

# 펄스와전류를 이용한 보온재 비해체식 배관감육 평가기술

박덕근<sup>†</sup> · M.K. Babu<sup>\*</sup> · 이덕현<sup>\*\*</sup>

## Nondestructive evaluation of wall thinning covered with insulation using pulsed eddy current

Duck-Gun Park<sup>†</sup>, M.K. Babu<sup>\*</sup> and Duk-Hyun Lee<sup>\*\*</sup>

(Received 11 June 2014, Revised 24 June 2014, Accepted 30 June 2014)

### ABSTRACT

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 developed system is capable of detecting the wall thickness change through an insulation of thickness 10cm and 0.4mm aluminum shielding. In order to confirm the thickness change due to wall thinning, two different sensors, a hall sensor and coil sensor were used as a detecting element. In both cases, the results show a very good change corresponding to the thickness change of the test specimen. During these experiments a carbon steel tube of diameter 210mm and a length of 620mm, which is covered with insulator of 95mm thickness was used. To simulate the wall thinning, the thickness of the tube is changed for a specified length such as 2.5mm, 5mm and 8 mm from the inner surface of the tube. A 0.4mm thick Aluminum plate was covered on the Test specimen to simulate the shielding of the insulated pipelines. For both hall sensor and coil detection methods Fast Fourier transform(FFT) was calculated using window approach and the results for the test specimen without Aluminum shielding were summarized which shows a clear identification of thickness change in the test specimen by comparing the magnitude spectra. The PEC system can detect the wall thinning under the 95 mm thickness insulation and 0.4 mm Al shielding, and the output signal showed linear relation with tube wall thickness.

**Key Words** : Local wall thinning (감육), Nondestructive evaluation (NDE, 비파괴), Pulsed Eddy Current (PEC, 펄스와전류), Carbon steel pipe (탄소강 파이프),

## 1. 서론

발전소나 화학설비 등의 배관 내부에는 고열과 고압의 유체가 흐르고 있다. 이에 따라 열손실을 방지하기 위하여 배관의 표면을 실리카 계통의 보온재로

둘러쌓고 있으며 보온재는 외부에 얇은 스텐레스 판으로 보호되고 있다. 배관은 대부분 탄소강 계열로 이루어져 있으며 보온재로 보호된 배관 표면은 습기에 의한 부식이 일어나며, 또한 배관 내부는 유체와의 마찰에 의하여 배관의 두께가 얇아지는 감육현상이 일어나며, 이러한 감육현상은 주로 유체의 속도가 급격히 변화하는 엘보등의 곡관부에 집중되어 발생한다<sup>1)</sup>. 이러한 배관의 건전성을 확보하고 배관의 수명을 증대시키기 위하여는 가동중에 부식과 감

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail: dgpark@kaeri.re.kr

TEL: (042)868-2023 FAX: (042)868-4785

<sup>\*</sup> 한국원자력연구원

<sup>\*\*</sup> 한국원자력연구원

육정도를 감시 또는 평가하는 비파괴 기술개발이 필요하다.

그러나 배관은 두꺼운 보온재로 덮혀 있기 때문에 보온재를 제거하지 않고는 널리 사용되는 초음파나 와전류기술을 적용할 수는 없다. 펄스와전류는 전통적인 정상 사인파(steady-state, sinusoidal current)를 사용하는 일반적인 와전류 기술과는 달리 펄스전류를 이용한다. 와전류탐상법에서 중요한 인자의 하나로 검사체의 투자율과 전기전도도 및 해당 주파수에 의해 다음 식과 같이 와전류의 침투 깊이가 결정된다<sup>2)</sup>.

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

여기서  $\delta$  는 표준침투깊이,  $f$  는 주파수(Hz),  $\mu$  는 자기투자율(H/m),  $\sigma$  는 전기전도도(S/m)이다. 위 식에서 와전류침투깊이와 주파수는 역수 관계이므로 수백 kHz 범위의 주파수대를 사용하고 있는 와전류 검사는, 비자성체인 인코넬이나 스텐레스 계통의 재료에 한정되어 적용된다<sup>3)</sup>. 그러나 배관재료인 탄소강은 강자성체로서 투자율이 수백에서 수만까지 매우 높고 전류가 시험체의 표면에 주로 분포하므로 일반적인 와전류 검사를 적용하기에는 제한이 있다. 따라서 보온재로 둘러 쌓인 탄소강 재료의 배관을 검사하기 위하여는 위 식에 의하여 주파수를 감소시키고 전류밀도를 증가시켜야만 한다. 이는 정상파인 경우 전류밀도가 낮아 시험체의 표면근처의 정보만 얻을 수 있는 반면 펄스파를 사용할 경우 전류밀도를 높일 수 있어 시험체의 내부정보까지 얻을 수 있기 때문이다<sup>4,5)</sup>. 이러한 성질로 인하여 펄스와전류는 탄소강과 같은 강자성 재료의 두께변화나 스텐레스강과 같은 비자성재료의 깊은 결함이나 이면결함과 같이 일반적인 와전류로 탐지가 곤란한 부위를 비파괴적으로 탐지하는데 사용된다. 펄스와전류법은 짧은 시간에 사각파를 가진하여 광대역 주파수 특성을 가지는데 이러한 광대역 특성으로 인하여 다양한 침투깊이에 대한 정보를 동시에 얻을 수 있다. 따라서 전통적인 와전류탐상법에서 주파수를 변경시키면서 주파수별 다른 신호를 취득하는 것에 비해 신호수집 시간을 절약할 수 있다. 또한 와전류장을 측정하기 위해 다양한 형태의 센서, 즉 코일, hall 센서, GMR 센서 등을 사용할 수 있다. 펄스와전류는 1950년대 초 이래로 금속의 비파괴 시험에 이용되어 왔으며,

검사하의 시험체에 와전류를 유도하여 field coil을 통과하는 일련의 전류 펄스를 이용한다. 유도된 와전류는 투과율, 전도율, 벽두께, 표면결함과 프로브 및 시험체(lift-off) 사이의 거리 등의 시험체 특성에 의해 영향을 받는다. 결과로 생긴 와전류는 탐촉자 코일에서 전압펄스를 유도하는 펄스자기장을 발생시킨다. 탐촉자 코일에서 유도된 전압은 시험체의 표면결함과 벽두께와 관련한 정보를 포함한다. 벽두께와 결함 정보는 time-sampling 기술을 이용하여 유도된 전압펄스로부터 추출된다. 본고에서는 보온재를 해체하지 않고 배관의 건전성을 평가할 수 있는 펄스와전류 기술과 이를 Mock-up 시험편에 적용한 결과를 소개하고자 한다.

## 2. 펄스와전류를 이용한 보온재 비헤체 방식의 감육평가

### 2.1 펄스와전류의 기초이론

변화하는 자기장이 가해질 때 도체에는 패러데이의 자기유도법칙에 의하여 와전류가 유도되며, 이는 도체 근처에 있는 코일을 통하여 전압신호로 관찰된다. 일반적인 와전류에서의 자기장은 단일한 주파수로 진동하는 정현파에 의하여 생성된다. 그러나 펄스와전류는 정현파를 인가하는 대신 사각 펄스파를 인가하여 와전류를 발생시킨다. 이 사각 펄스파는 넓은 범위의 주파수 영역을 가지기 때문에<sup>4,5)</sup>, 확산 방정식에 의하여 지배되는 시간에 따라 감소하는 진행파를 발생 시킨다. 이러한 방식으로 발생하는 펄스와전류는 사각펄스파가 증가할때와 감소할 때 만 불연속적으로 발생한다, 이는 펄스가 유지되는 시간 동안에는 전류가 일정하므로 와전류가 발생하지 않기 때문이다.

단지 외부 표면 결함 정보는 전압펄스의 초기 위치에서 나타나는 반면에, 외부 및 내부의 표면 결함과 벽두께 정보는 전압펄스의 끝 부분에 나타난다. Fig. 1(a), (b) 는 인가하는 펄스전류의 모양과 시험편에서 유도되는 펄스와전류의 모양을 보여주고 있다. Fig. 1(b)에서 펄스전류가 증가할때와 감소할 때 시험편에서 유도되는 펄스파의 형태가 변화하는 것을 알 수 있다. 이 부분은 시험편 내부에서 각각의 깊이에서 와전류가 산란되므로 펄스와전류의 모양이 변화한 것이데, 시험편 내부에 결함에 대한 정보를 포

함하고 있다. 시험편의 표면근처에 있는 결함에 의하여 유도된 신호가 처음 도착하고, 시험편 내부 깊은 곳에 있는 결함에 의하여 발생한 신호는 후에 도착하므로, 이들 신호는 도체내부에서의 확산에 의하여 이들 신호의 경로차에 의하여 유도된 신호는 둥근 모양을 가지게 된다. 따라서 Fig. 1(b)에서 유도된 신호의 앞부분은 표면 근처에 있는 결함에 대한 정보를 포함하고 있으며, 뒷부분은 깊은 부분에 위치한 결함에 대한 정보를 포함하고 있다.

도체 내에서 전자기장이 전파할 경우에는 표면에서의 인가되는 전류의 시간과 공간분포에 따라 결정된다. 이에 따라 총 자속은 탐촉자의 인덕턴스(L)와 전류(I)에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi = \frac{LI}{N} \tag{2}$$

이에 따라 코일에 발생하는 자기장을 최대를 하기 위하여는, 전기장은 코일에 흐르는 전류의 시간 변화율에 비례하기 때문에 코일에 흐르는 전류를 가능한 한 빨리 변화시키는 것이 좋다. 따라서 사각 펄스파를 이용하는 것이 이상적이다. 그러나 실제로는 코일에 흐르는 전류는 코일의 시정수에 의하여 영향을 받기 때문에 이상적인 펄스파를 생성 시키는 것은 불가능 하다. 따라서 입력 펄스파를 생성 시키는 탐촉자의 구동코일을 최적으로 설계하는 것은 펄스와전류 기술에 있어서 이 매우 중요하다. 파라데이의 자기유도 법칙에서 구동코일 양단에서 나타나는 출력 전압은 자속( $\Phi$ )의 시간변화율과 코일의 감은수(N)에 따라 결정된다.

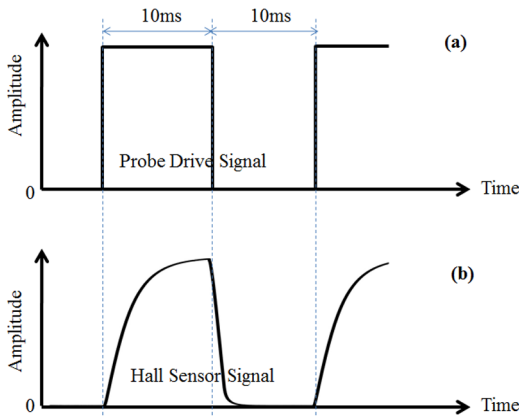


Fig. 1 Probe coil drive and Hall sensor signal

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \tag{3}$$

따라서 코일이 전압구동방식이면 인가전류의 크기와 모양은 코일의 저항과 인덕턴스에 의존한다.

### 2.2 펄스와전류 장치의 구성

펄스와전류 시스템은 펄스증폭기, 자기장을 발생하기 위한 자화코일과 탐지용 홀센서 및 탐지코일, 시험편에서 유도된 신호를 탐지하는 홀센서와 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. 2에 제시하였다. Fig. 2(a)는 펄스와전류 장치의 구성도이고 (b)는 실험용 탐촉자를 나타낸 것이다. 이 그림에서 펄스앰프는 구동코일에 자기장을 생성하기 위한 펄스전류를 공급하고, 구동코일은 펄스자기장을 발생 시킨다. 펄스자기장에 의하여 Mock-up 시험편에 유도된 펄스와전류는 탐촉자에 부착된 홀센서를 통하여 탐지되며, 홀센서의 출력신호는 컴퓨터로 처리 된다. 신호 수집 및 해석용 s/w는 LabView를 이용하여 제작 하였으며, 해석된 결과는 컴퓨터 모니터에 출력되도록 하였다. 펄스와전류 탐촉자는 구동코일과 홀센서 그리고 탐지용 코일로 구성되며, 각각의 사양은 시험편과 구동환경에 따라 정해진다. 시험편의 평균적인 두께는 구동코일 주위에 감긴 탐지코일에 의하여 탐지되며, 시험편 내부의 작은 국소적인 결함은 탐촉자 중심에 삽입된 홀센서를 이용하여 측정한다.

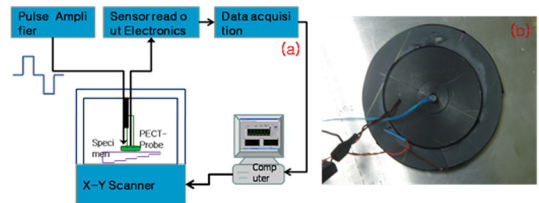


Fig. 2 (a) Schematic diagram of PEC system (b) Probe with both hall sensor and coil as the field detecting sensors

### 2.3 Mock-up 시험편 제작 및 실험

보온재로 둘러 쌓인 배관의 감육을 보온재 외부에서 탐지하기 위하여 탄소강 배관을 가공하여 2.5, 5,

8mm의 두께를 갖도록 가공하고, 외부에 95mm의 두께를 가진 보온재로 둘러싸고 그 외부에 0.4mm의 두께를 가진 알루미늄 판으로 감싼 Mock-up 장치를 Fig. 3 과 같이 제작 하였다. Mock-up 시험편 계단 내부에는 폭이 5mm, 깊이가 각각 1, 2 mm인 홈을 내어서 감육 시험편 내부에서의 결함을 모사하도록 가공 하였다. Fig. 3(c)는 배관감육 시험편과, 보온재와 알루미늄 cladding으로 구성된 Mock-up 시험편의 단면을 보여주고 있다.

실험 절차는 Fig 1의 모양과 같은 사각 펄스로 이루어진 펄스와전류가 탐촉자에 인가되어 시험편을 자하시키고 시험편에서 유도된 펄스와전류는 신호증폭기를 거쳐 아날로그 디지털 변환기(ADC)를 거쳐 컴퓨터에 연결 하였다. 탐촉자는 구동코일과 탐지용 홀센서 및 탐지코일로 구성되어 있으며, 홀센서는 배관내부의 국소적인 변화를 탐지하고, 탐지코일은 탐촉자가 놓여있는 부분 아래의 탄소강 배관의 평균적인 두께변화를 측정한다. 탐촉자는 보온재 위를 움직이면서 두께차이가 나는 측정점 위에서 펄스 자기장을 인가하여 배관의 두께를 탐지한다. 구동펄스는 수차례 연속적으로 인가하게 되며, 그 응답신호를 평균하여 배관두께 측정에서 오는 오차를 가능한 한 줄이도록 하였다. 보온재로 덮인 시험편의 외부에서 감육 손상에 의한 배관의 두께변화는 손상되지 않은 부분에서의 신호를 측정 하고, 그후 손상된 부분에서의 신호를 측정하고 이 신호들을 비교하여 손상 정도를 판단한다. 시험편의 각 계단 위치에서의

두께를 측정 한 후, 탐촉자를 배관 내부의 홈 위치에 놓고 움직이면서, 동일한 과정을 반복하여 계단위치에서의 홈에서 발생하는 신호를 측정하여, 계단 재부의 국소적인 변화를 측정 하였다. 모든 데이터 기록과 신호처리는 실험실에서 개발한 LabVIEW 프로그램을 이용하여 수행 하였으며, 신호처리 결과는 컴퓨터에 저장되고 동시에 모니터에 나타나게 구성 하였다. 본 시스템을 구성하여 Mock-up시험편에 적용하여 95mm 두께의 보온재와 0.4mm의 알루미늄 cladding 위에서 시험편 내부의 두께변화와 홈의 영향을 탐지할 수 있었다.

### 3. 실험결과 및 해석

강력한 전류가 탐촉자의 구동코일에 인가되면 구동코일은 강력한 정자기장을 생성하게 된다. 일정시간 후에 전류가 끊겨 구동전류에 천이영역이 발생할 때 시험편에서는 와전류가 발생하게 되며, 이 와전류는 천이영역에서 발생하기 때문에 천이와전류 또는 펄스와전류라고 한다. 전류가 인가되고 끊기는 상황이 주기적으로 발생하게 되면, 결과적으로 강력한 펄스자기장이 시험편에인가되게 되며, 이에 따라 시간에 따라 급격하게 변화하는 펄스자기장은 시험편에 펄스와전류를 유도하게 되며, 시험편에서 유도되는 펄스와전류는 홀센서에 의하여 전압신호로 변화되게 된다. 유도된 펄스신호의 천이시간과 세기는 시험편의 두께변화를 반영한다.

Fig. 4(a)는 알루미늄 cladding이 없는 경우이며, 4(b)는 알루미늄 cladding이 있는 경우를 나타내고 있다. Fig. 4(a)에서 인가전류가 증가하는 동안, 시험편의 두께가 증가할 수록 시험편에서 유도되는 와전류의 천이시간도 증가하게 된다. 반면 인가전류가 감소할 경우, 시험편의 두께가 증가할수록 천이시간이 감소함을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 보온재위에 0.4mm인 알루미늄 cladding이 덮혀 있는 경우를 나타내고 있다. Fig. 4(a)와 같은 경향을 보여주고 있으나, 알루미늄 cladding 없는 경우에 비하여 탐지되는 신호의 세기가 감소함을 알 수 있다. 알루미늄 cladding 이 있는 경우, 없는 경우에 비하여 천이신호의 기울기가 증가함을 알 수 있다. 이는 알루미늄 cladding에 의하여 와전류가 감소되기 때문인 것으로 보인다.

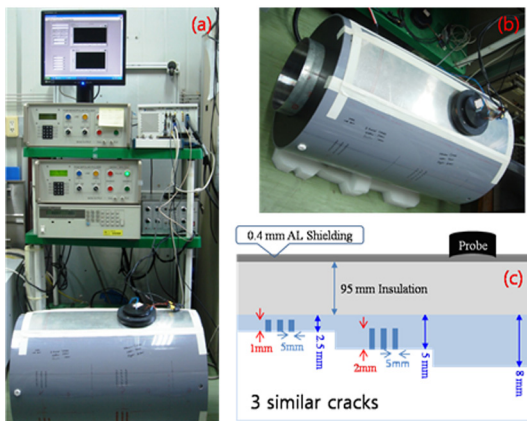
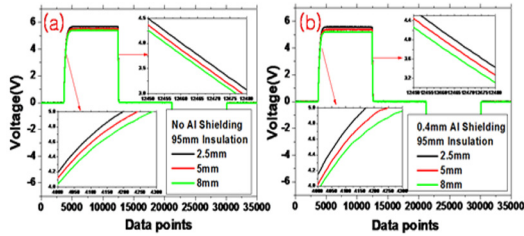
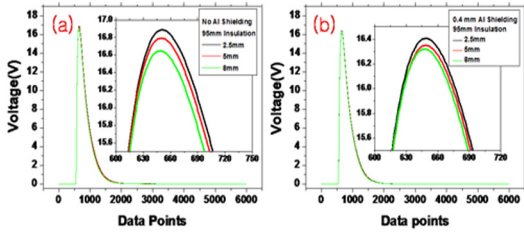


Fig. 3 (a) Experimental Setup of PEC system (b) Test Specimen (c) Inner Cross sectional view of the test specimen

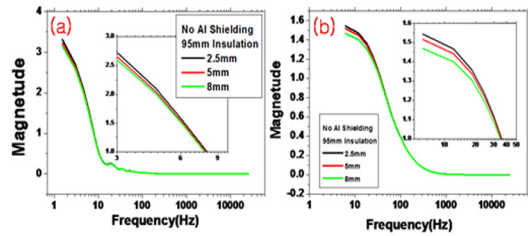


**Fig. 4** (a) Hall Sensor output with 95mm Insulation and not Aluminum shielding (b) Hall Sensor output when the sample insulated with 95mm Insulation and shielded with 0.4mm Aluminum plate

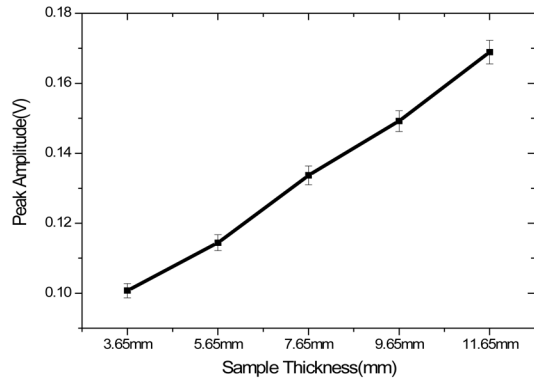


**Fig. 5.** (a) Hall Sensor output with 95mm Insulation and not Aluminum shielding (b) Hall Sensor output when the sample insulated with 95mm Insulation and shielded with 0.4mm Aluminum plate

홀센서에 의한 측정신호를 결과를 확인하기 위하여 코일 센서에 의한 결과를 해석하였는데, Fig. 4에서 보이는 것처럼 홀센서의 결과와 같은 경향을 보여주고 있다. 코일센서는 구동코일 외측에 권취되어 있으며, 홀센서와 동시에 시험편에서 유도된 와전류를 측정한다. 그러나 홀센서의 경우와는 달리 포물선 형태의 모양을 보여주고 있는데, 이는 홀 센서의 경우에는 시험편에서 유도되는 자속의 변화를 직접 탐지하며, 반면 코일센서의 경우는 자속의 시간변화를 탐지하기 때문이다. 이 그림에서 보듯이 배관의 두께가 감소할수록 탐지코일에서 유도되는 전압의 최고점은 점차적으로 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 배관의 두께가 증가할수록 와전류 손실이 증가하기 때문이다. Fig. 5에서 보듯이 시험편이 알루미늄 cladding 으로 둘러쌓여 있을 때 탐지된 펄스신호의 크기가 큰 폭으로 줄어드는 것은 알루미늄에 의한 와전류 손실로 인하여 펄스자기장의 세기가 줄어들기 때문이다.



**Fig. 6** (a) FFT of Hall Sensor output with 95mm Insulation (b) FFT of Coil output when the sample insulated with 95mm Insulation



**Fig. 7** Pulsed eddy current output of the Mock-up sample which is covered with 95mm thickness insulation and 0.4mm Al shielding.

Fig. 6(a)와 6(b)는 알루미늄 판이 없을 경우에 각각 홀센서와 코일센서로 측정된 펄스와전류 신호를 고속푸리에변환(FFT)한 경우의 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 탐지된 펄스신호의 에너지는 배관벽의 두께가 두꺼울 때 보다 얇을 경우에 보다 높은 에너지 밀도를 보여주고 있다. 와전류 손실은 배관의 두께가 증가할수록 빠르게 증가한다는 것을 알 수 있다, 이는 배관벽이 두꺼운 부분에서 탐지되는 와전류의 에너지가 두께가 얇은 쪽에서 탐지되는 와전류의 에너지보다 작다는 것을 의미한다. 홀센서로 탐지된 주파수 스펙트럼은 코일센서로 탐지된 주파수 스펙트럼보다 낮은 주파수 쪽으로 이동하였다. 이는 홀센서의 주파수 탐지범위가 코일센서보다 낮은 것에 기인한 것으로 보인다.

Fig. 7은 보온재의 직경이 250mm이고 원래 배관의 두께가 11.65mm인 배관을 가공하여 각 계단의 높이가 2mm가 되도록 가공한 후 그 위에 두께가 95mm인 보온재를 덮고, 보온재 위에 두께가 0.4mm

인 알루미늄 판으로 cladding 한 Mock-up 시험편 위에 펄스와전류 탐촉자를 놓고 알루미늄판의 외부에서 보온재로 둘러싸인 Mock-up 시험편의 두께변화를 측정하는 것이다. 측정은 한 위치에서 5번의 펄스 자기장을 인가한 후 평균한 것을 한 번의 측정으로 간주하였다. 각 측정점에서의 error bar는 5번 측정의 표준편차를 표시한 것이다. 그림에서의 Peak Amplitude는 홀센서를 차동형으로 구성하여 차동신호의 최대 높이점을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 두께가 95mm 인 보온재 외부에 0.4mm 인 알루미늄판이 차폐된 상황에서도 배관내부의 감육을 측정할 수 있다는 것을 확인 하였다.

#### 4. 결론

두꺼운 보온재로 덮혀있는 탄소강 배관의 감육을 펄스와전류 기술을 이용하여 측정 하였다. 구동코일과 홀센서, 그리고 탐지코일로 이루어진 펄스와전류 탐촉자를 이용하여 배관의 두께가 각각 2.5, 5, 8mm 인 직경 25cm인 배관에 두께가 95mm인 보온재로 둘러싸고 외부에 두께 0.4mm인 알루미늄 판으로 cladding한 Mock-up 시험편을 만들어 측정한 결과 배관의 두께에 따라 펄스와전류의 출력전압이 선형적으로 변화하는 것을 측정 하였다. 알루미늄 cladding 은 펄스와전류의 출력신호를 크게 감소 시킨다는 것을 확인 하였으며, 이는 알루미늄에 의한 와전류 손

실 때문인 것으로 확인 되었다. 배관의 두께가 증가할수록 와전류 손실이 빠르게 증가한다는 것을 확인 하였다. 펄스와전류 신호의 주파수 분석을 통하여 배관벽이 두꺼운 영역에서의 에너지 손실이 얇은 쪽에서의 손실보다 크다는 것을 확인 하였다. 여러 종류의 Mock-up 시험편으로 확인한 결과 두께가 95mm 인 보온재 외부에 0.4mm인 알루미늄판이 차폐된 상황에서도 배관내부의 감육을 측정할 수 있다는 것을 확인 하였으며, 본 실험결과 정도의 분해능이면 실제 현장에서도 무리 없이 적용 가능할 것으로 생각 된다.

#### 참고문헌

1. B. Chexal et al., 1998, "Flow Accelerated Corrosion in Power Plants", EPRI TR 106611-R1
2. R. Griberg, L. Udpa, A. Savin, R. Steigmann, V. Palihovic and S. S. Udpa, 2006, "2D eddy current sensor array", NDT&E Int. 39, 264.
3. N. Nair, V. Melapudi, J. Hector, X. Liu, Y. Deng, Z. Zang, L. Udpa, J. M. Thomas and S. Udpa, 2006, "A GMR based eddy current system for NDE of aircraft structures", IEEE Trans. Magn. 42, 3312.
4. C. J. Renken., 2001, "The use of personal computer to extract information from Pulsed eddy currents, Materials Evaluation", 59(3), 356.
5. J. Blitz, 1997, "Electrical and magnetic Methods of nondestructive testing", Chapman & Hall (London).