

펄스 와전류 비파괴검사의 원리

Principles of Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing

서동만(학술제3분과 위원, 군장대학교)

E-mail: dmsuh@kunjang.ac.kr

1. 서론

본 강좌에서는 한국비파괴검사학회의 전자기 비파괴검사 및 평가 학술제3분과의 활동의 일환으로 펄스 와전류검사 기술에 대하여 기초적 개념과 응용 분야를 소개하고자 한다. 펄스 와전류검사 기술은 기존의 와전류검사 기술에서 파생된 기술로 근본 원리는 코일을 이용하는 점에서는 와전류기술이지만 펄스를 주기적으로 발생시키는 면은 초음파기술과 유사하다. 펄스와전류검사의 원리를 먼저 소개하고 본 저자가 그 동안 연구한 펄스 와전류장비를 이용하여 측정한 실험 결과를 기술하고 이 기술을 적용할 수 있는 분야를 기술하고 맺음말을 서술한다.

2. 펄스 와전류검사의 원리

교류 전류를 사용하는 기존의 와전류검사 방법과는 달리 펄스와전류기술은 반복적인 펄스전압을 코일에 인가하는 방법으로 펄스 와전류를 발생시켜 코일을 이용하거나 홀센서를 이용하여 신호를 수집하는 기술이다. 먼저 이해를 돕기 위해 와전류검사의 원리를 설명하기로 한다. 그림 1은 코일에 교류 전류를 인가할 때 코일 주위에 자기장이 형성된다. 이러한 자기장이 검사체에 인가될 때 2차 자기장에 의한 와전류가 검사체 표면과 표면하에 와전류가 형성된다.

와전류는 검사체에 존재하는 크랙과 같은 결함이나 검사체의 임피던스 변화에 반응하게 되어 와전류검사가 이루어진다.

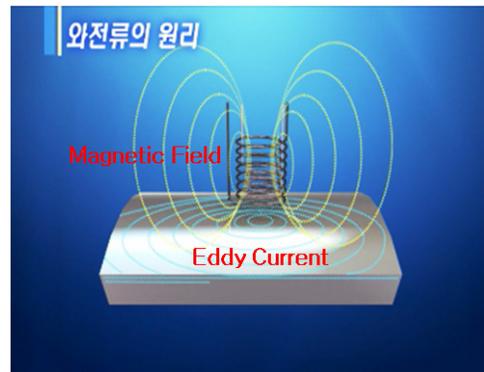


그림 1. 와전류의 원리

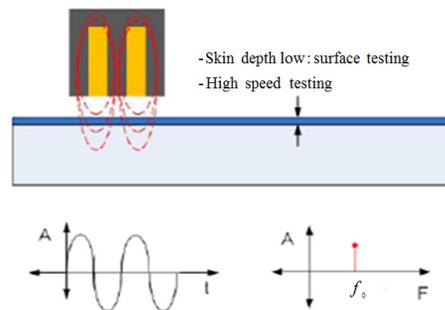


그림 2. 와전류 탐상

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

여기서 δ =표준침투깊이(mm)

π =3.14

f =주파수(Hz)

μ =투자율(H/mm)

σ =전기전도도(%IACS)

와전류탐상은 그림 2에서와 같이 일정한 주파수의 교류를 인가한다. 따라서 식(1)에서와 같이 표피효과가 발생되는데 침투깊이는 주파수 제곱근에 반비례한다. 즉 주파수가 높으면 표면에만 와전류가 발생되어 표면검사에 유리한 검사가 된다.

반면에 펄스 와전류는 코일을 사용한다는 점은 그림 1과 같이 와전류검사 기술과 같지만 초음파 장비와 같이 펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency)를 사용한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 50% 펄스폭을 가지는 사각파를 코일에 인가하면 광대역의 와전류가 검사체에 발생된다. 이러한 펄스 와전류는 광대역의 주파수를 포함하고 있어 와전류의 단일 주파수보다 식(1)에서와 같이 침투깊이가 깊다

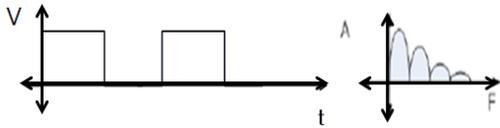


그림 3. 펄스 와전류 신호 발생

즉 식(1)에서와 같이 인가되는 주파수가 펄스 와전류검사에서는 모든 주파수를 포함하고 있어 침투깊이가 매우 깊지만 펄스가 케이블과 코일에 인가될 때 많은 왜곡이 일어나서 높은 주파수 성분이 적어지게 된다. 그러나 일반 와전류는 높은 주파수를 일반적으로 사용하기 때문에 침투 깊이가 작다. 실제 측정에서는 최대 20 mm에서 30 mm 정도의 침투깊이를 나타내고 있다.

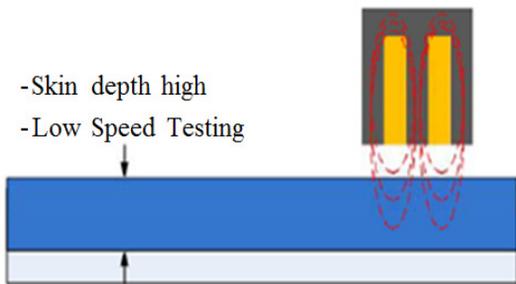


그림 4. 펄스 와전류검사

펄스 와전류에서 펄스의 on과 off의 펄스폭을 조절하는데 일반적으로 50% 펄스폭을 가지고 있으며 펄스 주기와 펄스 파워(전압 또는 전류)를

검사체의 특성에 맞게 조정하여야 한다. 이는 초음파처럼 펄스 주기(PRF)와 펄스 파워를 조절하는 것과 같다. 그림 4는 펄스 와전류검사 시 침투깊이와 검사 속도를 그림으로 나타낸 것이다. 펄스 와전류는 일반 와전류보다 침투깊이가 깊지만 측정 속도가 느리다. 그림 5는 본 저자가 고안한 펄스 와전류 신호처리 원리를 나타낸 것으로 구동 펄스에 의해 발생된 와전류신호를 수집하여 시간에 대한 전압의 변화를 나타낸 것이다. 같다. 이러한 펄스 와전류신호는 검사체의 임피던스값을 나타낸 것으로 이 신호를 통하여 검사체의 각종 정보를 알 수 있는데, 수집신호를 적절히 분석하는 기술이 요구되고 있다. 즉 신호의 최대진폭, 감쇠시간 등을 분석하여 두께정보, 부식정보 등을 도출해 낼 수 있다.



Fig. 1

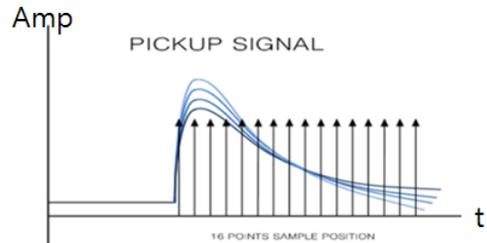


그림 5. 펄스 와전류 신호수집



그림 6. 펄스 와전류 신호의 변화

3. 펄스 와전류 적용

그림 6은 펄스 와전류 검사의 다양한 파라미터에 대한 신호의 특징을 보여주는데, 탐촉자와 검사체의 lift-off 변화에 의한 신호가 시간 축에서 가장 크게 변화하는 것을 알 수 있고 다른 변화에 의한 신호는 수직성분의 방향으로 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 결함이나 두께 변화 및 lift-off 등에 의한 신호가 고유한 특성을 가지고 검출되므로 신호를 정확히 분석하면 검사체의 정보를 알 수 있게 된다. 다양한 결함과 기하학적인 형상에 대한 특성을 분류하는 데 많은 경험과 실험이 요구되고 있으며 펄스 와전류기술을 확립하기 위해서는 이러한 분야에 계속적인 연구가 필요하다.

그림 7은 다양한 펄스 와전류 탐촉자와 시험장치를 보여주며, 보온재 아래 부식(Corrosion Under Insulation) 측정용 탐촉자, 탄소강 튜브 검사용 보빈 탐촉자, 두께 측정용 탐촉자, 크랙 측정용 탐촉자 등이 개발되어 있고, 현장에 적용되고 일부는 성능이 현장에서 사용할 수 있지만, 본 저자는 계속하여 성능을 개선하고 새로운 결함과 재료에 대한 검사장비와 탐촉자를 연구 개발하고 있다.

그림 5와 같이 펄스 와전류 신호에서 가장 변화가 많은 시간축의 신호를 16개로 샘플링해서 그림 8과 같이 같이 표현하여 lift-off와 두께변화에 의한 신호가 충분히 구분되도록 시스템을 완성하므로써 기존의 와전류검사 임피던스기술과 같은 개념에서 신호를 평가하여 재료특성의 분석을 가능하도록 장비와 프로그램을 개발하였다.

그림 8은 검사체의 두께를 측정하는데 lift-off 신호와 두께의 변화가 임피던스상에서 구분이 가능하도록 파라미터를 조절하여 측정한 결과이다.

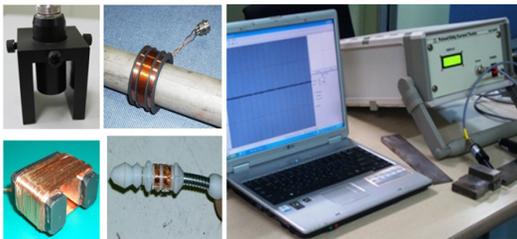


그림 7. 펄스 와전류 센서 및 장비((주)레이나)

이러한 펄스와전류기술은 검사 신호의 해석이 용이하고 동시에 다층구조물의 검사가 가능하며 특히 두께측정에 있어서 높은 정확성을 가지고 있다는 장점이 있다. 일반적으로 펄스 와전류신호는 신호검출의 목적으로 홀센서(hall sensor)를 이용하는 방법과 유도코일을 이용하는 방법이 있는데 Libby에 의해 1971년 처음으로 고안이 되었으며[1] Gibbs와 Campbell (1991) 등은 검출부로서 홀센서를 이용한 항공기 구조물의 볼트 연결부에 펄스와전류기술을 적용함으로써 강철 연결부에서 14 mm까지, 비철부분에서는 7 mm까지의 결함 부위를 검출할 수 있었다.

또한 미국의 GE사는 펄스 와전류센서를 2D로 배열하여 항공기 부품의 검사에 사용할 수 있는 장비를 상용화 하였으며[2] 네덜란드 RTD사와 Shell사에서는 보온재 아래 부식을 측정할 수 있는 장비를 개발하여 상용화하였다. 그 외 여러 연구자들이 펄스 와전류기술을 연구하고 있으며 영국의 뉴캐슬대학의 Tian교수는 카메라로 촬영한 영상으로 펄스 와전류의 현상을 시각적으로 나타내었다. 본 저자와 이정기, 이승석 등은 2005년에 검출부로 유도코일을 사용하여 전압의 변화를 측정함으로써 구동코일의 자기유도계수와 알루미늄 시편의 두께가 검출코일(pick up coil)의 출력전압에 주는 영향을 분석하여 전압과 두께에 따른 선형적 상관관계를 연구하였다[3]. 기존

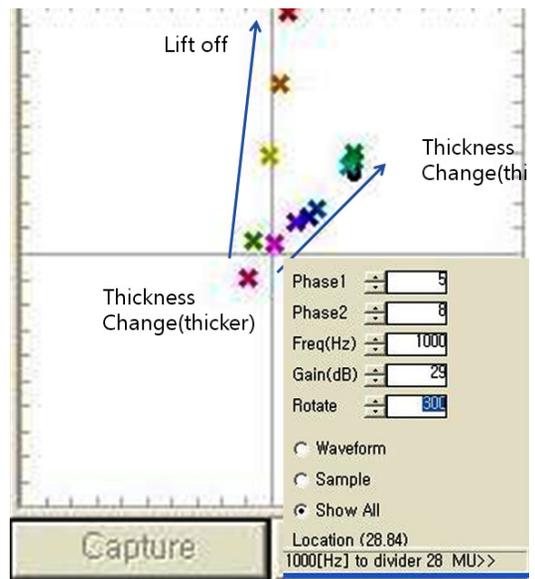


그림 8. 펄스 와전류 검사에 의한 신호 분리

ECT, UT 검사로 접근이 어려운 검사에 적용이 가능한 분야가 있어 새로운 측정방법으로 대두되고 있다. 펄스 와전류검사기술은 비접촉 검사 방법으로 원자력 및 화력발전소 보일러 배관 검사 그리고 석유 및 중화학분야 열 교환기 튜브검사에 적용이 될 것이며 자동차부품의 가공 합부처리 및 재료분석장치로 발전할 수 있을 것이다. 그림 9에서 보는 바와 같이 보온재아래의 부식 측정과 열처리검사 등에 활용이 가능하며 장비의 성능 개선과 사용 목적에 적합한 소프트웨어의 개발 그리고 분석방법 등에 대한 지속적인 연구가 계속되어야 한다.

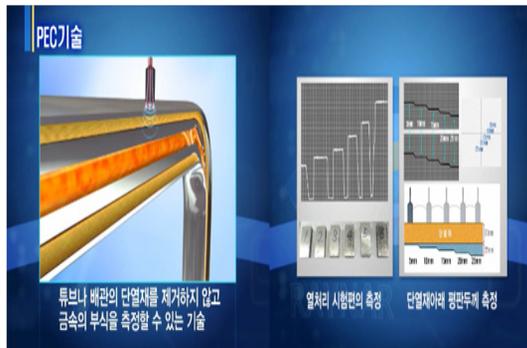


그림 9. 펄스 와전류 응용

4. 맺음말

본 기고에서는 펄스 와전류검사에 대하여 처음 접해보는 분들도 이해가 가능하도록 설명하려고 노력하였다. 기존 와전류 임피던스 기술과 같은 시각에서 적용할 수 있도록 장비를 구성하여 실

험을 수행하였다. 선진국에서 연구 개발된 펄스 와전류에 대한 기술을 설명하기보다는 본 저자가 연구개발한 펄스 와전류기술 위주로 설명을 하였는데 외국의 논문이나 기술 자료를 기술하려고 보니 저자들의 사진 그림 등의 사용을 허락 받는데 시간이 소요될 것 같아 외국의 기술의 소개를 못한 점 이해하여 주시기 바란다. 이러한 펄스 와전류기술은 관련기술자들의 관심사항이나 장비를 구입하기가 어려워 실험을 수행하기에 곤란하다는 연구자들의 견해가 있다. 또한 펄스 와전류기술의 성능을 검증하기에 많은 시간이 소요되어 현장 적용에 어려움이 있다. 그러나 국내외 여러 연구자에 의해 연구가 진행되고 있어 보다 발전된 기술로 발전될 것이다. 끝으로 펄스 와전류기술에 많은 관심이 있기를 바라며 비파괴검사분야에 펄스 와전류기술이 널리 이용되기를 기대한다.

참고문헌

- [1] Hugo L. Libby, "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods," Wiley-Interscience, (1971)
- [2] US Patent "Pulsed Eddy Current Two-Dimensional Sensor Array Inspection Probe and System," US2002/0190724
- [3] Jeong Ki Lee, Dong Man Suh and Seung Seok Lee, "Change of the pulsed eddy current signals by the variation of the thickness of an aluminum specimen," *Key Engineering Materials*, Vol. 297-300, pp. 2028-2033 (2005)