

교류전류를 이용한 결함탐상에 관한 연구 - 주파수와 Lift-off 효과 -

김 훈, 김 정엽, 문 봉호*

A Study on the Detection of Defects Using AC Current -The Effect of Frequency and Lift-off-

Kim Hoon, Kim jeong-youp and Moon Bong-ho

Key Words: AC current(교류전류), Non-contact(비접촉), Leaked magnetic-flux(누설자속), air-gap(간극), frequency(주파수), lift-off(리프트오프)

Abstract

NDI technique system using AC current is newly developed for inspection of defects. This technique is non-contact measurement system and can be applied for locating and sizing of surface defects in components. In this paper, the technique was applied for evaluating the location and size for 2-dimensional surface cracks and we had investigated the influence of frequency and lift-off. The results show that defects are able to detect with the variety of voltage, and the measuring voltage for the depth of defects are under the influence of the measuring frequency and the lift-off.

1. 서 론

원자력· 화력 발전설비, 석유· 화학설비 등과 같은 대형기기 및 구조물은 안전성 및 건전성을 확보하기 위하여, 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 이들 부재는 제조공정에서부터 허용결함이 존재하며, 건조시 가공이나 용접에 의하여 결함이 발생한다(여기서 결함은 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 조합된 작

용으로 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 대형기기 및 구조물의 수명을 단축시키며, 예기치 못한 파괴를 일으키는 요인이 된다. 파괴사고는 화재나 폭발 등을 초래하며, 기업의 경제적 손실뿐만 아니라, 인적 손실이나 환경오염과 같은 사회적 문제를 일으킨다. 최근 성수대교 상판 붕괴사고, 여천공단 H사 폭발사고 등은 그 예라고 할 수 있다.

대형구조물에 대한 미국 기계학회의 보수·관리 기준은 재료의 특성파악, 부재의 작용응력 및 변형 해석과 부재에 존재하는 결함을 검출하고, 구조물의 안전성 평가를 실시하여, 안전여유가

* 여수대학교 기계·자동차공학부

충분히 확보된다면, 결함이 존재하는 상태에서 가동을 허용하는 손상허용방법이 도입되고 있다³⁾. 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 구조물에 있어서, 현장에서 결함을 검출하고 평가하는 것은 매우 중요하다. 지금까지 구조물에 존재하는 결함을 검출하기 위하여, 방사선, 초음파, 자기, 교류 및 직류 전류, 레이저 등을 이용한 비파괴방법이 개발되어 왔다^{4, 5)}. 한편으로 이들 방법에 대한 탐상 감도 및 정확도를 향상시키려는데 노력을 기울여왔고, 가능한 비접촉방법으로 측정하려는 노력을 하여왔다⁶⁾.

본 연구에서는 일정 주파수의 교류전류를 페라이트계 철심 코일에 흐르게 하여, 자극간에 자력선을 형성시키고, 테이프 레코더의 헤드를 이용하여 비접촉으로 전압을 측정하는 장치를 고안하였다. 이 측정장치를 이용하여, 상자성체에 존재하는 2차원 인공표면결함의 탐상 가능성을 살펴 보았다. 또한 측정주파수와 결함의 깊이에 따른 감도변화와 lift-off의 영향을 살펴 보았다.

2. 실험방법

2.1 시험편

측정에 이용된 시험편의 재료는 원자로 압력용기 강재인 A508 Cl. III강으로 비투자율이 300인 강자성체이다. 이 강재의 전자기 특성을 Table 1에 나타내었다. 시험편의 형상 및 결함의 깊이는 Fig. 1에 나타내었다. 시험편은 와이어 방전 가공기를 이용하여, 폭 0.3mm의 2차원 표면결함을 측정면에 직각으로 가공하였다.

2.2 실험장치 구성 및 측정방법

측정장치의 계통도는 Fig. 2에 나타내었다. 측정장치는 측정기기 및 탐촉자로 구성되어 있다.

Table 1. Electromagnetic properties of A508 Cl. III steel

Magnetic property	specific permeability	electric conductivity (1/Ω m)	
ferromagnetic	750	0.17 × 10 ⁴	
skin depth (mm)			
100 Hz	200 Hz	500 Hz	3000 Hz
1.42	1	0.64	0.26

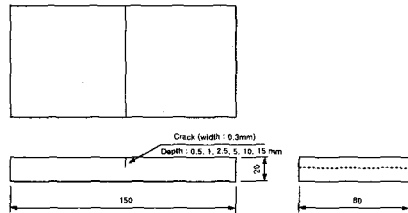


Fig.1 The geometry of surface crack specimen

측정기기는 직류전원공급기(DC power supply), 직류전원 자동차단기(DC power shut-off), 교류전류공급기(AC current driver), 록인 증폭기(lock-in amplifier)구성되어 있다. +15, 0, -15V를 직류전원 자동차단기에 가하여 안정된 직류로 만들고, 이 전원을 교류전류공급기에 가해 준다. 교류전류공급기는 록인 증폭기의 발진단자(oscillator)와 연결한다. 이 때 교류전류공급기의 출력단자에서는 록인 증폭기의 발진기에서 출력되는 전압과 주파수에 해당하는 교류전류가 출력된다(예를 들면, 발진기에서 출력되는 전압이 1V일 때, 교류전류공급기의 출력단자에 출력되는 전류는 1A 이다.). 이 교류전류를 탐촉자의 여자코일(솔레노이드형)에 공급하면, 철심의 자극간의 시험편에 자력선이 형성된다. 시험편에 형성된 자력선은 결함에 의하여 누설되며⁷⁾, 이 누설자속을 측정용 코일로 측정하면 교류전압이 발생하고, 이 전압을 록인 증폭기에 입력한다. 록인 증폭기는 입력된 전압의 주파수와 기준신호인 발진기의 주파수를 비교하며, 동일 주파수를 갖는

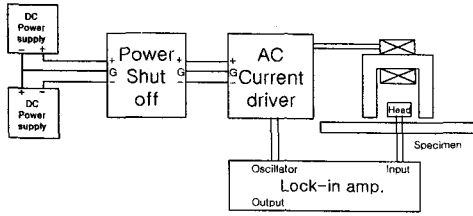


Fig. 2 Scheme of the measurement system
입력 전압을 선별하여 증폭하고, 직류의 rms 값으로 출력한다.

탐촉자의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 여자 코일은 페라이트계 철심에 0.5 mm 에나멜선을 120회 4점으로 총 480회 감았다. 측정용 코일은 철심 자극간의 중앙에 철심의 밑면보다 0.3mm 띄워 설치하였고, 일반 테이프 레코더의 헤드를 이용하였다.

본 연구에서는 철심의 자극간에 형성된 자력선이 결함의 길이 방향에 직각으로 되게 하였고, 탐촉자는 결함에 대하여 직각방향으로 이동하면서 측정하였다. 비접촉 측정감도를 알아보기 위하여, 탐촉자의 lift-off는 측정용 코일을 기준으로 0.3, 0.4, 0.5, 0.8mm로 하였고, 주파수의 영향을 알아보기 위하여, 측정주파수는 0.1, 0.2, 0.5, 1, 3kHz로 하였다.

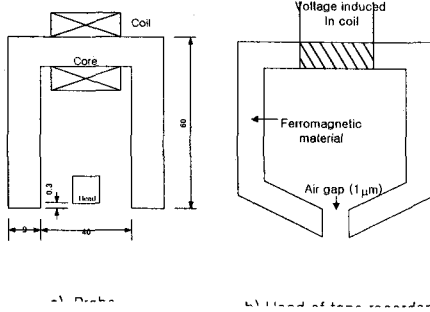


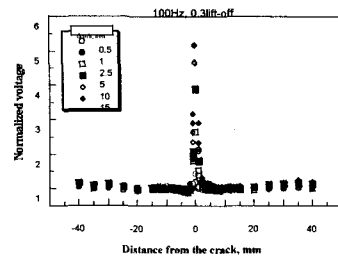
Fig. 3 Scheme of the probe

3. 결과 및 고찰

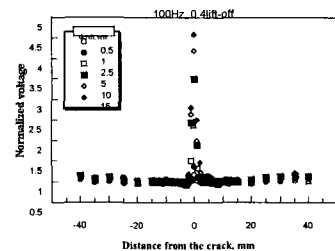
이상에서 구성된 비파괴탐상 장치를 이용하여, 강자성체에 도입한 2차원 표면결함의 깊이변화에 대하여 탐촉자와 시험편의 거리 즉, lift-off를 변화하면서 결함주위의 전압분포를 측정하였다.

또한, 동일 lift-off에서 측정주파수의 영향에 대해서 살펴보았다.

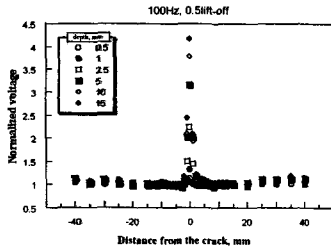
Fig. 4는 100Hz의 주파수에서 측정한 각 결함의 전압분포를 결함의 위치에서 거리에 대하여 lift-off에 따라 나타낸 것이다. 여기서 세로축의 전압은 결함이 없는 부분의 평균전압으로 무차원화하였다. 그림에서 보는바와 같이, 결함이 없는 부분의 전압분포는 약간의 오차는 존재하지만 거의 일정한 값으로 측정되며, 여기코일이 감겨있는 철심의 극간에 결함을 위치하여도 결함과는 정도 떨어진 위치까지의 전압은 거의 일정한 값으로 측정되어 결함에 의하여 누설된 자속이 측정코일에 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 이는 측정코일의 철심간극(air gap)이 1μm 정도이므로 측정코일에 누설자속이 영향을 주지 않기 때문이다. 측정코일이 결함근방에 가까워지면, 전압이 점점 변화하고, 결함위치에 측정코일의 철심간극이 위치하며, 최대의 전압을 나타내며, 결함의 깊이 변화에 대한 전압의 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 전압의 차이는 누설자속이 결함의 깊이에 따라 정량적인 변화를 하기 때문으로 판단된다.



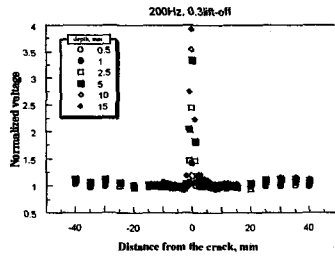
a) 0.3 mm



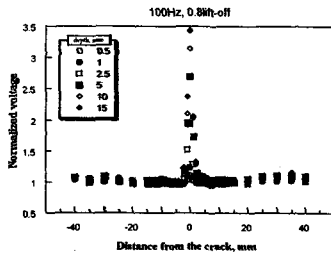
b) 0.4 mm



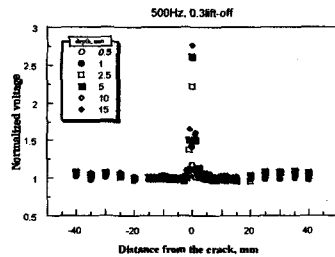
c) 0.5 mm



a) 200 Hz



d) 0.8 mm



b) 500 Hz

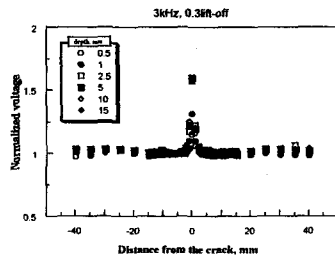
Fig. 4 The distribution of normalized voltage for each surface crack specimens at each lift-off

Fig. 5는 본 연구에서 lift-off가 가장 적은 0.3mm일 때, 측정주파수를 변화시켜 측정한 각 결함 깊이의 주파수 분포를 나타낸 것이다. 측정주파수가 100(Fig. 4 a), 200 Hz인 경우 결함위치의 전압의 차이가 결함깊이의 변화에 따라 명확한 차이를 보여주고 있으나, 500Hz와 3kHz의 측정주파수에서는 결함이 5mm이상의 깊이에 대하여 거의 차이가 없다. 이는 주파수가 클수록 전자기유도가 침투할 수 있는 표피두께(skin depth)가 작아지기 때문으로 판단된다. 표피두께 δ 는 다음 식으로 나타낸다⁸⁾.

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

여기서, f : 주파수, σ : 도전율, μ : 투자율

표피두께는 동일 자성체인 경우 도전율과 투자율이 일정하므로, 주파수에 의하여 정해진다. 따라서 깊은 표면결함이나 표피 내부결함을 측정하기 위하여, 낮은 주파수의 선택이 필요하다.

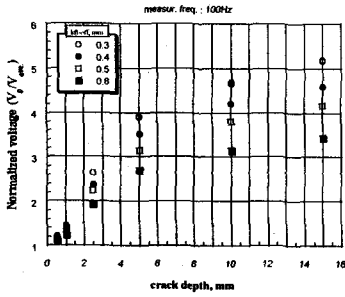


c) 3 kHz

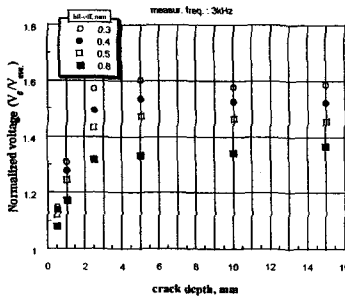
Fig. 5 The distribution of normalized voltage at 0.3 mm lift-off and 200, 500, 3000 Hz frequencies

Fig. 6은 결함 깊이의 전압이 주파수와 lift-off변화에 대하여 어떤 경향을 보이는가를 살펴보기 위하여, Fig. 4와 Fig. 5의 전압분포로부터 결함위치의 최대 전압($V_0/V_{ave.}$)을 결함의 깊이에 대하여 나타낸 것이다. 각 주파수에서 깊이가 작은 결함은 깊이에 대하여 거의 직선적인 증가를 보이고 있으나, 5mm 이상의 결함깊이에 있어서 전압은 주파수가 증가할수록 검출 감도가

감소하면서 포화되는 경향은 보이고 있다. 또한 이와 같은 경향은 lift-off의 변화에 의해서도 결함 검출 감도는 감소하지만, 동일한 경향을 나타내고 있다. 따라서 결함의 정량적 평가에 있어서 측정주파수와 lift-off는 중요한 인자임을 알 수 있다.



a) 100 Hz



b) 3 kHz

Fig. 6 The relationship between the normalized voltage at crack position and the crack depth at 100 Hz and 3 kHz

4. 결론

교류전류의 전자유도현상을 이용한 비접촉 결함탐상장치를 구성하고, 강자성체의 2차원 표면결함을 대상으로 탐상 가능성에 대하여 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

표면결함에 대한 결함의 검출은 가능하지만, 측정주파수가 증가하고 lift-off가 클수록, 깊은 결함의 검출 감도가 현저히 감소한다. 결함의 깊

이를 정량적으로 평가하기 위하여, 측정 주파수와 lift-off의 선택이 매우 중요하다.

후기

본 논문은 여수대학교 교내 학술지원과제로 수행되었습니다. 연구비지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 庄子哲雄, 1991, "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
- 2) 庄子哲雄, 1993, "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, p. 265
- 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) 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.
- 5) 金 燦, 庄子哲雄, 鄭 世喜, 1995, "집중유도형교류전위차법에 의한 강자성체 및 상자성체의 2차원 표면결함의 비파괴평가," 大韓機械學會論文集, Vol. 19, No. 5, pp. 1202 - 1210
- 6) 장경영, 김홍준, 2001, "레이저와 공기결함 트랜스듀서를 이용한 비접촉식 초음파 비파괴 평가/검사," 대한기계학회 2001년도 재료 및 파괴부문 학술대회논문집, pp. 86-92
- 7) 한응교, "비파괴검사공학," 1998, 학연사 p. 343
- 8) 한응교, "비파괴검사공학," 1998, 학연사 p. 329