

<論 文>

집중유도형 교류전위차법에 의한 강자성체 및 상자성체의 2차원 표면결함의 비파괴평가

김 훈* · 庄子哲雄** · 정세희***

(1994년 8월 8일 접수)

Nondestructive Evaluation of 2-Dimensional Surface Crack in Ferromagnetic Metal and Paramagnetic Metal by ICFPD Technique

H. Kim, T. Shoji and S. H. Chung

Key Words : Nondestructive Evaluation(비파괴평가), ICFPD(집중유도형 교류전위차법), Ferromagnetic Material(강자성체), Paramagnetic Material(상자성체), 2-Dimensional Surface Crack(2차원 표면결함)

Abstract

Aiming at nondestructive evaluation of defect with high accuracy and resolution, ICFPD(Induced Current Focusing Potential Drop) technique was newly developed. This technique can be applied for locating and sizing of defects in components with not only simple shape such as plain surface but also more complex shape and geometry such as curved surface and dissimilar joint. This paper describes the principle of ICFPD technique and also the results of 2-dimensional surface crack in ferromagnetic metal(A508 Cl. III steel) and paramagnetic metal(pure aluminum and stainless 304 steel) measured by this technique. Results are that surface defects in each specimen are detected with the difference of potential drop, and potential drops are distributed a similar shape for each metal and each depth. The normalized potential drop $(V_{d12}/V_{d2})_{max}$ in the vicinity of defect is varied with the depth of defect. Therefore, ICFPD technique can be used for the evaluation of defect not only in ferromagnetic metal but also in paramagnetic steel.

1. 서 론

비파괴검사법은 구조물의 소재 및 부품 또는 부재에 존재하는 결함, 재질의 이상 또는 재질의 경년열화 등을 파괴하지 않고 검사하는 방법이다. 이들 검사법은 전자선, 중성자선, 기계적 진동, 자기, 열, 전기 등의 물리적 현상을 이용하는 것으로,

방사선 투과시험(RT), 초음파 탐상시험(UT), 자기 탐상시험(MT), 침투 탐상시험(PT), 과류탐상시험(ET) 등이 있다. 이 이외 검사법으로는 누설 시험법, AE법, 전기저항시험법(전위차법) 등이 개발되어 이용되고 있다.⁽¹⁾ 이 시험법 중 표면결함의 깊이를 예측하는 검사법으로는 Dover 등에 의해서 개발된 균열성장 게이지(crack growth gage)를 이용한 교류전위차법(ACPD)⁽²⁻⁴⁾이 있다. 이 검사법은, 측정물에 교류전류를 직접 흘려주는 방법으로, 가능한 전류가 측정물의 표면에 일정하게 분포하도록 하는 것을 전제로 하고 있으며, 실험실 범위 내

* 정희원, 한국원자력연구소

**日本 仙臺市 青葉區 東北大學 工學部

***정희원, 전북대학교 정밀기계공학과

에서 표면균열의 깊이 측정에 커다란 진전을 보여 왔다. 그러나, 이 검사법은 결함의 위치, 크기 및 형상의 검출 정도에 있어서 만족할 정도로 충분하다고 할 수 없으며, 측정재질에 대한 연구 또한 그다지 많지 않다.

김과 Shoji⁽⁶⁻⁷⁾는 구조물에 존재하는 결함을 탐상하고, 더욱이 그 크기를 계측하는데 있어서 종래의 교류전위차법이 포함하고 있는 문제점을 해결하기 위해, 교류전류가 탐상영역에 집중적으로 유도되어 결함을 평가할 수 있는 집중유도형 교류전위차법(induced current potential drop, ICFPD)을 개발하여 왔다.

본 논문은 이 비파괴 탐상법을 이용하여, 구조물의 각종 강재에 존재하는 3차원 균열을 탐상하고, 그 크기(깊이 및 길이)를 평가하기 위하여, 2차원 결함을 도입한 강자성체 및 상자성체의 시험편에 대하여 결함평가를 실시하였다. 본 방법이 일반적인 강자성체 뿐만이 아니고, 상자성체에 존재하는 결함에 대해서도 탐상이 가능하고, 그 크기(특히, 결함깊이)를 계측할 수 있는 보다 우월한 비파괴 검사법임을 명확히 한다.

2. 원 리

무한히 긴 도선에 전류 I가 흐를 때, 도선의 주위에는 자계 H가 유도된다. 이 도선을 무한 평판의 도체에 올려놓으면, 도선 주위의 유도자계에 의해 도체에 전류가 유도된다. 이 때 유도자계가 시간적으로 변화하면, 그 변화의 극히 짧은 시간에 도체에 전류가 유도되고 기전력이 생긴다. 이 전류와 기전력을 유도전류(induced current)와 유도기전력(induced electromotive force)이라 하고, 이런 현상을 전자기유도⁽⁸⁾라 한다. 이 전류는 도선의 바로 밑에서 보다 큰 전류를 나타내고, 도선에서 거리에 반비례한다.^(8,9) 즉, 전류는 도선의 바로 밑에 집중적으로 유도되는 것이 된다. 유도전류는 교류전류의 성질을 갖으므로, 표피효과(skin effect)에 의해서 도체의 표면층(skin 또는 layer)에 집중해서 흐르고, 이 표피두께(skin depth) δ ^(10,11)는 다음식으로 나타낸다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \tag{1}$$

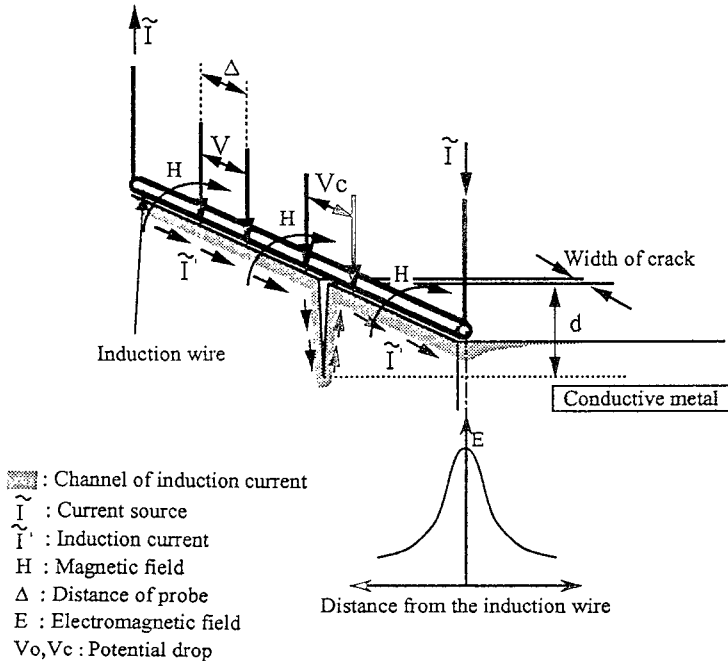


Fig. 1 Principle of the ICFPD. It is seen that a focused induction current is led on the surface of metallic material beneath an induction wire, and the potential drops(V_0 and V_c) are measured with a potential pick-up probe of which width is Δ

여기서, δ : 표피두께

f : 주파수

σ : 도전율

μ : 투자율

이 식은 투자율, 도전율 및 주파수의 함수이나, 측정도체의 투자율과 전도율은 거의 일정하므로, 표피 두께는 측정주파수에 의해서 결정된다. 따라서 측정도체와 결합깊이에 의해 적절한 주파수의 선택이 필요한 경우도 있다.

측정도체의 표면에 결합이 존재하는 경우, 유도전류는 도체의 표면과 결합의 파면을 따라서 흐르며, 이 때 유도전류는 도체의 표면과 결합의 파면에 동일 형태로 분포되어 있다고 가정한다. 이 유도전류를 간격이 l 인 단자에 의해 전위차를 측정하면, 결합이 없는 곳의 전위차(V_0)는 단자 간격에 비례하고, 결합이 존재하는 곳의 전위차(V_c)는 단자 간격과 균열깊이의 2배의 합에 비례한다. 표피 두께가 무한히 얇은 이상적인 모델의 경우, 결합깊이는 측정전위차의 관계에서 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$d = \frac{4l}{2} \left(\frac{V_c}{V_0} - 1 \right) \quad (2)$$

따라서 도체의 표면에 흐르는 전류에 의한 전위차를 정확하게 측정하면, 다른 참고 전위차가 없어도 결합깊이의 측정이 가능하다. 그러나, 실제의 표피 두께는 유한하므로 이 식은 정확하다고 할 수 없다. 이와 같은 원리를 이용한 집중유도형 교류전위차법의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

3. 실험방법

3.1 시험편

실험에는 깊이가 다른 2차원 표면결합이 도입된 평판 시험편을 이용하여 측정하였다. Fig. 2는 각 시험편의 형상 및 크기를 나타낸 것이다. 시험편은 강자성체인 A508Cl. III 강(경수로 압력용기 용강재) 및 상자성체인 스테인레스 304강과 99.5% 순수 알루미늄이다. 이들 시험편에 도입된 2차원 표면결합은 방전가공기에 의하여 가공하였다. 이들 재료의 화학적 조성 및 실온에서 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

3.2 측정용 탐촉자

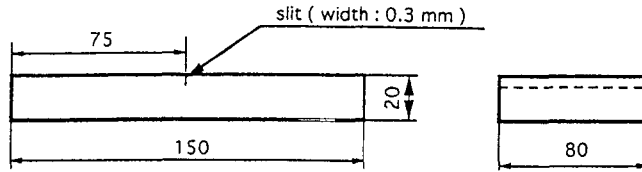
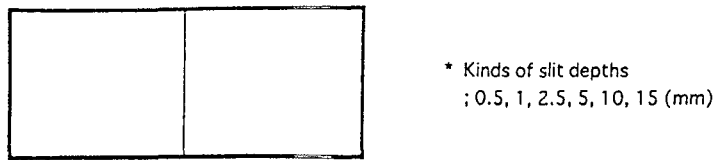
본 실험에 이용된 탐촉자의 정면도와 저면도(밀

면도)를 Fig. 3에 나타내었다. 탐촉자의 몸체는 절연체인 아크릴수지를 이용하였고, 측정단자는 직경 0.3 mm, 길이 2.5 mm의 인칭동을 이용하였다. 단자는 접촉저항을 작게하고 접촉조건을 일정하게 하기 위하여, 압축용 용수철을 이용하여 압축하였으며, 상하 왕복운동이 가능하게 하였다. 단자와 단자 사이의 간격은 약 10 mm이다. 유도선은 두께 약 30 μ m의 동박판을 이용하였고, 크기는 폭 1 mm, 길이 32 mm로 하였다. 이 유도선은 측정물과 접촉을 방지하기 위하여 절연재를 얇게 피복하였고, 가능한 측정물에 큰 전류를 유도시키기 위하여, 탐촉자의 저면에 설치하였다. 또한, 유도선의 바로 밑에 큰 전류가 유도되기 때문에, 측정단자가 유도선의 중앙에 위치하도록 직경 1 mm의 구멍을 만들고, 유도선의 바로 밑에 유도되는 최대 전류를 측정하였다. 유도선에서 측정장치까지 유도선(유도부분) 이외의 도선은, 측정물에 전류가 유도되지 않도록 하기 위하여 전자기적 절연도선(electromagnetic shield wire)을 사용하였다. 절연 도선이 이루는 회로의 크기는 32×27 (mm)이며, 그 회로의 방향은 측정단자와 평행하게 탐촉자에 설치하였다.

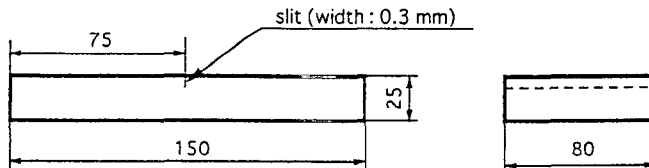
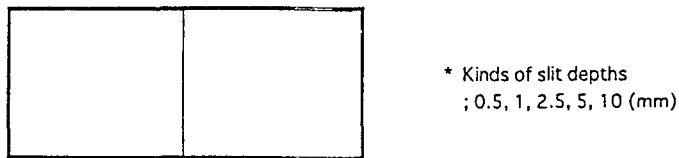
3.3 측정장치 및 측정방법

측정장치는 측정기기 및 측정용 탐촉자로 구성되어 있다. Fig. 4는 측정장치의 계통도를 나타낸 것이다. 본 연구에 사용된 측정기기는 영국의 Matelect사의 CGM5이다. 이 기기는 최대 2 A rms까지 임의의 일정한 교류전류를 공급할 수 있으며, 그 주파수는 0.3 kHz에서 100 kHz까지의 범위 중 일정한 주파수를 선택하여 공급한다. 또한, lock-in-amplifier가 내장되어 있어, 전위차의 위상을 측정하고, 측정 전위차를 증폭한다.

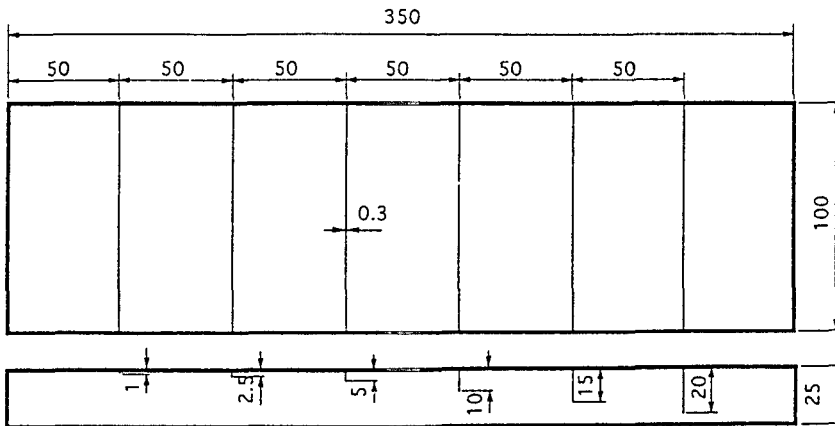
이와 같은 측정장치를 이용한 측정방법은, 탐촉자의 저면에 설치된 유도선에 일정 크기와 일정 주파수를 갖는 교류전류를 흐르게 하여 측정하는 부위의 국부적인 영역에 전류를 유도시킨다. 이 때, 유도선은 결합의 길이 방향에 대하여 직각으로 놓이게 하고, 탐촉자를 직각방향으로 이동시키면서, 측정부위에 유도되는 전류를 일정간격의 단자를 이용하여 전위차로 측정한다. 탐촉자는 결합의 존재에 의한 전류의 변화를 조사하기 위하여, 결합이 없는 부위는 10 mm씩, 결합이 존재하는 부위는 1 mm 또는 2 mm씩 이동하여었다. 단, 스테인레스 304강의 시험편은 순수알루미늄과 같은 상자성체



(a) Ferromagnetic material (A508(L III steel))



(b) Paramagnetic material pure aluminum



(c) Paramagnetic material (SUS 30 steel)

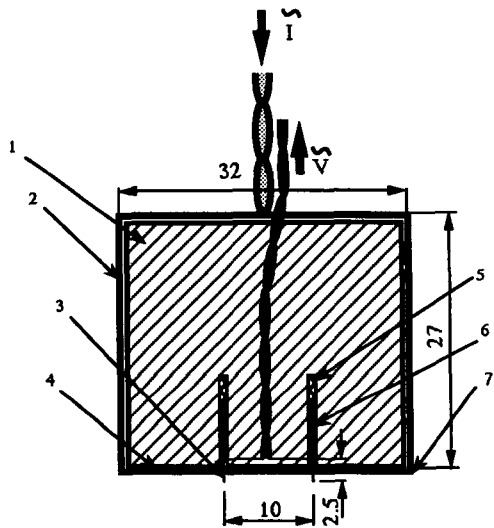
Fig. 2 The geometry of each slit specimen

Table 1 Chemical composition of A508 Cl. III steel, SUS 304 steel and pure aluminium(wt%)

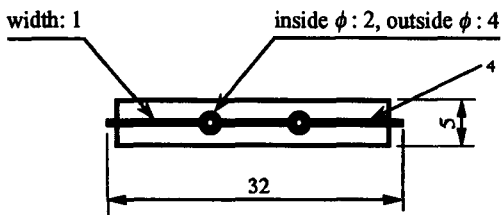
Steels	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
A508 Cl. III	0.21	0.20	1.45	0.003	0.003	0.78	0.15	0.48	0.05	0.0088
SUS 304	0.08	1	2	0.045	0.003	10.5	20	-	-	-
pure Al.	Al(99.5%)(Impurity ; Si + Fe : <0.3, Cu : <0.03)									

Table 2 Mechanical properties of A508 Cl. III steel, SUS 304 steel and pure aluminium(at room temperature)

Metal	Yield stress (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Elongation (%)	Reduction of area(%)
A508 Cl. III	449	587	26.2	70.8
SUS 304	205	520	40	-
Pure Al.	-	<120	-	-



(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 a potential pick-up probe(Ac. probe) used in ICFPD

로, 결함의 깊이를 평가하는 부분의 전위차 즉, 결함이 존재하는 부분의 최소 전위차와 최대 전위차만을 측정하였다. 각각의 각종 시험편에 대하여 측

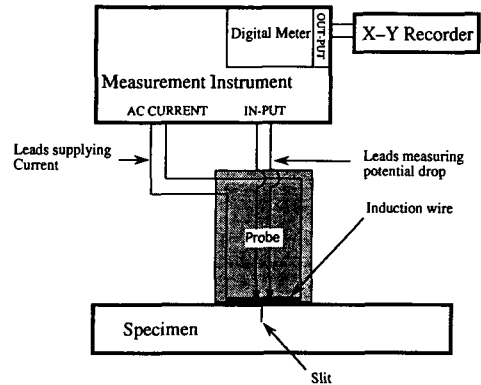


Fig. 4 Block diagram of ICFPD measuring system. The measurement instrument is a commercial thing

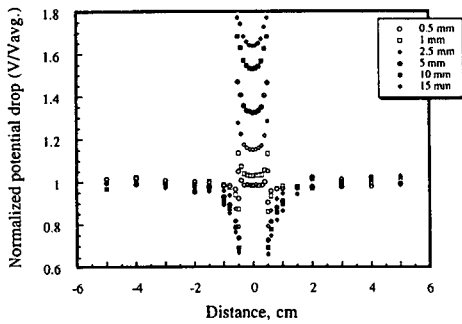
정한 주파수는 0.3, 1, 3, 10, 30 및 100 kHz이다.

4. 실험결과 및 고찰

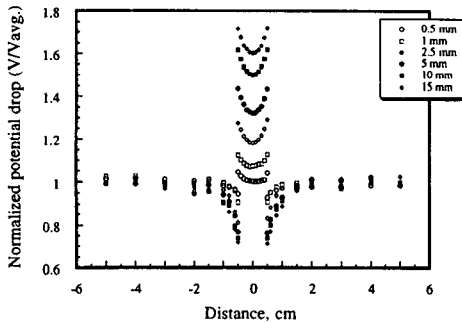
4.1 강자성체에 도입한 2차원표면 결함의 평가
 집중유도형 교류전위차법을 이용해서 강자성체에 (A508 Cl. III강)도입된 결함의 깊이에 의하여 변화하는 표면의 전위차 분포의 변화를 알아보기 위하여, 주파수를 변화시키면서 각 시험편의 전위차를 측정하였다. 이 중에서 0.3, 3, 30 kHz의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림은 측정전위차를 결함이 없는 부분의 평균전위차로 무차원화하고, 결함의 위치에서 거리에 따라 나타낸 것이다. 어느 주파수에서도 전위차는 결함의 존재에 의해서 변화하고, 이 전위차 분포는 탐촉자의 측정위치에 의해서 크게 3부분으로 나누어진다. 즉, 결함이 없는 부분, 결함단부 및 결함부이다.(Fig. 6 참고) Fig. 6은 탐촉자의 측정위치에 따른 전위차 분포를 모식적으로 나타낸 것이다.

탐촉자가 결함단부에 위치하는 경우, 측정단자가 결함의 단에 가깝게 접근함에 따라서 전위차는 점점 감소하고, 결함의 깊이가 깊을수록 낮은 전위차로 측정된다. 결함부의 전위차는 결함이 깊을 수록 큰 전위차로 측정되고, 그 분포는 결함이 측정단자 간의 중앙에 위치할 때의 전위차를 중심으로 대칭적인 U자형을 이루고 있다. 이 전위차 분포에서, 결함부근에서 전위차의 변화는, 전위차의 변화가 없는 결함이 없는 부분과 비교하여 볼 때, 유도전

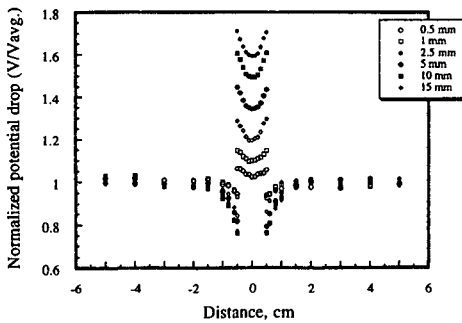
류의 흐름과 자속누설⁽¹²⁾ 등이 결함의 크기(특히, 깊이)에 크게 의존하여 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 비파괴방법에 의해, 결함의 탐상 및 깊이의 예측이 가능하다. 이상의 전위차 분포에서 결함에 의하여 전위차가 충분히 변화하는 결함부의 최대 전위차($V_{\Delta/2}^+$)와 결함단부의 최소 전위차($V_{\Delta/2}^-$)와의 전위차비 ($(V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2}^-)_{max}$)를 구하고, 결함의 깊이에 대하여 나타낸 것이 Fig. 7이다. 이 전위차비는 결함에 의하여 변화하는 각 인자의 영향이 충분히 주어진 것으로 결함평가의 인자로서 사용할 수 있다. 각 주파수에서 전위차비는 결함이 깊을수록 폭선적으로 증가하고, 100 kHz 주파수의 경우를 제외하고, 주파수가 클수록 감소하는 주파수의



(a) 0.3 KHz

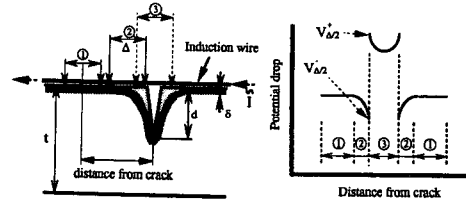


(b) 3 KHz



(c) 30 KHz

Fig. 5 The distribution of potential drops at each measuring position away from the slit in 508 Cl. III specimen by ICFPD



- ① Sound region
- ② Crack edge region
- ③ Crack region

Normalized potential drop*
$(V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2}^-)_{max}$

(*A parameter in order to evaluate surface crack depth)

(Δ : Distance between potential pick-up pins)

Fig. 6 Scheme of potential distribution measured with ICFPD technique

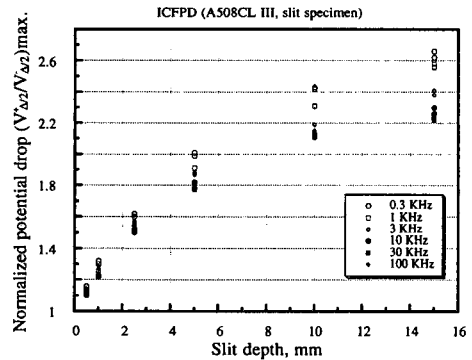


Fig. 7 The relation between slit depth and the normalized potential drops ($V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2}^-$) that are measured A508 Cl. III specimen by the ICFPD at each frequency

존성을 나타내고 있다. 따라서 적절한 주파수를 선택할 필요성이 있으며, 결합깊이는 본 선도를 이용하여 예측이 가능하다.

4.2 상자성체(순수알루미늄 및 스테인레스 304강)에 도입한 2차원 표면결합의 평가

4.2.1 순수알루미늄 시험편에 대한 평가

집중유도형 교류전위차법을 이용해서 순수알루미늄에 도입된 결합의 깊이에 의하여 변화하는 표면

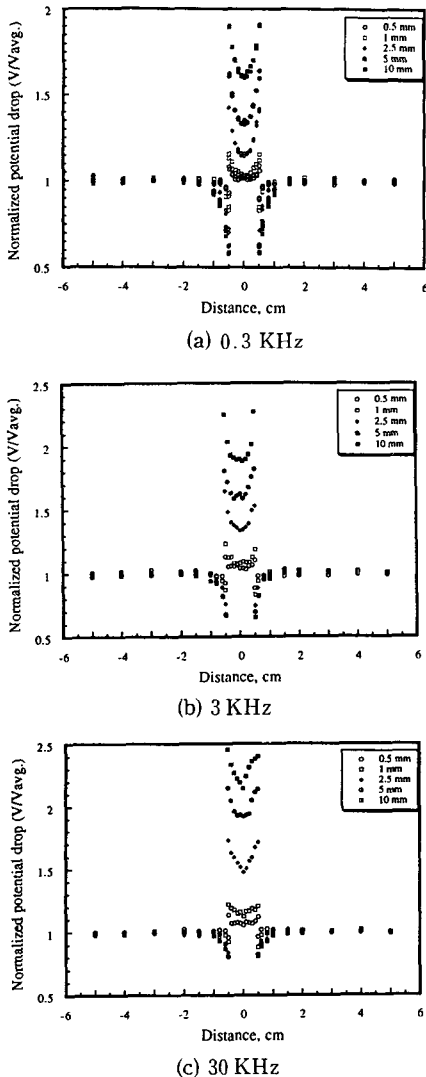


Fig. 8 The distribution of potential drops at each measuring position away from the slit in pure aluminum specimen by ICFPD technique

의 전위차 분포의 변화를 알아보기 위하여, 주파수를 변화시키면서 각 위치의 전위차를 측정하였다. 이 측정전위차를 결합이 없는 부분의 평균전위차로 무차원화하고, 결합의 위치에서 거리에 따라 나타낸 것이 Fig. 8이다. 이 그림은 각 주파수에서 측정된 결과 중에서 0.3, 3, 30 kHz의 전위차 분포를 나타낸 것이다. 결합단부에서는 결합이 깊을수록 또한 측정단자가 결합의 단에 가까울수록 낮은 전위차로 측정되고 있다. 결합부에서는 결합이 깊을수록 큰 전위차로 측정되고, 결합위치를 중심으로 좌우대칭인 U 또는 V자형의 전위차 분포를 하고 있다. 이와 같은 전위차 분포는 어느 주파수에서도 강자성체의 전위차 분포와 같은 형상을 하고 있어, 본 측정방법에 의해 측정된 전위차 분포는 측정재질에 관계없이 일정한 형태의 전위차 분포로 측정되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 상자성체에서도 결합을 탐상하고, 결합의 깊이 예측이 가능하다.

이상의 전위차 분포에서, 본 측정방법의 결합깊이의 예측인자인 결합부근의 전위차비($(V_{\Delta 1/2}^+ / V_{\Delta 1/2}^-)_{max}$)를 구하고, 결합깊이에 대하여 정리하였다. 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 전위차비는 결합이 깊을수록 곡선적인 증가를 하고 있다. 이는 순수알루미늄에 도입한 표면결합에 있어서도 강자성체와 같은 깊이 의존성을 보이고 있다. 그러나, 주파수 의존성은 강자성체의 결과와 달리, 10 kHz 주파수의 전위차비가 큰 값을 나타내고 있다.

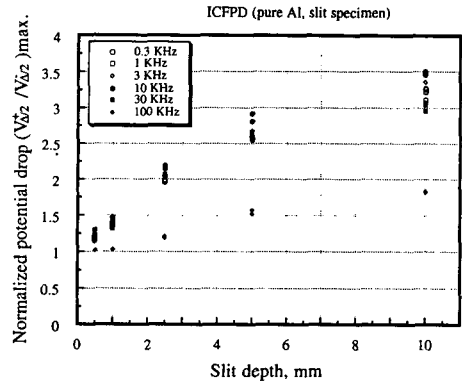


Fig. 9 The relation between slit depth and normalized potential drops ($V_{\Delta 1/2}^+ / V_{\Delta 1/2}^-$) that are measured pure aluminum specimen by the ICFPD at each frequency

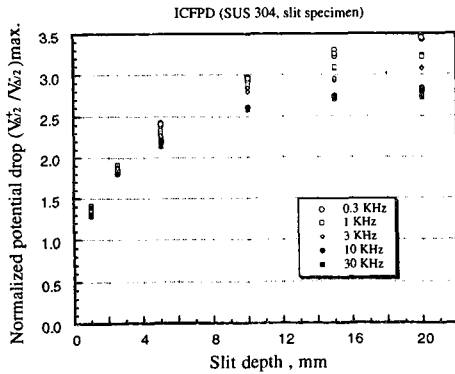


Fig. 10 The relation between slit depth and normalized potential drops ($V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2}^+$) that are measured stainless 304 specimen by the ICFPD at each frequency

4.2.2 스테인레스 304강 시험편에 대한 평가

위의 결과에서, 본 집중유도형 교류전위차법은 강자성체(A508Cl. III 강) 및 상자성체(순수알루미늄)에 존재하는 표면결함에 대하여 같은 형태의 전위차 분포로 측정되고 있음을 알았다. 따라서, 스테인레스 304강에 대해서는, 결함깊이를 예측하는데 필요한 결함 부근의 전위차 즉, 결함단부의 최소 전위차($V_{\Delta/2}$)와 결함부의 최대 전위차($V_{\Delta/2}^+$)를 측정하고, 결함깊이의 측정인자인 전위차비($(V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2})_{max.}$)를 구하였다. 이 전위차비를 결함깊이에 대하여 정리한 것이 Fig. 10이다. 그림에서 전위차비는 강자성체인 A508Cl. III 강과 상자성체인 순수알루미늄의 결과와 같이, 결함이 깊을 수록 곡선적으로 증가를 하고 있다. 주파수 의존성은 같은 상자성인 알루미늄 시험편의 결과와 달리, 0.3 kHz 주파수의 전위차비가 큰 값을 나타내고 있다.

이상의 집중유도형 교류전위차법에 의한 강자성체 및 상자성체의 측정결과, 측정 재질에 관계없이 표면결함의 존재에 의해 전위차는 변화되며, 측정된 전위차는 같은 형상의 분포를 이루고 있다. 이 전위차 분포로부터 표면결함의 유무를 파악할 수 있다. 또한, 결함부근의 전위차비($(V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2})_{max.}$)는 결함의 깊이에 따라 곡선적으로 증가하고 있어 결함깊이 평가인자로 사용할 수 있으며, 결함깊이와 전위차비($(V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2})_{max.}$)와의 관계선도를 이용하여 결함깊이의 예측이 가능하다. 따라서, 본 측정방법을 이용한 각각의 강종에 존재하는 임의의 표면결함의 깊이 예측은 결함부근의 최대 및 최소전위차

만을 측정하여 전위차비를 구하고, 각각의 강종에 대하여 구해진 결함의 깊이와 전위차비($(V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2})_{max.}$)와의 선도를 이용함으로써, 결함의 깊이를 예측할 수 있다.

5. 결 론

비파괴적 결함탐상법의 하나로 개발된 집중유도형 교류전위차법을 이용해, 강자성체 및 상자성체에 도입한 2차원 표면결함에 대하여 결함의 탐상 및 결함의 깊이 예측 가능성을 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 집중유도형 교류전위차법은 측정재질에 관계없이 표면결함을 탐상하고, 측정된 전위차는 같은 형상으로 분포되며, 이 전위차 분포에서 결함의 존재를 확인할 수 있다.
- (2) 결함의 존재에 의해 유도전류가 충분히 변화하는 결함부근의 전위차비($(V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2})_{max.}$)는 결함의 깊이 평가인자로 사용하고, 결함깊이와 전위차비($(V_{\Delta/2}^+ / V_{\Delta/2})_{max.}$)와의 관계를 이용하여 결함깊이의 예측이 가능하다.

참고문헌

- (1) 日本非破壊検査協會編, 1992. “新非破壊検査便覽,” 日刊工業, 第1章.
- (2) Dover, W. D., Chaiesworth, S. D. W., Taylor, K. A., Collins, R. and Michale, D. H., “AC Field Measurement-Theory and Practice,” *The Measurement of Crack Length and Shape during Fracture and Fatigured Warley*, West Midland, UK, pp. 222~260.
- (3) Dover, W. D., Collins, R. and Michale, D. H., 1991, “Review of Developments in ACPD and ACFM,” *British J. of NDT*, Vol. 33, pp. 121~127.
- (4) Collins, R., Dover, W. D. and Michale, D. H., 1985, “The Use of AC Field Measurements for Nondestructive Testing,” *Research Techniques in Non-Destructive Testing*, Academic Press, London, Vol. 8, pp. 211~267.
- (5) 金 堦, 庄子 哲雄, 1993, “誘導型交流電位差による新しい探傷技術の開発,” 日本材料學會, 第42期, 講演會論文集, pp. 1~3.
- (6) Kim, H. and Shoji, T., 1994, “Nondestructive

- Evaluation of Surface Defect Shape and Size by the Induced Current Focusing Potential Drop," *The 71st JSME Spring Annual Meeting Proceeding*, pp. 586~588.
- (7) 金 樵, 庄子哲雄, 1994, "集中誘導型交流電位差に関する研究 — 缺陷寸法の評價程度及び周波數依存性の検討," 日本材料學會論文集, Vol. 43, No. 494, pp. 1482~1488.
- (8) Donald, R. J., "Electromagnetic Interference Compatibility," White, MSEE/PE, Vol. 3.
- (9) Hayt, W. H., 1990, *Engineering Electromagnetic*, 5th edition, McGraw-Hill. Chap. 8.
- (10) 二村忠元, 1975, "電子氣學," 丸善, 第 5章.
- (11) 田中勝廣, 1989, "電子氣學計算法," 日本理工出版會, 第4章.
- (12) Mirshekar-Syahkal, D., Collins, R. and Michale, D. H., 1985, "Development in Surface Crack Detection by the A. C. Field Technique," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 4, A, pp. 349~357.