

特輯 : 구조물 경년열화와 수명평가

교류전류를 이용한 새로운 비파괴탐상법의 개발

- 표면결함과 이면결함의 평가 및 실기 부재의 결합 검출 -

김 훈* · 임 재 규**

**Development of the Advanced NDI Technique Using an Alternating Current
-the Evaluation of surface crack and blind surface crack and the detection
of defects in a field component-**

H. Kim and J. K. Lim

Key words : Aging Degradation(경년열화), Field Component(실기 부재), ICFPD(집중유도형교류전위차법), Surface Crack(표면결함), Blind Crack(이면결함), Internal Crack(내부결함)

Abstract

In the evaluation of aging degradation on the structural materials based on the fracture mechanics, the detection and size prediction of defect are very important. Aiming at nondestructive detection and size prediction of defect with high accuracy and resolution, therefore, an Induced Current Focusing Potential Drop(ICFPD) technique has been developed. The principle of this technique is to induce a focusing current at an exploratory region by an induction wire flowing an alternating current(AC) that is a constant ampere and frequency. Defects are assessed with the potential drops that are measured the induced current on the surface of metallic material by the potential pick-up pins.

In this study, the ICFPD technique was applied for evaluating the location and size of the surface crack and blind crack made in plate specimens, and also for detecting the defects existing in valve, a field component, that were developed by SCC etc. during the service. The results of this present study show that surface crack and blind crack are able to defect with potential drop, these cracks are distinguished with the distribution of potential drop, and the crack depths can be estimated with each normalized potential drop that are parameters estimating the depth of each type crack. In the field component, the defects estimated by experiment result correspond with those in the cutting face of the measuring point within a higher sensitivity.

* 비회원, 한국원자력연구소

** 정회원, 전북대학교 기계설계학과

1. 서 론

원자력 및 화력 발전설비, 항공기, 화학 plant 등의 대형기기 구조물의 구성요소는 안전성 및 건전성의 확보를 위해 고도의 신뢰성이 요구되고, 한편으로 안전성과 경제성이 있는 한 장기간 사용되는 것이 요망되어 진다. 그러므로, 재료는 엄격한 품질관리와 각종 시험검사를 기초로 하여 제조되고, 건조 시에는 설계, 용접, 조립 등의 엄격한 각각의 규격 및 기준이 설정되어 진다. 그러나, 각종 환경하에 노출되어 있는 구조물은 장시간의 운전과 함께 재료강도의 감소와 물성의 변화 등으로 대표되는 경년열화의 문제¹⁾가 생기며, 특히 피로나 부식 등에 의하여 발생된 결함을 방지하는 경우, 구조물의 수명이 현저히 감소되므로 경제적 면의 손실뿐만 아니라, 안전성 면에서도 중대한 문제를 초래하게 된다. 따라서 제조단계에서 결함의 검출뿐만이 아니고, 운전개시 후에 있어서도 정기적으로 비파괴검사에 기초를 둔 공용기간중검사(In-Service Inspection)를 실시하여 구조물의 안전성을 진단하고 적절한 보수 및 관리를 하는 것이 요구된다. 특히 사회적으로 큰 관심이 모아지고 있는 원자력발전분야와 같은 구조물의 안전성을 만족시키기 위하여, 각종 부재에 존재하는 작은 결함을 고감도로 검출하고, 고정도로 정량적인 예측을 할 수 있는 비파괴검사법이 개발되어야 한다.

김 등^{2,3,4)}은 국부적인 탐상영역에 전류를 유도하여 결함을 고감도로 검출하고, 그 크기(길이 및 깊이)를 고정도로 예측할 수 있는 집중유도형교류전위차법(Induced Current Focusing Potential Drop, ICFPD)을 개발하여 왔다. 이 탐상법을 이용하여 상자성체에 도입한 표면결함에 대한 평가를 실시하여, 깊이를 평가하는 파라미터를 제안하였다⁵⁾. 또한, 상자성체인 순수 알루미늄과 오스테나이트계 스테인레스강에 도입한 표면결함의 평가를 실시하여, 강의 자성체에 구분없이 본 탐상법에 의하여 결함을 평가할 수 있음을 알았다⁶⁾. 더욱이, 표면경사결함에 대한 평가를 실시하여, 결함의 경사도 및 깊이를 평가하는 파라미터를 제안하고, 임의의 경사결함의 경사도 및 깊이를 예측할 수 있는 교정곡선을 제시하였다⁷⁾.

본 논문은 구조물에 존재하는 표면결함과 이면결함의 검출 가능성과 깊이의 평가 가능 한도를

알아보기 위하여, 강자성체인 A508 Cl. III강에 도입한 표면결함 시험편과 상자성체인 스테인레스 304강에 도입한 이면결함 시험편에 대하여 결합의 평가를 실시하고, 두 결합의 평가결과를 비교 검토하였다. 또한, 사용기간동안 초기 용접결함이 용력부식(SCC) 등에 의하여 성장된 결함이 존재하는 실기 부재인 밸브에 대하여 탐상을 실시하여, 집중유도형교류전위차법의 적용 가능성을 검토한 결과를 기술한다.

2. 원 리

무한히 긴 도선에 전류(I)가 흐를 때, 그 도선 주위에는 자계(H)가 유도된다(Ampere 법칙)^{8,9)}. 이 전류가 시간의 변화와 함께 변화하는 교류의 경우, 유도자계도 시간의 변화와 함께 변화한다. 이와 같이 교류전류가 흐르는 도선을 무한 평판의 도체 위에 올려놓으면, 도선 주위의 자계에 의하여 도체에 전류가 유도되고, 기전력이 생긴다. 이 전류와 기전력을 유도전류와 유도기전력이라 하고, 이 현상을 전자기유도^{10,11)}라 한다. 이 전자기유도에 대한 특성을 간단히 요약하면 다음과 같다.

- 1) 자계는 도선의 주위에 생기고, 그 방향은 시간과 함께 변화한다.
- 2) 유도전류는 자계의 변화를 방해하는 방향으로 생긴다.
- 3) 자계의 크기는 도선에서 거리에 반비례하며, 유도전류는 도선의 바로 밑에서 가장 크고 집중적으로 흐른다.

전자기유도에 의하여 유도된 전류는 교류전류와 같은 성질을 갖고 있으므로, 도체의 얇은 층(skin 또는 layer)에 집중해서 흐른다. 이런 효과를 표피효과(skin effect)^{12,13)}라 하며, 이 효과에 의한 표피두께(skin depth) δ은 다음 식으로 표현된다.

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

여기서, μ : 투자율 σ : 도전율 f : 주파수 ω : 각속도

이 식은 투자율, 도전율 및 주파수의 함수로 되어 있으나, 측정도체의 투자율과 도전율이 일정하므로 표피두께는 전류의 주파수에 의해서 결정된다. 따라서 측정도체와 결함의 종류에 의하여 적절한 주파수의 선택이 필요한 경우도 있다.

이상의 원리를 기초한 본 탐상법의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 유도전류는 유도선의 직하에 큰 전류밀도를 갖고, 국부적인 측정부위만이 유도되어 흐른다. 그리고 표면균열이 존재하는 도체에 적용한 경우, 표면에 유도된 전류는 결함면의 경로를 따라서 흐른다. 이 전류를 일정간격(Δ)의 측정 단자를 이용해서, 결함이 없는 부위의 전위차(V_o)와 결함이 존재하는 부위의 전위차(V_c)를 측정하여 비교함으로써, 결함깊이의 예측이 가능하다.

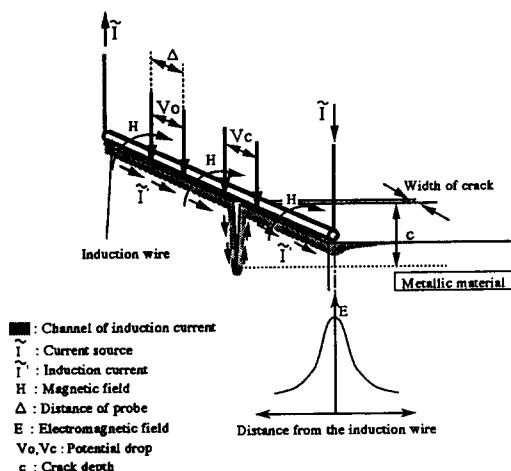


Fig. 1 Principle of the ICFPD. It is seen that a focused induction current is leaded on the surface of metallic material beneath an induction wire, and the potential drops(V_o and V_c) are measured with the potential pick-up pins

3. 측정장치

측정장치는 측정기기 및 측정용 탐촉자로 구성되어 있으며, 그 계통도를 Fig. 2에 나타내었다. 측정기기는 영국의 Matelect사의 CGM5이다. 이 기기는 최대 2 A rms까지의 크기와 0.3 kHz에서 100 kHz 사이의 주파수 대역에서 임의의 일정한 크기와 주파수를 선택하여 교류전류를 공급할 수 있다. 기기에 내장된 lock-in amplifier는 전위차의 위상을 측정하고, 측정된 전위차를 증폭시킨다.

측정용 탐촉자는 측정단자와 유도선으로 구성되어 있고, 그 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. a)는 정면도이고, b)는 유도선이 설치된 저면도(밑면도)이다. 탐촉자의 본체는 절연체인 아크릴수지이고,

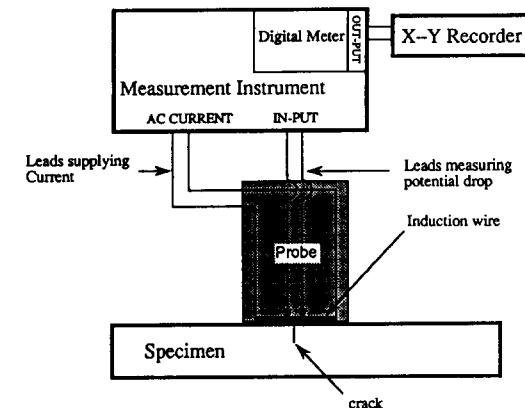
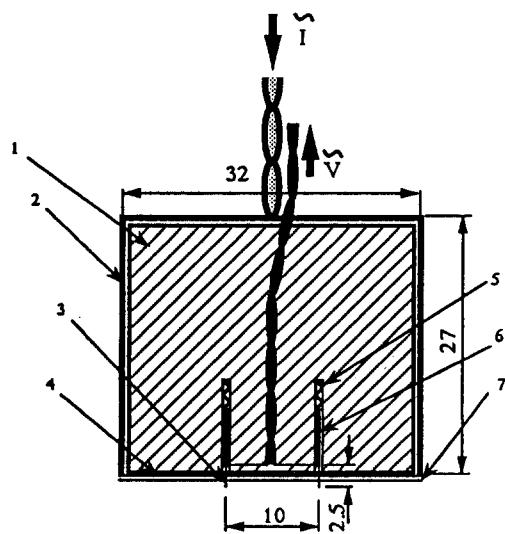


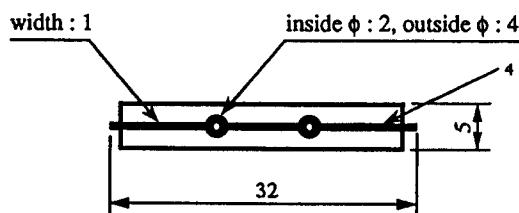
Fig. 2 Block diagram of ICFPD measuring system. The measurement instrument is a commercial thing.

측정단자는 직경 0.3 mm, 길이 2.5 mm의 인청동이다. 단자는 측정시 단자의 선단과 측정물과의 접촉 저항을 작게 하고 접촉 조건을 일정하게 하기 위하여, 압축스프링으로 압축하고 상하 운동이 가능하게 하였다. 단자와 단자 사이의 간격은 약 10 mm이다. 유도선은 두께 약 30 μm 의 동(銅) 박판을 이용해서 폭 약 1 mm, 길이 약 32 mm의 크기로 만들고, 가능한 측정물에 밀착시켜 큰 전류를 유도시키기 위하여 탐촉자의 밑면에 설치하였다. 유도선은 측정물과 전기적 절연을 시키기 위하여 절연체를 얇게 피복 하였다. 또한, 전류밀도가 최대로 유도되는 유도선 바로 밑의 전위차를 측정하기 위하여, 단자가 유도선의 폭 중앙에 위치하도록 Fig. 3 b)와 같이 유도선의 일부분을 원형으로 만들었다. 유도선 이외의 도선은 측정물에 전류의 유도를 방지하기 위하여 전자기적 절연도선(electromagnetic shield wire)을 사용하였다. 절연도선이 이루는 회로의 크기는 32×27(mm)이며, 회로의 방향은 측정단자와 평행하게 하였다.

측정방법은 탐촉자의 밑면에 설치된 유도선에 일정한 크기와 주파수를 갖는 전류를 흐르게 하여 측정물의 국부적인 영역에 전류를 유도시키고, 이 전류를 측정단자를 이용하여 전위차로 측정한다. 이 때, 유도선은 결함의 길이 방향에 대하여 직각으로 놓이게 하고, 측정용 탐촉자를 결함의 길이 방향에 대하여 직각방향으로 이동시킨다.



a) Cross section of the front side



b) Induction wire on the bottom side

- 1 : Acryl
- 2 : Electromagnetic shield wire
- 3 : Pick-up pin
- 4 : Induction wire
- 5 : Pressure spring
- 6 : Guide of pick-up pin
- 7 : Electric shield film

Fig. 3 Scheme of the potential pick-up probe used in ICFPD

4. 실험 방법

본 실험에 사용된 재료는 구조용압력용기용 강재인 A508 Cl.III강과 원자로 및 화학 플랜트의 배관용 강재에 많이 사용되는 스테인레스 304강이다. 이들 강은 비투자율이 각각 300과 1.02인 강자성체와 상자성체이고, 각 강의 화학적 조성 및 실온에서의 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 실험편은 직경 0.2 mm의 와이어방전가공기를 이용하여 폭 약 0.3 mm의 깊이가 다른 2차원 결함을 도입하였다. Fig. 4는 가공된 각 시험편의 형상과 크기 및 결함의 깊이를 나타낸 것이다. a)는 A508 Cl. III강의 표면결합 시험편이고, b)는 스테인레스 304강의 이면결합 시험편이다.

측정 조건은 주파수 0.3 kHz, 전류 2 A rms로 하였고, 이득은 측정 기기가 허용하는 최대 전위차를 얻을 수 있도록 설정하였다. 결합의 존재에 의하여 변화하는 표면의 유도전류 분포를 조사하기 위하여, 결합에서 측정단자 사이의 중앙까지의 거리가 10 mm이상인 결합이 없는 부위에서는 5 또는 10 mm씩, 그 이하의 부위에서는 1 또는 2 mm씩 탐촉자를 이동하면서 전위차를 측정하였다. 이면결합의 시험편은 결합이 존재하는 면의 반대 면에서 측정하였다.

Table 2. Mechanical properties of A508 Cl. III steel and SUS 304 steel

(at room temperature)

Metal	Yield stress (Mpa)	Tensile stress (Mpa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
A508 Cl.III	449	587	26.2	70.8
SUS 304	205	520	40	-

Table 1. Chemical composition of A508 Cl. III steel and SUS 304 steel

Steels	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	(wt %)
A508 Cl. III	0.21	0.20	1.45	0.003	0.003	0.78	0.15	0.48	0.05	0.0088	
SUS 304	0.08	1	2	0.045	0.003	10.5	20	-	-	-	

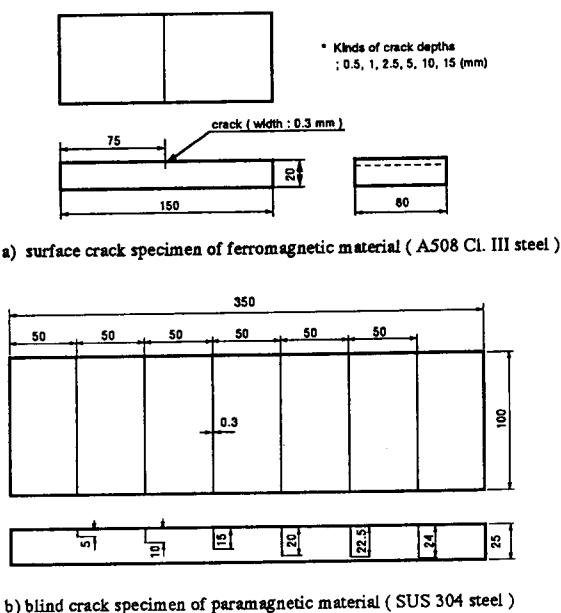


Fig. 4 The geometry of each specimen

5. 실험결과 및 고찰

5. 1 강자성체에 도입한 표면결합의 평가

표면결합의 깊이에 의하여 변화하는 표면의 유도전류 분포를 조사하기 위하여, 결합 위치를 중심으로 좌우 5 cm 구간을 전술한 간격으로 탐촉자를 이동하면서 각 위치의 전위차를 측정하였다. 측정전위차는 결합의 영향이 없는 부위의 평균전위차($V_{avg.}$)로 무차원화시키고, 결합위치에서 측정위치까지의 거리에 대하여 Fig. 5에 나타내었다. 전위차는 표면결합의 존재에 의하여 크게 변화하고 있으며, 탐촉자의 측정위치에 따라 결합이 없는 부분(①), 결합단부(②) 및 결합부(③)의 3부분으로 나눌 수 있다(Fig. 6). Fig. 6은 탐촉자의 측정위치와 전위차분포와의 관계를 도식적으로 나타낸 것이다.

탐촉자가 결합단부에 위치하는 경우, 측정단자의 하나가 결합의 단에 가까이 접근할 수록 전위차가 점점 감소하고, 결합이 깊을 수록 낮은 전위차로 측정되고 있다. 결합부의 전위차 분포의 형상은 결합이 측정단자의 중앙에 위치할 때의 전위차를 중심으로 대칭적인 U자형이며, 결합이 깊을

수록 큰 전위차로 측정되고 있다. 이상과 같이 결합단부와 결합부의 전위차분포는, 전위차가 일정하게 측정되는 결합이 없는 부분의 전위차와 비교하여 볼 때, 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 결합의 존재와 결합의 깊이에 의존하여 유도전류의 밀도와 흐름 및 자속 누설^[4] 등이 크게 변화하고 있음을 알 수 있다.

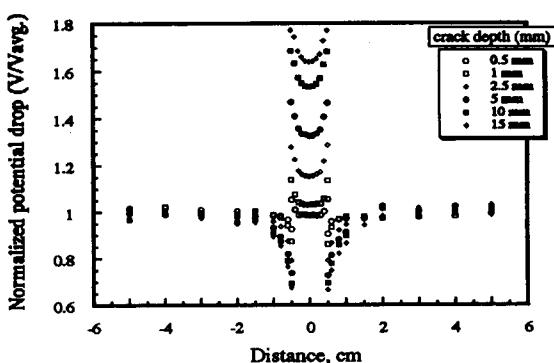


Fig. 5 The distribution of the normalized potential drop for each surface crack in A508 Cl. III specimens at the frequency of 0.3 kHz

이상의 전위차분포에서 결합에 의하여 전위차가 충분히 변화되어진 결합부의 최대 전위차($V^+_{\Delta z}$)와 결합단부의 최소 전위차($V^-_{\Delta z}$)를 취하여, 전위차비($V^-_{\Delta z}/V^+_{\Delta z}$)_{max}를 구하였다. 이 전위차비를 결합의 깊이에 대하여 나타낸 것이 Fig. 7이다. 전위차비는 균열깊이의 증가에 따라 곡선적으로 증가하고 있고, 결합 깊이의 변화에 따라 명확히 그 차를 보이고 있다. 따라서, 이 전위차비는 결합을 평가하는 파라미터로 이용할 수 있고, 본 선도를 이용하여 임의의 결합에 대한 깊이 예측이 가능하다. 특히, 깊이가 얕은 결합에서 큰 접선 기울기를 이루고 있어, 얕은 결합을 보다 정확히 예측할 수 있다.

5. 2 상자성체에 도입한 이면결합의 평가

이면결합에 의하여 변화하는 표면의 유도전류 분포를 조사하기 위하여, 결합 위치를 중심으로 좌우 2.5 cm 구간을 전술한 간격으로 탐촉자를 이동하면서 각 위치의 전위차를 측정하였다. 이 측정전위차를 결합의 영향이 없는 부위의 평균 전위차($V_{avg.}$)로 무차원화시키고, 이면 결합의 위치에서

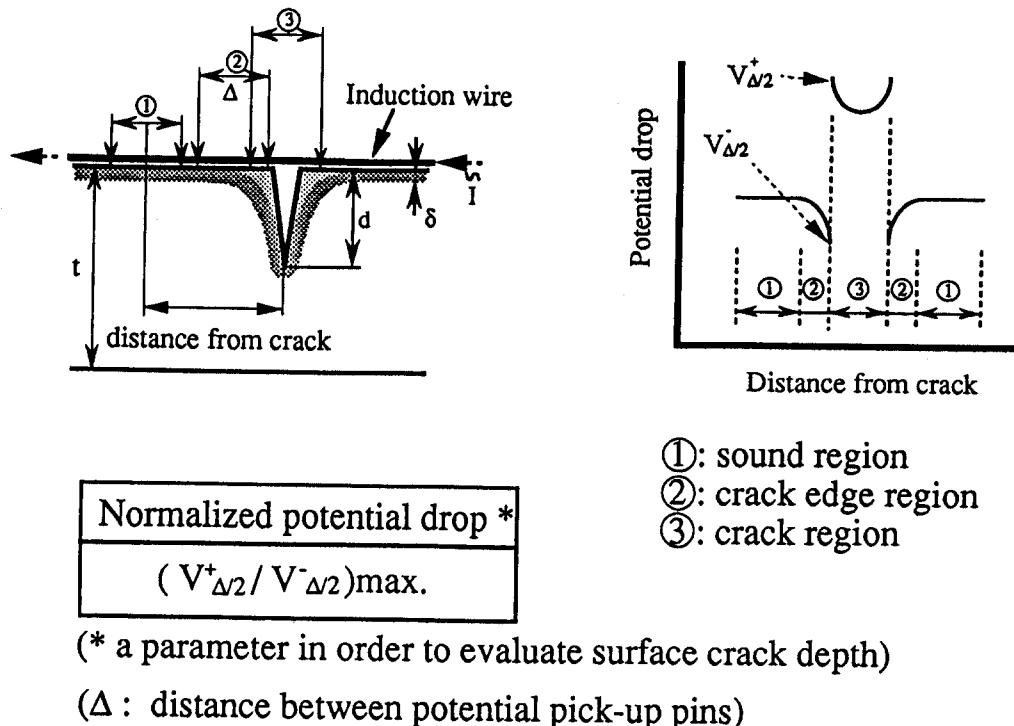


Fig. 6 Scheme of the distribution of potential drops for each measuring point in the case of surface crack

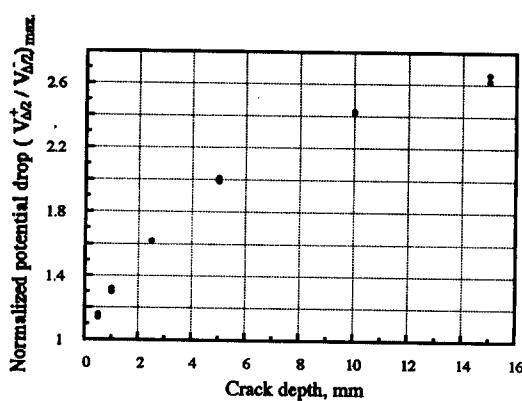


Fig. 7 The relationship between the normalized potential drop $(V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2}^-)_{max}$ and the depth of surface crack for A508 Cl. III specimen at the frequency of 0.3 kHz

측정위치까지의 거리에 대하여 Fig. 8에 나타내었다. 전위차분포는 탐촉자의 측정 위치에 따라 결합이 없는 부분(①)과 결합부(②)로 나눌 수 있다

(Fig. 9). 결합이 없는 부위의 전위차는 거의 일정하게 측정되고 있다. 결합부에서는 탐촉자가 결합 위치에 가까이 접근 할수록 전위차가 점점 증가하여 결합 위치에서 최고 전위차로 측정되며, 이 위치를 지나면 전위차는 점점 감소되고 있다. 또한, 결합 깊이의 변화에 대하여 전위차는 명확한 차를 보여주고 있고, 얕은 결합($5/25(m/m)$)까지 검출되는 것을 알 수 있다. 깊은 결합의 경우, 좌우 10 mm 위치에서 전위차가 감소하고 있다. 이에 대한 이유는 명확히 알 수 없으나, 유도전류의 흐름이 결합으로 인하여 크게 변화하거나, 측정 면에서 결합 선단까지의 두께(uncracked ligament)가 표피두께보다 얇아 자속의 누설현상¹⁴⁾에서 기인되는 결과라고 판단된다. 각 결합의 전위차분포는 결합 위치를 변곡점으로 좌우 대칭을 이루고 있다. 이 이면결합의 전위차분포를 표면결합의 전위차분포(Fig. 5)와 비교하여 볼 때, 그 분포 형상이 명확하게 구별된다. 따라서, 표면에 유도된 전류는 결합의 종류에 따라서 다르게 변화되고 있음을 알 수 있고, 측정된 전위차분포로 부터 결합의 종류의 파악이

가능하다.

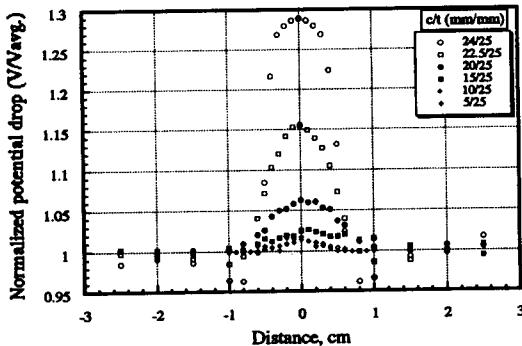


Fig. 8 The distribution of the normalized potential drop for each blind crack in SUS 304 specimen at the frequency of 0.3 kHz

Fig. 9는 이상의 결과를 기초로 하여 예측한 표피두께와 이면결합과의 관계를 모식적으로 나타낸 것이다. 스테인레스 304강은 비투자율이 1.02이며, 도전율이 $1.43 \times 10^7 (\Omega^{-1}/\text{m})$ 인 상자성체이다. 본 연구의 측정조건인 0.3 kHz의 주파수에서 표피두께(skin depth)는 식 (1)에 의하여 24.1 mm이다. 이는 비투자율과 도전율이 각각 300 및 $0.6 \times 10^7 (\Omega^{-1}/\text{m})$ 인 A508 Cl. III강(강자성체)의 표피두께에 비하여 매우 두껍다. 따라서 유도된 전류는 표면에서 보다 깊은 곳까지 흐르게 되며, 이 때 유도전류의 흐름과 밀도는 내부 또는 이면에 존재하는 결함에 의하여 변화하게 된다. 이와 같이 변화하는 표면의 전류를 측정하므로써, 내부결함 및 이면결합의 검

출이 가능하다. 그러나, 표피두께는 측정조건인 주파수에 크게 의존하므로, 측정물의 종류 및 두께, 검출결합의 종류에 따라 주파수의 선택이 필요하다.

이상의 전위차분포에서, 결합부의 최대전위차(V_o)와 결함이 없는 부분의 평균전위차(V_{avg})의 전위차비(V_o/V_{avg})를 구하고, 이 전위차 비를 이면결합의 깊이(c)와 시험편 두께(t)와의 비(c/t)에 대하여 나타낸 것이 Fig. 10이다. 전위차비는 결합이 깊을수록 크고, 얕을수록 작게 측정되며, 곡선적으로 변화하고 있다. 한편, 10/25(mm/mm)이상의 결함은 결합의 깊이 변화에 따라 전위차비의 차가 뚜렷하며, 그 이하의 얕은 결함은 전위차비의 차가 거의 없다. 5/25(mm/mm)의 결함은 비록 낮은 전위차비를 나타내지만, 깊이의 평가가 가능함을 알

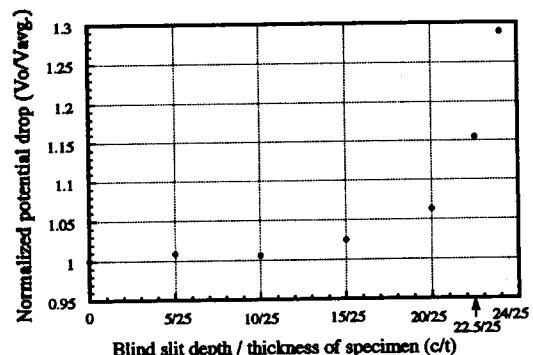
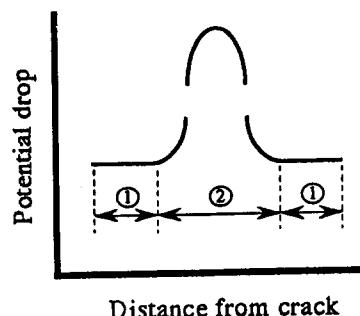
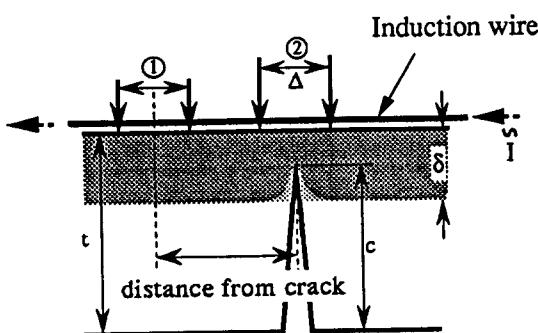


Fig. 10 The relationship between the normalized potential drop(V_o/V_{avg}) and the depth of blind crack for SUS 304 specimen at the frequency of 0.3 kHz



① : sound region
② : crack region

Fig. 9 Scheme of the relationship between blind crack and skin depth(δ), and the distribution of potential drop for each measuring points

수 있다.

이상으로부터, 본 탐상법에 의한 전위차의 측정으로 이면결합의 탐상이 가능하고, 전위차비(V_o/V_{avg})는 결합의 깊이 변화에 따라 차이를 나타내므로, 깊이를 예측하는 파라메터로 사용할 수 있음을 알았다. 또한 결합의 깊이와 전위차비와의 선도를 이용하여 임의의 이면결합의 깊이 또는 측정 면에서 결합 선단까지의 두께를 정량적으로 예측할 수 있다.

평가를 실시한 두 결합의 측정 결과로부터, 본 탐상법은 구조물에 존재하는 임의 결합의 탐상 및 위치의 확인뿐만이 아니고, 표면결합과 이면결합의

종류를 구분할 수 있다. 또한, 각 결합의 깊이 또는 측정 면에서 결합 선단까지의 두께(uncracked ligament)는 각 결합의 평가 파라메터와 교정곡선을 이용하여 정량적으로 예측할 수 있다. Fig. 11은 구조물에 존재하는 임의의 표면결합과 이면결합을 정량적으로 평가하는 과정을 나타낸 계통도이다.

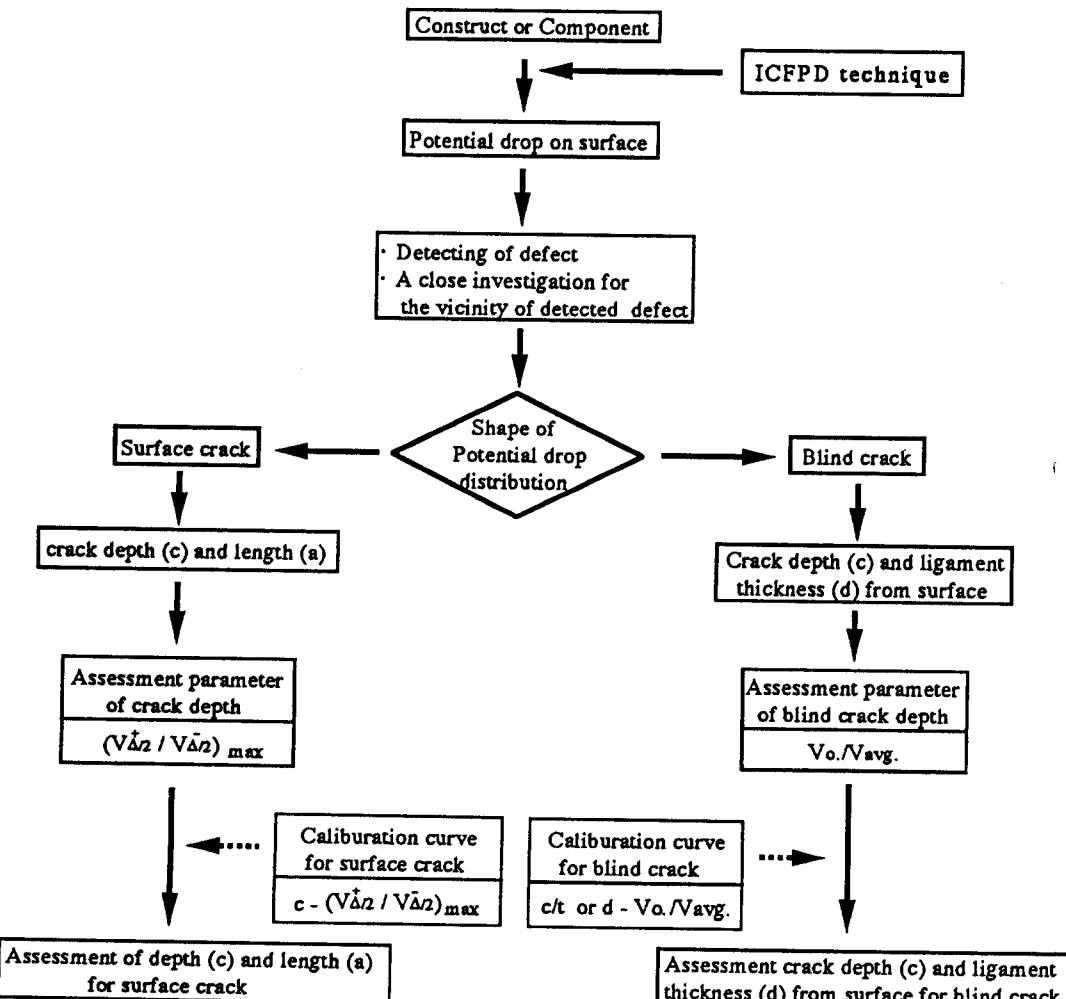
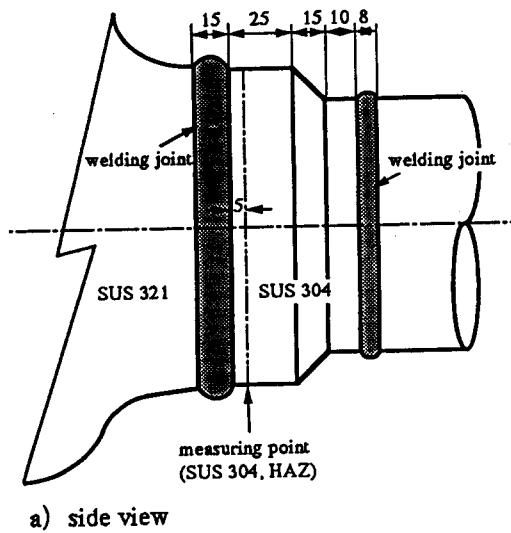


Fig. 11 Flow chart estimatieng a surface crack and a blind crack by ICFPD technique

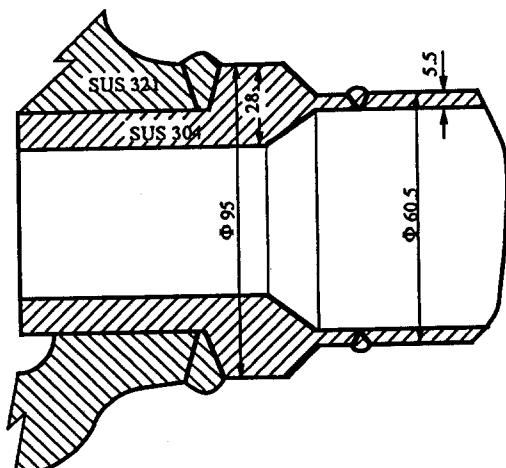
6. 실기 부재의 결합 검출

6. 1 부재의 재질 및 실험방법

측정한 실기 부재는 화학 plant에서 사용되는 밸브이며, 측정 부위의 개략도 및 단면도를 Fig. 12에 나타내었다. 본 밸브의 각 부위는 부하 인자 및 환경 인자 등을 고려하여 선택되어진 재질을 사용한 것으로, 밸브의 본체 및 파이프의 재질은 각각 스테



a) side view



b) cross sectional view

Fig. 12 The side view and the cross sectional view for the measuring region of valve

인레스 321강과 스테인레스 304강이며, 두 부위는 용접으로 접합하였다. 이 용접 부위는 용접에 의하여 발생한 초기 결함이 응력부식(SCC) 등에 의하여 성장한 표면결함, 내부결함 및 이면결함이 존재한다.

부재의 측정 위치는 원통형으로 되어 있어, Fig. 3의 탐촉자에 의한 측정은 불가능하므로, 유연성이 있는 유도선과 범용 탐촉자를 이용하였다. 이 유도선은 유도부의 길이가 70 mm이고, 그 형상은 Fig. 3 b)의 유도선과 같다. 탐촉자의 단자 간격은 10 mm이다. 부재의 측정 위치는 용접부의 단에서 5 mm 떨어진 스테인레스 304강의 용접열영향부 (HAZ)이며, 원주방향으로 측정하였다. 측정시 유도선과 탐촉자는 5 mm간격으로 이동하였고, 결함이 검출된 부분은 1 mm간격으로 전위차를 측정하였다. 측정면은 용접으로 인하여 생긴 산화막과 불순물을 제거하기 위하여, #100의 사포로 건식 연마하였다. 측정 조건은 주파수 0.3 kHz, 전류 2 A rms이다.

6. 2 결함의 평가

Fig. 13은 측정한 전위차를 측정 위치의 원주방향의 각도에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 약 75°, 83°, 98° 및 155°의 위치에 결함이 존재하는 것을 알 수 있다. 이 중 75° 위치의 전위차분포는 표면결함의 전위차분포(Fig. 5)와 유사한 형상을 하고 있어 표면결함임을 예측할 수 있다. 그러나 전위차의 형상이 비대칭이므로 예각의 경사표면결함으로 판단된다(참고문헌 7) 참조). 98°와 155° 위치의 전위차분포는 이면결함의 전위차분포(Fig. 8)와 형상이 같아 이면결함으로 판단할 수 있다. 83° 위치는 75° 위치의 전위차분포의 영향으로 결함의 예측이 불가능하다. 이상의 예측 결과를 확인하기 위하여 부재의 측정 위치를 절단하였다. Fig. 14는 절단 면에서 결함이 확인된 부분의 사진이다. 절단 면에서 확인된 결과는 측정에 의하여 예측된 결함의 위치와 결함의 종류가 거의 일치하고 있다. 예측 결과와 절단 면의 결과를 비교하여 보면, 75° 위치는 측정 면에 수직한 표면결함이 두 개가 존재한다. 이 위치의 전위차분포의 비대칭은 85° 위치의 내부결함과 두 개의 표면결함이 가까운 위치에 존재하여 생기는 영향의 결과이다. 83°와 98° 위치의 결함은 내부결함으로 확인되었으며, 전위차분포는 이면결함의 전위차분포와 동일한 형상

을 보이고 있음을 알 수 있다. 이 두 위치의 전위차분포가 비대칭형으로 측정되는 것은 각위치의 내부결함과 75°위치의 표면결함의 영향이 중첩된 것으로 생각된다. 155°부근은 150°와 170°사이에 4개의 내부결함이 존재한다. 이 위치의 전위차분포가 하나의 결함으로 측정되는 이유는 결함의 분포 간격이 탐촉자의 단자 간격보다 좁기 때문에 생기는 영향으로 판단된다.

이상의 결과에서 예측된 결함과 절단 면에서 확인된 결함은 공학적인 면에서 충분한 정확도로 일치하고 있다고 판단되어, 본 탐상법의 유효성을 검증할 수 있었다.

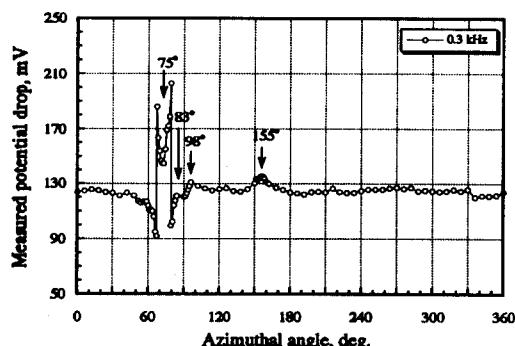


Fig. 13 The distribution of the measured potential drop for valve at the frequency of 0.3 kHz

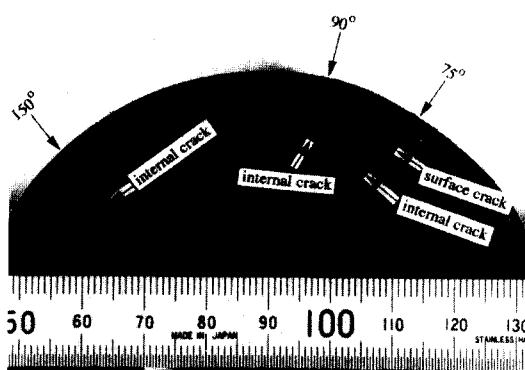


Fig. 14 Photograph of a cutting face in the measuring point of valve. There are surface cracks and internal cracks

7. 결 론

교류전류를 국부적인 탐상영역에 집중적으로 유도하여, 결함을 비파괴적으로 검출하고, 그 크기를 예측하는 집중유도형교류전위차법을 개발하였다. 본 탐상법을 이용하여 강자성체에 도입한 표면결함과 상자성체에 도입한 이면결함에 대하여 평가를 실시하였다. 또한 실기 부재인 벨브의 용접부 부근에 발생한 결함을 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 집중유도형교류전위차법은 표면결함 및 이면결함의 검출이 가능하고, 측정된 전위차분포의 형태로부터 결함의 종류를 구분할 수 있다.

2. 표면결함의 경우, 결함 부근의 전위차비($V^-_{\Delta z}/V^-_{\Delta z, \text{max}}$)는 결함 깊이의 평가 인자로 사용할 수 있고, 얇은 깊이의 결함에 대하여 고감도의 정량적 예측이 가능하다.

3. 이면결함의 경우, 전위차비 (V_o/V_{avg})는 이면결함의 깊이 또는 결함의 선단에서 측정 면까지의 두께(uncracked ligament)를 평가하는 인자로 사용할 수 있고, 교정 곡선을 이용하여 임의의 이면결함을 정량적으로 평가할 수 있다.

4. 실기 부재의 평가에 있어서, 측정 위치에 표면결함 및 내부결함이 존재하고 있음을 확인하였고, 결함의 종류와 위치가 절단 면에서 확인된 결함과 비교하여 공학적 정확도로 일치하였다.

참 고 문 헌

- 庄子 哲雄：“機器構造部材の經年劣化と壽命豫測”，日本機械學會材料力學部門講演 會講演論文集(1993), pp. 265–268.
- 金 壱, 庄子 哲雄：“誘導型交流電位差法による新しい探傷技術の開発”，日本材料學會, 第4期 講演論文集(1993), pp. 1–3.
- Kim, H. and Shoji, T., : “Nondestructive Evaluation of Surface Defect Shape and Size by the Induced Current Focusing Potential Drop”, *The 71st JSME Spring Annual Meeting Proceeding*(1994), pp. 586–588.
- 金 壱, 庄子 哲雄：“集中誘導型交流電位差法に関する研究－缺陷寸法の評價精度 および周波數依存性の検討－”，日本材料學會論文集, Vol.

- 43, No. 494(1994), pp. 1482–1488
5. 金 壱, 庄子 哲雄：“集中誘導型交流電位差法に關する研究－探觸子改良および2次元表面缺陷への適用”－, 日本材料學會論文集, Vol. 44, No. 500(1995), pp. 669–674
 6. 金 壱, 庄子 哲雄, 鄭 世喜：“집중유도형교류 전위차법에 의한 강자성체 및 상자 성체의 2 차원 표면결합의 비파괴평가”, 大韓機械學會論文集, Vol. 19, No. 5(1995), pp. 1202–1210
 7. 金 壱, 庄子 哲雄：“集中誘導型交流電位差法による傾斜缺陷の評價”, 日本非破壊 檢查論文集, 9월호 개제예정(1995).
 8. Hayt, W. H., : Engineering Electromagnetic, 5th edition, McGraw-Hill(1989), p. 233
 9. Kraus, J. D., : Electromagnetic, third edition, McGraw-Hill(1984), p. 169
 10. Hayt, W. H., : Engineering Electromagnetic, 5th edition, McGraw-Hill(1989), p. 321
 11. Kraus, J. D., : Electromagnetic, third edition, McGraw-Hill(1989), p. 326
 12. Hayt, W. H., : Engineering Electromagnetic, 5th edition, McGraw-Hill(1989), p. 356
 13. 日本非破壊検査協会編, 新非破壊検査便覧, 日本理工出版會(1989), p. 383
 14. Mirshekar-Syahkal, D., Collins, R. and Michale, D. H., : “Development in Surface Crack Detection by the A.C. Field Technique”, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 4, A(1985), pp. 349–357