

# 내부결함 검출 가능한 저주파 ECT 센서개발(I)

- 전자기 유도기전력 손실량의 특성-

박 정 응<sup>\*†</sup> · 장 문 석<sup>\*\*</sup> · 김 국 주<sup>\*\*\*</sup> · 김 범 기<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>조선대학교 공과대학 토목공학과

<sup>\*\*</sup>조선대학교 공과대학 토목공학과 대학원

<sup>\*\*\*</sup>(주)라디안

## Development of New Low Frequency ECT Sensor to Detect Inner Defects(I)

- Characteristic of Loss of Induced Electromotive Force -

Jeong-Ung Park<sup>\*†</sup>, Mun-Seok Jang<sup>\*\*</sup>, Guk-Ju Gim<sup>\*\*\*</sup> and Beom-Ki Kim<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Dept. of Civil Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

<sup>\*\*</sup>Dept. of Civil Engineering, Graduate School, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Randin Corporation, Seoul 34590, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : jupark@chosun.ac.kr

(Received August 17, 2015 ; Revised August 20, 2015 ; Accepted August 22, 2015)

### Abstract

Non-destructive techniques are used widely in the metal industry in order to control the quality of materials. Eddy current testing(ECT) is one of the most extensively used non-destructive techniques for inspecting electrically conductive materials at very high speeds that does not require any contact between the test piece and the sensor. The New ECT sensor which can detect inner defects was developed regardless the condition of surface. This sensor is verified to do experiment which measure the loss of induced electromotive force. The loss of induced electromotive force was measured in 5.4% and this low frequency ECT device can detect internal defects at depth 20 mm.

Key Words : Non-destructive techniques, Eddy current testing, Loss of induced electromotive force, Low frequency ECT

## 1. 서 론

비파괴검사란 방사선, 초음파, 전자기 등을 이용하여 검사 대상물에 손상을 가하지 않는 방법으로 구조물의 결함유무를 파악하여 대형사고 및 파손을 방지하는 기술이다. 산업설비에 소요되는 구조재의 유지·보수 전 과정에서 대상물의 결함 또는 건전성을 확인하는 검사기술로 원자력발전설비, 항공산업, 석유화학 설비 등 대형구조물이나 발전설비의 내부결함을 비파괴적인 방법으로 사전에 결함이나 균열을 검출하는 것을 의미한다.

비파괴검사기술은 발전소를 비롯하여 철강·화학, 건

축·토목(교량, 터널, 도로, 기타), 자동차, 항공기 부품, 전자 부품, 농산물 등과 같이 폭넓은 분야로 확산되고 있는 핵심 기술로 다양한 분야에서 수요가 증가하고 있다. 비파괴검사장비의 용도는 검사방식에 따라 분류할 수 있고, 에너지원과 검사체의 종류 등에 의해서도 구분된다. 검사방식은 채용되는 에너지원<sup>1,2)</sup>(방사선, 와전류, 자기장, 특수액체, 초음파, 중성자, 음향 등)에 따라 구분된다.

본 연구에서는 와전류법에 의한 비파괴검사방법에 관한 것으로서 전도체일 경우 적용가능 하고, 비접촉식 방법이며, 고속으로 탐상할 수 있어 관, 봉 등의 비교적 단순한 형상의 제품 검사와 발전소<sup>4,6)</sup>, 화학 플랜트 배관의 보수검사에 널리 이용되고 있다. 그러나 와전류

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Journal of Welding and Joining, Vol.33 No.4(2015) pp57-62

<http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.4.57>

탐상방법은 표면결합의 검출에는 우수하지만 깊은 내부 결함을 검출하지 못하는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서 표면의 상태에 관계없이 내부결합을 검출할 수 있는 저주파 ECT 센서를 개발하였다. 저주파센서에서 측정정확도에 영향을 미치는 유도기전력의 손실량을 측정하고 내부결합 검출 실험을 실시하여 저주파 ECT 장치의 검출능력을 실험으로 검증하였다.

## 2. 저주파 ECT 센서 특징 및 장치

본 저주파 ECT 센서는 기존의 센서의 문제점을 보완하여 2개 이상의 쌍을 갖는 1차코일과 2차코일을 병렬로 연결시켜 동일한 교류자장을 형성시키고 그 교류자장의 크기에 따라 변화하는 유도전류를 1센서부와 2센서부(Fig. 1)에서 각각 고속으로 샘플링하여 증폭회로에서 증폭과 노이즈 필터링을 거쳐 제 1센서부의 데이터와 제 2센서부의 데이터의 각각의 위상의 변화와 진폭의 변화, 저항의 변화(Fig. 2) 등을 분석한다. 이러한 결과로부터 용접부위의 제품의 균열을 비파괴적으로 검사하는 방법이다. 본 저주파 ECT 센서의 특징은 앞에서 설명한 것과 같이 제 1센서부와 제 2센서부로부터 기존의 자기 센서에서 출력시키지 못했던 진폭과 위상을 고감도로 도출할 수 있는 것이다. 이러한 원리에 의해 유도기전력으로부터 금속의 손상정도를 검출할 수 있을 뿐 아니라 저주파를 사용함으로써 내부의 결함도 동시에 검출할 수 있다.

저주파 ECT 장치는 크게 Fig. 3과 같이 3개 장치, 손상검출 센서부, 인터페이스부, 측정값분석부로 구성된다. 피로손상 검출센서부는 코일로 교류자계를 발생시키면, 구조체에 유도자기력이 발생되고, 금속손상이 있는 경우 변형된 유도기전력을 전자기 유도센서로 검출하는 장치이다. 인터페이스(파형검출 및 증폭, A/D 변환기)부는 센서부로부터 측정된 유도자기력을 증폭 및 A/D변환을 하는 장치로 구성되며, 또한 교류전류를 제어한다. 측정값 분석 및 GUI구성부는 A/D변환된 측

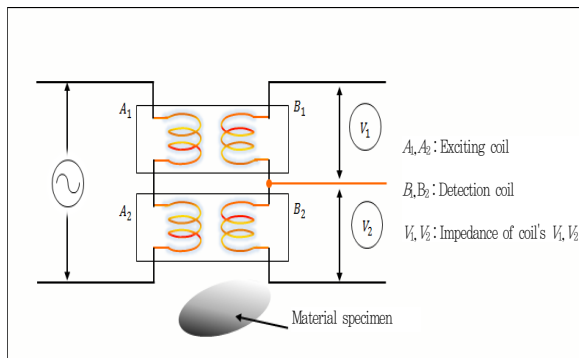


Fig. 1 Schematic diagram of electrical network of sensor

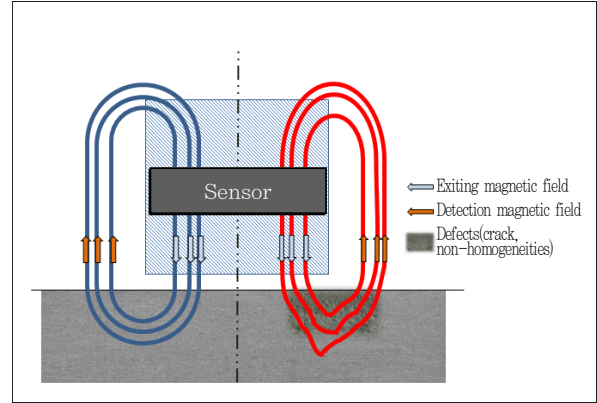


Fig. 2 Principle of electromagnetic induction

정값으로부터 노이즈를 제거하고 측정된 유도자기력으로부터 위상의 변화, 진폭의 변화 그리고 저항의 변화로 분석하는 소프트웨어와 이를 쉽게 볼 수 있도록 GUI구성하는 소프트웨어 및 장치로 구성된다.

## 3. 전자기 유도기전력의 손실량 측정 실험

### 3.1 상호유도에 의한 유도기전력 측정원리

전기장과 자기장의 상호간 유도현상을 설명하는 것이 패러데이 법칙으로, 임의의 폐회로에서 발생하는 유도기전력의 크기는 폐회로를 통과하는 자기선속의 변화율과 같다는 것을 의미한다. 수학적으로는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \tag{1}$$

여기서  $\Phi_B$  : 자기 선속,  $\varepsilon$  : 기전력 이다

만약, 코일을 N회 감긴 코일을 생각하면, 코일은 원형 도선이 겹겹이 쌓여있는 형태로 볼 수 있고, 각 원형 도선을 통과하는 자기선속은 동일하다. 이 때 유도

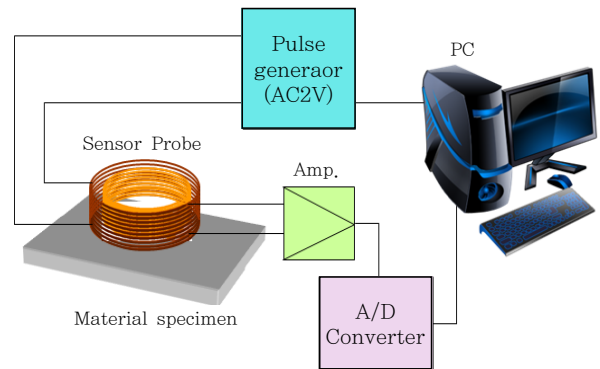


Fig. 3 Composition of low frequency ECT device

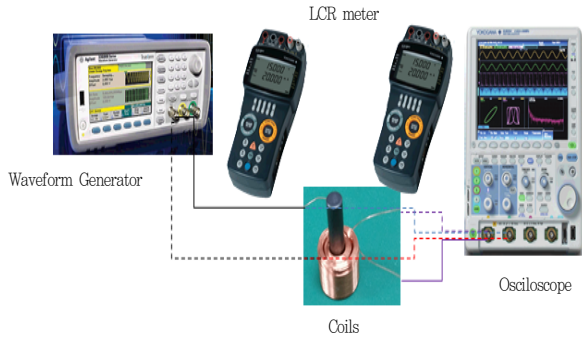


Fig. 4 Connection diagram of sensor and measuring devices

기전력은 다음과 같다.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \tag{2}$$

전기 회로에서 발생하는 유도 기전력은 폐회로를 통과하는 자속의 변화에 반하는 유도 자기장을 만드는 방향으로 발생한다. 예를 들어, 폐회로를 통과하는 자속이 감소할 경우 이를 증가시킬 수 있는 유도 자기장을 만들기 위해, 유도 전류가 그에 맞는 방향으로 흐르게 된다. 맥스웰 방정식의 패러데이 법칙에서 렌츠의 법칙은 (-)부호로 나타난다. 자기장은 1차코일에 의하여 발생한다. 코일에서 앙페르의 법칙을 쓰면 한 단면적에서 어느 점에서나 자기장이 일정하다는 것을 보일 수 있다. 무한한 도선에선 솔레노이드 어느 부분의 중심을 잡아도 자기장이 일정하므로 솔레노이드 모든 점에서 자기장이 균일하다. 앙페르 고리에서 앙페르의 법칙을 사용하면 직사각형의 윗변과 아랫변에서는 자기장의 방향과 적분 방향이 수직하므로 적분값이 0이고 오른쪽 변에서는 자기장이 0이므로 적분값이 0이다. 결과적으로 직사각형의 왼쪽 변의 길이를  $l$ 이라고 하면 앙페르의 법칙에 의해 다음과 같다.

$$\int Bdl = \mu_0 inl \tag{3}$$

단,  $n$ 는 단위 길이당 감겨있는 도선의 수이다.

코일내부에서 자기장의 세기는 일정하므로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\int Bdl = Bl = \mu_0 inl \tag{4}$$

$$\therefore B = \mu_0 i n \tag{5}$$

각진동수  $\omega = 2\pi f$  인 교류전류( $i$ )가 코일을 통하여 흐르는 경우 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i = i_0 \sin \omega t \tag{6}$$

이때 전류에 의하여 유도되는 기전력은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{u_0 A N N' w i_0 \cos \omega t}{l} \tag{7}$$

### 3.2 상호유도에 의한 유도기전력 측정방법

유도기전력의 손실량을 측정하기 위해 파형발생기(waveform generator), LCR meter, 오실로스코프(oscilloscope), MultiTester를 준비하고 Fig. 4와 같이 1차코일과 2차코일을 연결한다.

1차코일에 파형 발생기를 연결하고, 임의의 주파수와 전압을 인가하였을 때 1차코일과 2차코일의 전류를 Multitester를 이용하여 측정한다. 또한 오실로스코프를 사용하여 파형을 검증한다. 구체적으로는 다음 2가지 방법으로 측정한다. 첫 번째 방법은 파형발생기의 인가 전압을 일정하게 하고 주파수 범위는 1kHz 에서 10kHz 범위로 변화시키며 주파수 변화에 따른 1차, 2차코일의 전류를 측정한다. 또 다른 방법은 파형발생기의 주파수를 고정하고 전압을 변화시키면서 변화되는 전압에 따른 1차, 2차코일의 전류를 측정한다. 이러한 방법으로 측정된 전류를 식(7)에 대입하여 유도기전력 값( $\varepsilon$ )을 계산한다. 또한 2차코일에 대한 1차코일의 변화도 위와 같은 방법으로 반복하여 측정한다. 1차와 2차코일로부터 유도전압(V)과 이론 기전력( $\varepsilon$ )의 상대오차(V/ $\varepsilon$ )를 계산하고 그 차이가 작은 것을 선별하는 것이 좋다. 선별된 코일로부터 유도 용량이 크면 유도 기전력도 함께 증가하므로 LCR meter를 이용하여 코일의 인덕턴스 값과 저항을 측정하여 저항이 작고 인덕턴스 값이 높은 센서를 선별하는 것이 좋다.

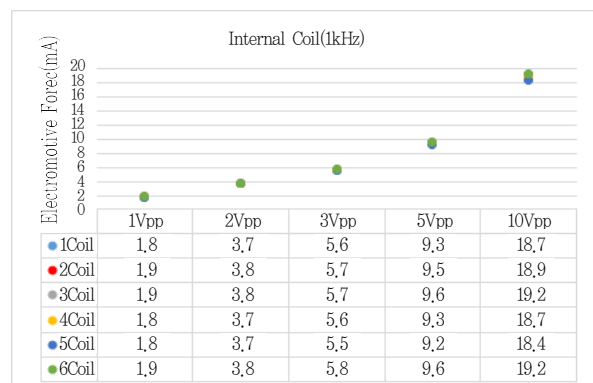
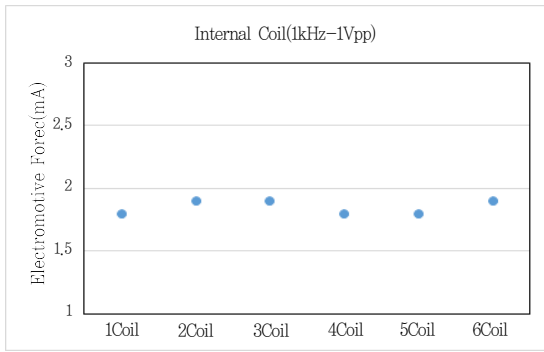
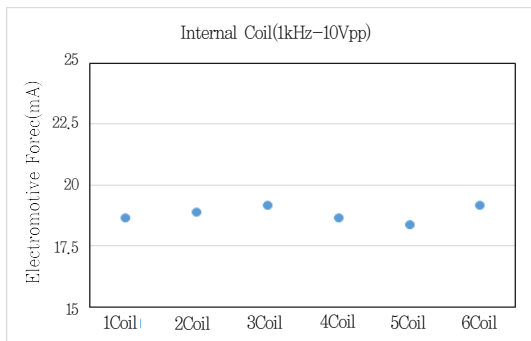


Fig. 5 Electromotive force of internal coils according to volts



(a) 1Vpp



(b) 10Vpp

Fig. 6 Variation of electromotive force of internal coils

3.3 실험결과 및 고찰

Fig.5는 내부코일의 유도기전력을 보여주고 있다. 측정된 유도기전력은 내부코일의 내경이 3mm이고, 외부코일이 내경이 6mm인 총 6개의 코일에 대해 인가전압을 1, 2, 3, 5, 10Vpp로 변경하면서 측정된 값을 보여주고 있다. 이때의 주파수는 모두 1kHz로 동일하다. 인가볼트가 증가에 따라 유도기전력의 크기도 동시에 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 각 코일은 동일 인가전압에 대해 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이것은 코일제작시 거의 동일한 작업환경을 유지하고 있는 것을 알 수 있다.

각 코일에 대한 유도기전력의 손실을 보다 면밀히 검토하기 위해 인가볼트 1Vpp와 10Vpp에 대해 Fig.6에 보여주고 있다. 인가 전압이 1Vpp인 경우 코일에 따라 유도기전력의 값이 다르나 그 범위가 0.1이내(평균의 5.4%)이고, 10Vpp인 경우는 0.8 이내(평균의 4.2%)로 나타나 그 변화량이 매우 작은 것으로 나타났다.

한편 외부코일의 유도기전력의 변화량은 Fig. 7에 보여주고 있다. 외부코일 시험시 유도기전력의 변화를 크게 하기 위해 주파수를 5kHz를 사용하였다. 유도기전

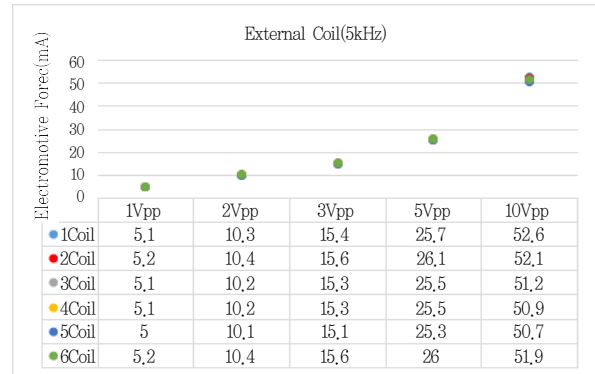
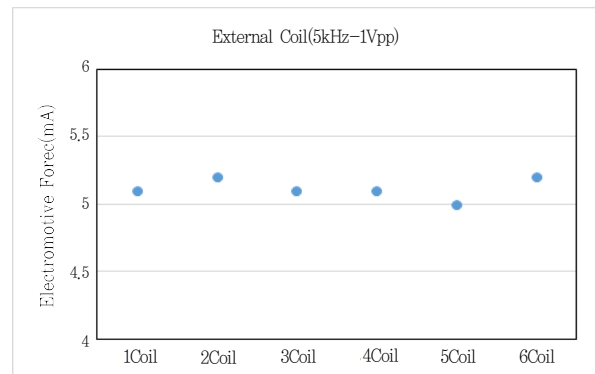
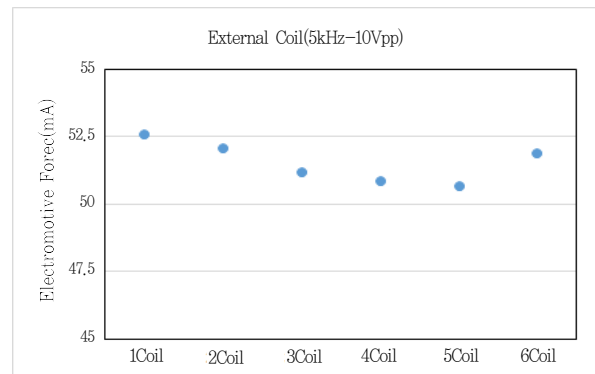


Fig. 7 Electromotive force of internal coils according to volts



(a) 1Vpp



(b) 10Vpp

Fig. 8 Variation of electromotive force of external coils

력은 내부코일의 경우 2-20mA에 비해 5-50mA로 두 배이상 증가하여 나탄 것을 알 수 있다. 이것은 주파수를 상승시킨 결과이고, 각 코일에 대해 동일한 인가전압인 경우 유도기전력의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 외부코일에 대해서도 유도기전력의 손실을 보다 면밀히 검토하기 위해 인가볼트 1Vpp와 10Vpp에 대해 Fig.8에 보여주고 있다. 인가 전압이 1Vpp인 경우 코일에 따라 유도기전력의 값이 다르나 그 범위가 0.1 이내(평균의 1.9%)이고, 10Vpp인 경우는 1.9 이내

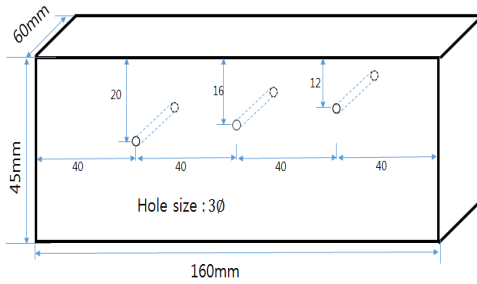


Fig. 9 Geometry of artificial holes specimen

(평균의 3.6%)로 나타나 그 변화량이 매우 작은 것으로 나타났다.

저주파ECT센서의 유도기전력의 변화량을 측정한 결과 인가전압과 주파수가 증가할수록 유도기전력은 크게 나타났다. 또한 동일한 주파수 와 인가전압인 경우 코일에 따른 유도기전력의 변화량은 인가전압이 낮을수록 적게 나타났다.

#### 4. 내부결함 검출실험

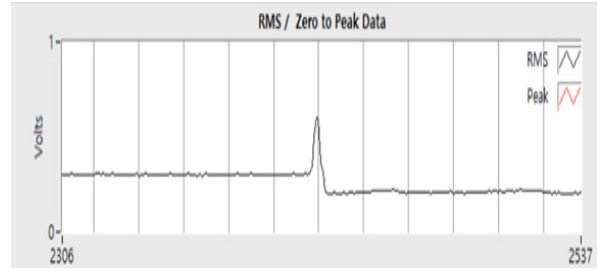
저주파 ECT센서를 이용한 내부결함검출을 위하여 인공 시험편은 제작하여 모의실험을 시행하였다. 기존 ECT장비의 경우 최대 4mm 깊이의 결함을 검출할 수 없으나 본 센서의 경우 최대 20mm 깊이의 인공결함을 만들어 저주파 ECT센서의 검출능력을 실험하고자 한다.

##### 4.1 실험 준비

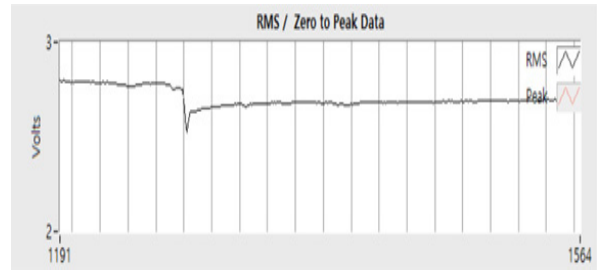
시험편의 강종은 일반적으로 많이 사용되고 있는 일반구조용 탄소강인 SS400을 사용하였으며, Fig. 8에서 보는 바와 같이 160×60×45mm 크기로 제작하였다. 실제 비파괴평가의 목적인 내부결함의 검출을 위해서 재료내부에 인공결함을 부여하기 위해 직경 3mm의 홀가공을 수행하였다. 또한 홀간 중심간 거리를 최소 12mm부터 시작하여 16mm, 20mm까지 깊이이고, 홀간 간격은 모두 40mm로 제작을 하였다.

##### 4.2 실험결과 및 고찰

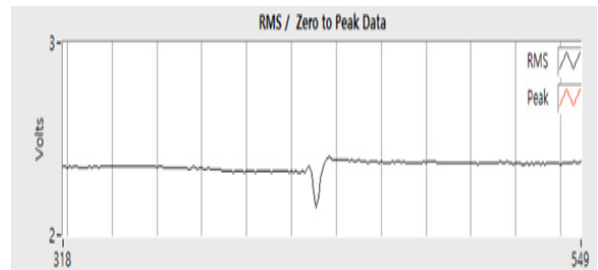
Fig.9는 내부결함에 대한 결함검출신호를 시험체의 표면으로 깊이에 따라 검출한 결과를 보여주고 있다. 시험에 사용한 센서는 3.2절에서 사용한 센서와 동일하며 3절에서 기전력의 손실량은 코일을 가지고 제작된 센서이다. 내부 결함은 Fig.8과 같이 내부로 12, 16, 20mm에 있고 Fig. 9의 (a),(b),(c)와 같이 각 결함을 검출한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의



(a) depth =12mm



(b) depth =16mm



(c) depth =20mm

Fig.10 Detection signal of internal holes

ECT의 한계인 4mm보다 5배 정도 더 깊은 결함을 검출할 수 있었다.

#### 5. 결 론

표면의 상태에 관계없이 내부결함을 검출할 수 있는 저주파 ECT센서를 개발하였다. 그리고 저주파센서에서 측정정확도에 영향을 미치는 유도기전력의 손실량을 측정하고 내부결함 검출 실험을 실시하여 저주파 ECT 장치의 검출능력을 실험하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

저주파ECT 센서의 유도기전력의 변화량을 측정한 결과 인가전압과 주파수가 증가할수록 유도기전력은 크게 나타났고, 동일한 주파수와 인가전압인 경우 코일에 따른 유도기전력의 변화량은 인가전압이 낮을수록 적게 나타났다. 그러나 유도기전력의 손실량은 5.4% 이내로 측정되어, 측정시 기전력의 손실은 최소화시킬 수 있었다. 내부결함 검출실험에서는 내부결함 20mm까지 측정할 수 있어 기존의 ECT장비의 성능 대비 5배 정도

증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 내부직경이 3mm인 센서로서 내부직경이 증가하고, 주파수변동에 따라 더 깊은 내부결함도 검출 할 수 있을 것으로 판단 된다.

### 감사의 글

이 논문은 2013년도 해양수산부 미래해양산업기술개발사업(20130158)과 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구 사업지원(No. 2014-044260)의 결과로 수행되었음.

### References

1. Ik Gun Park : Nondestructive evaluation of spot weld quality using by ultrasonic measurement, *Journal of KWS*, 12 (3) (1994), 402-410.
2. ASNT, Nondestructive Testing Handbook Electromagnetic Testing, 3rd Eds., 5 (2004), 172-179.
3. EPRI, Electromagnetic NDE Guide for Balance-of-Plant Heat Exchangers, Rev. 2, (1997), 3.2-21-4.0-30.
4. V. S. Cecco, Eddy Current Manual, Vol. 1 Test Method, AECL Chalk River Lab., (1983), 168-174.
5. G. P. Singh, R. A. Cervantes and R. L. Spinks, Ultrasonic Nondestructive Testing Technique for the Examination of Low-Pressure Turbine discs Rims, *SWRI*, (1985), 398- 401.
6. ASTM B637, Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars, Forgings, and Forging Stock for High-Temperature Service, (1993), 276-278.
7. Donald J, Hangemaier: Fundamentals of Eddy Current Testing, *ASNT*, (1990), 43.
8. ASNT, Nondestructive Testing Handbook 2nd. Edition Vol.4. Electromagnetic Testing, (1986), 382
9. ASM, "Metal Handbook", 8th ed., Vol2, (1964), 398-405.
10. Ahn, Y. S., Geong, G. J., New Eddy Current Technology Development in Power Plant, (2004), 110-122.