

교류전류를 이용한 비접촉결함탐상법에 관한 연구  
 - 주파수와 lift-off의 영향 -

A Study on the Non-Contact Detection Technique of  
 Defects Using AC Current  
 -The Influence of Frequency and Lift-off-

김 훈\*<sup>†</sup>, 나의균\*\*

Hoon Kim\*<sup>†</sup>, and Eu-Gyun Na\*\*

초 록 계자코일에 흐르는 교류전류로 전자기장을 유도하고, 결함에 의하여 누설되는 자속을 간극을 갖는 헤드로 측정하여 결함을 검출하는 새로운 비파괴탐상장치를 구성하였다. 이 탐상장치는 비접촉으로 강자성체의 구조물 요소에 존재하는 표면결함을 검출하고, 그 크기를 평가하는데 적용할 수 있다. 본 논문은 강자성체에 도입한 2차원 표면결함에 적용하여 결함의 평가를 실시하였다. 또한 측정주파수와 lift-off가 이들 평가에 미치는 영향을 검토하였다. 결함은 전압 분포에서 최대치로 검출할 수 있고, 이 최대전압의 변화는 결함의 깊이가 증가함에 따라 증가한다. 결함의 최대전압은 주파수와 lift-off의 영향을 받지만, 작은 깊이의 결함은 깊이와 전압비( $V_0/V_{ave}$ )의 관계로부터 선형적으로 예측할 수 있다.

**주요용어:** 교류전류, 비접촉, 누설자속, 간극, 주파수, 리프트오프, 표피효과

**Abstract** New nondestructive inspection (NDI) technique to detect the defect in metal was developed in which an electromagnetic field is induced in a metal by AC current flowing in the magnetic coil and the leak magnetic-flux disturbed by defects is measured using a tape-recorder head with air gap. This technique can be applied in evaluating the location and sizing of surface defects in components of the ferromagnetic body by means of the non-contacting measurement. In this paper, we have applied this technique to the evaluation of two-dimensional surface cracks in ferromagnetic metal, and also investigated the influence of the various frequencies and lift-off. Defects were detected with maximum values in the distribution of voltage and it was found that the maximum values tend to increase with the defect depth. Although the maximum values for defects are affected by the frequency and lift-off, the depth of small defects can be estimated from the linear relationship between the depth and voltage rate ( $V_0/V_{ave}$ ).

**Keywords:** AC current, non-contact, leak magnetic-flux, air-gap, frequency, lift-off, skin effect

1. 서 론

원자력·화학 발전설비, 석유·화학설비 등과 같은 대

형기기 및 구조물은 안전성 및 건전성을 확보하기 위하여, 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 이들 부재는 제조공정에서부터 허용결함이 존재하며, 건조시 가공이나 용접에

의하여 결함이 발생한다(여기서 결함이란 허용결함과 비파괴검사에 의하여 확인되지 않는 결함을 포함한다). 또한 부재는 고온, 고압, 화학적 부식분위기, 방사선 조사, 하중, 진동 등의 각종 사용환경에 노출되어 장시간 사용되고 있으므로, 환경의 복합된 작용으로 형태와 정도는 다르지만 경년열화가 발생한다. 경년열화는 1) 재료내부의 미시조직변화에 의해서 생기는 재질형 열화, 2) 잠재균열 및 그 성장 또는 사용기간 중에 균열의 발생 및 성장에 의해서 생기는 균열형 열화, 3) 부식, 방식, 마찰 등에 의해서 표면에 손상이 생기는 표면손상형 열화로 분류할 수 있다 [1, 2]. 이런 경년열화는 대형기 및 구조물의 수명을 단축시키며, 예기치 못한 파괴를 일으키는 요인이 된다. 파괴사고는 화재나 폭발 등을 초래하며, 기업의 경제적 손실 뿐만이 아니라, 인적 손실이나 환경오염과 같은 사회적 문제를 일으킨다. 최근 성수대교 상판 붕괴사고, 여천공단 H 사 폭발사고 등은 그 예라고 할 수 있다.

대형구조물에 대한 미국 기계학회의 보수·관리 기준은 재료의 특성 파악, 부재의 작용응력 및 변형 해석과 부재에 존재하는 결함을 검출하고, 구조물의 안전성 평가를 실시하여, 안전여유가 충분히 확보된다면, 결함이 존재하는 상태에서 가동을 허용하는 손상허용방법이 도입되고 있다[3]. 따라서 대형기 및 구조물이 충분한 안전여유를 확보한 상태에서 가동하기 위해서는, 결함이 안전성에 영향을 미치기 전에 정확히 평가되어 지는 것이 중요하다. 결함의 평가대상인자는 위치, 길이, 깊이 및 그 형상이다. 구조물을 파괴하지 않고 이들 인자를 정확하게 평가하는 것은 곤란하며, 더욱이 가동 중에 있는 구조물이나 계속적인 구동을 하는 구조물에 있어서, 현장에서 결함을 검출하는 것은 매우 곤란하다. 지금까지 구조물에 존재하는 결함을 검출하기 위하여, 방사선, 초음파, 자기, 교류 및 직류 전류, 레이저 등을 이용한 비파괴탐상법이 개발되어 왔다[4, 5]. 한편으로 이들 방법에 대한 결함 검출감도 및 정확도를 향상시키려는데 노력을 기울여왔고, 가능한 비접촉방법으로 검출하려는 노력을 기울여왔다[6, 7].

본 연구는 테이프 레코더의 헤드를 이용한 비접촉 탐상장치를 고안하였다. 이 장치의 탐촉자는 역 U자형 페라이트계 철심에 계자코일을 감은 자력선 형성부와 철심의 자극간에 설치한 헤드로 구성되어 있다. 계자코일에 일정 주파수의 교류전류를 흐르게 하였을 때, 자극간 시간적으로 변화하는 자속이 형성된다. 헤드를 이용하여, 자극간 자속의 변화를 전압으로 측정한다. 본 연구에서는 이 측정장치를 이용하여, 상자성체에 존재하는 2차원 인

공 표면결함의 검출 가능성을 살펴보았다. 또한 측정주파수와 균열의 깊이에 따른 검출감도의 변화와 lift-off의 영향을 살펴보았다.

## 2. 실험방법

### 2. 1. 시험편

측정에 이용된 시험편의 재료는 원자로 압력용기 강재인 A508 Cl. III강이며, 이 강은 비투자율과 비도전율이 각각 750과  $0.17 \times 10^7$ 인 강자성체이다. 이 강재의 전자기 특성을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 평판 시험편의 형상이다. 가공된 시험편은 와이어 방전 가공기를 이용하여 폭 0.3mm, 길이 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 15 mm의 2차원표면균열을 측정 표면에 직각으로 가공하였다.

### 2. 2. 실험장치 구성 및 측정방법

Fig. 2는 탐상장치의 계통도를 개략적으로 나타낸 것이다. 측정장치는 측정기기 및 탐촉자로 구성되어 있다. 측정기기는 직류전원공급기(DC power supply), 직류전원 자동차단기(DC power shut-off), 교류전류공급기(AC current driver), 록인증폭기(lock-in amplifier)구성되어

Table 1 Electromagnetic properties of A508 Cl. III steel

magnetic property	relative permeability	electric conductivity (S/m)	
ferromagnetic	750	$0.17 \times 10^7$	
skin depth (mm)			
100 Hz	200 Hz	500 Hz	3 kHz
1.42	1	0.64	0.26

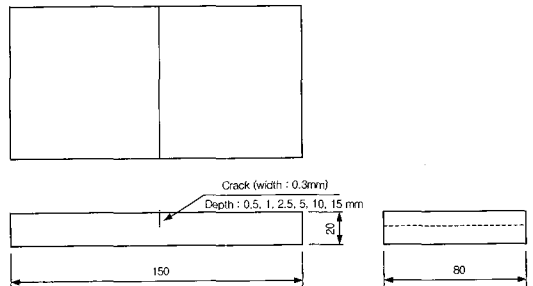


Fig. 1 The geometry of 2-dimensional surface crack specimen

있다. 직류전원 자동차단기에 +15, 0, -15 V의 직류전압을 인가하여 안정된 직류전원으로 만들고, 이 전원을 교류전류공급기에 가해준다. 교류전류공급기는 특인 증폭기의 발진단자(oscillator)와 연결한다. 이 때 교류전류공급기의 출력단자에서는 특인 증폭기의 발진기에 입력되어 출력되는 전압과 주파수에 해당하는 교류전류가 출력된다(예를 들면, 발진기에서 출력되는 전압이 1V일 때, 교류전류공급기의 출력단자에 출력되는 전류는 1A 이다.). 이 교류전류를 탐촉자의 솔레노이드형 계자코일에 공급하면, 철심의 자극간에 시간적으로 변화하는 자속이 형성된다. 자극간에 시험편이 위치하면, 시험편에 자속이 침투하고, 이 자속에 의하여 표면에 와전류가 형성된다. 시험편에 침투된 자속은 결함에 의하여 누설되고[8], 이 누설자속을 측정용 헤드로 측정하면 교류전압이 발생한다. 이 전압을 특인 증폭기에 입력한다. 특인 증폭기는 입력된 전압의 주파수와 설정된 기준신호인 발진기의 주파수를 비교하며, 동일 주파수를 갖는 입력 전압을 선별하여 증폭하고, rms 직류전압으로 출력한다.

Fig. 3은 탐촉자와 헤드의 개략도이다. a)는 계자코일이 감긴 페라이트계 철심과 철심 자극간의 중앙에 철심의 밀면보다 0.3mm 띄워 설치한 헤드를 나타낸 개략도이다. 페라이트계 철심의 상부는 직경 0.5mm 에나멜선을 120회 4겹으로 총 480회 감은 계자코일을 설치하였다. b)는 측정용 헤드의 개략도이며, 헤드갭(head gap 또는 air gap)이 약 1 $\mu$ m정도인 일반 테이프 레코더의 헤드를 이용하였다.

본 연구에서는 철심의 자극간에 형성된 자속이 결함의 길이 방향에 직각으로 되게 하였고, 탐촉자는 결함에 대하여 직각방향으로 이동하면서 전압을 측정하였다. 주파수에 대한 결함의 검출감도를 알아보기 위하여, 측정주파수는 0.1, 0.2, 0.5 및 3kHz로 하였고, 비접촉 검출감도를 알아보기 위하여, 탐촉자의 lift-off는 측정용 코일을 기준으로 0.3, 0.4, 0.5, 0.8mm로 하였다.

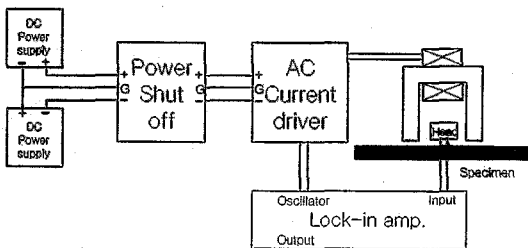


Fig. 2 Schematic of the non-contact detection system

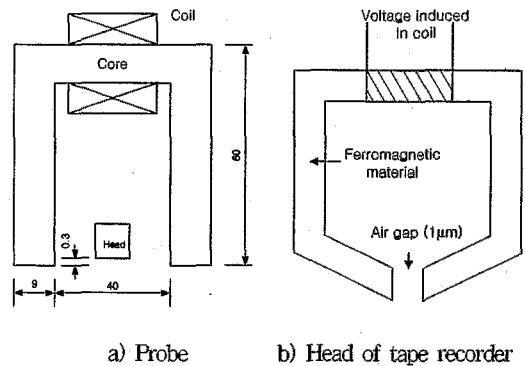


Fig. 3 Schematic of the probe and head

### 3. 결과 및 고찰

이상에서 구성된 비파괴탐상 장치를 이용하여, 강자성체에 도입한 2차원 표면결함의 깊이변화에 대하여 측정주파수 변화에 따른 결함주위의 전압분포를 측정하였다. 또한, 동일 측정주파수에서 탐촉자와 시험편과의 거리 즉, lift-off를 변화하면서 전압분포를 측정하여 결함의 검출감도에 미치는 영향을 살펴보았다

Fig. 4는 0.1kHz의 주파수에서 측정된 각 결함 주위의 전압분포를 결함의 위치를 기준으로 한 거리에 대하여 나타냈으며, lift-off에 따라 분류하였다. 여기서 측정 전압은 결함이 없는 부분의 평균전압( $V_{ave}$ )으로 무차원화( $V/V_{ave}$ ) 하였다. 그림에서 보는바와 같이, 결함이 없는 부분의 전압분포는 약간의 오차가 존재하지만 거의 일정한 값으로 측정되고 있으며, 계자코일이 감겨있는 철심의 자극간에 결함이 위치하여도 결함에서 좌우 약 3mm이상 떨어진 위치까지의 전압은 거의 일정한 값으로 측정되고 있다. 이는 결함에 의하여 누설된 자속의 폭이 작고, 헤드의 철심간극(air gap)이 약 1 $\mu$ m정도이기 때문에, 누설자속이 측정 전압에 영향을 주지 않기 때문이다. 철심간극이 결함근방(결함에서 좌우 약 3mm이내)에 가까워지면, 측정전압은 점점 증가하고, 결함위치에 철심간극이 위치하였을 때, 전압이 최대 측정되며, 이 전압은 결함의 깊이 변화에 대하여 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. 또한, lift-off가 증가할수록, 동일한 결함의 검출감도가 점점 감소하고 있다. 이상으로부터 전압은 결함의 위치를 중심으로 좌우대칭을 이루며, 이 전압분포로부터 결함의 위치를 파악할 수 있다. 더욱이 lift-off가 결함의 검출감도에 크게 영향을 미치지지만, 결함의 깊이변화에 따른 최대전압의 차이는 결함의 교란으로 생기는 누설자속이 결함의 깊이와 밀접한 관계가 있음을 나타내고 있다.

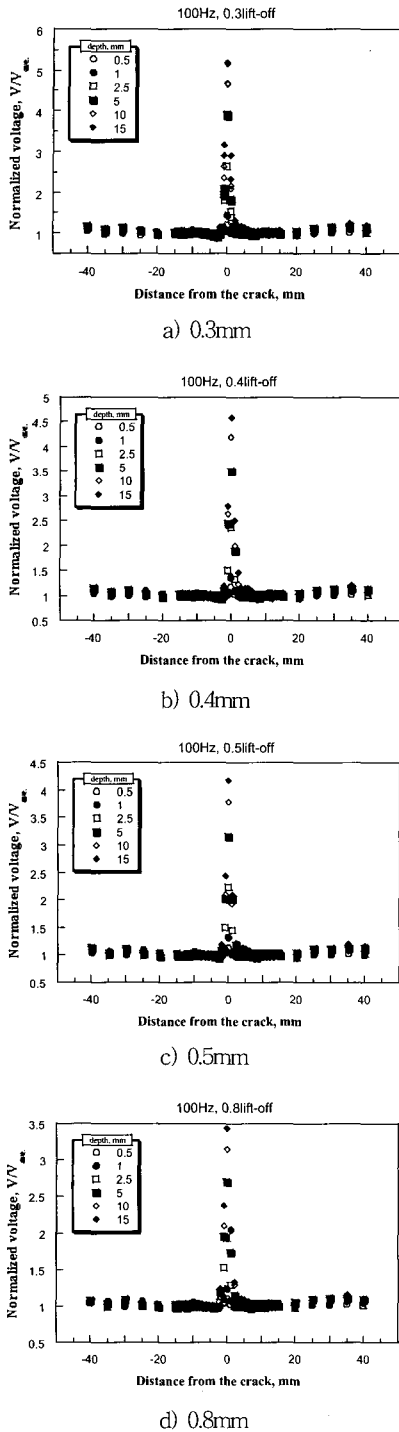


Fig. 4 The distribution of normalized voltage for each surface crack specimens at 0.1kHz frequency each lift-off

Fig. 5는 lift-off가 0.3mm일 때, 측정주파수를 변화시키면서 측정된 각 결함 깊이의 전압분포를 나타낸 것이다. 전압분포의 형태는 Fig. 4와 같이 결함위치에서 전압이 최대 측정되며, 결함 위치를 중심으로 거의 대칭을 이루고 있어. 측정주파수의 변화에 의한 영향을 받지 않는다. 그러나 측정주파수가 0.1(Fig. 4 a)), 0.2kHz인 경우, 결함위치의 전압은 결함깊이의 변화에 따라 명확한 차이를 보여주고 있으나, 0.5 kHz와 3kHz의 측정주파수에서는 결함이 5mm이상의 깊이에 대하여 전압의 차가 거의 없는 등, 측정주파수가 증가할수록 결함위치의 전압은 급격한 변화를 나타내고 있다. 특히 결함이 깊을수록 주파수 의존성이 크게 나타나고 있다. 이는 주파수의 함수인 표피두께(skin depth, 식 (1))와 관계가 있다고 판단된다. 즉 주파수가 증가하면, 전자기장이 침투할 수 있는 표피두께가 작아지고, 이상적인 경우 이 두께이상의 결함 깊이에 해당되는 누설자속은 없기 때문에, 일정깊이 이상의 측정전압은 거의 일정한 값으로 포화하게 된다. 따라서 깊은 표면결함이나 표피 내부결함을 측정하기 위하여, 낮은 주파수의 선택이 필요하다.

전자장의 크기가 표면의 38.8%로 되는 표피두께  $\delta$ 은 다음 식으로 나타낸다[9].

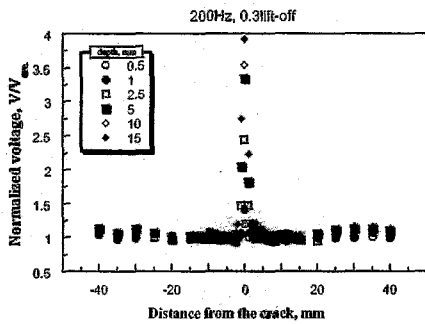
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $f$  : 주파수,  $\sigma$  : 도전율,  $\mu$  : 투자율

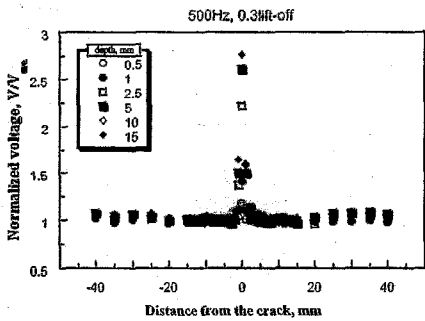
동일 자성체인 경우 도전율과 투자율이 거의 일정하므로, 표피두께는 주파수에 의하여 정해진다.

Fig. 6은 결함위치의 전압이 결함의 깊이에 따라 어떻게 변화하며, 주파수와 lift-off변화에 대하여 어떤 경향을 보이는가를 살펴보기 위하여, Fig. 4와 Fig. 5의 전압분포로부터 결함위치의 최대 전압비( $V_0/V_{ave}$ . 여기서,  $V_0$ 는 결함위치의 전압,  $V_{ave}$ 는 결함이 없는 부위의 평균전압이다.)를 결함의 깊이에 대하여 나타낸 것이다. 0.1과 0.2 kHz 주파수의 경우, 5 mm 결함깊이를 기준으로 해서 구분되고 있다. 5 mm 이하까지의 전압비는 거의 일정한 기울기를 갖고 직선적인 증가를 하며, 5 mm 이상의 전압비도 직선적인 증가를 하지만, 기울기가 5 mm 이하의 기울기보다 감소한다. 0.5 kHz 주파수의 경우, 0.1와 0.2 kHz 주파수와 같은 경향을 보이고 있으나, 2.5mm 와 5mm 사이에서 기울기가 감소하고, 5mm 이상의 전압비는 거의 포화되고 있다. 3kHz 주파수의 경우 2.5mm 결함깊이가

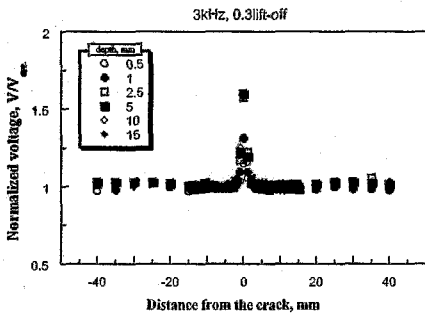
지의 전압비는 거의 직선적인 증가를 하고 있으나, 그 이상의 전압비는 거의 포화되는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 경향은 lift-off를 변화시켜 측정된 결과에서도 같으며, 최대 전압비( $V_0/V_{ave}$ )는 lift-off가 증가할수록 점점 감소한다. 이상에서의 같이 결함 깊이의 최대 전압비의 관계는 주파수와 lift-off에 의존하는 현상을 나타내고 있지만, 유도전자가 충분히 흐르는 각 주파수에서의 표



a) 0.2 kHz

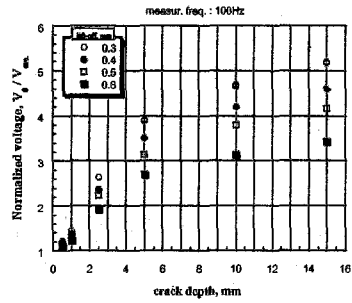


b) 0.5 kHz

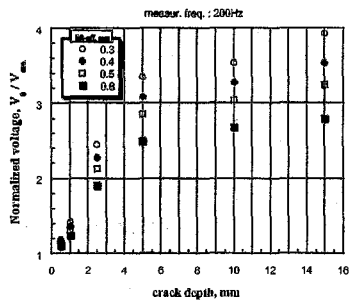


c) 3 kHz

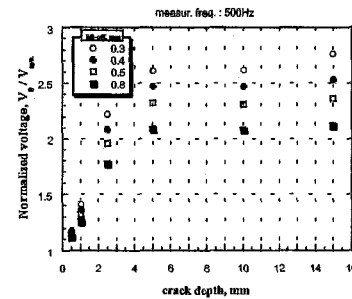
Fig. 5 The distribution of normalized voltage at 0.3mm lift-off and 0.2, 0.5, 3kHz frequencies



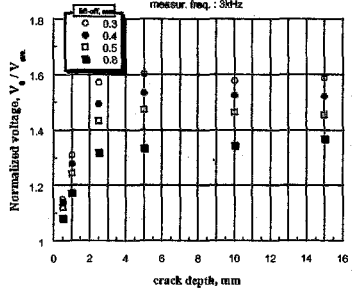
a) 0.1 kHz



b) 0.2 kHz



c) 0.5 kHz



d) 3 kHz

Fig. 6 The relationship between the normalized voltage at crack position and the crack depth at 0.1, 0.2, 0.3 and 3kHz

피두께(Table 1)보다 약 4배 정도의 깊은 결함까지 선형의 기울기를 갖고 있어 선형적인 평가가 가능하다. 더욱이 0.1 및 0.2kHz의 낮은 주파수에서 5mm이하의 결함깊이를 예측할 수 있는 감도보다는 낮아지지만, lift-off에 관계없이 약 15mm 정도의 결함깊이까지 예측 가능성을 보여주고 있다. 이는 본 연구에서 사용된 탐촉자가 표면 결함의 교란으로 생기는 미소한 누설자속까지 충분히 검출할 수 있음을 보여주고 있다. 이상의 실험 결과에 의하여, 주파수와 lift-off에 따른 결함깊이와 결함위치의 전압비( $V_0/V_{ave}$ )의 교정곡선을 작성함으로써 깊이를 정량적으로 평가할 수 있으며, 특히 구조물(강자성체)의 파괴 초기단계에 생성되는 미소 표면결함을 검출하고, 그 깊이를 예측할 수 있다.

#### 4. 결 론

교류전류의 전자계유도를 이용한 비접촉 결함탐상장치를 구성하고, 강자성체의 2차원 표면결함을 대상으로 검출 가능성에 대한 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면결함 주위의 측정전압은 결함의 위치에서 최대치로 나타나며, 결함위치를 중심으로 좌우대칭 분포를 이루고 있다. 이 전압분포는 주파수와 lift-off의 변화에 대해서도 동일한 형상을 보이며, 이 분포로부터 결함의 정확한 위치과악을 할 수 있다.
2. 결함의 깊이와 결함위치의 전압비( $V_0/V_{ave}$ )와의 관계는 주파수와 lift-off에 의존성이 있지만, 피두께보다 약 4배 정도인 결함깊이까지 선형적인 기울기를 갖고 있어 선형적인 평가가 가능하다. 더욱이 낮은 주파수(0.1 및 0.2kHz)에서 약 15mm 정도의 결함깊이까지 예측이 가능하다. 따라서 주파수와 lift-off에 따른 결함깊이와 결함위치의 전압비( $V_0/V_{ave}$ )의 교정곡선을 작성함으로써 표면결함의 깊이를 정량적으로 평가할 수 있다.

#### 후 기

본 논문은 여수대학교 교내 학술지원과제로 수행되었습니다. 연구비지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 庄子哲雄, "機器構造物の壽命診断と長壽命化技術," 日本原子力學會誌, Vol. 94, No. 866, p. 52, (1991)
- [2] 庄子哲雄, "機器構造物の經年劣化と壽命豫測," 日本原子力學會 材料力學部門講演會論文集, No. 930-73, pp. 265, (1993)
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code/An America National Standard Section III (ANSI/ASME BPV-III) Division 1, 1977 Edition, Appendix G(1977), American Society of Mechanical Engineers
- [4] H. Kim, and T. Shoji, "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, (1994)
- [5] 金 燮, 庄子哲雄, 鄭 世喜, "집중유도형교류전위차법에 의한 강자성체 및 상자성체의 2차원 표면결함의 비파괴평가," 大韓機械學會論文集, Vol. 19, No. 5, pp. 1202-1210, (1995)
- [6] 佐藤康元, 庄子哲雄, "遠隔誘導型電磁場計測法の開發," 日本機械學會材料力學部門講演會論文集, pp.329-330, (2000)
- [7] 장경영, 김홍준, "레이저와 공기결합 트랜스듀서를 이용한 비접촉식 초음파 비파괴 평가/검사," 대한기계학회 2001년도 재료 및 파괴부문 학술대회논문집, pp. 86-92, (2001)
- [8] 한응교, "비파괴검사공학," p. 343, 학연사, (1998)
- [9] 日本非破壊検査協會編, "非破壊検査便覽," pp. 652, 日刊工業新聞社, (1980)