

## 펄스 와전류를 이용한 알루미늄 두께 평가

### Thickness Evaluation of the Aluminum Using Pulsed Eddy Current

이정기\*<sup>†</sup>, 서동만\*\*, 이승석\*

Jeong-Ki Lee\*<sup>†</sup>, Dong-Man Suh\*\* and Seung-Seok Lee\*

**초 록** 일반적인 와전류 검사는 단일 주파수 또는 매우 협소한 주파수 대역을 가지는 정현적 신호 사용하며, 알루미늄과 같은 도체에서 피로 균열 같은 결함을 검출하는데 사용되고 있다. 이에 반하여 펄스 와전류는 아주 넓은 주파수 대역폭을 가지는 펄스 신호를 사용한다. 이것은 여러 주파수를 동시에 사용하는 다중 주파수 와전류 검사를 한번에 수행할 수 있도록 하며, 일상적인 와전류 검사에 비하여 침투 깊이를 더 깊게 할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 부식 또는 침식 등에 의한 금속 손실을 평가하기 위한 펄스 와전류 장치를 개발하였다. 개발된 장비는 최대 40 V의 구형 펄스를 발생시키는 펄스 발생기, 수신된 신호를 52 dB까지 증폭하는 증폭기, 16 bit 20 MHz의 A/D 변환기, 윈도우 프로그램으로 운영되는 산업용 개인 컴퓨터로 구성하였다. 펄스 와전류 탐촉자는 구동 코일 안에 검출 코일을 삽입한 pancake 형태로 설계 제작하였다. 검출 코일의 출력 신호는 구동 코일에 전압을 끊을 때 갑자기 증가하고 신호의 후반부는 시간에 따라 지수적으로 감소하였으며, 감쇠율을 나타내는 지수 값은 알루미늄 두께가 두꺼울수록 증가하였다.

**주요용어:** 와전류 검사, 펄스 와전류, 부식 평가, 도체

**Abstract** Conventional eddy current testing has been used for the detection of the defect-like fatigue crack in the conductive materials, such as aluminum, which uses a sinusoidal signal with very narrow frequency bandwidth. Whereas, the pulsed eddy current method uses a pulse signal with a broad bandwidth. This can allow multi-frequency eddy current testing, and the penetration depth is greater than that of the conventional eddy current testing. In this work, a pulsed eddy current instrument was developed for evaluating the metal loss. The developed instrument was composed of the pulse generator generating the maximum square pulse voltage of 40 V, an amplifier controlled up to 52 dB, an A/D converter of 16 bit and the sampling frequency of 20 MHz, and an industrial personal computer operated by the Windows program. A pulsed eddy current probe was designed as a pancake type in which the sensing coil was located inside the driving coil. The output signals of the sensing coil increased rapidly when the step pulse driving voltage turns off, and the latter part of the sensing coil output voltage decreased exponentially with time. The decrement value of the output signals increased as the thickness of the aluminum test piece increased.

**Keywords:** eddy current testing, pulsed eddy current, corrosion evaluation, conductors

## 1. 서 론

부식은 구조물과 시스템의 수명을 제한하는 요소 중의 하나이다. 부식을 평가하기 위한 많은 비파괴 평가 방법이 개발되어 왔고, 사용되고 있으나, 항공기의 lap joint와 같은 다층 구조에서 표면 층 밑에 숨어있는 부식을 정량적으로 평가하는 것은 어려운 과제이다. 다층 구조에서 초음파는 기계적으로 결합되어야만 둘째 층과 셋째 층으로 초음파 에너지가 전파할 수 있는 반면에 와전류는 층들이 기계적으로 결합이 되어있지 않더라도 각 층에 와전류가 유도되는 장점이 있어 다층구조의 비파괴 평가에 유용하다.

그러나 단일주파수를 사용하는 와전류 검사에서는 결합의 깊이에 대한 정보가 부족하며 침투 깊이에 의한 검사 영역의 제약을 갖는다. 이러한 제약 조건을 극복하기 위한 방법으로 두 개 이상의 주파수를 사용하는 다중 주파수 와전류 검사법이 개발되었다[1,2]. 이 방법은 다층 구조에서 표면 층 밑에 숨어 있는 부식을 평가하는데 있어 단일 주파수 와전류 검사법에 비해 효과적이기는 하지만, 연속적으로 주파수를 변화시켜야 하기 때문에 시간이 많이 걸리고, 임피던스 matching을 하기 위하여 장치가 복잡해진다.

일반적인 와전류 검사법에 비하여 펄스 와전류(PEC) 검사법은 구형 펄스와 같은 광대역 펄스를 사용한다. 도체의 시험체 위에 구동 코일을 두고 광대역 펄스 전압을 구동 코일에 인가하면 시험체에는 과도적인 와전류가 유도된다. 이러한 펄스 전압에 의해 형성되는 와전류는 확산 방정식으로 설명할 수 있는 매우 심하게 감쇠하는 파동과 같은 특징을 갖는다[3]. 이러한 특징으로 인하여 펄스 와전류는 sinusoidal 전류에 의해 유도되는 일반적인 와전류에 비하여 넓은 폭의 주파수 성분을 지니기 때문에 침투 깊이가 증가된다[3]. 최근 PEC에 대한 연구는 주로 lap-splice의 층 사이에 숨어있는 부식을 평가하기 위하여 수행되어 왔으며[4-6], 기저상체 판에 대한 부식 평가에 대한 연구도 시도되었었다[7]. 이러한 PEC 검사 기술에 있어서는 일반적으로 와전류 검사에서 사용하는 코일 센서뿐만이 아니라 Hall 센서와 giant magnetoresistive(GMR) 센서를 사용하는 연구도 진행되었다[4,8]. PEC는 과도 와전류에 의해 형성되는 시편 표면의 field의 변화를 측정하여 표면 밑의 상태를 파악하는 것이므로 coil 센서보다는 GMR 센서가 보다 정확한 측정 결과를 얻을 수 있다[8]. 그럼에도 불구하고 coil 센서는 다양한 형태로 제작하기가 쉬워 현장 적

용이 용이하며, 수신 감도를 적절하게 조절할 수 있기 때문에 많이 사용하고 있다.

본 연구에서는 코일 센서를 사용한 PEC 전용 검사 장비를 개발하였으며, 개발된 구성 요소와 성능 평가 결과를 나타내었다. 그리고 구동 코일의 자기 유도 계수(inductance)와 시험체의 두께가 코일 센서의 출력 전압에 주는 영향을 분석하였다.

## 2. 펄스 와전류(PEC) 장치 구성

Fig. 1(a) 개발된 PEC 장치의 구성도를 나타낸 것이다. 개발된 PEC 장치는 구동 코일과 검출 코일로 구성된 probe부, 구동 코일에 인가하는 펄스 전압을 발생시키는 펄스 발생부, 검출 코일에 수신된 신호를 증폭하는 증폭부, 수신 신호를 디지털 신호로 전환하는 A/D 변환부, 그리고 장치를 제어하고 신호를 저장하고 보여주기 위한 산업용 컴퓨터로 구성하였다. 펄스발생부는 최대 40 V의 구형 펄스(square pulse)를 발생시키며 펄스 발생 회수는 100 Hz에서 1 kHz까지 조절 가능하도록 하였으며 duty cycle은 50%가 되도록 하였다. 본 연구에서는 300 Hz의 구형 펄스를 발생시켰다. 그리고 증폭부는 검출 코일의 신호는 최대 52 dB까지 증폭하도록 하였으며, A/D 변환기는 16 bit의 진폭 분해능과 20 MHz sampling rate를 갖는 것을 사용하였다. 그리고 Visual C++을 사용하여 본 장치의 조작용을 위한 전용 Windows 프로그램을 개발하였다.

Fig. 1(b)는 본 장치와 연결하여 사용하는 probe의 구조를 나타낸 것이다. 구동 코일 안쪽에 검출 코일이 삽입되는 구조를 하고 있으며, 구동코일의 외경은 30 mm 내경은 10 mm로 하였으며, 검출코일의 외경은 7 mm와 3 mm가 되도록 하였다. 그리고 검출 코일의 자기 유도 계수는 73  $\mu$ H로 고정시키고 구동 코일의 자기 유도 계수는 670  $\mu$ H, 1.7 mH, 2.7 mH, 3.6 mH, 22 mH로 변화시켜 구동 코일의 영향을 조사하였다.

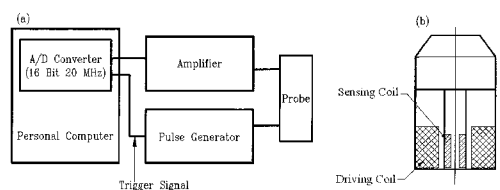


Fig. 1 (a) The schematic diagram of the developed PEC instrument and (b) the structure of the probe

### 3. PEC 장치의 성능 평가

Fig. 2는 펄스 발생기에서 발생된 펄스 전압이 구동 코일에 가해졌을 때 구동 코일 양단에 걸리는 peak 전압을 나타낸 것이다. 코일에 급작스럽게 전류를 끊어주면 파라데이(Faraday) 법칙에 의하여 코일에 역기전력이 발생되어 주어진 구형 펄스 전압보다 더 큰 peak 전압이 유도된 것이다.

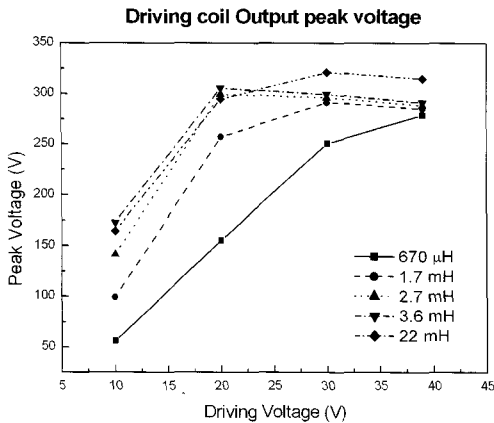


Fig. 2 The variation of the peak output voltage of the driving coils with the step pulse voltage

Peak 전압은 펄스 발생기의 펄스 전압에 따라 선형적으로 증가하지 않음을 보여주고 있다. 구동 코일의 자기 유도 계수가 670 μH인 경우 펄스 발생기의 펄스 전압이 30 V까지 선형적으로 증가하였으나, 다른 구동 코일의 경우 펄스 발생기의 펄스 전압이 20 V까지만 증가하였다. 특히 구동 코일의 자기 유도 계수가 2.7 mH와 3.6 mH인 경우에는 펄스 전압이 20 V 이상일 때 구동 코일의 양단의 peak 전압은 감소하였다. 이러한 결과는 개발된 PEC 장치의 전기적인 특성에 의한 것으로 본 장치는 자기 유도 계수가 670 μH인 구동 코일에 대해서는 펄스 전압이 30 V일 때 가장 좋은 효율을 내며, 다른 코일의 경우에는 20 V가 가장 좋은 효율을 내는 것으로 평가할 수 있다.

### 4. 검출 코일의 출력 신호 분석

코일에 구형 펄스 전압이 가해지는 경우 전압이 가해질 때와 끊어질 때 코일에 의해 형성되는 자기

장의 변화량이 가장 크게 일어난다. 따라서 구동 코일과 인접한 검출 코일에 유도되는 전압이 가장 급격하게 증가하게 된다. 또한 구동 코일이 도체 위에 있었다면 도체에는 펄스 형태의 와전류가 유도되어 형성될 것이다.

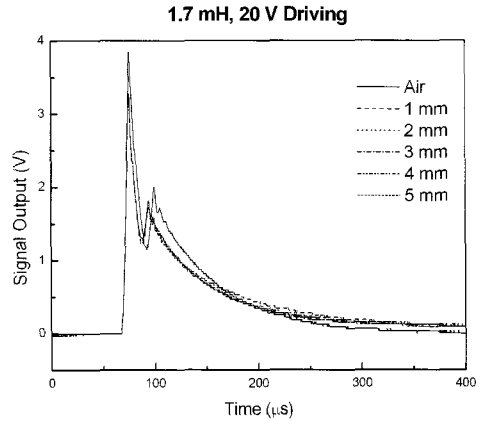


Fig. 3 The output voltage of the sensing coil with the inductance of 1.7 mH applying the step pulse voltage of 20 V

Fig. 3은 자기유도 계수가 1.7 mH인 구동 코일에 20 V의 펄스 전압이 끊어지는 순간 이후의 검출 코일의 양단에 걸리는 전압을 알루미늄 시편의 두께가 1 mm에서 5 mm 까지 변화시켜 시편의 두께에 따라 변화되는 검출 신호의 상태를 나타낸 것이다. 신호가 갑자기 증가하는 순간은 구동 코일에 가해주는 전압이 끊어지는 순간에 해당된다. 시편이 없는 상태에서 수신된 신호의 초기 부분의 peak 전압은 알루미늄 시편이 있는 경우에 비해 큰 값을 갖는다. 렌츠(Lenz)의 법칙에 의하여 도체에 유도되는 와전류는 자기장의 변화를 억제하는 방향의 자기장을 형성하는 방향을 갖기 때문에 시편이 있는 상태의 코일에 유도된 전압이 더 낮게 나타난 것이다. 그럼에도 불구하고 검출코일의 출력전압은 시편의 두께와 무관하게 나타났다. 이는 같은 종류의 시험편인 경우 펄스 전압에 의하여 표면에 유도되는 와전류의 영향이 크게 나타나기 때문이다[5]. 반면에 Fig. 3에서 150 μs 이후의 신호의 전압은 시험체의 두께 변화에 따라 다른 출력전압을 나타내고 있다. 시험체가 없는 공기중에서의 검출 코일의 전압은 오직 구동 코일 내부의 자기장의 변화에 의하여 유도된다. 하지만 구동

코일이 도체 시험체 위에 놓여 있고 여기에 펄스 전압을 인가한다면 도체에는 시간이 흐를수록 사라지는 형태의 과도적인 와전류가 유도될 것이다. 따라서 검출 코일의 출력신호의 후반부는 도체에 유도된 와전류에 의해 형성된 것이며, 도체 두께에 의해 영향을 받고 있음을 보여주는 것이다. 그리고 검출 코일의 출력신호의 후반부는 시간에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 보인다. 따라서 이 부분의 출력 신호,  $V(t)$ 는 다음과 같은 시간의 함수로서 나타낼 수가 있다.

$$V(t) = Ae^{-\gamma t} \quad (1)$$

여기서  $\gamma$ 는 출력신호의 시간에 따른 변화율로  $\gamma$ 가 양수이면 지수적으로 증가하는 것이며, 음수이면 지수적으로 감소한다.

Fig. 4와 5는 각각 구동 코일에 구형 펄스 전압을 20 V와 30 V를 가했을 때 검출 코일의 출력신호의 후반부의 감쇠율인  $\gamma$  값을 나타낸 것으로 linear-log 함수로부터 polynomial curve fitting에 의한 1차항의 계수로 구하였다. 이렇게 구한 감쇠율의 절대값은 알루미늄 시편의 두께가 두꺼울수록 증가하고 있다. 감쇠율의 절대값이 크면 클수록 검출 코일의 신호가 더 빨리 감쇠됨을 나타내고 있다.

코일 센서를 사용할 경우 검출 코일의 출력 전압은 자기장의 시간적 변화율의 크기에 비례한다. 그리고 자기장의 변화는 검출 코일 주변에 형성되는 전류의 시간적 변화에 비례한다. 여기서 검출 코일 주변의 전류는 구동 코일에 흐르는 전류와 도체 시편에 유도되는 와전류도 영향을 미친다.

알루미늄 시편의 두께가 두꺼울수록 시험체에 유도되는 와전류에 대한 저항은 감소하므로 시험체에 유도된 과도적 와전류의 변화는 더 느리게 감소한다. 결과적으로 시험체의 두께가 두꺼울수록 와전류에 의한 자기장의 변화는 감소하여 검출 코일에 유도되는 전압의 크기가 감소하게 된다. 즉, 시편의 두께가 두꺼울수록 검출 코일의 출력전압은 더 빨리 감소하게 된다.

그리고 감쇠율의 절대값은 구동 코일의 자기유도계수가 670  $\mu$ H인 경우를 제외하고 구형 펄스 전압이 20 V와 30 V일 때 두께가 두꺼울수록 증가하고 있다. 이것은 펄스 전압이 구동 코일의 자기유도계수가 670  $\mu$ H인 경우를 제외하고 구동 코일에 인가하는 펄스전압이 20V 까지 구동 코일 양

단에 걸리는 peak 전압이 선형적으로 증가하는 현상에 의한 것으로 보여진다. 특히 펄스 전압이 20 V이고 구동 코일의 자기유도계수가 1.7 mH일 때 감쇠율의 절대값은 선형적으로 증가하고 있다. 이와 같이 펄스 와전류에 의한 검출 코일의 출력 신호의 감쇠율의 변화가 시험체의 두께뿐만 아니라 구동 코일의 자기유도 계수 값의 변화에 따라 달라지는 것은 구동 코일과 검출 코일간의 상호유도계수의 영향에 의한 것이다.

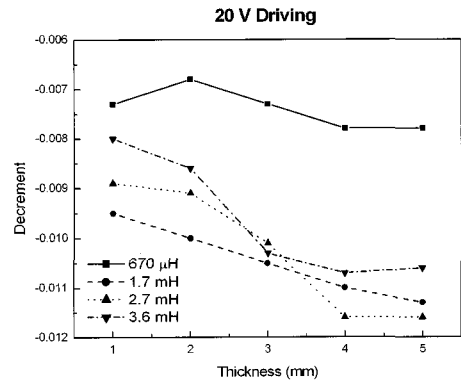


Fig. 4 The variation of the output voltage of sensing coils with the aluminum thickness applying the step pulse voltage of 20 V

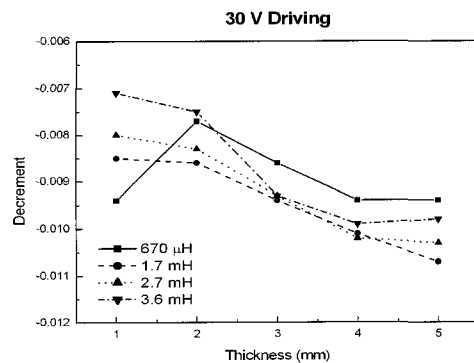


Fig. 5 The variation of the output voltage of sensing coils with the aluminum thickness applying the step pulse voltage of 30 V

## 5. 결 론

본 연구에서는 산업용 컴퓨터 기반의 펄스 와전류 장치를 개발하여 구동 코일의 자기유도계수를 670  $\mu$ H, 1.7 mH, 2.7 mH, 3.6 mH, 22 mH의 다

섯 종류를 제작하여 펄스발생기에서 구형 펄스 전압을 변화시키면서 장비의 성능 평가를 실시하였다. 그리고 검출코일의 출력전압을 두께가 1 mm에서 5 mm로 한 알루미늄 시험편에 대하여 측정하여 분석하였다.

구동 코일의 peak 전압은 자기유도 계수가  $670 \mu$  H인 구동 코일을 사용하였을 때 스텝펄스 전압이 30 V까지 선형적으로 증가하였으나, 다른 자기유도계수 값을 갖는 구동코일을 사용하였을 때에는 스텝펄스 전압이 20 V까지만 선형적으로 증가하였다. 구동 코일의 전압을 끄는 순간의 검출 코일 출력 전압은 시험체가 있을 때가 시험체가 없을 때보다 더 작게 나타났다. 이것은 렌쯔(Lenz)의 법칙에 의하여 펄스 와전류가 구동 코일 주변의 자기장의 변화를 억제하는 방향으로 유도되는 현상에 기인한 것이다. 그리고 검출 코일의 출력 신호 후반부는 시간이 지남에 따라 점차적으로 감소하는데 이러한 감소는 지수적으로 감소하였다.

그리고 시험체의 두께가 두꺼울수록 출력 신호는 더 빨리 감소하였다. 이것은 검출 코일의 출력 신호가 시험체에 유도되는 와전류의 변화에 의존하는 것 때문이다. 그리고 검출 신호의 감쇠율의 값은 구동 코일이 1.7 mH일 때가 가장 선형적으로 변화되었다. 이것은 본 연구에 의해 개발된 PEC 장비는 구동 코일이 1.7 mH일 때가 평가에 있어서 가장 효율적인 조건이라고 할 수 있다.

## 후 기

본 논문은 과학기술부 “국가지정연구실사업”으로 수행한 연구의 내용입니다. 본 연구를 수행하기 위한 연구비를 지원하여 주신 과학기술부 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] J. G. Thomson, "Subsurface Corrosion Detection in Aircraft Lap Splices Using a Dual Frequency Eddy Current Inspection Technique," *Materials Evaluation*, Vol. 51, No. 12, pp. 1398-1401, (1993)
- [2] S. Mitra, P. S. Urali, E. Uzal, J. H. Rose and J. C. Moulder, "Eddy-Current Measurements of Corrosion-Related Thinning in Aluminum Lap Splices," *Rev. Prog. in QNDE* Vol. 12, pp. 2003-2010, (1993)
- [3] D. L. Waidekich and S. C. Huang, "The Use of Crossing Points in Pulsed Eddy Current Testing," *Materials Evaluation*, Vol. 30, pp. 20-24, (1972)
- [4] S. K. Burke, G. R. Hugo and D. J. Harrison, "Transient Eddy Current NDE for Hidden Corrosion in Multilayer Structure," *Rev. of Prog. In QNDE*, Vol. 17, pp. 307-314, (1998)
- [5] R. A. Smith and G. R. Hugo, "Transient Eddy Current NDE for Ageing aircraft Capabilities and Limitations," *Insight*, Vol. 43 No. 1, pp. 14-25, (2001)
- [6] G. R. Hugo and D. J. Harrison, "Characterization of Hidden Corrosion in Multilayer Aircraft Structures Using Transient Eddy Current NDE," *Rev. of Prog. in QNDE*, Vol. 18, pp. 1401-1408, (1999)
- [7] D. Vasic, V. Bilas and D. Ambrus, "Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes," *IEEE Trans. on Instru. & Meas.*, Vol. 53 No. 4, pp. 1289-1294, (2004)
- [8] William W. Ward III and J. C. Moulder, "Low Frequency, Pulsed Eddy currents for Deep Penetration," *Rev. of Prog. in QNDE*, Vol. 17, pp. 291-298, (1998)