

자기포화 와전류기법에 의한 자성 튜브 비파괴검사

Nondestructive Examination of Ferromagnetic Tube Using Magnetic Saturation Eddy Current Technique

이희종*[†], 조찬희*, 송석윤*, 지동현*, 정지홍*

Heejong Lee*[†], Chanhee Cho*, Seokyeon Song*, Donghyun Jee* and Jeehong Jung*

초 록 원전 발전소 터빈계통을 구성하는 열교환기 튜브는 일반적으로 구리합금, 스테인리스강, 탄소강, 티타늄합금 등의 재질로 제작된다. 이들 재질중에서 페라이트계 type-439 스테인리스강은 자성 재질로서 오스테나이트계보다 더 높은 열전달을 가지며, 부식에 의해 유발되는 결함에 대해 더 높은 저항성을 가진다. 페라이트계 스테인리스강은 보통 발전소 열교환기의 저압급수가열기와 습분분리재열기에 사용된다. 저압급수가열기는 일반적으로 두께가 얇은 type-439 스테인리스강을 이용하는 반면에 습분분리재열기는 더 두꺼운 핀튜브를 사용한다. 이와 같이 터빈 습분분리재열기 튜브로 사용되는 type-439 스테인리스강 핀튜브는 터빈계통의 운전으로 인하여 손상이 발생할 수 있다. 손상에 의한 가장 대표적인 결함은 진동에 의해 발생할 수 있는 마모, 피로균열 등이며 마모성 결함은 일반적으로 튜브-튜브지지판에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 type-439 스테인리스강 자성체 튜브에 발생할 수 있는 결함을 검출하고 크기를 측정할 수 있는 자기포화 와전류탐상검사 기법의 능력을 평가하였다.

주요용어: 자기포화, 와전류탐상검사, 튜브 결함, 자성체

Abstract The tubes in heat exchanger are typically made from copper alloy, stainless steel, carbon steel, titanium alloy material. type-439 ferritic stainless steel is ferromagnetic material, and furnish higher heat transfer rates than austenitic stainless steels and higher resistance to corrosion-induced flaws. Ferritic stainless steel can typically be found in low-pressure(LP) feedwater heaters and moisture separator reheaters(MSRs). LP feedwater heaters generally utilize thin wall type-439 stainless steel tubing, whereas MSR typically employ a heavier wall tubing with integral fins. Service-induced damage can occur on the OD(outside diameter) surface of type-439 ferritic stainless steel tubing which is employed for MSR tubing, and the most typical damage mechanism is vibration-induced tube-to-TSP(tube support plate) wear and fatigue cracking. The wear has been reported that occurs mainly on the OD surface. Accordingly, in this study, we have evaluated the flaw sizing capability of magnetic saturation eddy current technique using magnetic saturation probe and flawed specimen.

Keywords: Eddy Current Testing, Magnetic Saturation, Permeability, Ferromagnetic

1. 서 론

발전소 터빈계통을 구성하는 열교환기 튜브는 일반적으로 구리합금, 스테인리스강, 탄소강, 티타늄

합금 등의 재질로 제작된다. 이들 재질 중에서 페라이트계 type-439 스테인리스강은 자성 재질로서 오스테나이트계보다 더 높은 열전달을 가지며, 부식에 의해 유발되는 결함에 대해 더 높은 저항성을

가진다. 열교환기 튜브에 사용되는 대표적인 자성 재질은 type-439 페라이트계 스테인리스강, 모넬 합금이다. 페라이트계 스테인리스강은 보통 저압급 수가열기와 습분분리재열기에 사용된다. 저압급수가열기는 일반적으로 두께가 얇은 type-439 스테인리스강을 이용하는 반면에 습분분리재열기는 더 두꺼운 핀튜브를 사용한다. 핀튜브의 핀은 튜브 외부 표면적을 약 250~300% 증대시킨다. 증대된 튜브 외부 표면적은 전체적인 열전달 능력을 향상시킨다. 이와 같이 터빈 습분분리재열기 튜브로 사용되는 type-439 스테인리스강 핀튜브는 터빈계통의 운전으로 인하여 손상이 발생할 수 있으며, 손상에 의한 가장 대표적인 결함은 진동에 의해 발생할 수 있는 마모 및 피로 균열이다. 일반적으로 마모 결함은 튜브-튜브 지지판에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 자성체 튜브의 결함 검사에 사용이 가능한 와전류검사 기법에는 자기 포화 와전류검사, 원격장 와전류검사, 자속누설기법 등이 있으며, 본 연구에서는 type-439 페라이트계 스테인리스강 핀튜브에 발생할 수 있는 결함을 검출하고 크기를 측정할 수 있는 자기포화 와전류탐상검사 기법의 능력을 평가하였다[1].

2. 이론적 배경

자성체 튜브 와전류검사에서 일반적으로 투자율 변화로부터 발생한 신호로부터 실제 결함신호를 구분하기가 어렵다. 튜브 재질의 투자율은 보통 재질 성분, 냉간가공, 열처리 상태에 따라 변하게 된다. 자성체 튜브검사를 위한 자기포화 와전류탐상검사 기법은 코일 근처의 튜브를 자기적으로 포화시킨다. 만약 튜브를 98%이상으로 포화시키게 되면 비자성체 튜브에서 얻어지는 결함 및 다른 이상신호가 얻어진다. 그러나 실제로 모든 자성체 튜브를 완전하게 포화시킬 수 없으나, 자성 튜브를 효과적으로 포화시킬 때 평가가 가능한 와전류신호가 얻어지게 된다. 자성 체질내에서 와전류침투깊이에 영향을 미치는 중요한 요소는 재질의 투자율이다. 일반적으로 투자율 변화에 의해서 발생하는 코일의 어떠한 임피던스 변화일지라도 튜브벽 감육의 영향을 차폐하게 된다. 결과적으로 투자율의 변화를 최소화시키지 않을 경우 결함의 검출은 신뢰성을 잃게 된다. 상대 투자율은 보통 10~200범위를 가지며 재질 성분, 냉간가공, 열적이력에 따라 변한다.

만약 재질의 투자율변화를 “1”단위 근처까지 줄이게 되면 시험은 재래식 와전류검사법과 아주 유사하게 된다. 그렇지만, 튜브 내경의 제한으로 인해서 크기가 더 크고 투자율이 강한 자석을 설치할 수가 없기 때문에 모든 재질을 자기적으로 포화시킬 수가 없다. 공기와 대부분의 비자성체 재질의 투자율은 “1”로 간주되지만 몇가지 탄소강의 경우 대략 10에서 200까지의 투자율을 가지며, 이들 재질을 자성체로 분류한다. 투자율은 μ 로 표시하며 투자율이 증가할수록 침투깊이에 미치는 영향을 쉽게 알 수 있다[2]. 자성 재질의 투자율은 와전류 침투깊이를 크게 제한시킨다. 즉 와전류 침투깊이는 투자율에 반비례하며 투자율이 증가할수록 침투깊이는 감소하고 반대로 투자율이 감소하면 침투깊이는 증대된다. 재질의 투자율은 자화력(H)에 노출되어 발생하는 자속밀도(B)를 측정하기 전까지는 결정할 수 없다. 투자율을 결정하기 위해서는 자화력과 자속밀도를 측정해야 하며, 투자율은 아래 식 (1)로 표현된다.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1)$$

여기에서 μ = 투자율, B = 자속밀도(flux density, gauss), H = 자화력(magnetizing force) 또는 자장밀도(field intensity, oersteds) 이다.

Type-439 스테인리스강에 대한 자화특성을 측정하여 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 자화력(H)이 커지면 자속밀도(B) 역시 증가한다. 곡선에서 자속밀도가 안정화된 점을 포화점이라 부르며 자화력의 발생원은 영구자석, 교류 또는 직류 전원이 공급되는 전자석을 사용할 수 있다. 자성체를 교류 자화력에 노출시킬 때 B-H 곡선은 변하게 되며

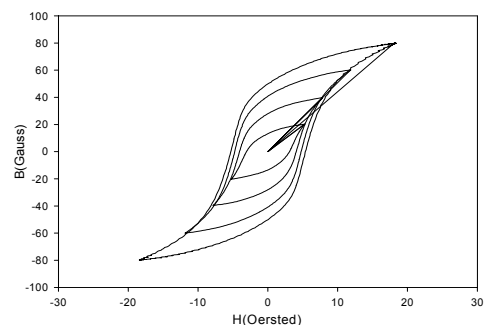


Fig. 1 Hysteresis loop of type-439 stainless steel

이러한 변화는 이력곡선(Hysteresis loop)으로 나타내진다. 자화력이 증대되고 다시 감소될 때 자속밀도는 변하게 되며 Fig. 1에서와 같은 순서로 루프가 형성된다. 자성체 튜브에 대한 와전류검사를 위해서는 자기 이력효과의 발생을 가능한 최소화시켜야 한다. 이를 위한 한가지 방법은 와전류검사 탐촉자에 영구자석을 사용하는 것이다. 영구자석은 B-H 곡선의 어떤 점에서의 재질 투자율을 국부적으로 안정화시킴으로서 재질의 거동을 비자성체 재질과 유사하게 만들어 와전류검사가 가능하게 한다. 자기적으로 바이어스 된 와전류탐촉자를 사용할 경우에 자기 히스테리시스 효과를 완전히 제거하지 못하지만 검사가 가능할 정도로 충분히 최소화시킬 수 있다. B-H 곡선상의 운전점에서 어떤 미소한 자기이력이 항상 존재하게 되며 재질의 투자율에 따라 자기편향 와전류탐촉자는 항상 자성체 튜브검사를 위한 최선책은 아니다. 자기 바이어스 와전류검사 기법은 튜브벽을 어느 정도까지 자화시키기 위해서 와전류코일에 영구자석 또는 전자석을 결합하여 사용한다.

이 자장은 튜브 벽두께와 투자율이 증가함에 따라 감소하는 자속밀도를 튜브벽 내에 발생한다. 포화방식에 따라 재질의 상태는 완전포화상태에서는 튜브벽 감육을 또는 부분포화상태에서는 투자율변화에 따라 발생하는 코일의 임피던스변화를 감지하므로써 평가가 이루어진다. 특정 튜브재질의 자화수준을 확인하기 위한 가장 쉬운 방법은 교정시험편을 이용, 신호를 취득하여 비교하는 것이다. 구분 가능한 위상각에 의해서 여러 가지 결합크기를 확실히 식별하게 될 경우 적절한 자화수준이 얻어진 것으로 간주할 수 있다. 배경성 잡음으로 인해서 교정시험편 신호를 식별할 수 없을 경우, 더욱 신뢰성 있는 검사 결과를 얻기 위해서는 더 높은 포화수준을 가진 탐촉자 또는 다른 기법으로 대체하는 것이 바람직하다[1-2].

자성 튜브의 와전류검사는 튜브벽이 부분적으로 자화되기 때문에 코일의 임피던스변화는 우선적으로 탐촉자 충진율(내경변화)과 재질 투자율 변화 두가지 인자의 혼합에 의해서 영향을 받는다. 튜브 내측 표면에 유도된 와전류는 탐촉자 충진율 변화에 민감하지만, 코일 임피던스변화는 주로 투자율 변화가 주 요인으로서 영향을 미친다. 특정 자성체 재질의 경우 투자율은 자속밀도가 증가할수록 감소한다. 유도 와전류가 튜브벽을 투과할 수 없기 때

문에 체적검사는 튜브벽을 투과하는 영구자석의 정적 자장에 의해서 이루어진다. 특정 재질의 경우 투자율은 자속밀도가 증가할수록 감소하며, 영구자석에 의해 부분적으로 자화되는 어떠한 튜브라도 어떤 일정 크기의 투자율 값을 갖는다. 튜브 지지구조물 또는 튜브감육이 없는 경우를 제외하고는 해당 튜브에서 상대 투자율 값이 얻어지게 된다 [1-2].

3. 실험 내용

3.1. 실험장치 구성

자성체 튜브의 자기 포화 와전류검사 기법에 적용되는 와전류시험장비는 기존 와전류검사기법에 사용되는 장비와 유사하다. 주요 차이점은 탐촉자 코일의 설계와 자화 자기장의 방향이다. 이 실험을 위해서 Fig. 2와 같은 자기포화 와전류탐상검사 시스템을 구성하였다. 자기포화 와전류탐상검사 시스템을 구성하는 와전류 주파수 발생 및 취득을 위한 장치로서 R&D Tech.사 TC-5800장비와 신호 분석을 위한 프로그램은 EddyView를 사용하였다. EddyView 프로그램이 설치된 컴퓨터에서 신호를 취득하여 분석하였다. 또한, 자석의 자화력 측정에는 F.W.Bell사의 model-6010 Gaussmeter를 사용하였다.

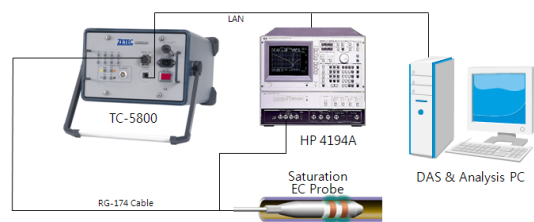


Fig. 2 Experimental setup for magnetic saturation eddy current testing

3.2. 자기포화 와전류탐촉자 설계 제작

3.2.1. 탐촉자 운전주파수

와전류검사에서 와전류의 표준 침투깊이는 식 (2)로 표현된다. 자성체 튜브에서 표준 침투깊이는 비자성체 튜브와 다르게 운전주파수뿐만 아니라 재질의 투자율에 반비례한다. 따라서 자성체 튜브를

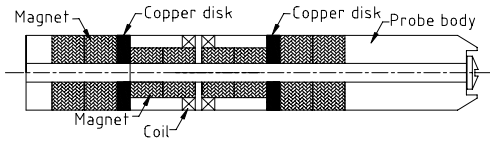
자기적으로 포화시키지 않은 상태에서는 기존의 와전류검사가 불가능하다. Type-439 스테인리스강의 전기 및 자기적 특성은 고유저항(ρ)이 $63 \mu\Omega\text{-cm}$, 상대 투자율(μ_r)이 1~700이다. Type-439 스테인리스강의 자기포화 시험주파수는 튜브의 포화정도 즉 상대투자율에 따라서 160 kHz~300 kHz범위가 된다[2].

$$\delta = 50 \sqrt{\rho / (f \cdot \mu_r)} \quad (2)$$

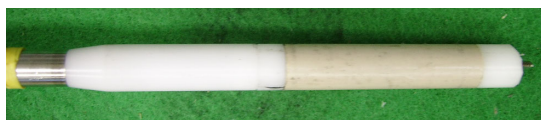
- δ : 표준 침투깊이(mm)
- ρ : 비저항($\mu\Omega\text{-cm}$)
- f : 운전 주파수(Hz)
- μ_r : 상대투자율

3.2.2. 탐촉자 설계

탐촉자의 코일이 위치하는 튜브벽을 효율적으로 자화시키기 위해서 영구자석을 Fig. 3에서와 같이 코일하부에 배치하였으며, 자석의 외경 치수는 코일의 두께를 제외한 최대 크기(8 mm)로 정하였다. 자석의 길이는 코일 폭(5 mm)보다 크게 하였으며 자석은 자속밀도가 높은 희토류 자석을 사용하였다. 또한, 코일 주변 자장의 집속을 위해서 구리 원판을 자석의 전후방에 배치하였다. 탐촉자의 충진율은 현장에 설치된 열교환기 튜브 내부의 이물질 을 고려하여 약 80%를 적용하여 탐촉자 외경을 정하였다. 탐촉자 케이블은 원격검사에 필요한 길이로서 약 25 m의 RG-174 동축 케이블(C값 : 101 pF/m)을 사용하였다. 자기 포화 보빈코일은 직경이 0.14 mm인 동선와이어를 사용하여 권선수가 약 130인 코일을 제작하여 사용하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 Magnetic saturation EC probe (a) schematic diagram (b) fabricated EC probe

3.3. 보정시험편 설계 제작

교정 및 표준시험편은 터빈 습분분리재열기 튜브와 동일한 사양인 type-439 스테인레스 강 튜브를 사용하여 제작하였다. Type-439 스테인레스 강 튜브의 치수는 외경 19.05 mm, 내경 14.2 mm, 관두께 1.07 mm 이다. 자성체 와전류검사 시스템의 교정을 위한 교정시험편은 Fig. 4에서와 같이 ASME 코드요건에 따른 시험편을 제작하였으며, 교정시험편에 포함된 인공결함은 관통공(TWH: through wall hole), 평저공(FBH: flat bottomed hole), 원주 외경 및 내경 그루브(OD & ID groove)이다. 결함 시험편은 교정시험편과 치수가 다른 관통공, 평저공, 원주 외경 및 내경 그루브를 포함하고 있다. 깊이 측정에 사용된 관통공과 360° 원주 그루브의 깊이는 동일하게 각각 튜브두께의 10%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80%, 100%이다.

4. 실험 방법

4.1. 자속밀도에 따른 잡음대신호비(S/N Ratio) 측정

자성체 튜브 와전류검사에서는 튜브벽이 부분적으로 자화되기 때문에 코일의 임피던스 변화는 우선적으로 탐촉자 충진율(내경변화)과 재질의 투자율변화 두가지 인자의 혼합에 의해서 영향을 받는다. 튜브 내측 표면에 유도된 와전류는 탐촉자 충진율 변화에 민감하지만, 코일 임피던스 변화는 주로 투자율 변화가 주요인으로 영향을 미친다. 특정 자성체 재질의 경우 투자율은 자속밀도가 증가할수록 감소한다. 유도 와전류가 튜브벽을 투과할 수 없기 때문에 체적검사는 튜브벽을 투과하는 영구자석의 정적 자장에 의해서 이루어진다. 특정 재질의 경우 투자율은 자속밀도가 증가할수록 감소하며, 영구자석에 의해 부분적으로 자화되는 어떠한 튜브라도 어떤 일정 크기의 투자율을 갖는다. 튜브 지구구조물 또는 튜브감육이 없는 경우를 제외하고는



Fig. 4 Calibration standard & flaw specimen for magnetic saturation ECT

해당 튜브에서 상대 투자율이 얻어지게 된다.

따라서, type-439 스테인레스 강 튜브 검사에 필요한 최적의 자속밀도를 결정하기 위해서 탐촉자 코일 하부에 위치한 자석의 자속밀도 변화가 와전류신호의 S/N 비에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해서 탐촉자를 구성하는 자석의 수량을 증가시면서 이에 따른 신호 변화를 관찰하여 와전류신호의 S/N 비를 측정하였다. 코일 하부의 위치한 영구자석 봉치를 구성하는 각 자석의 치수는 외경이 8 mm, 두께가 5 mm이며 자속밀도는 약 1.9~2.1 kG/개 이다. 이와 같은 영구자석을 하나씩 증가시키면서 자속밀도 증가에 따른 S/N 비 변화를 관찰하였다. 즉 영구자석 자속밀도가 0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, 2.6, 2.7 kG에서 발생하는 신호의 S/N비 변화를 관찰하였으며, 결함 깊이가 튜브두께의 60%인 평저공 신호진폭을 1 volt, 위상각을 40°로 설정한 상태에서 평저공 진폭과 100% 관통공의 진폭비를 측정하여 평균값으로 S/N 비를 구하였다.

4.2. 위상각 분리도 측정

자석의 자속밀도가 위상각에 미치는 영향을 분석하기 위해서 탐촉자 코일 하부에 설치된 자석 개수를 증가시켜 자속밀도 변화에 따른 위상각 변화를 관찰하였다. 이를 위해서 20, 50, 100 kHz의 3개 시험주파수에서 깊이가 각각 20%, 40%, 60%인 3개 평저공의 위상각을 측정하였으며, 이 세 가지 위상각 중에서 최저 깊이인 20%와 최고 깊이인 60% 평저공 신호의 위상각 차이를 비교하였다. 또한, 주파수 변화에 따른 위상각 변화를 관찰하기 위해서 위상각 차이가 최대로 발생하는 자속밀도에서 깊이가 20%, 40%, 60%인 3개 평저공의 위상각을 측정하였으며 시험주파수는 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600 KHz에서 측정하였다. 최저 깊이인 20%와 최고 깊이인 60% 평저공에서 발생한 위상각 차이를 비교하였다.

4.3. 자속밀도가 신호형상에 미치는 영향

자석 자속밀도가 와전류신호의 "8"자형 로브신호형상에 미치는 영향을 분석하기 위해서 영구자석을 하나씩 증가시키면서 자속밀도 증가에 따른 와전류신호 로브 형상변화를 관찰하였다. 자속밀도 변화

에 따라 탐촉자 코일이 위치한 근처 튜브의 투자율이 변화되어 와전류신호에 영향을 미치기 때문이다. 이를 위해서 영구자석 자속밀도가 각각 0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, 2.6, 2.7 kG에서 발생하는 와전류 로브신호의 변화를 관찰하여 최적 로브형상이 얻어지는 자석의 자속밀도를 확인하였다.

4.4. 깊이측정 정확도

자성체 튜브에 대한 자기포화 와전류탐상검사 기법의 결함 검출 및 깊이 측정 정확도를 분석하기 위해서 관통공, 평저공 등의 인공결함이 포함된 결함시험편을 이용하였다. 시험편에 포함된 결함의 깊이를 측정하여 자기포화 와전류기법의 결함 측정 정확도를 분석하였다. 이를 위해서 먼저 교정시험편에 포함된 관통공과 평저공의 위상각을 이용하여 위상각-대-결함깊이 교정 곡선을 작성한 다음 결함시험편내에 포함된 인공결함의 위상각을 측정하여 각 결함의 깊이를 평가하였다. 평가에 사용된 주파수는 50 kHz를 기본주파수로 사용하였으며 보조주파수로서 100 kHz와 200 kHz를 사용하였다. 기본 주파수에서 각 결함의 위상각을 10회씩 측정, 평균값을 구하여 각 결함에 대한 깊이측정 RMSE를 구하였다.

4.5. 튜브 외부구조물이 와전류신호에 미치는 영향

열교환기 튜브 지지판과 같은 외부구조물이 와전류신호에 미치는 영향을 분석하기 위해서 두께 15 mm, 직경 50 mm의 탄소강 링을 각 결함부위에 위치시켜 이때 발생하는 와전류신호의 변화를 관찰하였다. 비자성체 튜브의 와전류검사에서는 일반적으로 튜브 지지판 부위에 발생할 수 있는 결함을 평가하기 위해서 주파수 혼합기법을 사용하여 구조물신호를 소거한다. 따라서, 이 실험에서는 자성체 튜브에 대한 주파수 혼합기법의 적용성을 평가하기 위해서 3개 시험주파수 10, 50, 100 kHz에서 튜브 지지판 링의 와전류신호의 위상각을 측정하여 주파수 혼합기법의 적용 가능 여부를 평가하였다. 또한, 튜브 지지판 부위에 결함이 위치할 때 결함 특성화의 가능성을 평가하기 위해서 신호변화를 관찰하였으며, 깊이가 다른 결함에 지지판 링을 위치시켜 이때 생성되는 신호를 분석하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1. 자속밀도가 잡음-신호비에 미치는 영향

탐측자 코일을 구성하는 자석의 자속밀도가 와전류 신호의 잡음-대-신호비에 미치는 영향을 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 영구자석의 자속밀도를 증가시킴에 따라 S/N 비는 약 0.18 부근까지 거의 선형적으로 증대되었으나 자속밀도를 단계적으로 0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, 2.6, 2.7 kG로 계속 증가시킬 경우 자속밀도가 2.5 kG 이상에는 S/N 비의 변화가 거의 발생하지 않았다. 따라서, type-439 스테인레스 강 핀튜브 검사에 필요한 와전류탐측자 자석의 적절한 자속밀도는 대략 2.5 kG 근처가 되는 것을 알 수 있다.

5.2. 위상각 분리도

5.2.1. 자속밀도 변화에 따른 위상각 분리도

자속밀도가 와전류 신호 위상각에 미치는 영향을 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 최저 값이인 20%와

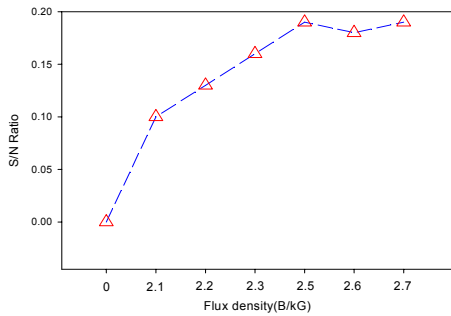


Fig. 5 Plot showing S/N ratio vs flux density

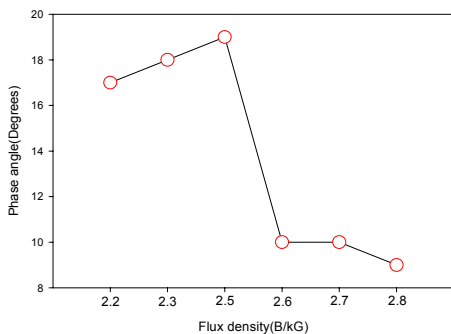


Fig. 6 Plot showing phase angle separation v.s. flux density

최고 값이인 60% 평저공에서 발생한 위상각 차이를 측정하였으며, 그림에서와 같이 자속밀도를 증대시킴에 따라 2.5 kG까지는 위상각 퍼짐이 증대되었으나, 이후부터는 위상각이 감소하였다. 즉 type-439 스테인레스 강 핀튜브 검사에 필요한 자속밀도는 대략 2.5 kG 근처가 되는 것을 알 수 있다.

5.2.2. 주파수 변화에 따른 위상각 분리도

탐측자 코일에 가해지는 주파수변화에 따른 위상각의 퍼짐 정도를 분석하기 위해서 시험주파수를 5, 10, 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600 kHz로 변화시키며 각 주파수에서 깊이가 20%인 평저공과 60%인 평저공의 위상각 퍼짐을 관찰한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 위상각 퍼짐은 50 kHz에서 가장 크게 19°가 발생하였다. 그림에서와 같이 시험주파수 범위가 5~50 kHz까지는 위상각 퍼짐이 점차적으로 증가되었으나 이후 시험주파수 600 kHz까지는 감소하는 경향을 나타내었다.

5.3. 자속밀도가 신호품질에 미치는 영향

자속밀도가 와전류 로브 신호 형상에 미치는 영향을 분석하기 위해서 영구자석 자속밀도를 각각 0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, 2.6, 2.7 kG로 증대시켜 이때 형성되는 신호형상변화를 관찰하였다. 신호는 Fig. 8에 나타낸바와 같이 자속밀도를 증대시킴에 따라 2.5 kG까지는 신호형상 품질이 향상되었으나 이후부터는 신호형상의 변화가 관찰되지 않았으며, 그림에서와 같이 낮은 자속밀도[Fig. 8(b)]에서 로브 신호 형상은 높은 자속밀도[Fig. 8(c)]에서보다 상대적으로 왜곡이 더 발생하였다.

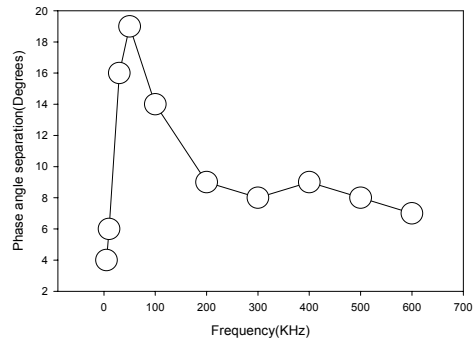


Fig. 7 Plot showing phase angle separation v.s. frequency

5.4. 튜브 외부구조물이 와전류신호에 미치는 영향

튜브지지판 부위에 발생한 결함신호를 평가하기 위해서 3개 시험주파수 10, 50, 100 kHz에서 얻어진 튜브 지지판에 대한 3개 리사주신호의 위상각 차이를 관찰하였다. 각 주파수에서 얻어진 신호의 위상각 차이는 약 1°~2°로서 매우 작아 주파수 혼합에 의한 지지판 신호 소거가 이루어지지 않았다. 이에 따라 튜브 지지판 부위에 위치한 평저공과 마모성 결함의 리사주신호 변화를 관찰하였다. 평저

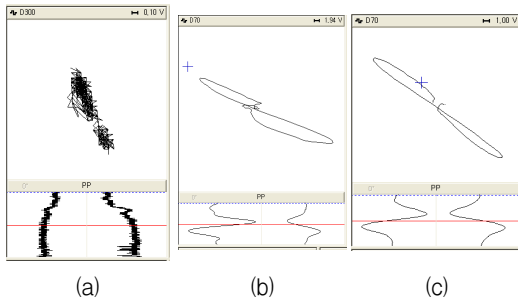


Fig. 8 Lissajous signal of 61% FBH in TP-439 S/S (a) with zero Gauss, (b) with 2.1 kG, (b)with 2.5 kG of flux density

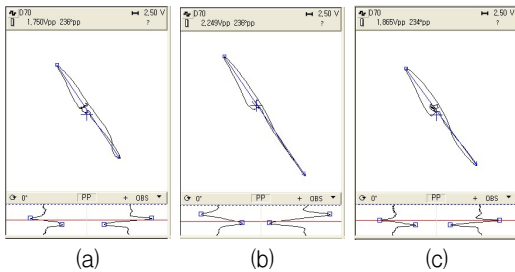


Fig. 9 TSP Lissajous signal affected by FBH flaws (a) no FBH, (b) 60% FBH, (c) 40% FBH

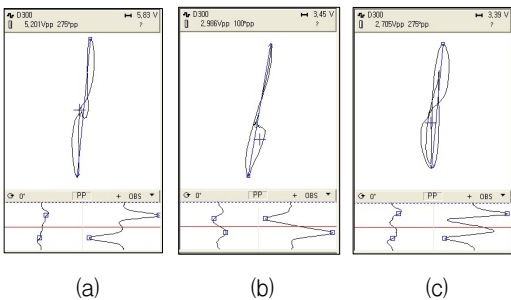


Fig. 10 TSP Lissajous signal affected by wear flaws (a) no tube wear, (b) 60% tube wear on TSP position, (c) 40% tube wear on TSP position

공은 지지판 신호형상 변화에 거의 영향을 미치지 않아 평저공의 검출이 어려웠으나(Fig. 9), 마모성 결함은 지지판 신호형상과 진폭에 변화가 발생하여 식별이 가능하였다(Fig. 10). 특히 리사주 신호형상 변화보다 신호 진폭전압이 보다 크게 변하여 지지판부위에 마모성 결함이 발생한 것을 구분할 수 있었다. 지지판 부위에 위치한 마모성 결함에 의한 진폭 변화를 측정하여 마모 깊이를 추정하기 위해서 깊이가 다른 마모성 결함을 지지판부위에 위치시켜 진폭을 측정된 결과 마모깊이-대-진폭전압의 상관관계가 선형적으로 이루어지지 않아 마모 깊이 추정이 되지 않았다.

5.5. 깊이측정 정확도

자기 포화 와전류검사 기법을 적용하여 type-439 스테인리스강 튜브 결함시험편에 포함된 관통공, 평저공, 마모, 외경 및 내경 그루브 등의 모든 형태의 결함이 검출되었다. 이들 결함형태에 대한 자기포화 와전류검사 신호의 스트립차트 신호를 Fig. 11에 나타내었으며, 각 결함형태에 대한 리사주 신호형상은 비자성체 튜브에 대한 보빈탐촉자 신호형상과 거의 동일하였다. 평저공과 마모성 결함에 대한 크기측정 정확도 측정을 위해서 평저공 결함과 마모 결함이 각각 포함된 두가지 종류 결함 시험편을 사용하였다.

두 가지 형태의 결함에 대한 크기측정을 위해서 평저공 결함은 위상각 분석 기법을 적용하였으며 마모 결함은 진폭 분석기법을 적용하였다. 각 기법의 측정정확도는 각 결함 형태별로 깊이가 다른 7개 결함에 대한 튜브두께 깊이(%)를 10회씩 측정하여 RMS 오차를 구하여 정확도를 비교하였다.

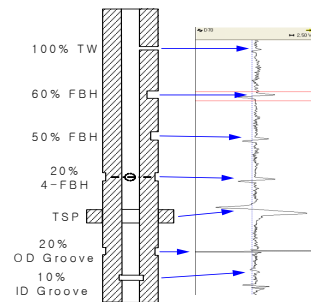


Fig. 11 Strip chart signals from TWH, FBH, TSP, ID & OD grooves when using saturation EC probe

5.5.1. 평저공(FBH) 측정 정확도

균열성 결함의 크기측정을 위해서 평저공(FBH) 결함을 이용하여 위상각-대-% 튜브두께 교정곡선을 작성하였다. 이 교정곡선을 사용하여 깊이가 다른 7개 평저공 결함에 대한 튜브두께 깊이(%)를 10회씩 측정하여 측정 RMS 오차를 구하였으며 그 분석결과를 Fig. 12, 13에 나타내었다. 깊이가 다른 7개 평저공에 대한 포화대전류검사기법의 깊이 측정 평균오차는 RMS 20%로서 깊이가 얇은 결함일 수록 측정오차가 크고 깊이가 깊을수록 측정오차가 감소하는 경향을 나타내었다. 회귀선도에 대한 상관계수는 0.95로서 양호하였다. 또한 관통공 결함의 측정 RMS오차는 21%로서 얇은 결함의 측정오차와 유사한 결과를 나타내었다.

5.5.2. 마모성 결함 측정 정확도

마모성 결함의 크기측정을 위해서 360° 원주방향

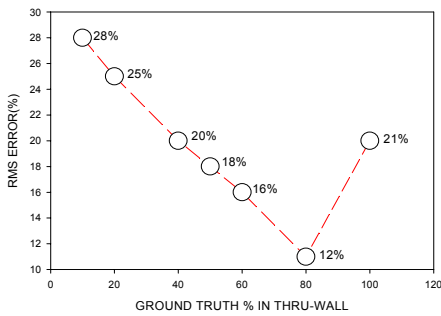


Fig. 12 Plot showing flaw sizing RMS error for FBHs of various depth when using the saturation EC technique

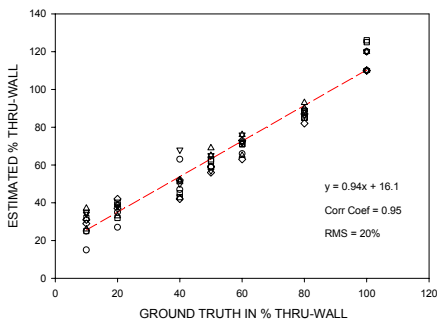


Fig. 13 Regression plot showing flaw sizing capability(RMS error) for FBHs by saturation technique when using the saturation probe and a FBH standard

마모결함을 이용하여 진폭-대-% 튜브두께 교정곡선을 작성하였다. 이 교정곡선을 이용하여 깊이가 다른 7개 마모성 결함에 대한 튜브두께 깊이(%)를 10회씩 측정하여 측정 RMS 오차를 구하였으며 그 분석결과를 Fig. 14에 나타내었다. 깊이가 다른 7개 마모성 결함에 대한 포화대전류검사기법의 깊이 측정 평균오차는 RMS 16%로서 깊이가 얇은 결함일 수록 측정오차가 크고 깊을수록 측정오차가 감소하는 경향을 나타내었다. 회귀선도에 대한 상관계수는 0.96로서 양호함을 나타냈다. 또한 관통공 결함의 측정 RMS오차는 19%로서 얇은 결함의 측정오차와 유사한 결과를 나타내었다.

깊이가 다른 7개 마모성 결함에 대한 크기측정 정확도를 분석한 회귀선도를 Fig. 15에 나타내었다. 모든 마모성 결함이 검출되었으나, 그림에서와 같이 크기측정이 다소 과도하게 측정되는 경향을 나타내었다.

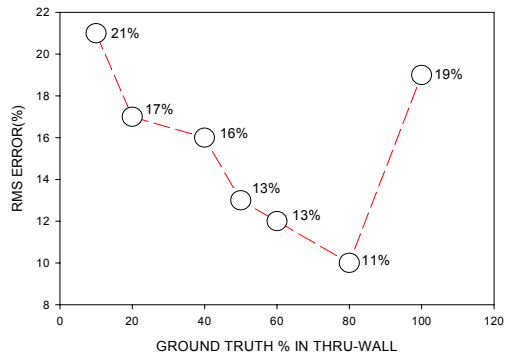


Fig. 14 Plot showing flaw sizing RMS error for FBHs of various depth when using the saturation EC technique

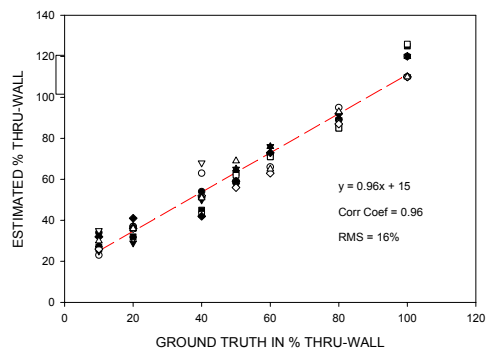


Fig. 15 Regression plot showing flaw sizing capability for wear flaw when using the saturation EC technique

6. 결론

본 연구에서는 자성체 튜브에 발생할 수 있는 결함을 검출하고 크기를 측정할 수 있는 자기포화 와전류탐상검사 기법의 능력과 현장 적용성을 평가하여, 아래와 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 자기포화 와전류탐상검사 기법에 의해 자성체 튜브에 가공된 모든 인공결함(평저공 및 마모)의 검출이 가능하였다.
- 2) 평저공에 대한 크기측정 정확도는 RMSE 20%로서 깊이가 얇은 결함일수록 오차가 크고 깊을수록 오차가 감소하는 경향을 나타낸다.
- 3) 마모에 대한 크기측정 정확도는 RMSE 16%로서 깊이가 얇은 결함일수록 오차가 크고 깊을수록 오차가 감소하는 경향을 나타낸다.
- 4) Type-439 스테인레스 강 핀튜브 검사에 필요한 포화 자속밀도는 약 2.5 kG이며, 이 자속밀도에서 위상각 분리가 최대로 발생한다.
- 5) 주파수변화에 따른 위상각 분리도가 작기 때문에 주파수 혼합에 의한 튜브 지지판 신호 소거가 어렵다. 지지판 부위 튜브에 발생한 마모성

결함에 의해 진폭 변화가 발생하나, 깊이 측정에 필요한 진폭-깊이측정 상관관계가 비선형적으로 형성되어 깊이 추정에 적용이 어렵다.

- 6) 상기와 같은 능력을 가진 자기포화 와전류검사 기법을 현장에 적용할 경우 자성체 열교환기 튜브 건전성평가를 위한 비파괴검사에 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] EPRI, Electromagnetic NDE guide for balance-of-plant heat exchangers, Rev. 2, pp. 3.2-21~4.0-30, (1997)
- [2] V. S. Cecco, Eddy current manual, Vol. 1 Test Method, AECL Chalk River Lab., pp 168-174, (1983)
- [3] The Materials Information Society, "NDE and quality control," ASM Handbook Vol. 17, pp 181~183, (1997)
- [4] 이희중, 남민우, 김용식, 원자력발전소 제어봉 상태진단 기술개발, 최종연구보고서, 전력연구원, (1997)
- [5] Zetec Inc., TC-5800 manual, (2002)