

## FEF 탐상법을 이용한 상자성체 표면결함 평가

### The Evaluation of Surface Crack in Paramagnetic Material by FEF Technique

김 훈

Hoon Kim

**초 록** 전자기장을 유도하는 원리를 기초로한 새로운 비파괴탐상법인 FEF법을 개발하였다. 이 탐상법은 전자기장을 유도하는 유도선과 이를 감지하는 감지부로 구성되어 있고, 비접촉 방식으로 탐상을 실시한다. 본 연구는 알루미늄합금, 스테인레스강과 인코넬 합금강의 재료에 방전 가공한 결함에 대하여 결함 검출 및 결함 깊이에 대한 평가를 실시하였다. 결함이 없는 영역에서의 측정전압은 lift-off에 의존한다. 결함영역에서 탐촉자가 결함에 가까이 접근 할수록 전압은 증가하고, 결함위치에서 최고전압으로 측정되며, 이 최고치는 결함의 깊이에 따라 변화한다. 각 재료에 대한 전압분포는 같은 경향으로 측정된다.

**주요용어:** 전자기장, 집중전자기장법(FEF법), 비접촉방식, 상자성체, 2차원 표면결함, lift-off

**Abstract** FEF(Focused Electromagnetic Field) technique was newly developed that is based on the induction principle exciting electromagnetic field. The technique consists of an induction wire and a sensor for detecting electromagnetic field, and is applied in a non-contact mode. In this study, the technique was applied to the evaluation of EDM slits in some conductive materials - aluminum alloy, stainless steel and Inconel alloy. The voltage in the non-defect region is depended upon the measurement lift-off. The voltage signals on defects are measured with peak values, and the peak values changed with the depth of defects. The voltage distributions for all conductive materials are the same trend.

**Keywords:** electromagnetic field, FEF technique, non-contact mode, paramagnetic material, 2 dimensional surface defect, lift-off

#### 1. 서 론

교류전류를 이용하여 결함을 검출하는 비파괴탐상법은 그 동안 많이 연구되고 개발되어져왔다. 와전류탐상법(ET)[1]은 대표적인 방법으로 많이 이용되고 있으나, 최근에는 결함을 검출하고 성장을 모니터 할 수 있는 전위차법(Potential Drop

Technique)[2]이 새로이 선을 보이고 있다. 이 방법은 정전류제어 방식으로, 측정영역의 표면에 일정한 전류가 분포되도록 하기 위하여 한 쌍의 단자로 측정 표면에 전류를 공급한다. 결함에 대한 정보는 표면에 분포한 전류를 일정간격의 측정단자를 이용하여 전위차를 측정하고, 결함에 의해 변화하는 전위차의 차이를 이용하여 실시간 검출 할 수 있다.

그러나 측정할 때 단자가 측정물의 표면에 직접 접촉하기 때문에, 표면의 상태에 따라 단자의 접촉이 불안정하게 되면 측정물체에 공급되는 전류에 문제가 발생할 뿐만이 아니고, 측정 전위차도 불안정하게 되므로 측정치에 오차가 발생할 수 있다. 전위차법에 있어서 전류를 측정표면에 일정하게 분포하도록 하는 문제점을 해결하기 위하여, 저자는 유도에 의하여 측정물체에 전류를 공급할 수 있는 방법인 ICFPD법(Induced Current Focusing Potential Drop Technique)[3-6]을 개발하였다. 이 방법은 하나의 유도선에 전류를 공급하여 측정부위의 표면에 전류를 유도하는 방식이다. 이 전류는 탐상영역에 집중적으로 유도되고, 유도선의 바로 밑 영역에 가장 큰 전류가 흐르게 된다. 이 유도전류는 교류전류와 동일한 특성을 가지고 있으며, 측정물의 표면과 결함의 면을 따라 흐르게 된다. 결함 검출은 전위차법과 동일한 방법으로 결함 면을 따라 흐르는 전류를 일정간격의 한 쌍의 측정단자를 이용하여 전위차를 측정한다. 이 방법은 탐상영역에 전류를 집중시키는 이점이 있으나, 전위차법과 동일하게 측정단자를 측정 면에 접촉하여 전위차를 측정하기 때문에 측정표면이 오염되었거나 보호막이 형성되었을 때 측정에 문제점이 생길 수 있다.

본 연구는 전위차법과 ICFPD법의 단점을 해결하기 위하여 비접촉으로 결함을 탐상할 수 있는 방법을 새로이 제시한다. 이 탐상법은 FEF법(Focused Electromagnetic Field Technique, 집중전자기장법)이라 한다. 본 논문은 FEF법을 상자성체(알루미늄합금, 스테인리스 강 및 인코넬 강)에 적용한 기초 실험결과로, 결함이 없는 곳의 lift-off 변화에 대한 영향을 살펴보고, 방전 가공한 2차원 인공결함인 표면결함을 대상으로 측정한 결과를 제시한다.

2. FEF의 원리 및 장단점

FEF의 센서는 하나의 몸체이며, 유도부와 감지부로 구분되어 있다. 유도부는 교류전류가 흐르는 하나의 직각 회로이며, 이 회로의 하단부는 하나의 유도선이 설치되어 있고, 이외 부분은 전자기 차폐선으로 연결되었다. 유도선은 측정물체(전도성물체)의 표면 위에 놓이게 되며, Fig. 1의 원리와 같이 측정물체에 전류를 유도시킨다. 일정주파수와 크기를 갖는 전류를 회로에 흐르게 하면, 유도선 주위에 자계가 여기되고, 자계는 주파수에 따라 변화하

며, 측정물체의 표면에 전류를 유도한다. 이 유도전류는 국부적인 측정영역에 집중되고, 공급전류와 같은 특성을 갖으며, 전류의 흐름은 공급전류와 반대 방향이다. 유도전류는 측정물체에 존재하는 결함(표면, 이면, 내면)에 의하여 교란되고, 측정물체의 표면에 측정영역의 정보를 가지고 있는 전자기장이 누설된다. 감지부는 1 μm 간극이 있는 철심과 철심에 감겨진 코일로 구성되어 있다. 측정물체의 표면에 누설된 전자기장은 철심의 간극에서 감지되고, 철심의 자기장 변화는 코일에 전류를 유도하여 측정부위의 정보를 얻는다.

본 방법의 장단점은 다음과 같다.

- 1) 국부적인 측정영역에 집중된 전류 유도,
- 2) 비접촉 측정,
- 3) 탐촉자가 간단하고,
- 4) 사용이 간편하고,
- 5) lift-off의 변화에 의한 영향이 크다

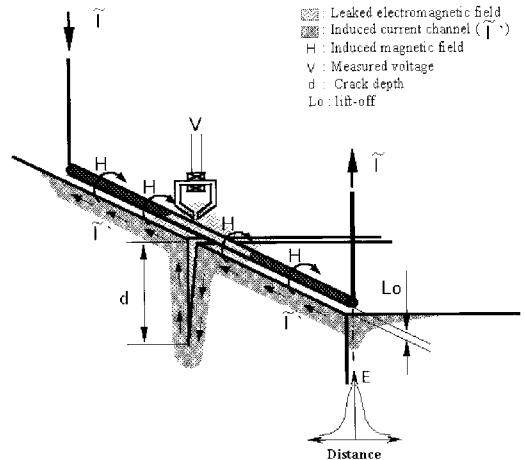


Fig. 1 The principle of the FEF technique

3. 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 상자성체인 알루미늄합금, 스테인리스, 인코넬합금이다. 시험편은 각각 6, 10 및 7 mm 두께의 판상이다. 결함은 방전가공으로 가공된 폭 0.3 mm의 2차원 슬릿이며, 깊이는 알루미늄합금의 경우 0.5, 1.3, 1.9, 3, 4.2 mm이고, 스테인리스의 경우 0.5, 1, 3, 5 mm이며, 인코넬합금의 경우 0.5, 1, 2, 3 mm이고, 각 슬릿 간의 거리는 약 60 mm이다.

측정시 탐촉자는 결함의 길이방향에 대하여 직각 방향으로 1 mm씩 이동하였고, 측정의 재현성을 알아보기 위하여 1회 측정완료 후 1 mm 간격을 이동하여 2회 측정을 실시하였다.

유도선에 공급된 전류는 2 A<sub>RMS</sub>이고, 공급전류의 주파수는 알루미늄합금의 경우 30 kHz이고, 스테인리스와 인코넬합금의 경우 100 kHz로 하였다. lift-off는 각 시험편 공히 0과 0.2 mm로 하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1. 결함이 없는 영역에서의 lift-off 영향

전류가 흐르는 도선 주위의 자계는 도선으로부터 거리에 반비례하여 감소하기 때문에, 교류전원을 이용한 대부분의 비파괴 측정법은 lift-off의 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서 제안한 FEF법도 결함이 없는 영역에서 lift-off의 영향을 살펴볼 필요가 있다. lift-off는 0에서 10 mm까지 변화시켰고, 공급전원의 전류와 주파수는 각각 2 A<sub>RMS</sub>, 30 kHz이다.

Fig. 2는 결함이 없는 영역에서의 lift-off와 측정 전압과의 관계를 나타내고 있다. lift-off가 증가함에 따라 전압이 증가하지만, lift-off가 약 4 mm 이상에서는 전압의 증가폭이 점점 감소하여 포화되고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 lift-off가 증가하여도 측정전압이 증가하며 그 증가 폭이 점점 감소하는 이유는, 철심감지유도전압이 직접유도일정전압보다 크기가 작고, 부호(방향)가 반대이며, 또한 lift-off의 증가함에 따라서 철심감지유도전압의 크기는 lift-off의 거리에 제곱 반비례하여 점점 작아지기 때문이다. (여기서, 직접유도일정전압은 유도회로에서 철심에 감긴 측정코일에 직접 유도되는 전압이며, 철심감지유도전압은 측정물체의 표면에 유도된 전자기장이 철심에 감지되어 측정코일에 유도되는 전압으로 정의한다.)

이상에서와 같이 측정전압이 lift-off에 매우 민감하기 때문에, 측정전압으로부터 lift-off를 평가할 필요가 있다. Fig. 3은 Fig. 2의 측정전압(V)에 lift-off(Lo)를 곱하고 그 값[(V)Lo]을 lift-off에 대하여 나타낸 것이다. [(V)Lo]는 lift-off(Lo)에 대하여 거의 선형관계를 보인다. 이들 관계는 다음과 같이 근사식으로 표현할 수 있다.

$$(V)Lo = Mo + M_1Lo \quad (1)$$

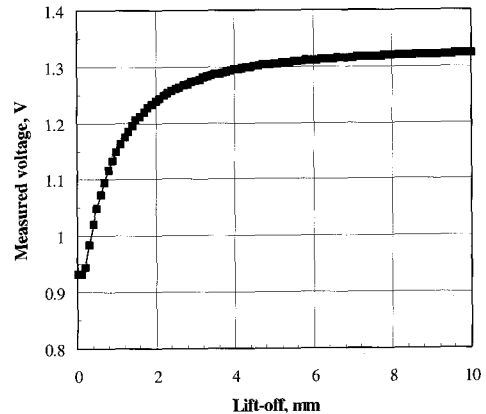


Fig. 2 The relationship between the measured voltages and lift-offs in the defect-free region

여기서, V : 측정전압    Lo : lift-off  
Mo, M<sub>1</sub> : curve fitting법으로 구한 상수

식 (1)의 상수 Mo와 M<sub>1</sub>은 측정하는 재료 및 공급 전원의 주파수 등 측정조건에 의존한다. 식 (1)을 lift-off(Lo)로 나타내면

$$Lo = Mo / (V - M_1) \quad (2)$$

이 식으로부터 lift-off(Lo)는 V의 함수이다. 따라서 이 식을 이용하면 결함이 없는 영역에서 전압을 측정함으로써 lift-off를 예측할 수 있다. 즉 포인트 등으로 보호막이 된 구조물에 대해서도 비접촉 측정이 가능하고, 식 (2)으로 보호막의 두께 측정이 가능하다.

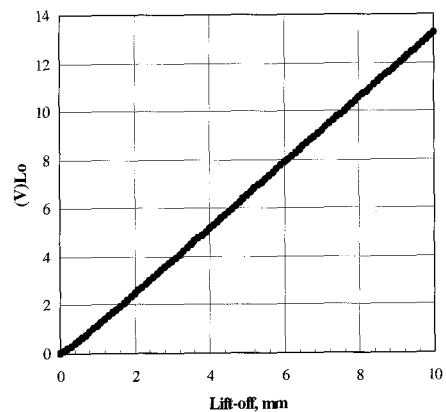
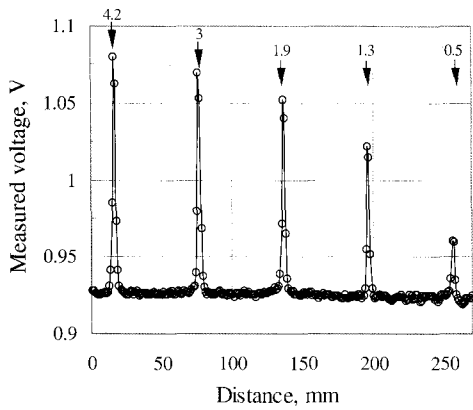


Fig. 3 The relationship between [(V) Lo] and lift-off

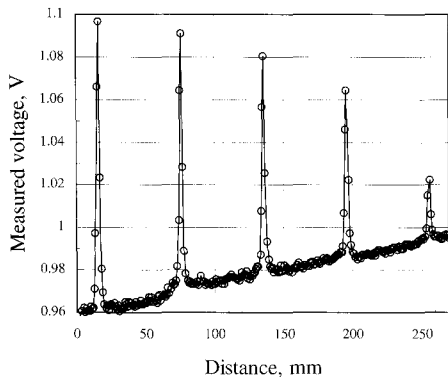
4.2. 2차원 표면결함에 대한 적용

본 절은 표면결함에 적용하였을 때, 결함주위에서 결함깊이의 변화에 대한 측정전압의 변화를 살펴보기 위하여 실험을 실시하였다.

Fig. 4는 알루미늄 시험편에 대한 0 과 0.2 mm lift-off의 전압분포를 결함의 위치에 대하여 나타낸 것이다. 각 결함 근방에서 탐촉자가 결함에 가까이 접근함에 따라 전압이 점점 증가하고, 결함위에서 최고전압으로 측정되고 있다. 이 최고전압은 결함의 깊이에 따라 차이를 나타내고 있다. 결함이 없는 부분에서 측정전압은 표면의 조도 및 재료의 국부적 자기 특성에 의하여 약간의 변화를 나타내고 있지만, 이런 변화는 공학적 오차범위 내에서 무시할 수 있다. 또한 lift-off를 변화시킨 Fig. 4 (b)



(a) 0 mm lift-off

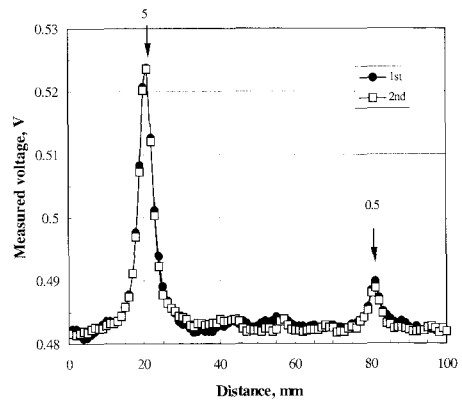


(b) 0.2 mm lift-off

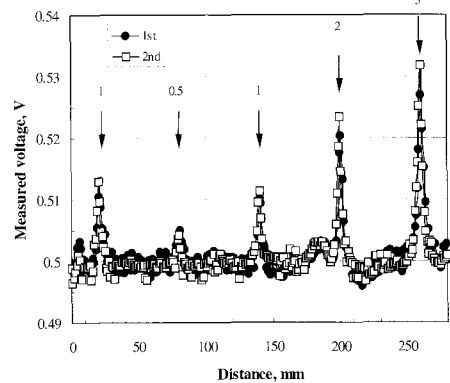
Fig. 4 The distribution of voltage for each slit in aluminum alloy measured with 0 and 0.2 mm lift-off

에서도 전압분포는 동일한 형상을 하고 있다. 다만 lift-off 0.2 mm의 전압 분포에서 경사를 가지고 오른쪽으로 증가하고 있다. 이것은 시험편 가공상의 문제로 측정시 lift-off의 변화에 오는 오차라고 판단된다(측정시 시작점에서 일정한 lift-off로 고정하여 측정하였음).

Fig. 5 (a)와 (b)는 스테인레스강과 인코넬 합금강의 전압 분포를 각각 나타낸 것이다. 그림에서 최고전압은 알루미늄합금의 전압분포와 동일하게 결함위에서 측정되고, 이 최고전압은 결함의 깊이에 따라 차이를 나타내고 있다.



a) stainless steel (Depth : 5, 0.5 lift-off : 0.2 mm)



b) Inconel alloy (lift-off: 0 mm)

Fig. 5 The distribution of voltage for each slit in stainless steel and Inconel ally

이상의 결과에서 보는 바와 같이 재료가 다른 것에 적용하였을 때도 전압분포의 형태는 거의 유사함을 알 수 있다. 또한 결함위치의 최고치는 결함의 깊이에 대하여 차이를 나타내고 있다. 따라서 결함위

치의 최고치는 결함의 깊이를 예측하는데 사용할 수 있으므로, 최고치와 깊이와의 관계 및 lift-off의 의존성을 평가할 필요가 있다. Fig. 6은 알루미늄합금에 대한 것으로, Fig. 4의 전압분포에서 결함위치의 최고치( $V_m$ )를 결함주위의 결함이 없는 곳의 전압을 평균한 전압( $V_a$ )으로 무차원화( $V_m/V_a$ )하고, 결함의 깊이와 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 ( $V_m/V_a$ )는 결함의 깊이가 깊어짐에 따라 비선형으로 증가하고 있고, 점점 증가폭이 감소하여 포화되는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 경향으로부터 누설되는 전자기장의 양은 결함의 깊이에 비례하지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 결함이 깊은 경우, Fig. 6의 교정곡선으로부터 결함의 깊이를 예측하는데 오차가 크게 발생할 수 있으므로, 교정곡선을 이용하는 방법보다 측정전압으로부터 결함의 깊이를 바로 예측할 수 있는 방법이 필요하다. 우리는 각 결함위치의 ( $V_m/V_a$ )에 결함의 깊이( $d$ )를 곱한 값인  $[(V_m/V_a)d]$ 를 결함예측인자로 제시하고, 결함 깊이와의 관계를 고찰하였다.

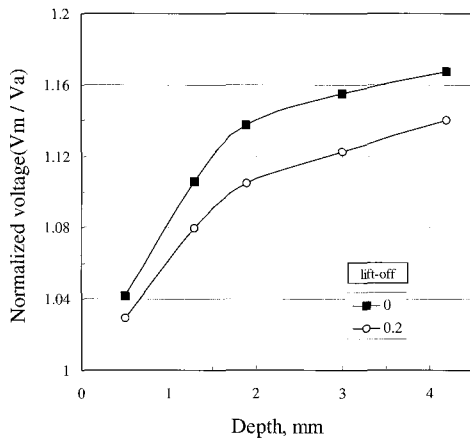


Fig. 6 The relationship between ( $V_m/V_a$ ) and the depth of slit for aluminum alloy

Fig. 7은 측정된 각 재료와 lift-off에 대하여, 예측인자  $[(V_m/V_a)d]$ 를 결함깊이( $d$ )에 대하여 나타낸 것이다. 결함예측인자와 결함깊이와의 관계는 선형을 이루며, 직선의 기울기는 측정재료와 lift-off에 따라서 변화하고 있다. 이들 직선은 다음과 같은 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$(V_m/V_a)d = N_0 + N_1d \quad (3)$$

여기서,  $V_m$  : 결함 위치의 최고치  
 $V_a$  : 결함근방의 평균치  
 $d$  : 표면 결함의 깊이  
 $N_0, N_1$  : curve fitting법으로 구한 상수  
 (측정조건 및 재료에 의존)

식 (3)을 결함의 깊이  $d$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$d = N_0 / [(V_m/V_a) - N_1] \quad (4)$$

이 식은 측정 전압( $V_m, V_a$ )의 함수임을 알 수 있다. 따라서 측정 조건과 재료에 따른  $N_0$ 과  $N_1$ 을 알고,  $V_m$ 와  $V_a$ 를 측정하면 식 (4)를 이용하여 결함의 깊이를 예측할 수 있다.

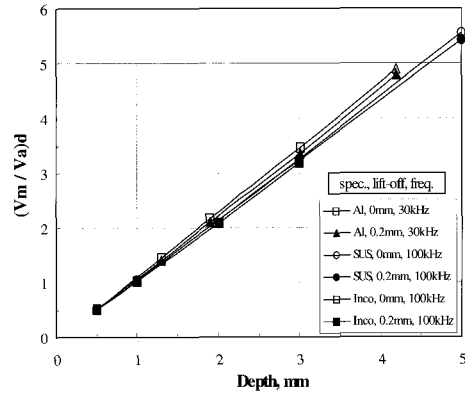


Fig. 7 The relationship between ( $V_m/V_a$ )d and the depth of slit

### 5. 결론

하나의 유도선으로 국부적인 영역에 전자기장을 유도하는 것을 기본 원리로 하는 FEF법을 이용하여 결함이 없는 곳의 lift-off 영향과 몇 개의 상자성체에 도입한 표면결함에 대해 평가를 실시하였다. lift-off의 영향은 측정 표면에 유도된 자기장에 영향을 받으며, 식 (2)에 의하여 측정전압으로부터 lift-off를 예측할 수 있다. 표면결함에 대한 전압분포는 결함에 의해 교란된 전자장의 영향으로 점점 증가하고, 결함의 위치에서 최고 전압으로 측정되었다. 이와 같은 전압분포는 다른 재료에 대해서도 동일한 결과를 얻었다. 최고 전압은 결함의 깊이에 의해 차이를 나타내고 있으며, 이 전압을 이용하여 식 (4)로부터 결함의 깊이를 예측할 수 있다.

이상의 결과를 통하여 FEF법은 표면 결함의 탐상이 가능하고, 결함의 깊이를 충분히 예측할 수 있는 방법임을 알았다.

#### 참고문헌

- [1] H. Hoshikawa, K. Koyama and H. Karasawa, "Study of a new surface eddy current probe without lift-off noise," Journal of JSNDI, Vol. 50, No. 11, pp. 736-742, (2001)
- [2] A. A. Aboutorabi and M. J. Cowling, "Measurement of flaw profile of semi-elliptical surface flaws using the AC potential technique," NDT Inter., Vol. 16, p. 139, (1983)
- [3] H. Kim and T. Shoji, "A study on induced current focusing potential drop (ICFPD) technique -Examination of the sizing accuracy of defects and its frequency dependence-," Journal of the Society of Materials Science Japan, Vol. 43(494), pp. 1482-1488, (1994)
- [4] H. Kim and T. Shoji, "A study on induced current focusing potential drop (ICFPD) technique -Improvement of probe and application for the estimation of 2-dimensional surface defect-," Journal of the Society of Materials Science Japan, Vol. 44(500), pp. 669-674, (1995)
- [5] H. Kim and T. Shoji, "Study on the evaluation of inclined crack by ICFPD technique," Journal of JSNDI, Vol. 44, No. 9, pp. 730-735, (1995)
- [6] 김 훈, "집중유도형 교류전위차법에 의한 표면 결함과 이면결함의 평가에 관한 연구", 비파괴 검사학회지, 16권 2호, pp. 86-94, (1996)