

## Plus(+) Point Probe를 이용한 용접부 와전류검사 Eddy Current Testing of Weldment by Plus(+) Point Probe

이희중, 김용식, 남민우, 윤병식, 김석곤

Hee-Jong Lee, Yong-Sik Kim, Mim-Woo Nam, Byung-Sik Yoon and Seok-Kon Kim

**초 록** 발전설비를 구성하는 주요 기기중 펌프, 밸브, 배관 등의 용접부에 발생할 수 있는 균열 등의 결함을 검출하기 위한 plus-point 와전류검사탐촉자를 설계하여 결함을 검출하고 그 크기를 측정할 수 있는 검사기법을 연구하였다. 차동형 모드로 운전되는 plus-point 와전류탐촉자는 2개의 "I"자형 코일 이 십자형태로 교차되어 있으며, 탐촉자와 시험체 표면사이의 lift-off변화에 의한 영향이 재래식 표면 탐촉자에 비해서 작게 발생하는 특징이 있다. 결함에 대한 탐촉자 반응을 평가하기 위해서 304 스텐 인레스강 용접부에 인공결함인 균열성 노치를 방전가공하여 시험편을 제작하였으며, 이를 활용하여 plus-point 와전류탐촉자의 결함 검출, 종류 판별 및 크기를 측정할 수 있는 기법을 연구하였다.

**주요용어** : 와전류검사기술, plus-point probe, 용접부 결함

**Abstract** A plus-point eddy current test(ECT) probe was developed to examine the defects on the welds of pumps, valves, and pipings which are the major components of the electric power plants. non-destructive evaluation(NDE) techniques for detecting and sizing the flaws were studied adapting this probe. Differential plus-point ECT probe is consists of two "I"-type coils crossed each other and has an advantage having a small influence on the sensitivity by lift-off variation to the conventional types of probe. The specimens with crack-like electro discharge machining(EDM) notches on the weld of type 304 stainless-steel were fabricated in order to evaluate the plus-point ECT probe response to the flaws. NDE techniques to detect and size the flaws and estimate the flaw type were established with this specimens.

**Keywords**: eddy current testing, plus-point probe, weld defect

### 1. 서 론

와전류검사기술은 현재 원전 증기발생기를 포함한 발전설비중에서 각종 열교환기 전열관의 건전성평가를 위한 주요 비파괴검사기술로 적용되고 있다. 원전 1차계통 주요기기 가동중점검 요건인 ASME code section에 의하면 와전류검사기술은 비파괴검사법중에서 시험체 내부검사를 위한 체적검사법(volumetric method)으로 분류[1]되어 있으며, 주로 두께가 약 2mm이하인 열교환기 전열관 비파괴검사에 적용되고 있다. 와전류검사법은 액체침투검사법이나 자분탐상검

사법 등의 표면검사법과 비교할 때 검사전 시험체 표면처리가 필요 없고, 응력부식균열 등과 같은 미세한 결함에 대한 검출 감도가 뛰어나며 또한 비접촉식으로 검사속도가 빠르고, 검사 완료후 화학적 폐기물이나 방사선폐기물 등을 남기지 않는 장점이 있기 때문에 현재 외국의 경우 대체 표면검사법(alternative surface method)으로 적용이 확대되고 있으며 향후 국내에도 널리 적용될 것으로 예상된다. 발전설비중 압력용기를 포함한 주요 기기는 대부분 용접부로 구성되어 있으며 기기의 운전년수 증가에 따른 재질의 열화로 인해 용접부 표면 및 표면하에 균열이 발생되어 설비 운전이 영

향을 미칠 수 있기 때문에 사전에 이러한 결함을 검출하여 적절한 조치를 취하므로써 사고를 예방할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 발전기기 용접부에 발생할 수 있는 균열 등의 결함 검사에 적용이 가능한 plus(+) point 와전류검사 표면탐촉자를 설계하였으며 이를 이용하여 결함 크기를 측정할 수 있는 검사기법을 연구하였다. plus(+) point 탐촉자는 현재 증기발생기 전열관 sleeving부위 검사에 적용되고 있으며, 시험체 표면의 불규칙한 기하학적형상으로 인하여 탐촉자와 시험체 표면 사이에 발생할 수 있는 lift-off 영향이 최소화되는 특성을 가지고 있으므로 이와 같은 특성을 응용하여 용접 크라운이 연삭되지 않고 그대로 남아있는 상태로 사용되는 용접부 비파괴검사에 적용시 효과적인 것으로 예상되므로 본 연구를 수행하게 되었다.

## 2. 이 론

### 2.1. Plus(+) point 탐촉자 구조

Plus-point 와전류검사 탐촉자는 Fig. 1에서와 같이 두 개의 "I"자형 코일이 십자형태로 교차되어 있고, 교차된 두 코일이 동일 평면상에 제작될 수 없으므로 코일층을 한 층씩 번갈아 감아 두 코일의 비란성을 유지하였으며, 차동형(differential) 또는 송수신형(send-receive) 모드로 운전될 수 있으나 본 연구에서는 차동형(differential) 모드를 적용하였다. 탐촉자 코일의 이와 같은 십자형태 모양으로 인하여 plus-point 탐촉자라 부른다. 와전류센서 몸체는 직경이 약 5mm로서 재질은 내마모성이 강한 아세탈이며 코일 와이어는 0.14mm 에폭시 피복 동선을 사용하였다.

### 2.2. Plus(+) point 탐촉자 운전 원리

탐촉자를 구성하는 2개 코일은 Fig. 2와 같은 휘스

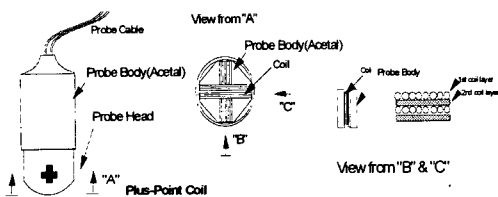


Fig. 1 Schematic diagram of plus-point coil probe

톤 브리지회로에서 차동형 형태로 연결되어 있으며, 각 코일은 코일 자장에 의해 영향을 받는 부위에서 발생한 전기적특성을 서로 비교한다. 2개 코일로 구성되어 있는 differential bobbin probe는 두 코일이 인접하고 있는 시험체 인접부위의 전기적 특성을 서로 비교하지만, plus-point 탐촉자는 구성 2개 코일이 서로 떨어져 있지 않고 "+" 형태로 교차되어 있으므로 시험체 표면 스캐닝시 동일 부위에 2개 코일이 위치하게 되어 lift-off변화가 상쇄되어 신호에 미치는 영향이 적게 된다. 재래식 표면 와전류탐촉자와 비교할 때 plus-point 탐촉자의 가장 큰 장점중의 하나는 시험체 표면과 탐촉자와의 간극이 변화할 때 두 코일이 동시에 영향을 받아 상쇄되기 때문에 lift-off변화에 의한 영향이 최소화되는 특징이다. 이러한 특성으로 인하여 plus-point 탐촉자는 열교환기 전열관 시트부위의 sleeving부위 등과 같이 검사체 표면의 기하학적형상이 일정하지 않아 lift-off변화가 비교적 심하게 발생하는 곳의 결함 검사에 적용되고 있으므로 이와 같은 특성을 발전설비 용접부 표면검사에 응용하여 적용할 경우 유용하게 활용될 것으로 예상된다.

## 3. 실험

### 3.1. 실험장치 구성

탐촉자 코일의 주파수특성과 임피던스, 저항, 인덕턴스, 위상각 변화 등의 전기적 특성을 측정하기 위해서 Fig. 3에서와 같이 주파수 대역이 100Hz~40MHz인 HP-4194A 임피던스 분석기를 사용하여 데이터를 취

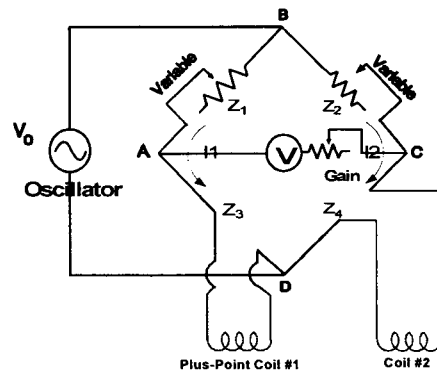


Fig. 2 Electric circuit of differential plus-point ECT probe

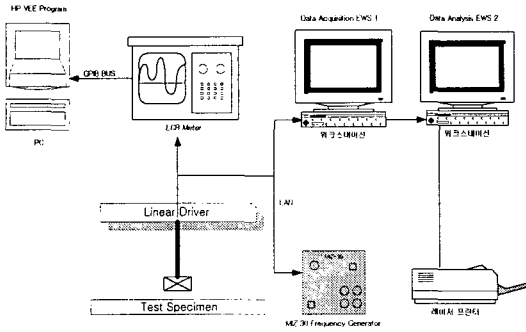


Fig. 3 Schematic view of plus-point ECT probe testing system

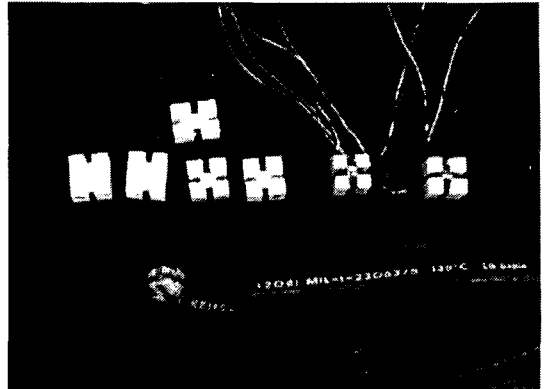


Fig. 5 Plus-point ECT probe

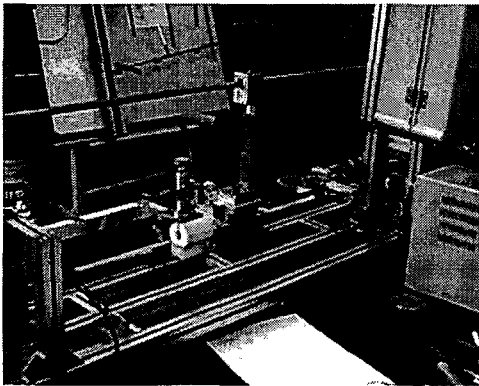


Fig. 4 Linear ECT scanning system

특하였으며, 취득자료는 GPIB interface카드와 HP-vee data analysis program을 이용하여 분석하였다. 또한 탐촉자의 와전류검사 특성을 평가하기 위해서 Fig. 3에서와 같은 64채널 용량으로 주파수 대역이 10kHz~1MHz인 Zetec Miz-30 와전류탐상장비를 사용하였으며, 와전류검사 신호취득 및 분석에 사용된 소프트웨어는 Zetec-eddyne<sup>®</sup> 프로그램을 사용하였다. 한편 calibration standard 및 시험편이 탐촉자 내부를 통과할 때 코일과 시험편간의 lift-off변화에 의한 오차를 최소화하고 재현성 향상을 위해서 Fig. 4와 같은 스캐너를 제작하여 활용하였다.

Table 1 Probe coil characteristics

| Plus-point coil | 권선수 N (Turns) | 코일 Dia. (OD, mm) | Inductance L in air( $\mu$ H) @200kHz | Resistance in air(k $\Omega$ ) | 공진주파수 in aired with Cable (kHz) | 비 고                       |
|-----------------|---------------|------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
|                 |               |                  | Air-cored                             |                                |                                 |                           |
|                 | 60            | 4.5              | 12                                    | 4                              | 920                             | * Coil wire dia. : 0.14mm |

### 3.2. 탐촉자 코일설계 및 제작

용접부 표면 와전류검사를 위한 탐촉자는 탐촉자와 용접부 표면간 lift-off변화, 투자율 및 전기전도도 변화에 대해 반응이 최소로 발생하여 최대의 S/N비를 얻을 수 있어야 하며, 또한 용접축에 대해 방향이 수직인 결함과 평행인 결함을 구분할 수 있어야 한다. 따라서 본 실험은 plus-point 탐촉자의 이와 같은 특성과 능력을 평가하기 위해 수행하였으며, plus-point 탐촉자의 주파수 특성과 결함 검출 특성을 평가하기 위해서 Fig. 5의 plus-point 탐촉자를 제작하여 실험하였다. Table 1에 plus-point 와전류탐촉자 코일의 전기적 특성을 나타내었다. 탐촉자 케이블은 원적검사에 필요한 길이로 2가지 탐촉자 모두 동일하게 약 22.5m인 고주파 동축 케이블(Mil-C-RG 174, specific capacitance : 101pF/m)을 사용하였다.

### 3.3. 교정 standard 및 시험편 제작

본 실험을 위해서 두께 4mm의 SS-304 스테인레스 강을 사용하여 Fig. 6에서와 같은 4개의 교정 standard와 시험편을 제작하였으며, SMAW용접법을 적용하여 폭이 약 15mm인 용접부를 가공하였다. 결함에 대한 탐촉자 반응을 평가하기 위해서 인공결함인 균열

Table 2 Probe coil characteristics

|                 |               |                  |  |                                 |                     |     |
|-----------------|---------------|------------------|--|---------------------------------|---------------------|-----|
| Plus-point coil | 권선수 N (Turns) | 코일 Dia. (OD, mm) | Inductance L in air ( $\mu\text{H}$ ) @ 200kHz | Resistance in air ( $k\Omega$ ) | 공진주파수 in aired with | 비 고 |
|                 | 60            |                  | 4.5  |                                 |                     |     |

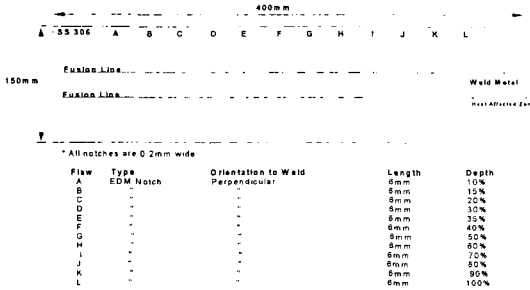


Fig. 6-1 Drawing of specimen #1

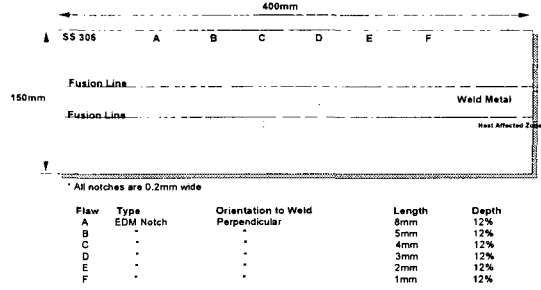


Fig. 6-2 Drawing of specimen #2

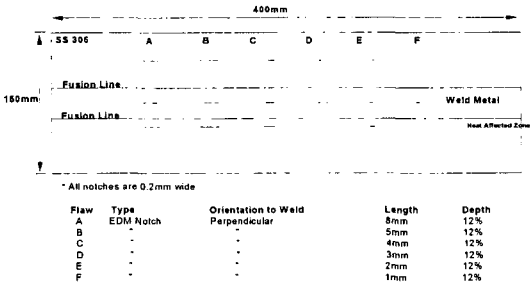


Fig. 6-3 Drawing of specimen #3

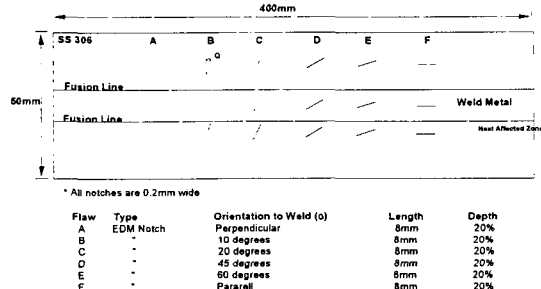


Fig. 6-4 Drawing of specimen #4

성 노치를 용접부, 용접열영향부와 인접 모재에 각각 가공하였으며, 결합의 방향은 용접축에 수직인 노치와 평행한 노치 2가지를 가공하였다. 용접부 크라운을 모재 두께와 동일하게 연삭한 후 용접부, 열영향부 및 모재에 방향과 깊이를 각각 다르게 하여 폭 0.2mm의 균열성 노치를 방전기계가공하였다. 용접축에 수직인 균열성 노치는 Fig. 6-1의 시험편 No.1에서와 같이 10, 15, 20, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100% 깊이로 가공하였으며 모두 폭이 0.2mm, 길이가 20mm이다. 이들 노치중 20, 40, 60, 100% 깊이의 노치번호를 이용하여 Fig. 7에서와 같은 교정 곡선을 작성하였으며, 결합의 방향특성 및 검사정확도 평가에는 10, 15, 30, 35, 50, 60, 70, 80, 90% 노치 신호를 사용하였다. plus-point 탐촉자의 결합 검출능과 크기 측정 정확도를 평가하기 위해서 용접부, 열영향부

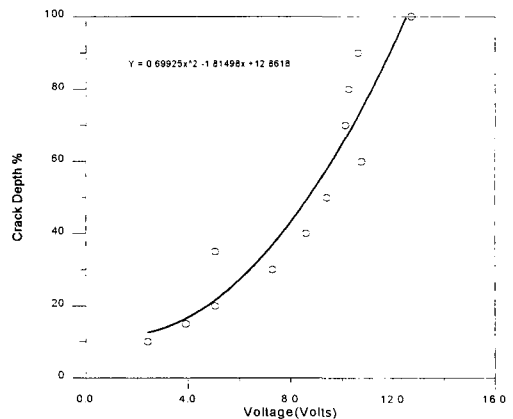


Fig. 7 Plus-point calibration curve of crack depth vs voltage ratio, for 800kHz data

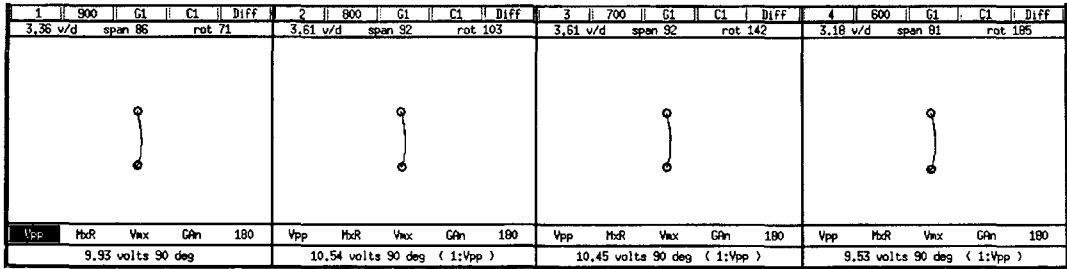


Fig. 8 Frequency response of the plus point coil (at 900, 800, 700, 600 kHz, 60% notch)

및 모재에 가공된 EDM 노치에 대해 각각 총 10회의 스캐닝을 수행하여 신호를 취득하였다.

3.4. 주파수 반응실험

plus-point 탐촉자의 결합에 대한 주파수 반응 특성을 평가하기 위해서 Fig. 8에서와 같이 4개 주파수에서 시험편 #1의 60% 노치결합 신호를 취득하여 각 신호의 진폭을 상호 비교하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 탐촉자 감도

차동형(differential) 모드에서 plus-point 탐촉자의 최대감도는 Fig. 8에서와 같이 800kHz에서 신호전압이 가장 크게 발생하였으며, 탐촉자 스캔 방향에 따른 감도는 Fig. 9에서와 같이 노치방향이 2개의 각 요일 권선 방향에 수직 또는 수평일 경우 즉 스캔방향에 수직 또는 수평일 때 가장 크게 발생하였으며, 권선

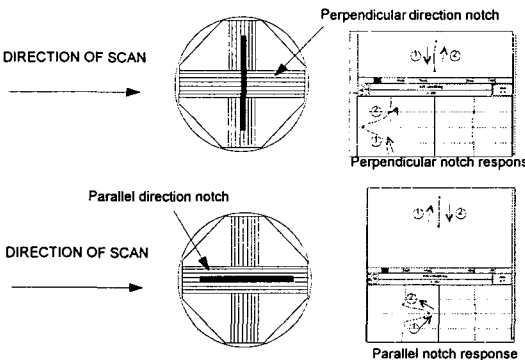


Fig. 9 Directional properties of notch signal

방향에 45°인 균열의 경우 신호가 가장 작게 발생하였다. Fig. 6의 시험편 # 2, 3을 이용하여 plus-point 탐촉자의 결합 검출감도를 측정한 결과 결합위치(용접부, 열영향부 및 모재)에 상관없이 모든 균열성 노치(폭 0.2mm)가 동일한 감도로 검출되었으며, 깊이가 0.5mm이고 길이가 최소 1mm인 노치가 검출되었다.

4.2. 신호해석

차동 모드로 운전되는 plus-point 탐촉자에서 발생하는 와전류신호는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 절대형 모드(absolute mode)에서 발생하는 신호형태로 발생하였다. 와전류신호평가에는 800kHz를 1차 시험 주파수로, 600kHz와 400kHz를 2차 보조 주파수로 사용하였으며, 탐촉자 lift-off, 재질의 전도도와 투자율 변화로부터 발생하는 잡음으로부터 신호의 구분력을 향상시키기 위해서 필터링 기능을 활용하여 S/N비를 개선하였다. 신호평가시 교정시험편내의 노치신호와 유사한 지시들은 유관지시인지 여부를 평가하였다. 이때 신호 방향과 형성과정 등을 기준으로 평가하였으며 2차 보조주파수 신호를 참고로 하였다. plus-point 탐촉자 신호 특성중에서 균열성결합은 Fig. 10에서와 같이 신호의 수직성분과 위상각의 변화가 아주 급격하게 변화하는 반면 평저공(flat bottomed hole) 신호는 Fig. 11에서와 같은 낚시바늘 형태로 완만하게 형성되었다. 이와 같은 신호 형성모양을 기준으로 균열성 노치신호와 평저공신호의 구분이 가능하였다. 또한 결합의 방향성 즉 용접축에 평행한 결합 또는 수직결합의 구분은 Fig. 9에 나타난 바와 같이 리사주 신호의 형성과정(극성)을 기준으로 구분이 가능하였다. 즉 평행한 결합의 형성은 처음에 오른쪽 아래로 시작하여 극점에 도달한 후 다시 왼쪽 위쪽 방향 원점에 이르러 형성을

마치게 되는 반면 수직방향의 결함은 왼쪽 위로 시작하여 극점에 도달한 후 다시 오른쪽 아래 방향으로 진행하여 원점에 이르게 되므로 2가지 방향의 결함의 구분이 가능하게 된다. Plus-point 탐촉자의 결함 방향에 대한 신호발생 특성을 관찰하기 위해서 길이가 20mm이고 깊이가 80%로 동일하나 방향이 원주방향에서 축방향으로 변하는 노치를 스캐닝하여 각 노치의 방향 변화에 따른 신호진폭의 변화를 관찰하였으며 이 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 이 그림에서 신호 전압치(Vpp)를 노치방향의 함수로 나타내었으며, 신호진폭이 최대로 발생하는 노치 방향은 균열의 방향이 2개의 각 코일 권선 방향에 수직일 경우 가장 크게 발생하였다. 튜브 축방향에 45° 각도를 가진 결함 신호진폭은 원주 및 축방향균열 신호진폭의 약 1/3로 감소하는 것을 알 수 있다.

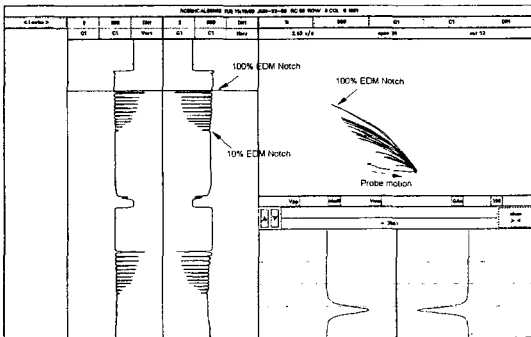


Fig. 10 Plus-point ECT probe signal response from crack-like EDM notches

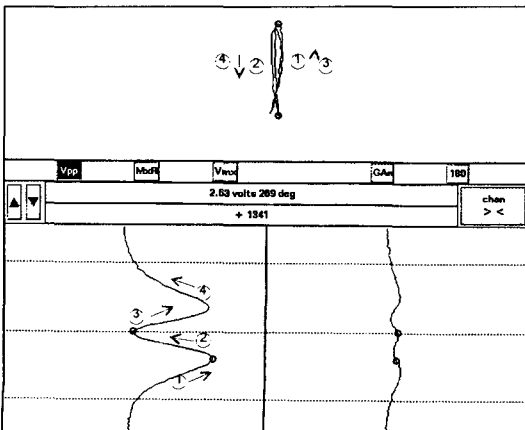


Fig. 11 Plus-point ECT probe signal response from a FBH (flat bottomed hole)

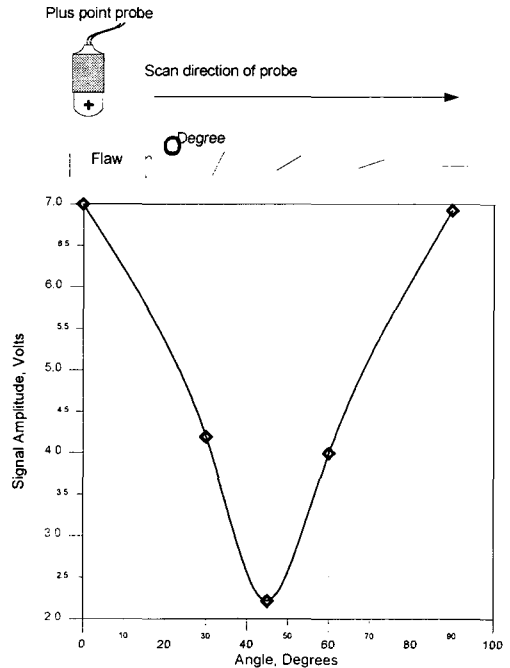


Fig. 12 Plot of signal amplitude vs defect orientation for a differential plus-point probe at 800kHz. EDM notches 80% deep by 20mm long in a SS-306 specimen

4.2.1. 정규화 전압곡선

Plus-point 와전류검사 탐촉자의 특성을 분석하기 위해서 Fig. 13의 정규화 전압곡선을 작성하였다. Lift-off변화, EDM 노치 깊이, 주파수변화 등의 여러가지 시험변수에 대한 plus-point 와전류검사 탐촉자의 반응이 그림에 나타나 있다. 운전 시험주파수 800kHz는 임피던스 전압 곡선상에서 lift-off변화에 의한 신호 구분이 잘되는 knee부분에 위치하고 있다.

4.2.2. 결함 크기 측정

각각 다른 탐촉자로부터 얻어진 신호를 정규화하기 위해서, 각 노치신호에서 얻어진 수직성분 전압치를 60% 깊이 노치에서 얻어진 신호의 평균전압치로 나누어 정규화하였다. 검사 주파수 800kHz에서 깊이가 10%~90%인 노치결함의 깊이를 측정 한 결과  $\pm 3.2\%$

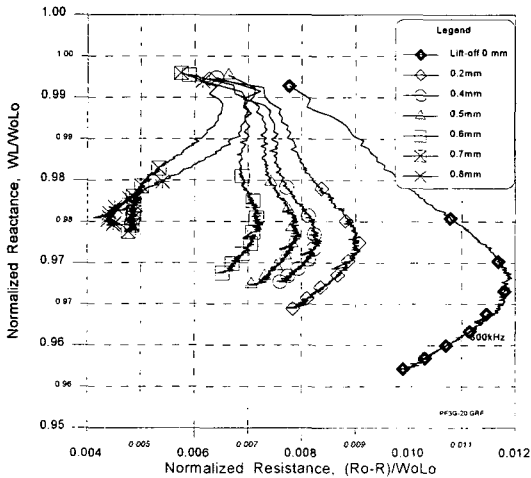


Fig. 13 Normalized impedance diagram of the plus-point probe

오차 이내로 측정이 가능하였으며 이 결과를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14는 검사주파수 800kHz에서 깊이가 10~90%인 노치 결함의 깊이를 측정된 모든 자료에 대한 분석곡선으로서 실선은 최적곡선이다.

## 5. 결 론

Plus-point 와전류탐촉자의 결함검출 크기 측정 특성을 평가하기 위해서 균열성 노치 및 평저공 등의 인공결함을 대상으로 실험을 수행한 결과 와전류검사는 액체침투탐상검사 또는 자분탐상검사 등의 표면 비파괴 검사법의 대체검사법으로 적용이 가능함을 확인하였으며, 다음과 같은 plus-point 와전류탐촉자의 특성을 확인하였다. 따라서 향후 본 연구결과인 plus-point 와전류탐촉자와 검사기법을 활용하여 발전설비 주요 구성기기인 배관, 펌프, 밸브 등의 건전성평가를 위한 비파괴검사에 활용할 예정이다.

- 1) 차동형(differential) plus-point 탐촉자를 사용하여 검출이 가능한 균열성 노치결함의 크기는 길이가 1.0mm이고 깊이가 0.5mm이다.
- 2) 결함신호의 형성 모양을 기준으로 판단하여 균열성 노치결함 신호와 평저공신호의 구분이 가능하였다.
- 3) Plus-point 와전류탐촉자의 최대 감도는 결함이 코일방향에 수직 또는 평행일 경우 발생하며 45°일 때는 약 1/3로 감소한다.

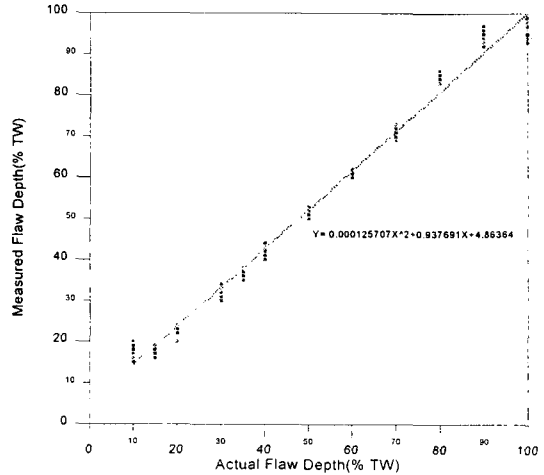


Fig. 14 Crack-like notch depth examination of plus-point ECT probe

## 참고문헌

- [1] American Society of Mechanical Engineers, ASME Code Section, "Rules for inservice inspection of nuclear power plant components", 14p (1989)
- [2] Zetec Inc. USA, MIZ-30 Operation Manual, (1994)