

## Flexible ECA Probe를 이용한 평판 및 용접부 검사

### Inspection of Welded Zone and Flat Plate Using Flexible ECA Probe

이창준\*, 이규성\*, 신충호\*, 이경준\*, 장윤영\*†

Chang-Jun Lee\*, Kyu Sung Lee\*, Chung-Ho Shin\*, Kyoung-Jun Lee\* and Yoon Young Jang\*†

**초 록** Flexible ECT (eddy current array) probe를 사용하여 판재 및 용접부에 존재하는 notch 결함을 MS-5800E와 OmniScan MX 장비로 검출능력을 비교하고, 주파수와 lift-off를 변수로 신호의 특성을 비교하고자 하였다. 실험 결과, 500, 1000, 1500 kHz를 사용하였을 때 notch 깊이가 증가할수록 신호의 진폭이 증가하는 것으로 나타났고, lift-off 변화에 따른 신호의 진폭은 선형적으로 감소하였다. 또한 용접부 결함은 probe와 시험체의 접촉면에 밀접한 관계가 있다. Probe와 시험체의 접촉면이 양호한 경우 검출감도가 우수하고 그렇지 않은 경우에는 검출감도가 떨어지는 것을 알 수 있었다.

**주요용어:** 비파괴검사, 와전류탐상, Flexible ECA (Eddy Current Array) Probe, Lift-off, 표준침투깊이

**Abstract** This paper aims to compare the ability to detect notch defects existing in the plate and welded area using a flexible ECA (eddy current array) probe with OmniScan MX and MS-5800E. The characteristics of signals with various frequencies and lift-offs were also compared. As a result, when signals of frequencies 500, 1000, and 1500 kHz were used, the amplitude of the signal increased, as the depth of the notch increased, but reduced linearly in accordance with the lift-off variation. In addition, the detection sensitivity of the weld defect was found to be closely related to the contact surface of the probe and specimen. In this paper, it was demonstrated that the detection sensitivity was excellent when the contact surface of the probe and the specimen was sufficient, but it was poor when the contact surface was insufficient.

**Keywords:** Non-Destructive Testing, Eddy Current Test, Flexible ECA (eddy current array) Probe, Lift-off, Skin Depth

#### 1. 서 론

비파괴검사(Nondestructive testing; NDT)는 피검사체의 원형을 유지하면서 재료나 부품 등의 물성을 검사하고 평가하는 기술을 말한다. 그러므로 피검사체가 사용되는 환경의 극한값, 잔존수명 등을 예측하기 위해 피검사체를 파괴시험하는 파괴검사와는 구별된다.

비파괴검사는 원자력발전소, 석유화학 설비, 군용장비, 항공기, 발전소의 안전성 확보를 위한 가동중·중 검사, 지역난방 열배관의 건설 및 유지보수검사, 각종 교량과 토목 구조물의 건설 및 유지보수를 위한 안전진단 등에 적용되고 있다. 대표적인 비파괴검사 방법으로는 초음파탐상

(UT), 방사선탐상(RT), 음향탐상(AE), 침투탐상(PT), 자분탐상(MT), 와전류탐상(ECT) 등이 있다.

그중에서 전자기유도 원리를 이용한 와전류탐상(ECT, eddy current test)은 표면과 표면 직하에 존재하는 결함 탐지, 두께 측정, 재료의 속성 분류 등 다양하게 활용되고 있으며 관(pipe)의 제작 검사 및 사용 중인 열교환기 전열관 검사에 대단히 유용한 비파괴검사 방법이다. 와전류탐상 기술은 신뢰도 향상과 검사 속도 증대를 위해 장비와 probe 개발이 지속적으로 이루어 왔으며 최근 array probe를 개발하여 산업현장에 적용함으로써 와전류탐상 기술의 신뢰도 향상뿐만 아니라 경제적 효과도 나타나고 있다[1].

또한, 평판 형태의 표면 probe를 사용한 제조공

정과 예방 보수 검사시의 와전류탐상검사 적용은 역사가 가장 오래되고 중요한 검사이다. 산업현장의 용접부 검사 및 비행기 부품의 균열 및 열처리 효과 검사 등에 사용되고 있다. 와전류탐상 검사는 접촉매질(couplant)이 필요없고 검사가 빠르며 100% 체적검사가 가능한 비파괴검사법이다[2].

본 논문에서는 flexible ECA(eddy current array) probe를 OmniScan MX 및 MS-5800E 장비를 이용하여 기존의 용접부 검사에 적용하던 PT, MT, RT, UT 등의 비파괴검사법을 보완하거나 제한사항(예를 들면, 도색된 용접부 검사)을 해결하고 구조물 영향으로 검사에 어려움이 있는 특수 환경 용접부에 flexible ECA probe를 적용한 검사 방법을 모색하였다.

2. 이론 및 기본원리

2.1. 침투 깊이에 따른 와전류신호 특성

시험체 내에서 와전류 분포는 지수 함수적으로 변화한다. 와전류의 밀도는 시험체 표면에서 최대이며, 시험체 표면에서 깊이 들어갈수록 지수 함수로 감소한다. 보통 지수함수곡선을 표현할 때 횡축(Y축)에 강도 또는 크기를, 종축(X축)에 시간이나 거리를 표현한다. 보통 강도가 37%가 되는 위치를 곡선의 "knee"라고 부르는데, 이는 초기에 X축으로 약간 이동할 때 Y축은 100%에서 37%로 크게 변화하고, 그 이후에는 X축으로 이동함에 대해 Y축이 완만하게 변화하기 때문에 두 영역을 구분하는 의미이다.

이러한 논리를 와전류탐상에 적용시켜 시험체의 와전류 밀도에 대한 용어를 만들어냈다. 시험체 표면에서의 와전류 밀도를 100%로 볼 때, 와전류 밀도가 37%인 깊이를 "표준침투깊이"라고 칭하며, Fig. 1에 시험체 표면에 평행한 자장 성분과 관련된 상대적인 와전류밀도 곡선을 나타내었고, 와전류밀도 관계식은 식(1)과 같다[3].

$$J_x = J_0 \exp -x \sqrt{(\pi f \mu \sigma)} = J_0 \exp\left(\frac{-x}{\delta}\right) \tag{1}$$

여기서,

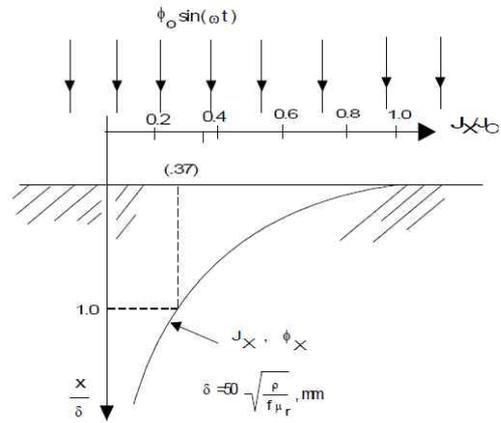


Fig. 1 Eddy current density and magnetic field distribution in the thick specimen

- $J_0$  = 표면에서 전류밀도 [ $A/m^2$ ]
- $\pi$  = 3.1416...
- $f$  = 주파수 [ $Hz$ ]
- $\mu$  = 투자율 [ $H/m$ ]
- $x$  = 표면에서 깊이 [ $m$ ]
- $\sigma$  = 전기전도도 [ $S/m$ ]
- $\delta$  = 표준침투깊이 =  $\sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$  [ $mm$ ]이다.

2.2. 검사 주파수 선정

각 시험을 위해 검사자는 사용 시험 주파수와 위상 조정을 결정하여야 한다. Fig. 2에는 여러 시험 변수( $\rho, \mu, t$ )에 대한 코일 임피던스가 여러 주파수에서 변할 때의 궤적이 나타나 있다. 얇은 평판의 모든 변수들에 대한 일반적인 검사 시 시험 주파수는 "lift-off"와 "평판 두께 변화 신호"가 임피던스 선도 상에서 90°로 분리되도록 선정한다. 이 주파수는 평판 두께와 표준침투깊이 비가 약 0.8배 정도가 되도록 하여 실험적으로 얻어진다.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}, \quad t/\delta = 0.8 \tag{2}$$

위 식으로 주파수 값을 구하기 위해서 아래 식을 도출할 수 있다.

$$f = 1.6 \frac{\rho}{t^2} [kHz] \tag{3}$$

여기서,

- $\rho$  = 비저항 [ $\mu\Omega cm$ ]
- $t$  = 평판두께 [ $mm$ ]이다.

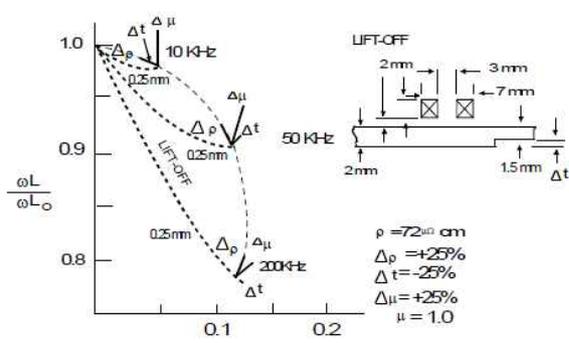


Fig. 2 Probe reaction to the various test parameters in the 3 frequency

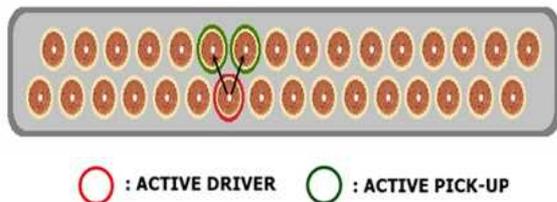


Fig. 3 ECA probe composition

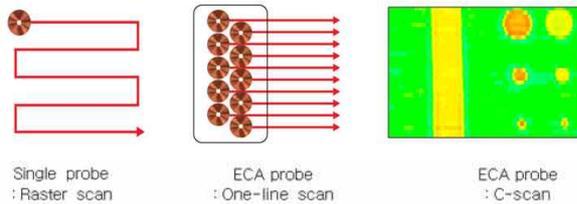


Fig. 4 Scanning principle comparison of ECA probe and single probe

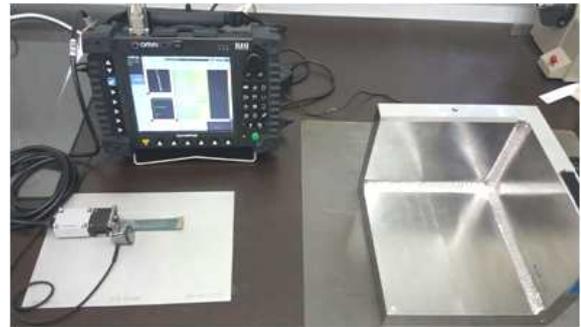
모든 결함신호(표면 또는 표면하 결함)는 90° 이내에 존재하게 된다. 가장 중요한 점은 모든 결함신호는 주파수에 관계없이 lift-off 신호와 두께 감소 신호 각도 이내에 든다는 것이다 (대부분의 적용에 있어 이것은 유효하지만 probe 직경보다 길이가 긴 얇은 결함신호는 lift-off 신호 바로 아래 나타나게 된다)[4].

2.3. ECA Probe의 기본원리

ECA probe는 Fig. 3과 같이 전류를 인가하는 drive coil과 발생하는 전기적 신호를 취득하는 pick-up coil로 구성되어 있다. ECA probe는 Fig. 4와 같이 single-coil에 비해 one-line scan으로 한번에 넓은 범위를 검사할 수 있고, encoder를 장착하여 신호의 이미지 C-scan과 sizing이 가능한 장점이 있다[5].



(a)



(b)

Fig. 5 Configuration of (a) MS-5800E and (b) OmniScan MX experimental setup

Table 1 Used software and probe of MS-5800E and OmniScan MX

Model name	MS-5800E	OmniScan MX
Software	Multiview 6.1 R0 version	MXE 3.0/2.1
Probe	ECA probe(General) Flexible type(FBB-051-500-032) Coverage of 51 mm (2 in.), 32 coil Frequency range : 80~3125 kHz ECA probe cable(CAB-032-OM2_5) Encoder(12 step/mm)	

3. 실험

3.1. 실험장비 및 시험편

본 연구에서 송수신에 사용된 probe는 주파수 범위가 80 kHz에서 3 MHz인 Olympus사의 flexible ECA probe를 사용하였으며, 와전류 신호를 송수신하기 위해 동일사의 MS-5800E과 OmniScan MX를 사용하였다. Fig. 5(a)와 (b)는 MS-5800E와 OmniScan MX의 실험구성을 나타내며, Table 1은 와전류 신호 수집에 사용된 프로그램과 probe의 사양을 나타내었다.

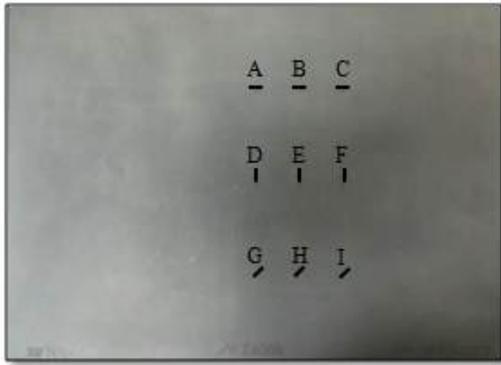


Fig. 6 Shape of flat plate specimen and position of notch

Table 2 Depth and width of notch in flat plate specimen

mm	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Dep	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Wid	0.2								

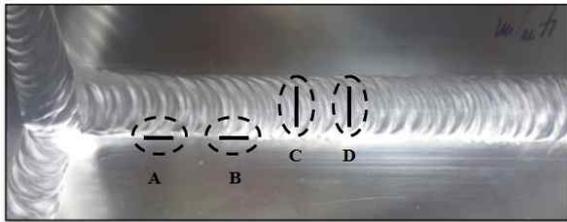


Fig. 7 Shape of flat welded specimen and position of notch

Table 3 Depth and width of notch in welded specimen

mm	A	B	C	D
Dep	2.0	3.0	1.0	2.0
Wid	0.1			

또한 실험에 사용된 시험편은 notch 결함의 깊이와 방향이 다른 평판을 사용하였으며, 두께는 2 mm이다. 그리고 두께가 30 mm인 용접부 시험편을 사용하였으며, 재질은 모두 SUS304이다. 일반적으로 이러한 용접부에 대한 비파괴검사는 초음파탐상, 침투탐상, 자분탐상으로 수행하지만 접촉매질과 자분을 사용하기 어려운 청정지역의 경우 또는 표면이 매끄럽지 못한 경우는 작업환경에 제한이 많기 때문에 표면에 접촉매질을 도포할 필요가 없는 ECA probe를 사용하여 측정해야 한다. 이때 사용한 시험편들의 형상은 Fig 6, 7과 같으며, Table 2, 3은 각 시험편들의 notch 결함 깊이와 폭을 나타내었다.

### 3.2. 주파수에 따른 notch 결함신호 측정

본 장에서는 주파수에 따른 notch 결함신호의 특성을 분석하기 위해 MS-5800E과 OmniScan MX를 이용하여 측정하였다. 이때 사용된 시험편은 notch 결함이 존재하는 평판 시험편이다. 또한 인가한 주파수는 500, 1000, 1500 kHz로 선택하였고, 각각의 주파수에 따른 신호의 진폭(voltage)과 위상각을 측정하고 비교하였다. 본 실험에서 나타난 진폭은 스트립 차트의 VPP(voltage peak to peak)를 측정하여 나타내었고, 위상각은 가장 큰 결함을 90°로 기준을 잡은 후 다른 깊이의 결함들과 비교하였다.

### 3.3. Lift-off에 따른 notch 결함신호 측정

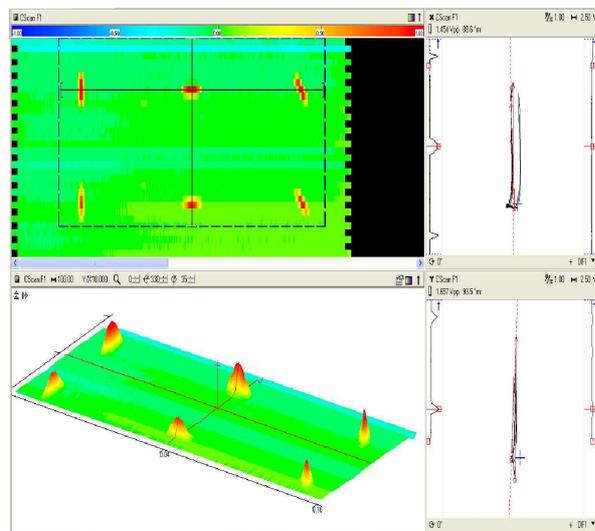
두 번째 실험에서는 첫 번째 실험에서 사용한 장치와 시험편을 그대로 사용하였고, 사용한 주파수는 두 장비 모두 500, 1000 kHz로 동일하게 인가하였다. 또한 lift-off에 따른 notch 결함신호의 특성을 분석하기 위해 0.15 mm부터 0.75 mm까지 0.15 mm 간격으로 설정하였고, notch 깊이가 0.25, 0.5, 0.75인 결함에 대해 측정된 신호의 진폭을 측정하였다.

### 3.4. 용접부 시험편에서의 notch 결함신호 측정

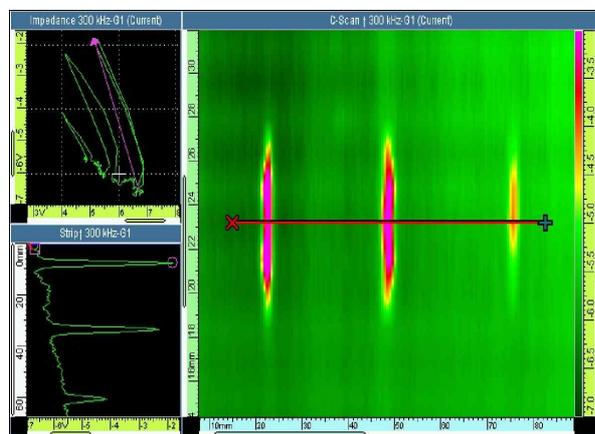
마지막 실험 또한 첫 번째 실험에서 사용한 장치를 동일하게 사용하였으나, 시험편은 평판이 아닌 용접부 시험편을 사용하였다. MS-5800E과 OmniScan MX를 통해서 존재하는 notch 결함의 신호를 측정하여 scan 이미지를 비교하였다.

## 4. 실험 결과

Fig. 8(a)와 (b)는 MS-5800E과 OmniScan MX를 사용하였을 때의 측정된 신호의 예시이며, Fig. 9(a)와 (b)는 MS-5800E와 OmniScan MX를 사용하여 주파수에 따른 진폭을 나타낸다. 두 장비를 사용하여 얻은 결과는 모두 주파수에 상관없이 notch 결함의 깊이가 깊어질수록 진폭이 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 하지만 OmniScan MX의 진폭이 상대적으로 높게 측정된 것은 결함신호의 가시성을 증가시키기 위해 gain



(a)

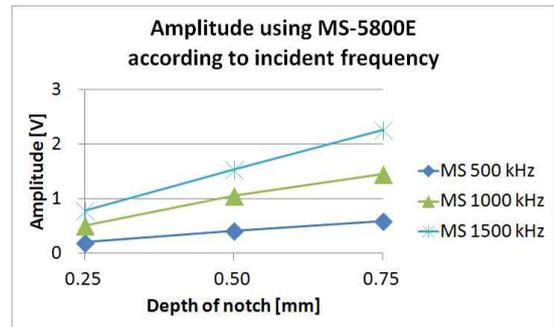


(b)

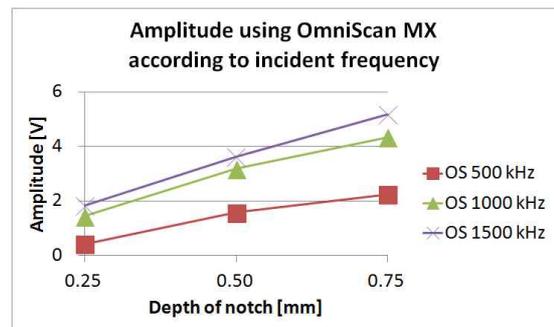
Fig. 8 Measurement example of (a) MS-5800E and (b) OmniScan MX

값을 조정하였기 때문이다. Fig. 10(a)와 (b)는 MS-5800E와 OmniScan MX를 사용하여 동일한 조건으로 실험하였을 때, 주파수에 따른 위상을 나타낸다.

이때 실험결과는 Fig. 10(a)와 (b)에서 알 수 있듯이 장비에 상관없이 notch 결함의 깊이가 증가함에 따라 위상이 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 다음 실험으로는 두 장비를 사용하여 주파수를 달리하였을 때, lift-off에 따른 진폭 특성을 비교하고 분석하고자 하였다. Fig. 11(a)와 (b)는 MS-5800E과 OmniScan MX를 사용하였을 때 주파수를 500 kHz로 설정하여 동일한 조건에서 lift-off에 따른 진폭 특성을 나타낸다. lift-off가 증가함에 따라 두 장비 모두 결함 깊이에 상

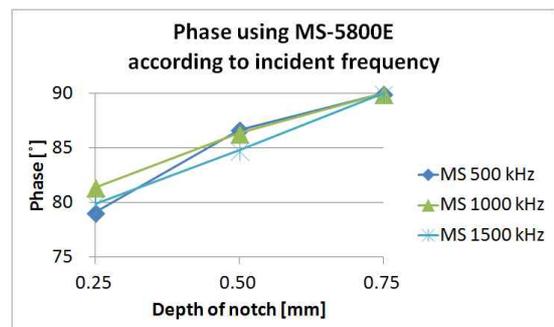


(a)

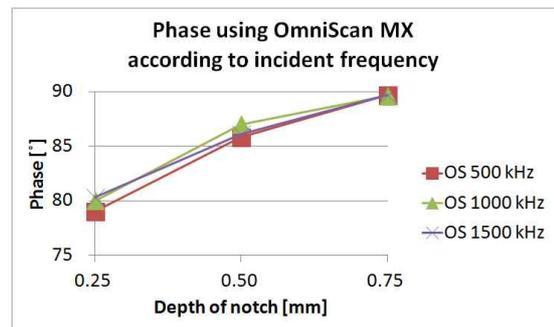


(b)

Fig. 9 Amplitude using (a) MS-5800E and (b) OmniScan MX according to incident frequency

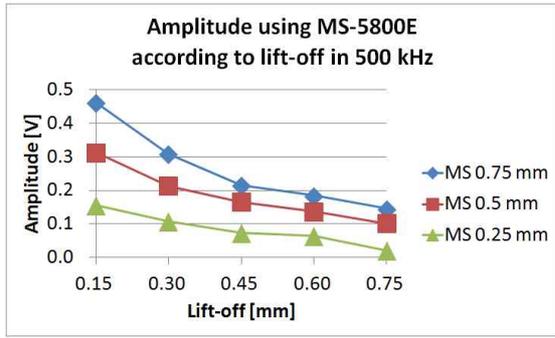


(a)

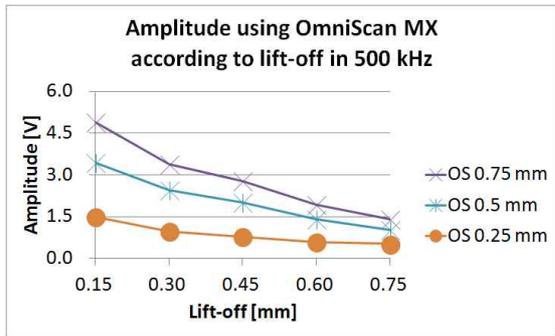


(b)

Fig. 10 Phase using (a) MS-5800E and (b) OmniScan MX according to incident frequency

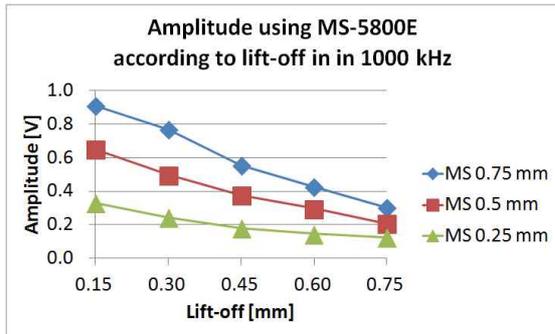


(a)

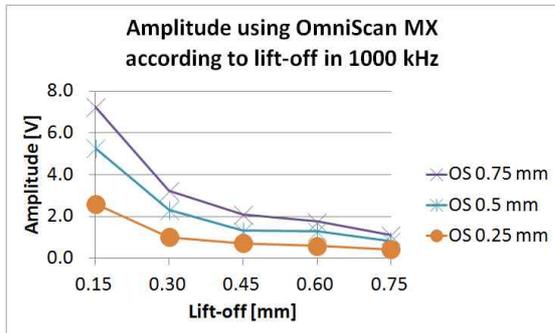


(b)

Fig. 11 Amplitude using (a) MS-5800E and (b) OmniScan MX according to lift-off in 500 kHz

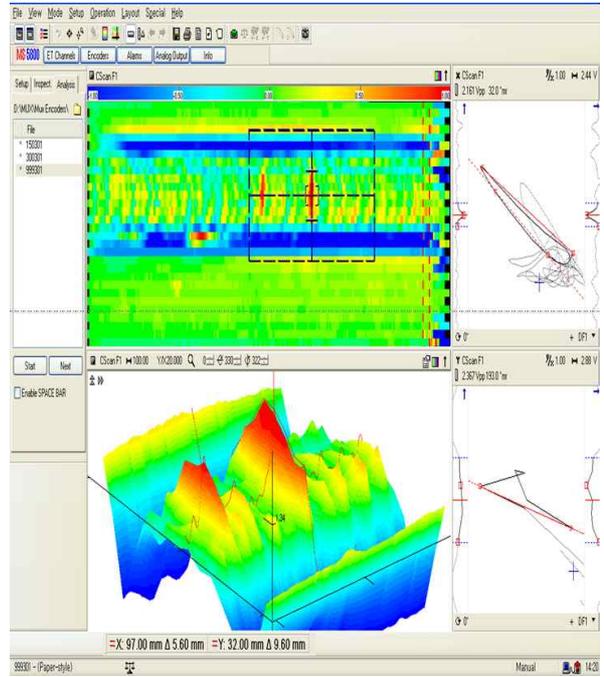


(a)

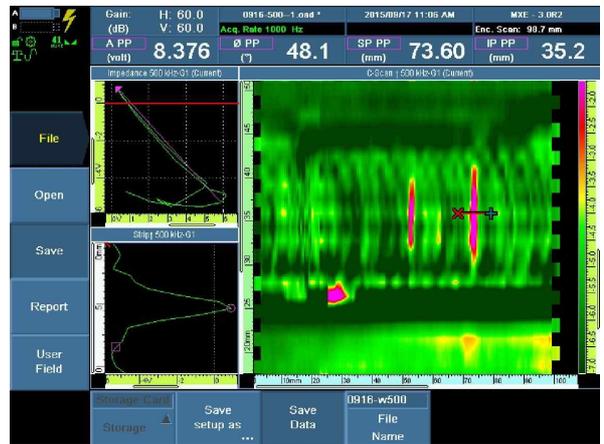


(b)

Fig. 12 Amplitude using (a) MS-5800E and (b) OmniScan MX according to lift-off in 1000 kHz



(a)



(b)

Fig. 13 Scanning image comparison of welded zone in the using (a) MS-5800E and (b) OmniScan MX

관없이 진폭의 크기가 감소하는 것을 알 수 있으며, 경향성 또한 두 장비 모두 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 12(a)와 (b) 또한 동일한 세팅에서 주파수를 1000 kHz로 수정하여 실험한 결과를 나타낸다. 이때, Fig. 11(a)와 (b)의 결과와 마찬가지로 전반적인 깊이에 상관없이 lift-off가 증가함에 따라 진폭의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 마지막으로 Fig. 13(a)는 일반적인 비파괴검사 방법으로 검사가 어려운 용접부에 대하여 MS-5800E를 이용하여 C-scan한 이미

지를 나타낸다. 여기서 알 수 있듯이 용접부와 모재의 경계면에 위치한 A notch 결함은 측정이 되지 않았으며, 같은 경우의 B notch 또한 본래의 길이보다 작게 나타났다. 하지만 용접부의 위에 위치한 C, D notch 결함은 뚜렷하게 검출됨을 알 수 있다. Fig. 13(b)는 (a)와 동일한 세팅으로 용접부의 notch 결함을 측정된 결과이다. 이때의 결과 역시 (a)와 동일하게 A와 B notch 결함의 측정은 어려웠고, C와 D notch 결함의 검출은 잘 됨을 알 수 있다. 실험에서 보는 것과 같이 용접부와 모재의 경계면이 고르지 않기 때문에 probe와 시험체의 접촉면이 양호하지 않아 신호의 감도가 떨어지는 것으로 생각된다. 이를 보완하기 위하여 추가로 pencil type probe를 사용하면 더욱 효과적인 검사가 될 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 실험에서는 flexible ECA probe를 사용하여 SUS304 재질의 notch 결함 시험편 검사를 하였다. 검사결과 평균 notch 시험편에서는 500, 1000, 1500 kHz에서 신호가 잘 나타났고(SUS304 standard의 경우 1000 kHz가 가장 좋은 감도를 나타냈다. 그 보다 낮은 주파수는 감도가 다소 떨어졌으며, 높은 주파수의 경우 S/N비가 증가하였다.), 용접부 notch 시험편에서는 형상 변화에 의한 lift-off 영향으로 500, 1000 kHz에서 다른 주파수에서 보다 높은 감도를 확인할 수 있었다. 또한 결함 깊이에 따른 진폭과 위상 변화는 인가된 모든 주파수에서 결함 깊이가 증가할수록 진폭과 위상이 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. Lift-off 변화에 따른 검출 능력을 확인한 결과 실험에 사용한 flexible ECA probe는 표면에서 0.7 mm 떨어진 곳까지 신호 확인이 가능함을 알 수 있었다. 용접부 notch 시험편 검사 결과 검사 환경 및 조건에 따라 다소 검출이 어려운 결함도

있었으나 대부분 결함은 검출이 가능함을 알 수 있었다. Probe와 시험체의 접촉면이 양호하지 않을 경우 이를 보완하기 위해서 용접부 경계면에 추가로 pencil type probe를 적용하면 더욱 효과적인 검사가 될 것으로 판단된다. 그리고 MS-5800E를 이용한 ECA probe 신호를 확인한 결과, 상용 ECA probe 전용 장비(OmniScan MX)와 감도 차이가 거의 없음을 알 수 있었다. 특히, MS-5800E를 이용하여 신호를 평가할 경우 결함을 분석할 때 C-scan을 활용하면 더욱 쉽게 신호평가를 할 수 있는 기능을 가지고 있다. 끝으로 ECA probe는 용접부 검사용으로 다양한 제품이 이미 개발되어 있으나, 필렛 용접부와 같이 구조가 복잡한 경우 사용 조건에 맞는 지그를 설계하여 검사할 경우 더욱 결함 검출과 신호의 감도가 향상될 것으로 기대된다.

## References

- [1] J. H. Kim and H. B. Lee, "Characteristic analysis of eddy current array probe signal in combo calibration standard tube using electromagnetic numerical analysis," *Journal of the Korean Society Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 4, pp. 330-337 (2010)
- [2] R. J. Bell and A. S. Birks, "An engineer's guide to eddy current testing," ASME 2013 Power Conference. American Society of Mechanical Engineers, pp. 1-8 (2013)
- [3] D. J. Hagemaijer, "Fundamentals of Eddy Current Testing," ASNT (1990)
- [4] V. S. Cecco, G. Van Drunen and F. L. Sharp, "Advanced manual for: Eddy current test method", CAN/CGSB-48.14-M86 (1986)
- [5] OmniScan MX and MX2 User's Manual DMTA-20015-01EN-Rev. G