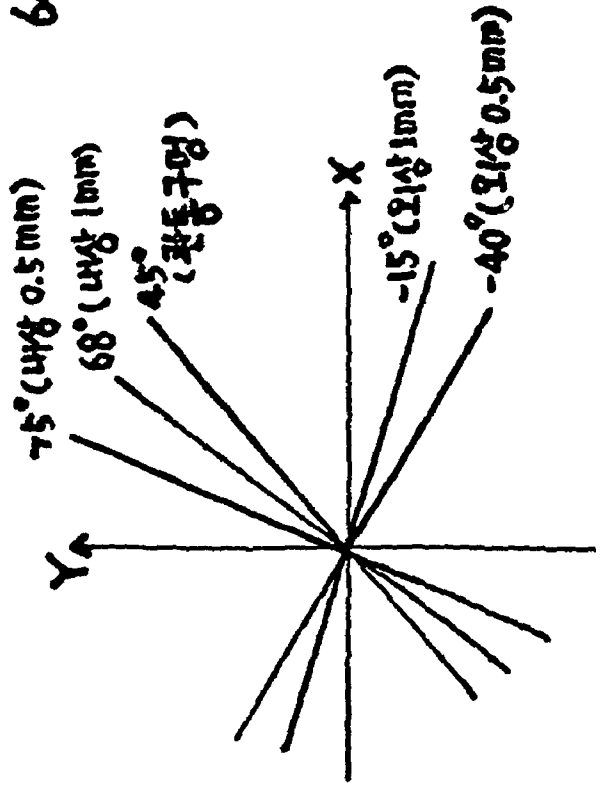
1 KHz



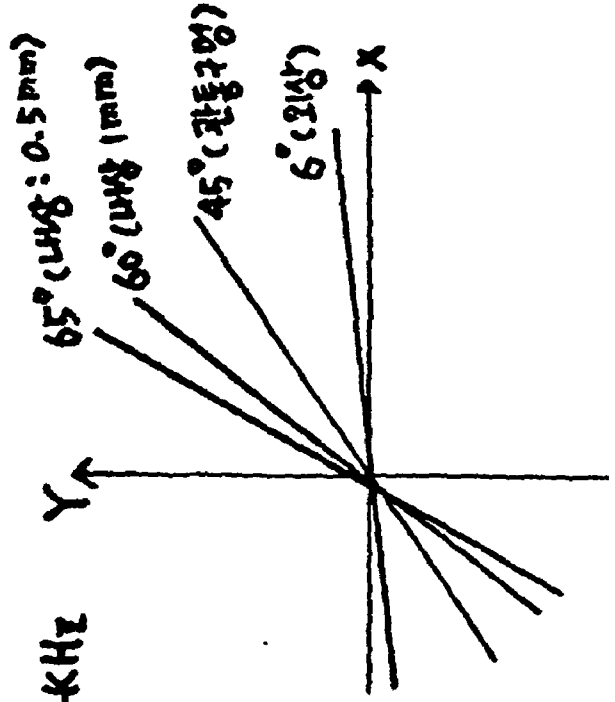
4 KHz

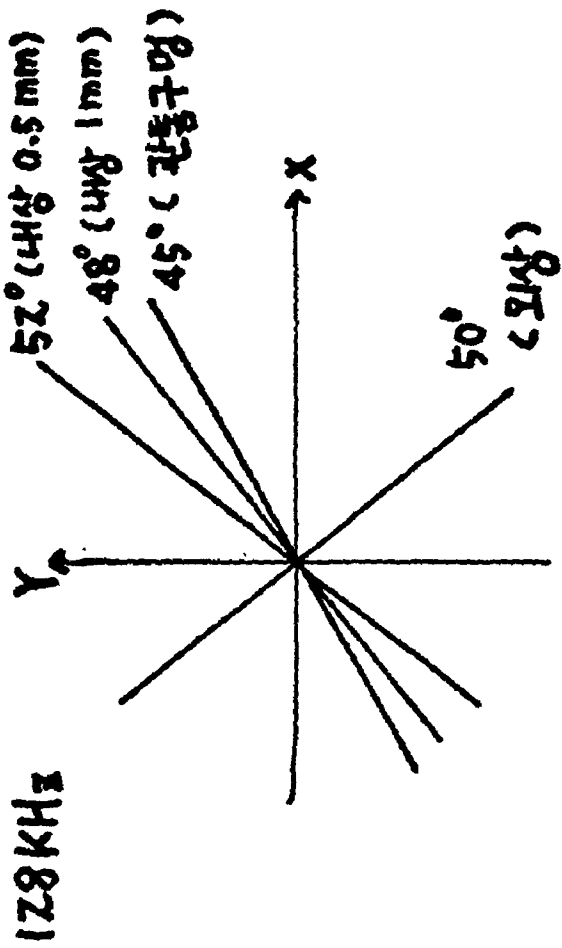


8 KHz



64 KHz





재료 : Brass  
 직경 : 50mm φ  
 두께 : 2mm  
 Probe : 내상형 Coil

그림 18. 각종 주파수에 있어서 결함의 크기.

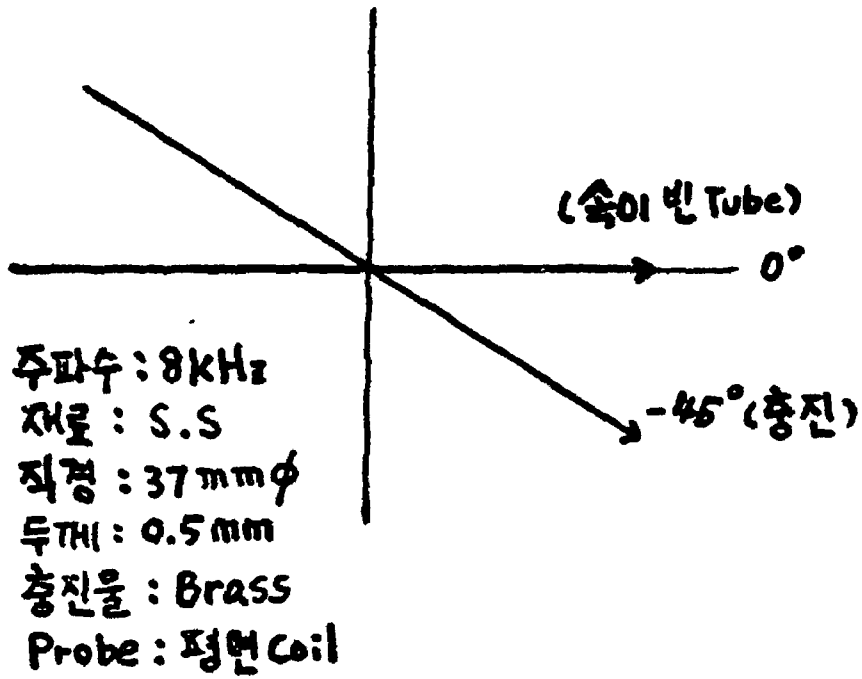


그림 19. S.S. Tube 내에 충전물이 있을 경우 위상의 변화

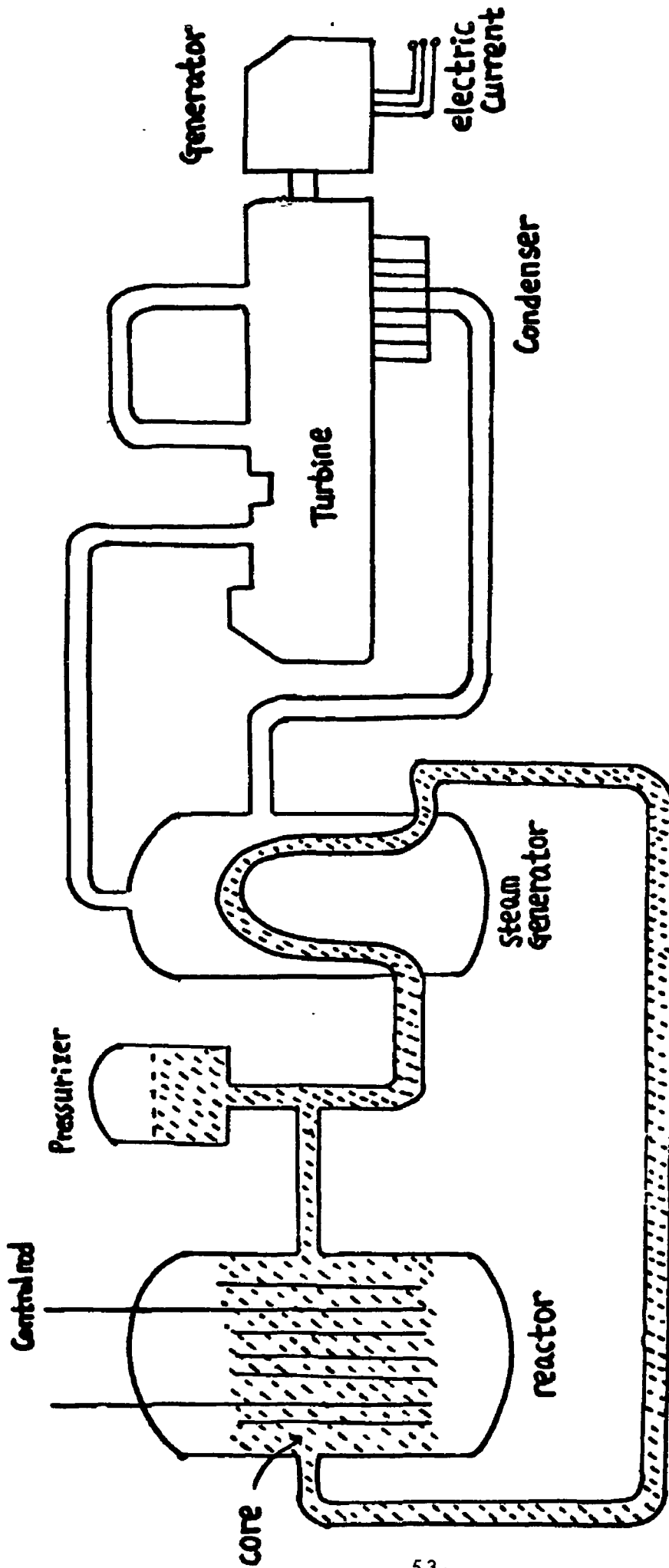


그림 20. Pressurized Water Reactor 의 개략도

조절전



조절후



그림 21. Phase 조정에 따른 기록지 표시



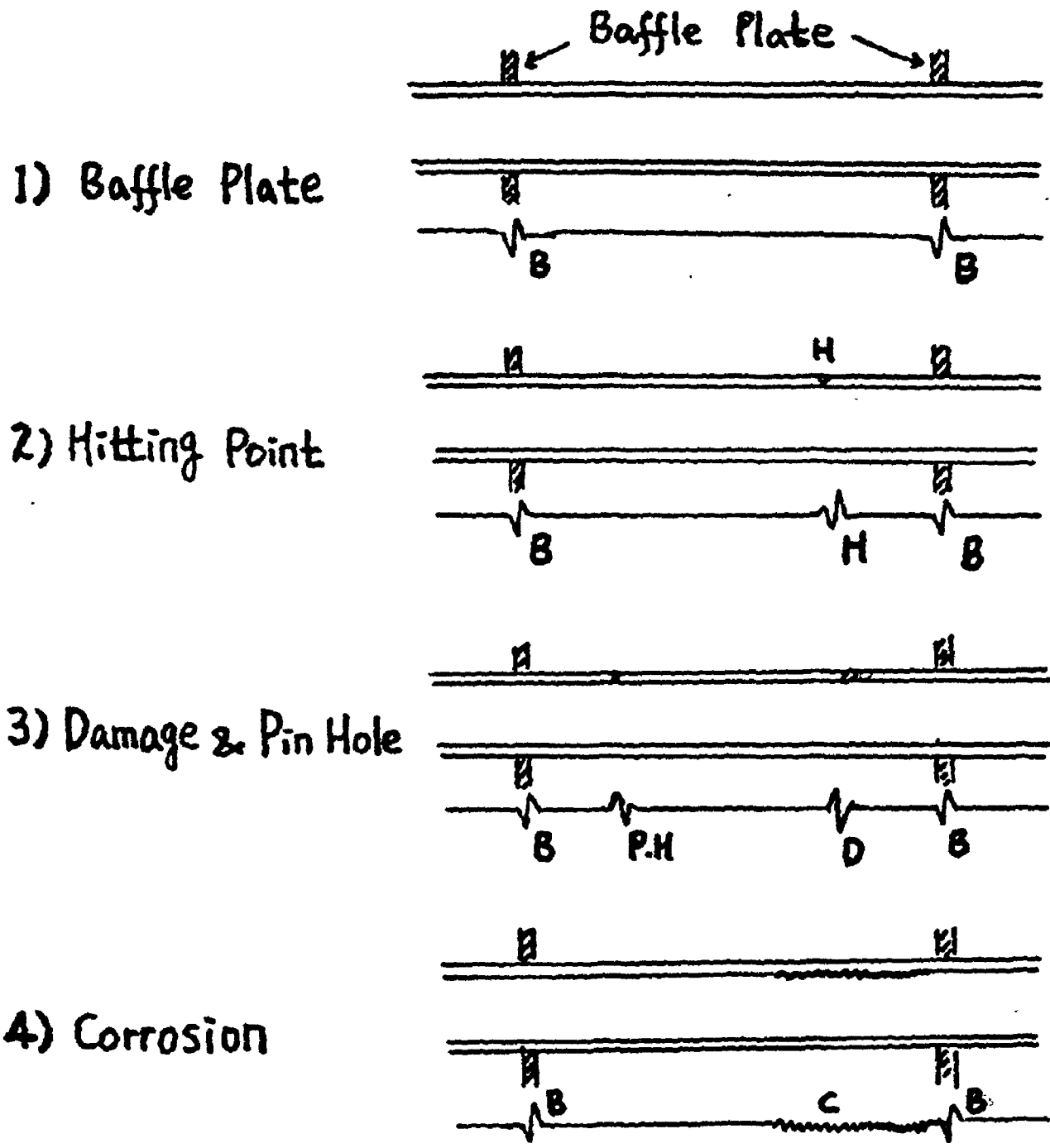


그림 22. 결함 파형 판별

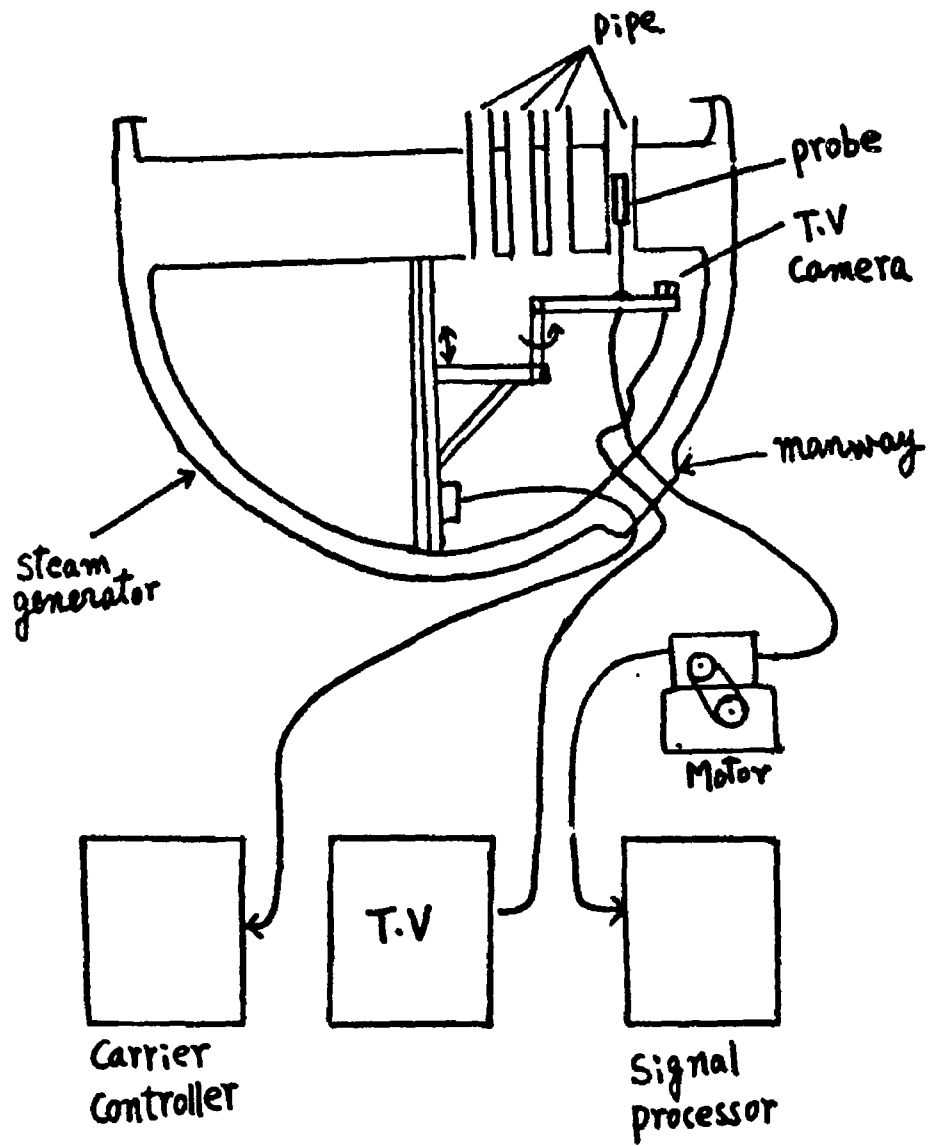
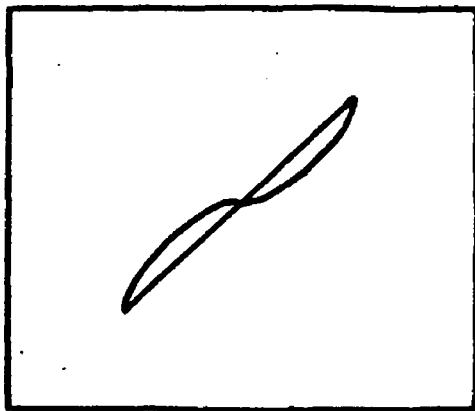
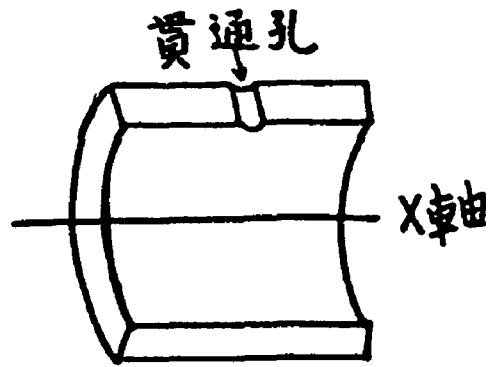
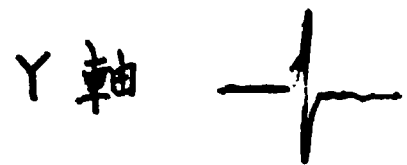


그림 23. PWR Generator 대한 외전류 탐상법



CRT



記錄波形

그림 24 . 관통구멍의 CRT 파형과 기록파형

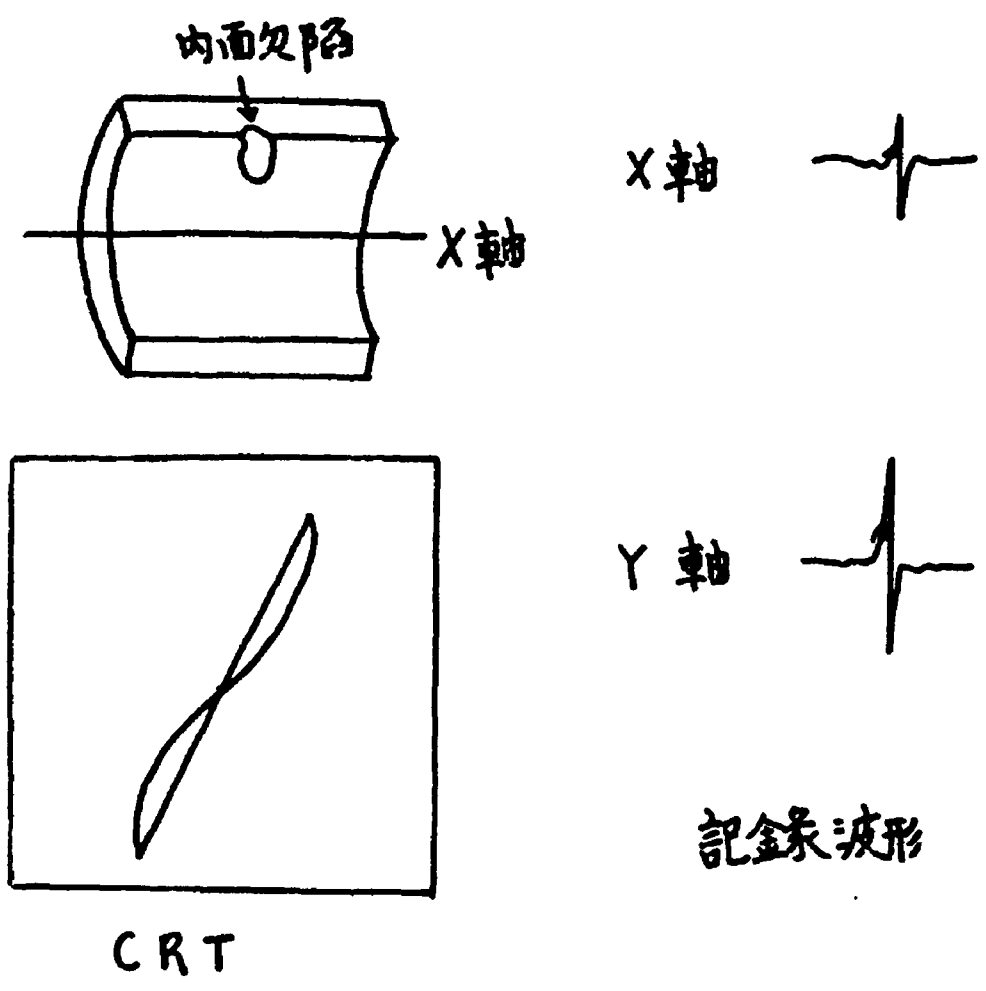


그림 25. 내면결합의 CRT 파형과 기록파형

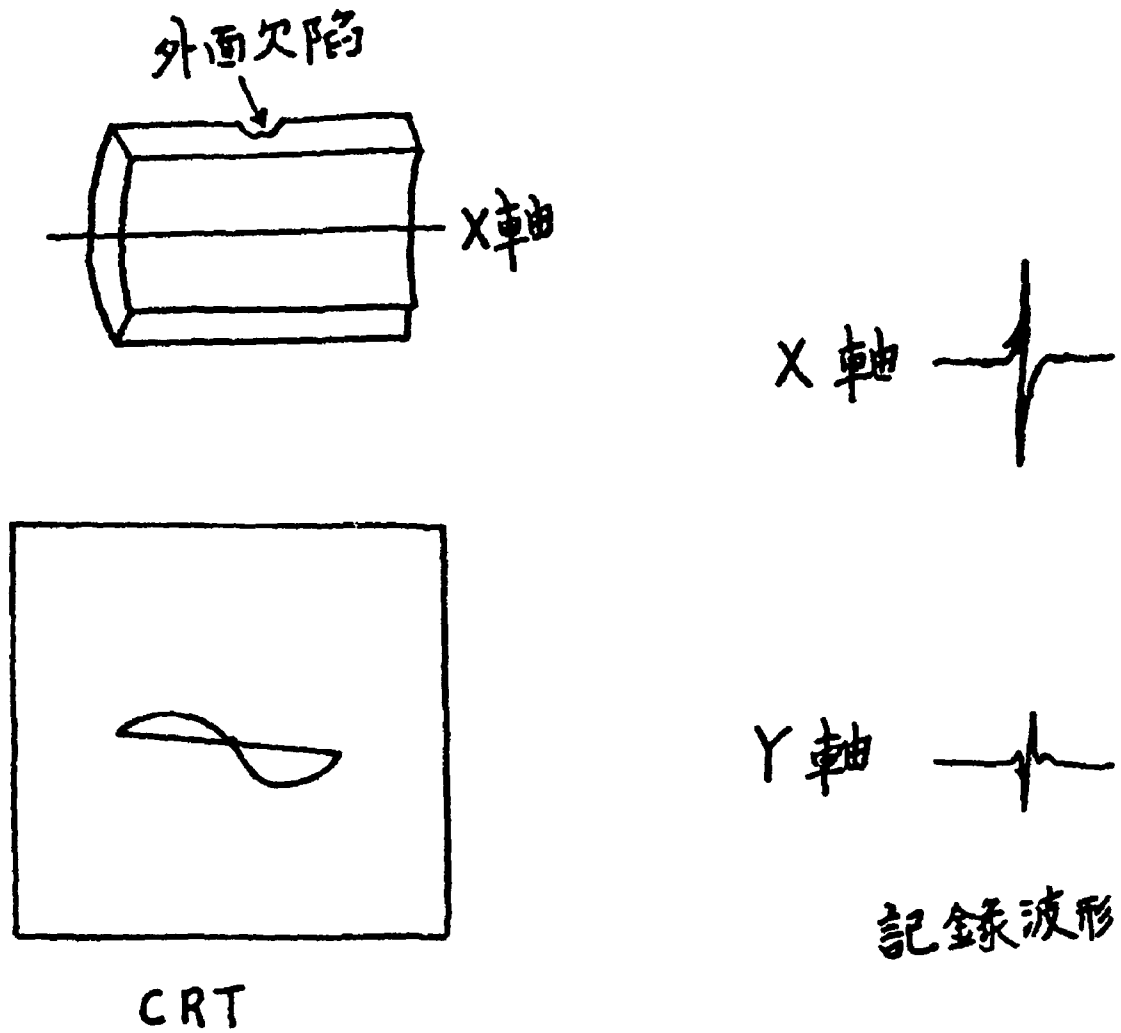


그림 26. 외면결합의 CRT 파형과 기록파형

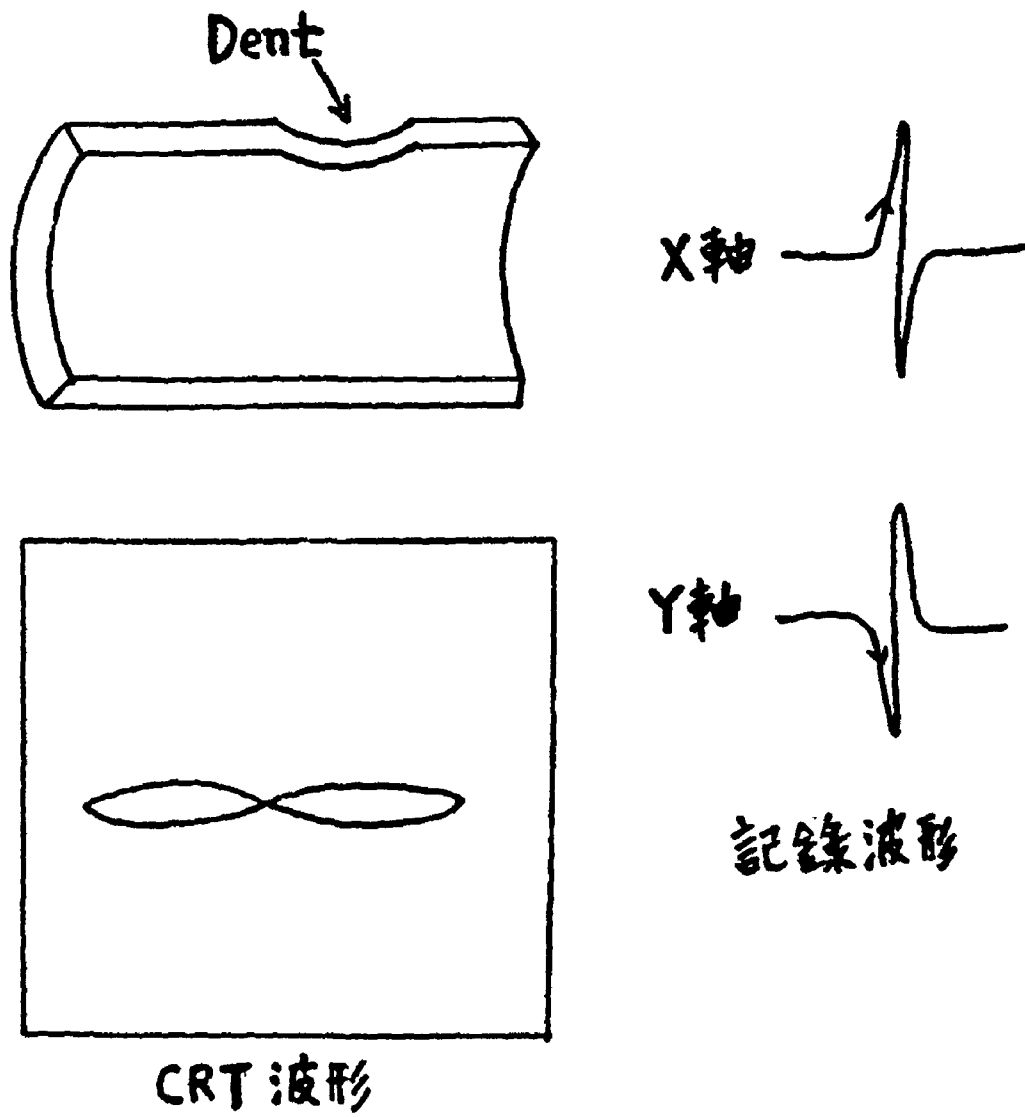


그림 27. Dent 의 CRT 파형과 기록파형

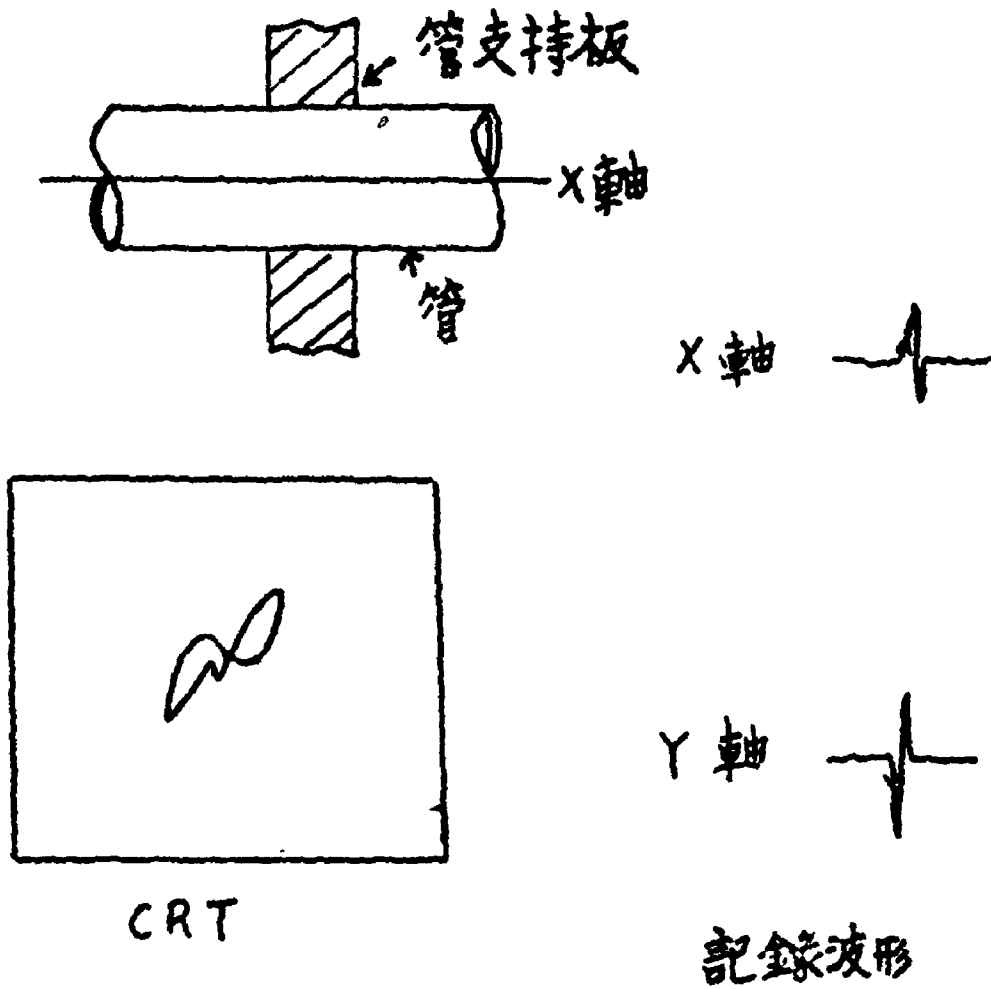
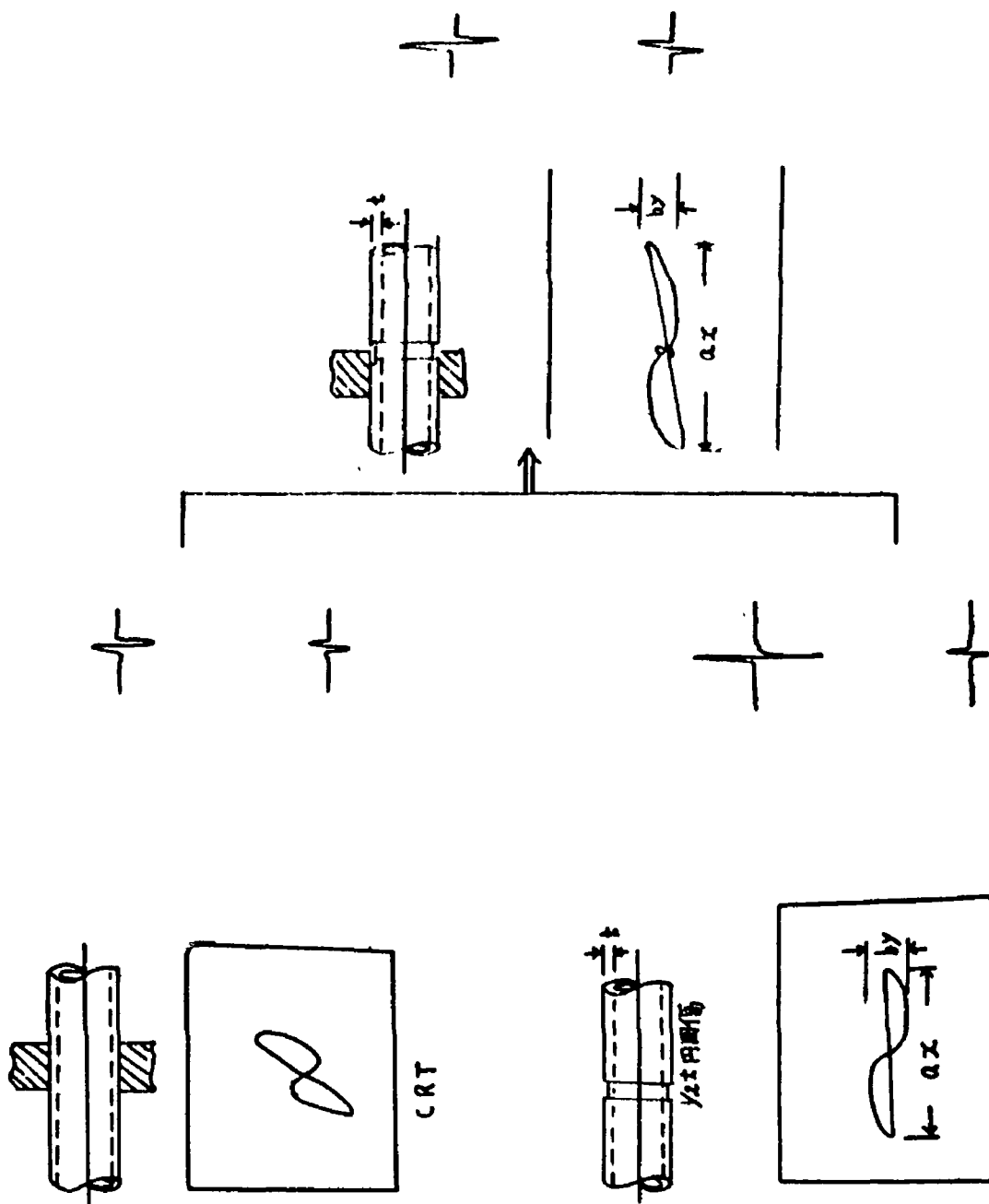


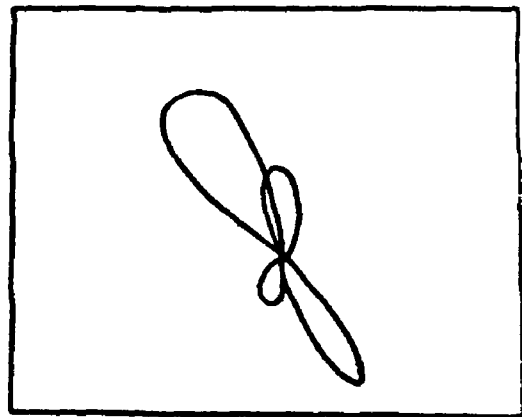
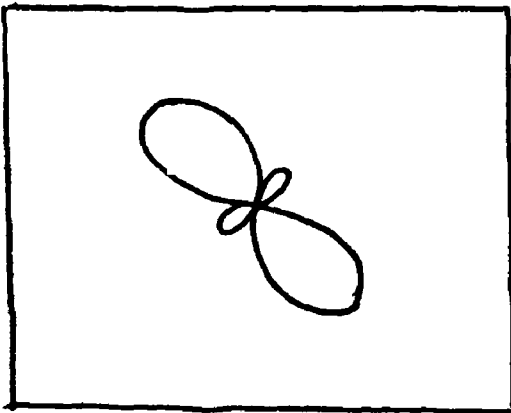
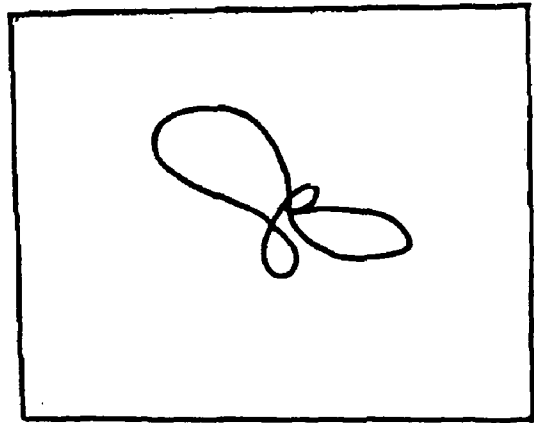
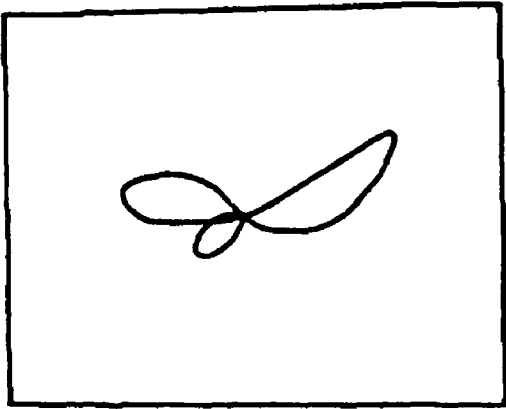
그림 28. 관 지지판의 CRT 파형과 기록파형



CRT

그림 29. 외면 결합과 판지판의 복합된 CRT과형과 기록파형





← 그림 30. 여러가지 복합신호의 CRT 파형

그림 30. 여러가지 복합신호의 CRT 파형

## IV. 参 考 文 献

1. Hughes, D.E. "Induction-balance and Experimental Researches therewith" Phil. Mag. Series 5, 8 (1879) P. 50-56.
2. Libby, H.L. "Progress in Applied Materials Research" (E.G. Stanford, J.H. Fearon, W.J. McGonnagle eds.) vol. 8, Iliffe Books, London (1967) pp. 121-173.
3. 朴大英・文龍植 「渦電流試験法・技術現況分析報告書」(1978)
4. Foerster, F. "Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren VI. Praktische Wirbelstromgeraete mit Durchlaufspule zur quantitativen zerstörungsfreien Werkstoffprüfung" zeitschrift für Metallkunde, 45 (1954) p. 180.
5. Foerster, F and Stambke, K. "Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren III. Verfahren mit Durchlaufspule zur quantitativen zerstörungsfreien Werkstoffprüfung" Z. Metallk., 32 (1941) p. 97.
6. Foerster, F "Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren, I. Das Tastpulverfahren," Z. Metallk., 43, (1952) p. 162. -64-

7. Beuse, H. and Koelzer H. "Industrielle Erfahrungen mit dem Magnatest-Q-Gerat," Z. Metalk, 45 (1954) p.677
8. General Dynamics, CT-6-5 Eddy Current Testing (1967) p. 6-11.
9. Takasage Technical Institute "Development of In-Service Inspection Equipment for Nuclear Power Plants" .Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, April (1977). p.16
10. 新日本非破壊検査株式会社 "渦流探傷試験の概要" (1978) p.34.

비파괴검사 기술개발 ( 와전류 시험법 )

---

1979년 2월 20일 인쇄

1979년 3월 30일 발행

발행인 현 경 호

발행처 한국원자력연구소

서울특별시도봉구공릉동 170-2

전화 (43) 2081 - 9

---

인쇄소 유 신 상 사