

Nondestructive Evaluation Using Pulsed Eddy Current Technology

Duck-Gun Park*

Nuclear Materials Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Yuseong 34057, Daejeon

(Received 29 September 2017, Received in final form 19 February 2018, Accepted 19 February 2018)

Eddy current technology has been used widely in the in-service inspection identify the corrosion for the safe and economical management of these fleets. Although the detection of corrosion by ultrasonic and eddy currents is not inherently difficult, there are problems with identification and characterization for multi-layer structure. Pulsed eddy current (PEC) is redeem these limitation of eddy current technology. PEC technology such as basic theory, system design and application was review in this paper. The PEC system was designed and manufactured in order to detect the local wall thinning such as corrosion under insulation (CUI) and flow accelerated corrosion (FAC). Local wall thinning is a point of concern in almost all steel structures such as pipe lines covered with a thermal insulator made up of materials with low thermal conductivity (fiberglass or mineral wool); hence, Non Destructive Technique (NDT) methods that are capable of detecting the wall thinning and defects without removing the insulation are necessary. In this study we developed a Pulsed Eddy Current (PEC) system to detect the wall thinning of Ferro magnetic steel pipes covered with fiber glass thermal insulator and shielded with Aluminum plate. The PEC system can detect the wall thinning and 20 % local defect under the 50 mm thickness insulation and 0.5 mm Al cladding, and the output signal showed linear relation with tube wall thickness.

Keywords : nondestructive evaluation, pulsed eddy current, insulation, corrosion under insulation, carbon steel pipe

펄스와전류기술을 이용한 비파괴 평가

박덕근*

원자력재료연구부, 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로989번길 111, 34057

(2017년 9월 29일 받음, 2018년 2월 19일 최종수정본 받음, 2018년 2월 19일 게재확정)

와전류 기술은 구조물의 안전과 유지보수 측면에서 많은 기여를 해왔다. 특히 초음파와 와전류를 이용하여 가동중인 구조물의 결함을 찾아내는 일은 본질적으로 어려운 일은 아니다, 여러 층의 경계를 가진 구조물 등에서는 적용하기 힘들었다. 펄스와전류 기술은 이러한 제한점들을 극복하기 위하여 고안 되었다. 본 연구에서는 펄스와전류의 기초이론, 시스템 디자인과 응용분야등을 기술하였으며, 펄스와전류 장비를 제작하여 보온재가 설치된 배관에서 보온재를 제거하지 않고 국소적인 배관내부의 결함을 측정할 수 있는 예를 소개하였다. 보온재가 설치된 배관에서의 주손상은 절연체하의 부식(CUI)과 유동가속부식(FAVC)로 나누어진다. 산업 현장에서 사용되는 대부분의 배관은 열손실을 방지하기 위하여 외부에 열전도도가 낮은 물질이 보온재로 설치되어 있으므로, 보온재를 제거하지 않고 내부의 결함을 탐지하는 비파괴기술이 필요하다. 본 연구에서는 배관 외부가 보온재로 덮혀있고 보온재 외부에 알루미늄 클래딩이 설치된 강자성체 배관의 두께변화를 측정하는 펄스와전류 장치를 개발하였다. 이 장치는 50 mm 두께의 보온재와 0.5 mm 두께의 알루미늄 클래딩이 설치된 배관에서 20%의 국소적인 두께변화를 탐지할 수 있었다.

주제어 : 비파괴, 펄스와전류, 보온재, 절연체하의 부식, 탄소강배관

I. 서 론

펄스와전류 검사 기술은 기존의 와전류검사 기술에서 파생된 기술로 근본 원리는 코일을 이용하는 점에서는 와전류기

술이지만, 기존의 와전류가 가지고 있는 단점을 극복하기 위하여 고안된 기술이다[1, 2]. 비파괴 시험의 분야에서 최근의 발달은 사인파 보다는 펄스전류를 이용한다. 사인파인 경우 전류밀도가 낮아 시험체의 표면근처의 정보만 얻을 수 있는 반면 펄스파를 사용할 경우 전류밀도를 높일 수 있어 시험체의 내부정보까지 얻을 수 있기 때문이다. 기존의 와전류 기술은 특정한 주파수를 가진 연속적인 사인파를 시료에 인가

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-42-868-2023,

Fax: +82-42-868-4815, e-mail: dgpark@kaeri.re.kr

한 후 전자기 유도법칙에 의하여 시료에서 유도된 신호를 탐지하는 것이다. 기존의 와전류 탐상검사는 주로 재료의 표면층 결함을 검출하거나 비자성체의 배관이나 봉등의 결함을 탐상하는데 사용하고, 결함탐상 이외에도 동, 알루미늄 등 비철금속의 전기전도도 측정 및 도금층의 피막두께 측정등에 사용되고 있다[3]. 그러나 낮은 분해능 및 투자율 변화를 초래하는 재질물의 영향을 받는 문제점이 있었다[4]. 펄스와전류법(PEC)은 짧은 시간에 사각파를 가진하여 발생시킨다. 사각파는 원리적으로 모든 주파수 범위를 포함하는 광대역 주파수 특성을 가지는데 이러한 광대역 특성으로 인하여 다양한 침투깊이에 대한 정보를 동시에 얻을 수 있다[5]. 그러나 와전류가 다중구조물의 결함을 탐지하기 위하여는 침투깊이 뿐만 아니라 인가전류의 세기도 충분히 커야만 한다. 일반적인 와전류와 같은 정상파를 연속적으로 발생시키기 위하여는 거대한 장치가 필요하게 되나 현실적으로 이를 만족하기는 힘들다. 따라서 순간적으로 큰 출력을 내는 펄스파를 인가하여야만 한다. 또한 펄스와전류는 동시에 광대역 주파수를 발생시키기 때문에, 전통적인 와전류 탐상법에서 주파수를 변경시키면서 주파수별 다른 신호를 취득하는 것에 비해 신호수집 시간을 절약할 수 있다. 또한 와전류에 의한 자기장을 측정하기 위해 다양한 형태의 자기센서, 즉 코일, Hall 센서, GMR 센서 등을 사용할 수 있다. PEC의 동작원리는 일반적인 와전류와 유사하나 펄스를 사용함으로써 정상파 사용에 따른 출력제한 문제를 해결할 뿐만 아니라 이론적으로 펄스파는 모든 주파수를 다 포함하고 있으므로 주파수 선택의 문제에 있어서도 자유롭다. 그러나 자기장의 세기를 계산하는데 따른 데이터 해석의 문제점과 탐촉자 디자인의 문제는 와전류보다 훨씬 복잡하다. 특히 산업현장에서 많이 사용되는 탄소강은 강자성체로서 투자율이 수백에서 수만까지 매우 높고 전류가 시험체의 표면에 주로 분포하므로 일반적인 와전류 검사를 적용하기에는 제한이 있다. 따라서 탄소강 재료의 배관을 검사하기 위하여는 주파수를 감소시키고 전류밀도를 증가시켜야만 한다. 이를 위해서는 펄스폭과 전류밀도를 조절할 수 있는 펄스파를 사용할 경우 전류밀도를 높일 수 있어 시험체의 내부정보까지 얻을 수 있기 때문이다[4, 5]. 이러한 성질로 인하여 펄스와전류는 탄소강과 같은 강자성 재료의 두께변화나 스텐레스강과 같은 비자성재료의 깊은 결함이나 이면결함과 같이 일반적인 와전류로 탐지가 곤란한 부위를 비파괴적으로 탐지하는데 사용된다. 대표적인 현상으로는 항공기와 같이 여러장의 얇은 판재가 겹쳐져 있는 부분의 부식 또는 절연체로 덮혀있는 강자성 배관에서 일어나는 절연체하의 부식 또는 유동가속부식 등이 있다[6, 7]. 펄스와전류시스템의 시험시 중요한 원리적 특징을 간략하게 요약하면 다음과 같다.

1) Field coil에 흐르는 전류의 펄스는 코일 주위의 공간에

자기장을 생성하며, 이 자기장의 강도는 펄스전류의 세기에 의존한다.

2) 코일에 흐르는 펄스전류는 자기장을 발생시키며, 이 자기장의 변화에 의하여 도체내에 전류가 유도된다. 전류는 시험체 내로 확산하며 기하학적 경계, 결함 및 전도율이 다른 재료의 층과 같은 불연속에 의해 반사될 수 있다.

3) 반사된 전류는 시험체 가까이에서 위치한 탐지코일의 단자에 전압의 펄스로써 검출된다.

4) 전압 펄스는 시험 시편에 관한 적절한 정보를 얻어내기 위하여 회로의 다양한 타입에 의해 처리되며 유용한 형상으로 나타낸다.

펄스 와전류는 펄스의 특징인 광대역신호와 높은 침투 자기장으로 인하여 설계에 따라서 일반적인 와전류장치에 이용된 탐촉자로 얻어질 수 없는 고분해능을 가질 수 있다. 본고에서는 와전류의 특성과 활용에 대하여 소개하고자 한다.

II. 펄스와전류의 기본이론과 장비

1. 펄스와전류의 기본이론

변화하는 자기장이 가해질 때 도체에는 패러데이의 자기유도법칙에 의하여 와전류가 유도되며, 이는 도체 근처에 있는 코일을 통하여 전압신호로 관찰된다. 일반적인 와전류에서의 자기장은 단일한 주파수로 진동하는 정상파에 의하여 생성된다. 그러나 펄스와전류는 정상파를 인가하는 대신 사각 펄스파를 인가하여 와전류를 발생시킨다. 이 사각 펄스파는 넓은 범위의 주파수 영역을 가지기 때문에, 확산방정식에 의하여 지배되는 시간에 따라 감소하는 진행파를 발생 시킨다. 이러한 방식으로 발생하는 펄스와전류는 사각펄스파가 증가할 때와 감소할 때 만 불연속적으로 발생한다, 이는 펄스가 유지되는 시간 동안에는 전류가 일정하므로 와전류가 발생하지 않기 때문이다.

탐촉자에 의한 펄스와전류는 Fig. 1과 같은 R-L 등가회로에 의하여 묘사된다. 계단함수가 코일의 입력으로 주어질 때 코일과 저항을 통하여 흐르는 전류는 다음과 같이 Kirchhoff의 법칙에 의하여 주어진다.

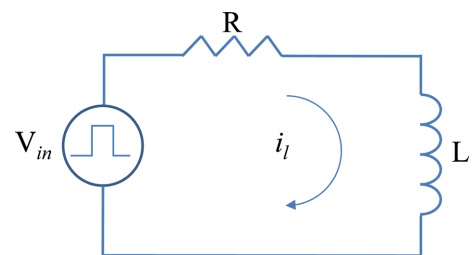


Fig. 1. (Color online) RLC equivalent circuit in the pulse driving coil.

$$V = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \tag{1}$$

이식의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$V = V_{ini}(1 - e^{-(R/L)t}) \tag{2}$$

여기서 L/R 은 시정수로서 초기의 전류가 렌츠의 법칙에 의한 역전류의 저항 때문에 정상전류로 되는데 까지 걸리는 시간이다. 따라서 이 시정수로 인하여 이상적인 사각파 펄스전류를 시험편에 인가하기는 불가능 하다. 따라서 가능한 한 코일의 저항과 인덕턴스를 적절히 조합하여 사각파에 가까운 펄스를 발생 시켜야만 한다. 탐촉자 밑에 시험편이 없을 때, 즉 탐촉자가 공기 중에 놓여 있을 때, 자기장은 단순히 구동전류에 비례한다. 그러나 탐촉자가 금속 시험편 위에 놓여 있을 때 시험편에 유도된 와전류가 자기장의 증가를 방해하기 때문에 전류가 일정한 값에 도달하기까지 시간이 걸린다. 따라서 와전류는 두 개의 코일이 서로 결합하고 있는 상호유도 현상과 비슷하게 된다. 이 상호 인덕턴스는 이차회로의 부하 때문에 코일의 임피던스로 작용하게 된다. 즉 시험편에서의 와전류는 일차 구동코일로 되돌아와서 펄스전류가 증가하는 것을 방해하게 되며 와전류는 부하저항 요소로 작용하여 시험편에서의 에너지손실을 나타내게 된다. 따라서 코일이 시험편에 가까이 갈 때 임피던스는 증가하게 된다. 코일의 임피던스는 코일전압을 일정한 구동전류로 나눈 것으로서 유도 리액턴스라고 불린다. 코일의 자기장속에 저장된 에너지는 코일의 인덕턴스에 직접 비례하므로, 와전류에 의한 반대되는 자기장은 자속손실을 감소시키며, 이것은 인덕턴스를 감소시키며 결과적으로 저장된 에너지를 감소시킨다.

Fig. 2(a), (b)는 인가하는 펄스전류의 모양과 펄스와전류 시험의 개념을 보여주고 있으며, Fig. 2(c)에서는 전형적인 펄스와전류 신호를 보여주고 있다. Fig. 2(a)와 같은 광대역 펄스 또는 계단식 전류가 코일에 인가될 때 코일에서 발생된

자기장이 재료의 내부로 전파되며, 재료의 내부에는 인가자기장을 방해하는 방향으로 과도와전류가 발생하게 된다. 이때 순 자기장은 초기에 인가된 자기장($\phi 1$)과 유도된 와전류에 의하여 재료에 발생하는 방향이 반대인 자기장($\phi 2$)의 합이 되며 이 자기장을 코일이나 홀센서 또는 자기저항센서(GMR)와 같은 자기센서로 탐지할 수 있다. 결과적으로 Fig. 2(c)와 같은 모양의 신호가 시험편에서 유도되며 이 모양을 해석하여 시험편에 대한 정보를 알 수 있다. 와전류 탐상법에서 중요한 인자의 하나로 검사체의 투자율과 전기전도도 및 해당 주파수에 의해 다음 식과 같이 와전류의 침투 깊이가 결정된다 [8].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \tag{3}$$

여기서 δ 는 표준 침투 깊이, f 는 주파수(Hz), μ 는 자기투자율(H/m), σ 는 전기전도도(S/m)이다. 위 식에서 와전류 침투 깊이와 주파수는 역수 관계이므로 주파수가 낮으면 침투 깊이가 커짐을 알 수 있다. 와전류탐상은 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. 비자성체에서는 투자율이 1인 반면, 강자성체는 투자율이 수백에서 수만까지 매우 높으므로 전류가 시험체의 표면에 주로 분포하고 전류가 투과할 수 있는 깊이에 제한이 있다. 와전류 시험은 시험에 유도된 와전류가 재료의 변수 즉 결합이나 재료의 비균질성에 의해 찌그러지게 되면 그 변화를 측정하여 결합이나 재료의 상태를 판단짓는다. 와전류는 검사체에 존재하는 균열과 같은 결함이나 검사체의 임피던스 변화에 반응하게 되어 와전류검사가 이루어지며, 코일이나 자기센서 등으로 결합에 의한 와전류의 변화를 검출한다. 만일 결합이 비자성체에 있을 경우에는 전기전도도가 변화하며 이는 코일의 임피던스에 영향을 미치므로 우리는 와전류의 변

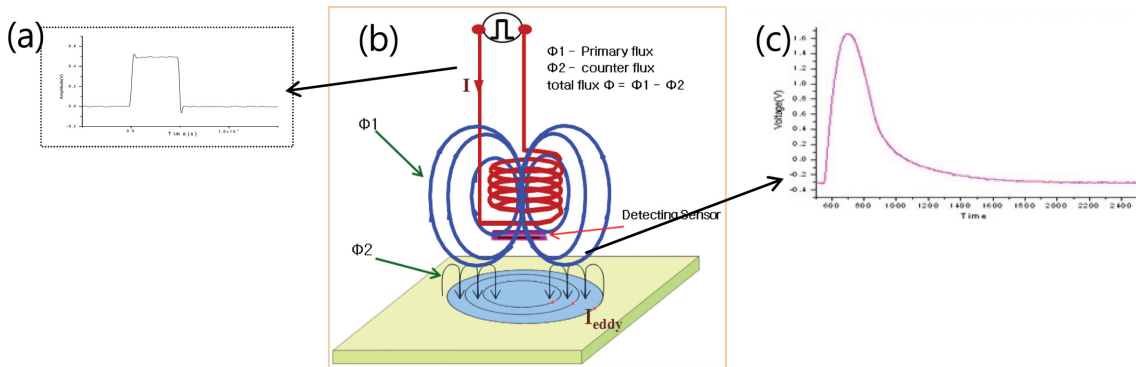


Fig. 2. (Color online) Principle of pulsed eddy current. (a) Configuration of driving pulse (b) Schematics of PEC, (c) Typical PEC response.

화 정도로서 결함의 분포를 알 수 있다, 그러나 자성체일 경우에는 투자율도 동시에 변화하며, 또한 투자율의 크기는 전기전도도의 변화에 비하여 매우 크므로 자성체의 경우 와전류를 적용하기에는 어려움이 있다. 스테인리스강은 비자성체이므로 자기이력이 없다. 따라서 자기이력이 있는 자성체와는 전류인가 방법에 있어서 차이가 난다. 비자성체는 자기이력이 없으므로 단일 펄스를 여러번 반복하여 인가하여도 전단계의 측정이 바로 뒤의 측정값에 영향을 미치지 않는다. 따라서 탐촉자 제작에서도 고려해야할 사항이 비교적 단순하다.

2. 펄스와전류 시스템의 구성

펄스와전류 시스템은 펄스증폭기, 자기장을 발생하기 위한 자화코일과, 시험편에서 유도된 신호를 탐지하는 홀센서, 유도된 신호를 증폭하고 차동신호를 얻기 위하여 특별히 제작된 차동형 앰프, 그리고 아날로그 출력신호를 디지털로 변환하는 A/D 변환기 및 구동 소프트웨어(s/w)로 구성되어 있다. 펄스와전류 실험의 구성도는 Fig. 3에 제시하였다. 이 그림에서 펄스 앰프는 구동코일에 자기장을 생성하기 위한 펄스전류를 공급하고, 구동코일은 펄스자기장을 발생 시킨다. 펄스 자기장에 의하여 시험편에 유도된 펄스와전류는 탐촉자에 부착된 코일 또는 홀센서를 통하여 탐지되며, 센서의 출력신호는 컴퓨터로 처리 된다. 전형적인 펄스와전류 신호는 Fig. 4와 같이 표시된다. 일반적으로 펄스와전류 신호는 3개의 파라미터로 특징지을 수 있는데, 진폭이 가장 높은 점에 도달하는 최대진폭 도달시간(time to peak amplitude), 그때의 진

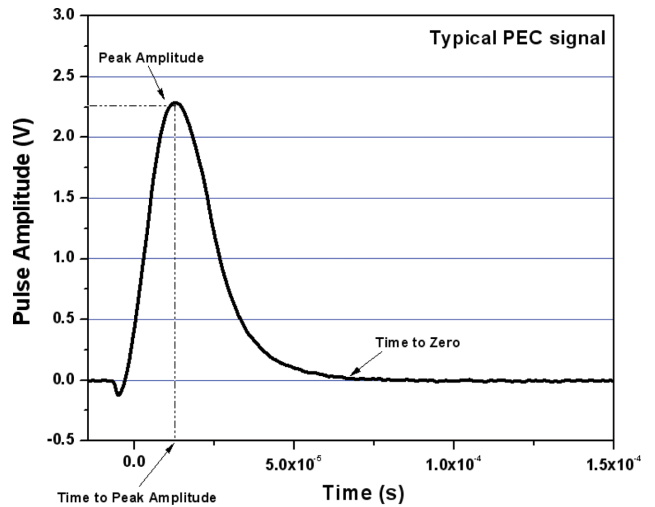


Fig. 4. (Color online) Typical configuration of PEC signal.

폭인 최대진폭(peak amplitude), 그리고 시간이 증가함에 따라 진폭이 평형상태에 도달하는 0점 도달시간(time to zero)이다. 이 부분은 시험편 내부에서 각각의 깊이에서 와전류가 산란되므로 펄스와전류의 모양이 변화한 것인데, 시험편 내부의 결함에 대한 정보를 포함하고 있다. 시험편의 표면근처에 있는 결함에 의하여 유도된 신호가 처음 도착하고, 시험편 내부 깊은 곳에 있는 결함에 의하여 발생한 신호는 후에 도착하므로, 이들 신호는 도체 내부에서의 확산에 의하여 이들 신호의 경로차에 의하여 유도된 신호는 둥근 모양을 가지게 된다. 따라서 Fig. 4에서 유도된 신호의 앞부분은 표면 근처에

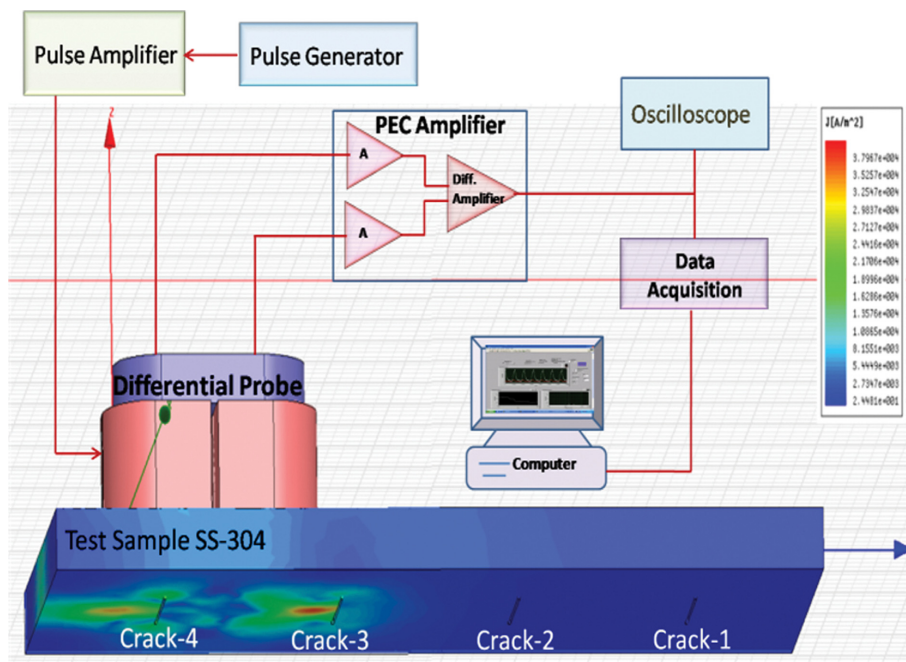


Fig. 3. (Color online) Experimental set-up for the pulsed eddy current.

있는 결합에 대한 정보를 포함하고 있으며, 뒷부분은 깊은 부분에 위치한 결합에 대한 정보를 포함하고 있다. 이는 외부 표면 결합 정보는 전압펄스의 초기 위치에서 나타나는 반면에, 외부 및 내부의 표면 결합과 벽두께 정보는 전압펄스의 끝 부분에 나타나기 때문이다. 시험편에 인가된 자기장은 계단형태의 전압특성(펄스전압에서 처음에 급격히 증가하는 가파른 부분은 높은 주파수를 포함한다) 때문에 시험편의 두꺼운 부분을 투과할 수 없다. 시간이 지남에 따라 자기장은 시험편에 더욱 깊숙이 침투하며 와전류는 최대 증가한다. 나중에는 와전류는 시험하고자 하는 재료의 전기저항에 의하여 0으로 줄어든다. 따라서 측정된 신호는 재료의 와전류에 의한 자기장의 변화이다. 일반적으로 최대진폭은 결합의 크기와 관계가 있으며, 최대진폭 도달시간과 0점 도달시간은 결합의 위치와 관계가 있다. 펄스 와전류 신호의 모양은 시험편의 두께, 시험체와 탐촉자와의 거리를 표시하는 lift-off 결합의 크기 등에 따라 달라지는데, 일반적으로 탐촉자와 검사체의 life-off 변화에 의한 신호가 시간 축에서 가장 크게 변화하며, 다른 변화에 의한 신호는 수직성분의 방향으로 나타난다. 그러나 탐촉자와 시험체 사이의 환경적인 요인이 복합적으로 결합되어 신호에 나타나므로, 다양한 결합과 기하학적인 형상에 대한 특성을 분류하는 데 많은 경험과 실험이 요구되고 있으며 펄스 와전류 기술을 확립하기 위해서는 신호 분석에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

3. 펄스와전류 장비제작 및 실험결과

실제 현장에서 사용되는 대부분의 배관은 강자성체인 탄소강으로 이루어져 있다. 탄소강은 자기이력을 가지고 있으므로 같은 결합을 반복해서 측정할 경우 이전 측정에 의한 잔류자화가 그다음 측정에 영향을 주게되므로, 이를 고려하여 펄스 전류를 인가하여야 한다. 기존의 모노폴라(monopolar) 펄스 자기장을 사용할 경우, 강자성 배관에서는 잔류자화로 인하여 연속 측정시 재현성 있는 데이터의 획득이 불가능 하다. 또한 강자성체는 투자율이 매우 크므로 스테인리스강의 경우와 같은 정도의 주파수를 사용할 경우 자기장이 배관의 표면 주위에만 집중되기 때문에 두께 변화를 탐지할 수 없다. 따라서 배관두께 정도의 투과깊이를 얻기 위해서는 극 저주파를 사용하여야한다. 이를 위하여 Fig. 5와 같은 바이폴러 형태로 된 사각 펄스파를 인가함으로써 처음 양(+)의 방향 전류에 의하여 자화된 배관이 일정 시간 후 음(-)의 방향 전류에 의하여 자기소거 되도록 하였다. 일반적으로 탄소강 배관의 경우 배관의 직경에 따라 배관의 두께가 정해지는데, 보통의 경우 10~20 mm 정도 두께를 가진 배관이 널리 사용된다. 이 경우 펄스폭은 최대 2 sec 정도 된다고 보고 펄스장치의 펄스폭은 0~2 sec 정도로 설계 하였다. 앞에서 말한 바와 같이 펄스와

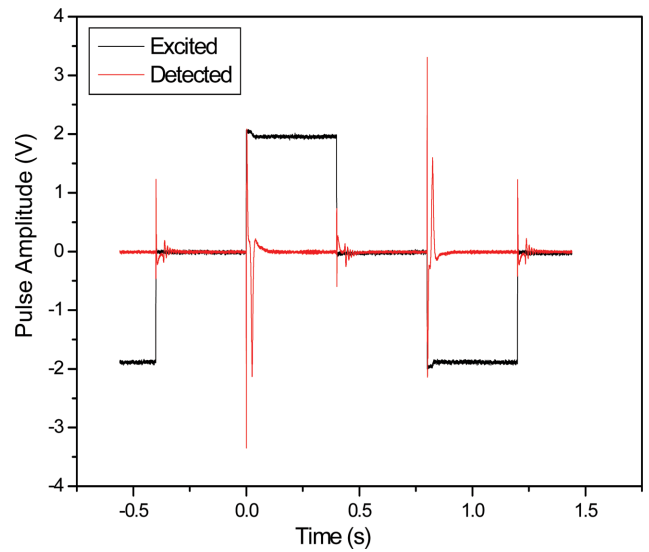


Fig. 5. (Color online) Configuration of driving pulse and detected PEC signal.

전류에서는 펄스모양이 이상적으로 사각모양일 때 가장 좋다. 그러나 실제로는 코일의 저항과 인덕턴스로 인하여 이상적인 사각과 모양의 펄스파형을 만들기는 불가능하다. 또한 펄스전류를 만들기 위하여는 일반적으로 펄스발생기에 파워 앰프를 붙여서 펄스전류를 만드는데, 전류가 커질 때에는 요구되는 출력이 매우 커지게 되므로 상용의 파워 앰프로는 이를 만족시키기 불가능하다. 보온재 비헤체 방식으로 검사하기 위하여는 전류의 세기가 100 A 정도는 되어야 하므로 이 정도의 파워 앰프는 찾기가 힘들뿐더러 설사 있다하더라도 가격과 무게가 엄청나기 때문에 실제 측정에는 사용하기 힘들다. 이에 따라 본 연구에서는 펄스를 연속적으로 방출하지 않고 일정 시간만 방출하고 정지하는 파워 소스를 설계하여 제작하였다.

바이폴러형 펄스 지속에 따른 피검체의 두께변화를 측정하는 펄스자기장을 이용한 탐상장치는, 시편과 비접촉하는 자화 요크를 구성하고 자화 요크의 외부에 코일을 감아 교류자기장을 형성하였다. 탐촉자의 구동코일은 수십암페어(A) 정도의 높은 전류를 견뎌야 하므로 충분히 굵은 코일을 사용하여야 한다. 그러나 굵은 코일은 저항이 작은 대신 제한된 부피를 많이 차지하므로 한정된 체적에 감기 힘든 단점이 있으며 감는 횟수도 제한될 수밖에 없다. 또한 코일에 과도한 열이 발생하면 탐촉자의 온도가 올라가고 이에 따라 홀센서의 성능이 저하될 수밖에 없다. 여러 가지 조건들을 종합하여 적절한 굵기의 코일을 사용하여야 한다. 본 실험에서는 이 시간을 2 μsec(마이크로초)로 하였다. 전류가 최대점에서 급격히 0으로 감소할 때 Fig. 5의 붉은 색으로 표시된 PEC 유도신호가 발생하며 이 신호를 해석하면 시험편의 두께변화 즉 감속에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그림에서 보듯이 전류가 일

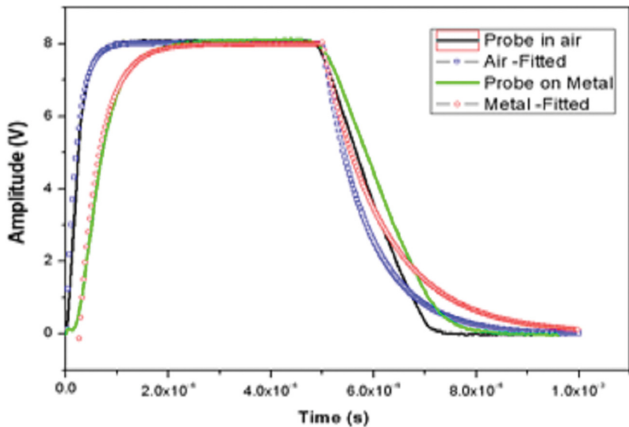


Fig. 6. (Color online) Transient response of the exciting coil measured and fitted.

정한 부분에서는 유도신호가 발생하지 않다가 펄스전류가 기립하거나 하강하는 천이영역에서만 유도신호가 발생하는 것을 알 수 있다. 유도신호의 방향은 인가된 펄스전류의 방향과 반대로 펄스전류가 양(+의 방향으로 상승할 때에는 음(-)의 반대방향으로 발생하고, 음(-)의 방향으로 하강할 때에는 반대로 양(+의 방향으로 유도된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 시험편의 상태에 따라서 공기 중에서도와 코일 내에서의 펄스모양 변화를 나타낸 것이다. 코일에 인가 전류가 흐를 때 인가전류가 가해지는 시간동안 전류는 최댓값에 도달한다. 인가전류가 갑자기 끊어질 때 전류의 거동은 지수함수적으로 감소하게 된다. 인가 전류가 끊어진 후 오랜 시간이 경과하면 감소신호의 로그 값은 시간에 따라 거의 선형으로 감소한다. 탐촉자 밑에 시험편이 없을 경우, 즉 탐촉자가 공기중에 있을 경우, 측정된 자기장은 단순히 인가전류에 비례한다. 그러나 탐촉자가 금속으로된 시험편 위에 놓여 있을 때

인가전류와 반대방향의 와전류가 시험편에 유도되어, 인가전류가 지연되어 최대점까지 도달하는 시간이 탐촉자가 공기중에 있을 경우보다 길어진다. 인가 전류가 끊어진후 시간이 경과하면 와전류는 시험편 내부로 침투해 들어가며 신호는 결합의 크기에 따라 변하게 된다. 동일한 잔여 두께를 가진 두 시험체에서 신호의 감쇠 거동은 위치와 관계 없이 거의 일정하다. 자기장은 시험편에 따라 달라지며 코일의 임피던스도 달라진다. 따라서 어떠한 재료의 성질이나 기하학적 변화는 와전류의 분포에 영향을 미치며 또한 관련된 자기장은 코일의 임피던스를 변화 시킨다. 그림에서 실선으로 표시된 것은 실험결과를 나타낸 것이며, 점선으로 표시된 것은 계산결과를 나타낸 것이다. 실선중 검은선은 탐촉자 아래에 시험편이 없을 경우 이고 녹색으로 표시된 것은 탐촉자 아래에 시험편이 놓여 있는 경우이다. 탐촉자 아래에 시험편이 있을 경우에는 탐지코일에서의 리액턴스가 크게되므로 시정수가 크게되어 펄스의 기립시간과 떨어지는 시간이 증가하게 되므로 천이영역에서 펄스신호의 기울기가 감소하게된다. 하강천이영역에서 계산결과와 실험결과가 일치하지 않는 것은 계산에 사용된 코일상수등이 실제 코일과 완전히 일치하지 않기 때문이다.

III. 펄스와전류의 적용

1. 항공기의 접합부에서의 결함탐지

항공기의 두랄루민 판재를 접합할 때 용접을 하지 않고 리벳팅으로 접합한다. 이에 따라 리벳팅부 주위는 몇겹의 판재가 겹쳐져 있어서 이 겹친 부위에서 피로 및 부식에 의한 균열이 자주 발생하고 있다. 그러나 기존의 와전류로는 판재가 겹친 부분에서의 결함을 탐지할 수 없다. 기존의 와전류가 판재에

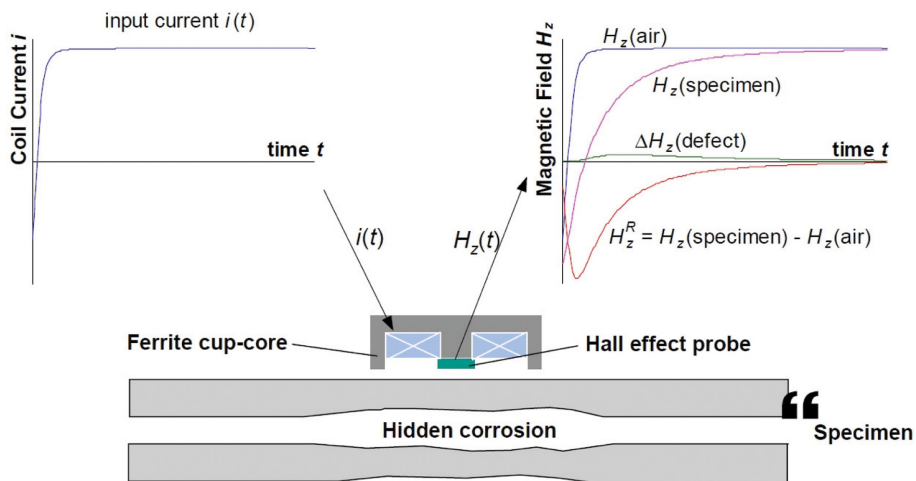


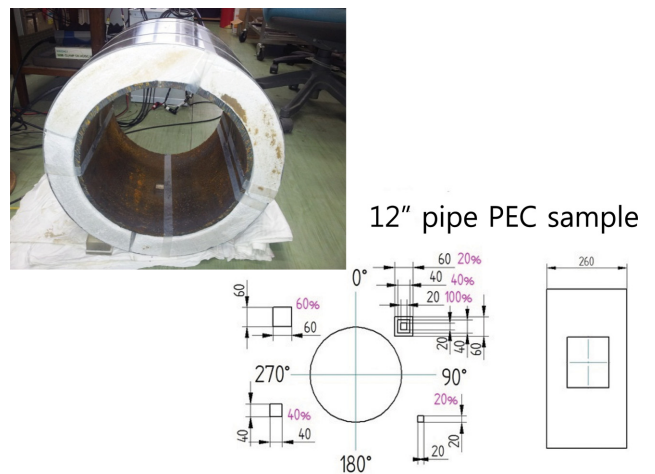
Fig. 7. (Color online) Schematic showing the probe on a multilayer specimen with hidden corrosion between layers, including typical input current $i(t)$ and probe response $H_z(t)$ [13].

인가될 경우에는 처음의 판재에서 급격히 감소되어 첫 번째 판재의 바닥이나 두 번째 판재까지 도달하지 못한다. 따라서 다중 주파수를 사용하거나 이들을 결합하는 실험적인 기법들을 사용하여야 하는 이것 역시 만족스러운 결과를 얻기 힘들다. Fig. 7은 캐나다에서 개발된 항공기 검사용 TREVSCAN 시스템을 사용하여 항공기 동체부분의 다중 접합부를 검사하는 방법을 나타낸 것이다[12]. 시험편에 광대역 펄스를 유도하기 위하여 구동코일에 지속적으로 감소하는 사각펄스 전류를 인가하였으며, 이 전류는 시험편 내부로 전파되는 주기적인 와전류에 의하여 발생하는 역자기장을 발생시킨다. 시험편의 표면에 수직한 자기장의 성분 $H_z(t)$ 는 코일 축상에서 시험편위로 놓여있는 홀센서에 의하여 측정된다. 펄스와전류는 본질적으로 모든 주파수를 포함할 뿐만 아니라 와전류의 세기를 조절할 수 있으므로 몇 겹의 판재를 투과하거나 또는 판재사이의 부식과 같은 결함을 측정할 수 있다. 탐촉자 앞에 시험편이 없을 경우에는 측정된 자기장 $H_z(\text{air})$ 은 단순히 인가전류에 비례한다. 탐촉자가 금속 시험편 위에 놓였을 때 측정되는 자기장 $H_z(\text{specimen})$ 은 초기 자기장의 변화에 반대방향으로 시험편에 유도되는 와전류에 의하여 보다 긴 상승 시간 (rise time)을 가진다. 시험편의 효과를 보기 위하여 시험편에 의하여 유도되는 자기장 H_z^s (시험편 내부에서 유도되는 와전류에 의한 자기장)은 $H_z(\text{specimen})$ 와 $H_z(\text{air})$ 사이의 차로써 계산된다. 시험편 내부의 결함에 의한 신호를 강조하기 위하여 구조물의 결함이 없는 신호를 기준으로 신호($\Delta H_z(t)$)를 표시하는 것이 일반적이다. 만일 구조물에 결함이 없다면 이 신호 $\Delta H_z(t)$ 는 일반적으로 나타나지 않는다. 이 신호를 처리하면 부식에 의한 비행기 동체의 모습변화를 영상으로 표시할 수 있다. 그러나 펄스와전류는 아직도 신호처리 분야에서 많은 발전을 필요로 하는 기술이다. 특히 항공기 동체의 결함 탐지나 판재사이의 부식과 같은 문제에서 얼마나 정확히 탐지할 수 있고 얼마정도의 깊이로 탐지 가능한가에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 또 다른 중요한 문제는 다층 구조에서 층간 사이의 부식과 같은 이면결함을 탐지하는 것이다. 펄스 와전류를 사용하여 어느 정도의 깊이에서 결함 크기가 얼마인지를 알아내는 것은 매우 중요하다.

2. 보온재 비해체식 배관감육 평가기술

정유회사나 발전소등의 배관 내부에는 고온의 유체가 흐르고 있으며 단열을 위하여 배관 외부를 보온재로 둘러싸고 있으며, 배관의 내부는 유체의 흐름에 의하여 유체유동가속부식 (Flaw Accelerated Corrosion, FAC)이라는 손상을 받아 두께가 얇아지는 감육 현상이 일어나고 있다[7]. 또한 배관이 보온재로 둘러싸여 있으면, 배관과 열차폐체의 경계면에서 부식이 발생하게 되며 이를 절연체 아래의 부식(corrosion under

insulation, CUI)이라고 한다[15]. 이와 같은 현상들은 압력용기나 배관을 파손시키기도 하며 발전소나 구조물의 건전성을 심각하게 위협하고 있다. 특히 정유회사등은 수천 킬로미터에 달하는 배관이 거미줄처럼 엉켜있기 때문에 배관의 부식이나 마모를 확인하는 것은 중요한 일이다. 원자력 발전소에서의 감육은 주로 복수계통, 주급수 계통, 주증기계통 등에서 발생하며 3인치 이상 주배관, 보조배관 및 부속기가 문제가 되고 있다. 일본에서는 미하마 원전 3호기에서 감육에 의한 급수 배관 파열로 작업자 11명이 화상을 입고 그중 5명이 사망하는 사고가 있었다. 현재 발전소 배관의 두께검사에 사용되는 초음파검사(UT, ultrasonic technique) 방법은 수직탐상을 이용한 두께측정 방식으로 검사 대상관의 보온재를 제거한 후 검사부위를 격자모양으로 분할하여 정밀하게 측정함으로써 배관전체의 감육정도와 형상을 비교적 정확하게 구할 수 있는 장점이 있다. 그러나 검사를 위하여 보온재를 제거하고 또한 검사후 재가설 하여야 한다. 이와 같은 작업에는 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 방대한 양의 배관을 검사하는 곳에는 적용하기 힘들다. 이에 따라 배관이나 압력 용기 등의 열차폐를 위한 보온재를 제거하지 않고 이를 탐지하기 위한 방법이 INCOTEST사에서 개발되었다[16]. 이는 강력한 펄스 자기장을 이용하여 자기장이 보온재를 투과하여 배관의 모재인 배관과 상호작용하여 발생하는 와전류를 탐지하는 “펄스 와전류를 이용한 보온재 비해체식 배관감육 평가기술”이다. 또한 균일한 자기장을 인가하기 위하여 자화 요크의 양 다리에 4개의 코일을 대칭적으로 감아 잔류자화에 의한 자기력을 제거하고 양방향에 대칭자기장이 인가되도록 하였다. 본 연구에서는 0.2~2 sec 정도의 극저주파를 가진 펄스 자기장을 인가하여 배관 재료와 같은 시험체에 자극을 유도하고 시험



EDM machined in pipe inside

Fig. 8. (Color online) PEC Mock-up sample and defect size.

체에서의 유도된 자속의 변화를 센서로 검출함으로써 자성체로 이루어진 배관의 두께변화를 정량적으로 측정할 수 있도록 하였다. 바이폴라형 펄스 자속에 따른 피검체의 두께 변화를 측정하는 펄스자기장을 이용한 탐상장치는, 시편과 비접촉하는 자화 요크를 구성하고 자화 요크의 외부에 코일을 감아 교류자기장을 형성하였다. 시험편은 Fig. 8과 같은 모양의 탄소강으로 제작한 시험편을 사용 하였으며, 본 시험편은 정유회사에서 사용되는 배관이며 결함의 형상은 배관에서 일어나는 결함의 종류를 가정하여 정하였다. 배관의 외경은 12인치, 두께는 12 mm이며, 각각 두께대비 20%, 40%, 60% 깊이로 결함을 가공 하였으며, 20% 결함은 한 번의 길이가 20 mm이며 깊이는 두께의 20%로 하였다. 40%, 60% 결함은 한 번의 길이가 각각 40 mm, 60 mm이며 결함의 깊이는 각각 40%, 60%이다. 나머지 결함은 위의 3가지 종류의 결함을 한곳에 포개어 놓았는데, 결함의 깊이는 60 mm 결함은

20%로 하고 그 내부에 40 mm 결함을 40% 깊이로 가공 하였으며, 마지막 20 mm 결함의 깊이는 100% 관통으로 하였다. 정사각형 결함의 형상은 Fig. 8의 왼편 상단의 60 mm 결함부터 반시계방향으로 결함을 표시하였다.

Fig. 9는 사각형 결함에 대하여 측정한 결과이다. 펄스는 Fig. 5와 같이 양의 방향으로 반주기를 인가한 후 인가시간만큼 정지한 후 음의방향으로 반주기를 인가하였다. 탐촉자에 의하여 유도된 신호는 그림에서 보듯이 펄스가 증가하는 부분과 감소하는 부분에서 나타난다. 유도신호의 크기를 나타내는 peak amplitude는 결함의 크기가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 Fig. 9의 신호를 결함의 부피와 결함의 깊이에 따라 그린 것이다. 그림에서 보듯이 결함과 신호의 크기와의 상관관계는 결함의 부피보다 깊이와 더욱 좋은 상관관계를 보여주는 것을 알 수 있다. 그러나 이는 일반적인 와전류 실험결과와는 다른 경향을 보이고 있다. 대부분

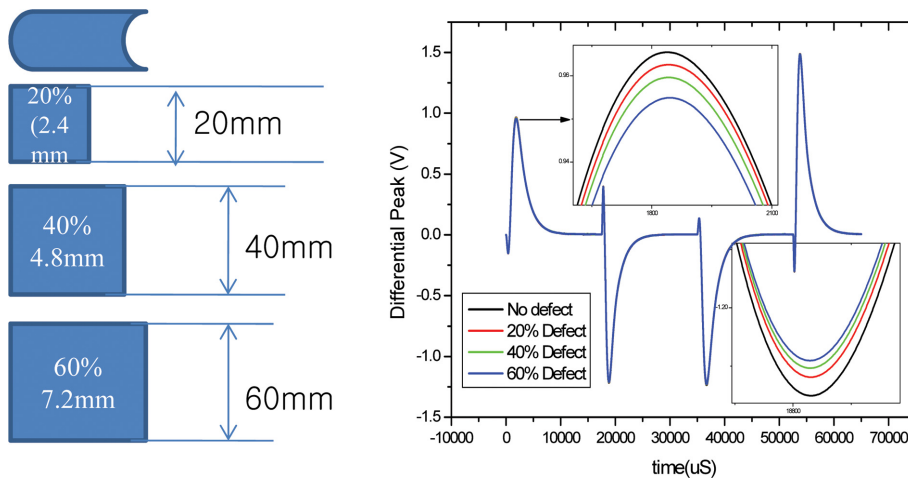


Fig. 9. (Color online) Defects configuration and detected sensor signal measured by differential Hall sensor.

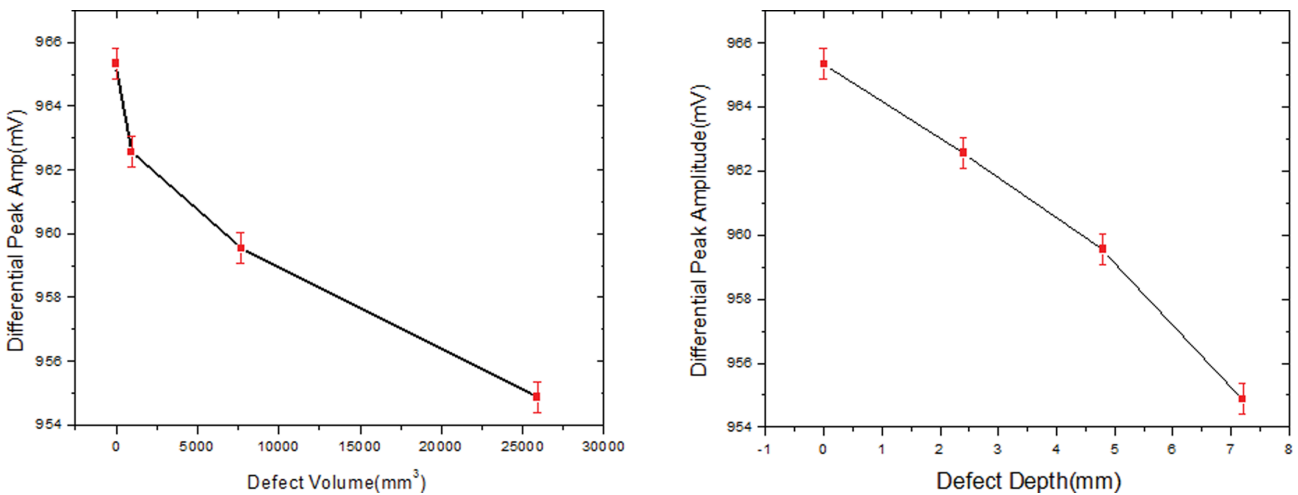


Fig. 10. (Color online) PEC signal plotted according to the defect volume and defect depth measured by differential Hall sensor.

의 실험결과는 신호의 세기는 결함의 부피와 좋은 상관관계를 보여주고 있다. 본 실험에서 이와 같은 결과가 나온 것은 신호를 측정하는 센서가 탐촉자의 중앙에 위치하고 있으며, 이 위치에서 자속이 집중되기 때문인 것으로 생각된다. 반면 일반적인 와전류 실험에서는 낮은 전류밀도로 인하여 자속이 발산되는 경향이 있다. 따라서 본 연구의 결과는 탐촉자의 모양에 의한 것으로 보인다.

IV. 결론 및 전망

펄스와전류의 기본 이론과 장비 및 사용처에 대하여 간략히 알아보았다. 펄스와전류는 기존 와전류의 한계점을 뛰어넘을 수 있는 기술로 각광받고 있다. 현재 가장 널리 사용되는 펄스와전류 기술의 적용은 비행기의 동체 및 날개 등과 같이 다중으로 겹쳐진 판재 사이의 부식을 탐지하는 것과, 절연체로 둘러싸인 배관에서의 손상, 즉 절연체하의 부식(corrosion under insulation)과 유동가속부식(fluid accelerated corrosion)을 탐지하는 것이다. 절연체로 둘러싸인 배관의 손상을 탐지하기 위하여 펄스와전류 장비를 제작하였으며, 현장 시험편을 이용하여 성능을 확인하였다. 성능 측정 결과 5 cm의 보온재와 0.5 mm 두께의 클래딩이 감싸고 있는 현장 시험편에서 두께대비 20%의 결함을 성공적으로 측정하였으며, 결함의 두께 따라 펄스와전류의 출력전압이 선형적으로 변화하는 것을 확인하였다. 펄스와전류를 이용하여 배관의 감육을 평가하는 기술은 현재 네덜란드 등의 INCOTEST사가 독점하고 있으며, 이 회사는 장비는 판매하지 않고 기술서비스만 하고 있다. 본 연구에서 개발된 장비의 성능은 INCOTEST 장비의 성능을 능가하는 것으로 평가되었으나, 결함에 대한 정량적인 평가와 정확성을 높이기 위해서는 폭넓은 데이터베이스의 확보와 신호처리 기술을 보강할 필요가 있다.

References

- [1] S. A. Smith and G. R. Hugo, *Insight* **43**, 14 (2001).
- [2] C. Tai, J. H. Rose, and J. C. Moulder, *Rev. Sci. Instrum.* **67**, 3965 (1996).
- [3] A. M. Zaman, C. G. Gardner, and S. A. Long, *J. Nondestruct. Eval.* **3**, 37 (1982).
- [4] G. Dobmann, R. Becker, and M. Disque, *Welding Research Abroad* **44**, 16 (1998).
- [5] S. K. Burke and L. R. F. Rose, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **20**, 797 (1987).
- [6] M. J. Cohn and J. W. Norton, In: *Proceeding of PVP2008 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference* (2008).
- [7] B. Chexal, J. Horowitz, and B. Dooly, EPRI TR 106611-R1, "Flow Accelerated Corrosion in Power Plants" (1988).
- [8] W. Lord, Y. S. Sun, S. S. Udpa, and S. Nath, *IEEE Trans. Magn.* **24**, 435 (1988).
- [9] J. Blitz, *Electrical and magnetic Methods of nondestructive testing*, Chapman & Hall, London (1997) p. 100.
- [10] J. Bowler, *Rev. Progr. Quant. Nondestruct. Eval.* **9**, 287 (1990).
- [11] C. P. Dolabdjian, L. Perez, V. O. De Hann, and P. A. De Jong, *IEEE Sens. J.* **6**, 1511 (2006).
- [12] R. A. Smith and G. R. Hugo, *Proc. 4th Joint DoD/FAA/NASA Conf on Aging Aircraft*, St Louis, May (2000).
- [13] D. J. Harrison, *Defence Research Agency Technical Report DRA/SMC/TR941008*, DRA Farnborough, UK (1994).
- [14] R. A. Smith and G. R. Hugo, *Proc. 5th Joint NASA/FAA/DoD Aging Aircraft Conference* (2002).
- [15] S. Winnik, *Corrosion-under-insulation (CUI) guidelines*, European Federation of Corrosion Publications No. 55, Woodhead Publishing Limited (2008).
- [16] R. Scottini and H. J. Quakkelsteijn, *4th Middle East NDT Conference and Exhibition* (2007).