

## 원자력발전소 습분분리재열기 튜브 원격장검사 기술 개발

### Development of Remote Field Testing Technique for Moisture Separator & Reheater Tubes in Nuclear Power Plants

남민우\*<sup>†</sup>, 이희종\*, 김철기\*\*

Minwoo Nam\*<sup>†</sup>, Heejong Lee\* and Cheolgi Kim\*\*

초 록 원자력발전소 열교환기 튜브의 대부분은 구리, 티타늄, 인코넬합금 등의 비자성체로 제작되어 있으나 2차 터빈계통의 습분분리재열기(moisture separator & reheater), 급수가열기 등의 튜브는 고압, 고온 등의 열악한 운전조건에서 상대적으로 고온 강도가 우수한 탄소강 또는 페라이트계열 스테인레스강 등의 자성체로 제작되어 있다. 특히 습분분리재열기 튜브와 같은 열교환 매체가 증기인 경우 열전달 능력을 증가시키기 위해서 핀 튜브를 사용한다. 탄소강 또는 페라이트계열 스테인레스강 등의 자성체 튜브는 고온, 고압에서 강도가 우수하지만 운전 중에 증기 커팅, 침식, 기계적 진동 마모, 응력부식균열 등의 사용중 결함이 발생하여 발전소 정상운전에 지장을 초래할 수 있기 때문에 전열관의 건전성 평가를 위한 주기적인 비파괴검사의 수행이 필요하다. 하지만 자성체 열교환기 튜브는 투자율이 높은 전기적 특성으로 인하여 기존의 와전류검사기술로는 비파괴검사가 어렵기 때문에 원격장검사기술을 적용해야 한다. 따라서 본 연구에서는 원자력발전소 습분분리재열기세관의 현장적용에 필요한 검사기술을 개발하기 위해서 원격장탐촉자, 인공결함 시험편 및 탐촉자 구동장치를 설계하였으며, 이를 활용하여 발전소 현장 검사에 적용하였다.

주요용어: 습분분리재열기, 원격장검사, 원격장탐촉자, 교정표준시험편, 자성체 튜브

**Abstract** The heat exchanger tube in nuclear power plants is mainly fabricated from nonferromagnetic material such as a copper, titanium, and incoel alloy, but the moisture separator & reheater tube in the turbine system is fabricated from ferromagnetic material such as a carbon steel or ferrite stainless steel which has a good mechanical properties in harsh environments of high pressure and temperature. Especially, the moisture separator & reheater tubes, which use steam as a heat transfer media, typically employ a tubing with integral fins to furnish higher heat transfer rates. The ferromagnetic tube typically shows superior properties in high pressure and temperature environments than a nonferromagnetic material, but can make a trouble during the normal operation of power plants because the ferrous tube has service-induced damage forms including a steam cutting, erosion, mechanical wear, stress corrosion cracking, etc. Therefore, nondestructive examination is periodically performed to evaluate the tube integrity. Now, the remote field testing(RFT) technique is one of the solution for examination of ferromagnetic tube because the conventional eddy current technique typically can not be applied to ferromagnetic tube such as a ferrite stainless steel due to the high electrical permeability of ferrous tube. In this study, we have designed RFT probes, calibration standards, artificial flaw specimen, and probe pusher-puller necessary for field application, and have successfully carry out RFT examination of the moisture separator & reheater tube of nuclear power plants.

**Keywords:** Moisture Separator & Reheater, Remote Field Testing, Remote Field Probe, Calibration Standard, Ferromagnetic Tube

## 1. 서론

원자력발전소의 각종 열교환기 튜브재질은 대부분 구리, 알루미늄, 티타늄합금 등의 비자성체 재질로 제작되어 있으나, 운전 조건이 타 계통에 비해 상대적으로 고온 고압인 터빈 습분분리재열기 및, 일부 고압 급수가열기 튜브 재질은 고온 강도를 고려하여 자성체인 탄소강 또는 페라이트계열 스테인레스강으로 제작되어 있다. 특히 터빈 습분분리재열기, 고압 급수가열기 자성체 튜브는 운전 중 응력부식균열, 증기침식, 마모 등의 결함이 발생할 수 있으므로 외국의 경우 발전소 운전 중 튜브 누설을 예방하기 위해서 주기적으로 비파괴검사를 수행하고 있으며, 이와 같은 자성체 튜브는 구리, 알루미늄, 티타늄합금 등의 비자성체 튜브와는 달리 투자율이 높은 전기적 특성으로 인하여 기존의 와전류검사기술을 적용할 수 없기 때문에 특수 기술인 원격장검사 기법(remote field testing)을 적용해야 된다[1,2]. 실험에 사용된 탄소강 편 튜브는 울진 원자력발전소 습분분리재열기 튜브 재질로 사용되고 있는 외경 18.8 mm, 내경 12.5 mm, 두께가 약 1.65 mm, 편 높이가 1.5 mm인 튜브를 대상으로 하였다. 본 연구 목적은 최적 원격장검사 기법 개발에 있으며, 이러한 목적을 달성하기 위해 비파괴검사의 신뢰도에 가장 크게 영향을 미치는 탐촉자를 개발하였고, 신호분석의 정확도 측정에 필수적인 표준시험편 및 실험용 시험편을 개발하였다. 결함의 정확한 위치 파악과 원격장검사 속도는 신호의 품질에 크게 영향을 미치므로 탐촉자의 인출 및 삽입 속도를 일정하게 유지하기 위해 탐촉자 삽입-인출장치를 개발하였다. 개발이 완료된 장비 및 기법을 사용하여 원전 습분분리재열기 세관의 건전성을 평가하기 위해 원격장검사를 수행하였다. 한편 원격장검사를 포함한 모든 비파괴검사를 현장에서 성공적으로 수행하기 위해서는 사전에 적용기술의 유효성이 입증된 비파괴검사기술을 적용해야 한다. 따라서 교정 표준시험편 및 실험용 시험편을 사용하여 검사기술의 정확도를 측정 분석하였다.

## 2. 원격장검사 이론

원격장검사기술은 주로 정유설비를 구성하는 각종 튜브류 검사에 적용되어 왔으나 지난 10 여년

동안 발전설비의 소구경 튜브 비파괴검사에 적용이 확대되었다. 이 기술은 비자성체를 포함한 자성체 튜브 비파괴검사에 효과적으로 적용될 수 있지만 현재 주로 탄소강이나 페라이트계열 스테인레스강 등과 같은 자성체 튜브 비파괴검사에 국한되어 적용되고 있는 실정이며, 튜브 내외부에 존재하는 결함을 일반 와전류검사 기술과 거의 동일한 감도로 검출할 수 있다. 원격장검사기술은 누설자속 또는 자기편향(magnetic biased)에 의한 와전류검사기술과는 다르게 자성체 튜브 건전성평가를 위해 외부편향자장(external biasing field)이 필요하지 않는다. Fig. 1에 원격장검사기술의 자장의 흐름형태를 나타냈다. 이 그림에서 저주파수(일반적으로 약 50~1,000 Hz)의 교류전류에 의해 여자코일에서 발생한 1차 자장은 튜브내부에서 외부로 효과적으로 투과하여 튜브 외부 표면을 따라 흐르게 되며 이 자장은 다시 튜브벽을 통과하여 내부 수신코일에 검출된다. 일반적으로 튜브 내부에 위치한 수신코일은 여자코일로부터 튜브 직경의 약 3~4배정도 떨어져 위치한다[3]. 원격장구역(remote field zone)이라 확인된 이 구역은 튜브 내부 표면에서 1차 자장이 수신코일과 어떠한 직접적인 결합도 발생하지 않도록 여자코일로부터 충분히 거리가 떨어져 있다. 튜브 외부 원격장구역에 발생하는 자장의 세기는 내부자장보다 크게 된다. 튜브 내외부에 존재하는 어떠한 이상상태도 수신코일에 수신되는 신호의 진폭 및 위상에 변화를 주게 되어 결함이 검출되게 된다. 이와 같이 1차 자장은 튜브 벽을 두 번 통과함으로써 원격장검사기술은 체적검사법에 해당된다[4].

## 3. 실험 방법

### 3.1. 실험장치 구성

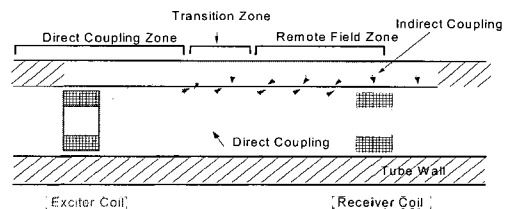


Fig. 1 In a simplified remote field test probe, the energy travels from exciter to detector coil by an indirect external path

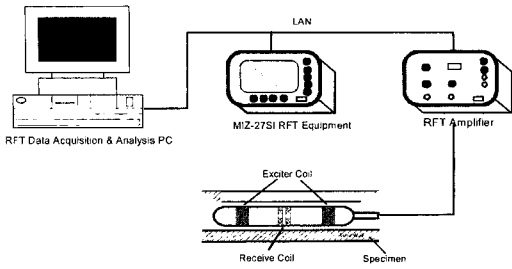


Fig. 2 Schematic diagram of remote field testing system

본 연구에 사용된 원격장 와전류검사 시스템은 Fig. 2에 나타난 미국 Zetec사의 MIZ- 27SI 주파수발생기 및 증폭기가 주 장비로 구성되어 있다. MIZ-27SI 주파수발생기는 운전가능 주파수범위가 50 Hz~10 MHz이고 2개 주파수를 동시에 주입할 수 있으며 최고 검사속도가 7m/초까지 가능한 디지털 장비이다. 또한 와전류신호의 위상과 진폭을 2차원 리사주신호를 포함한 차동·절대형신호와 X/Y방향 스트립차트로 나타낼 수 있다[5,6].

3.2. 원격장탐촉자 설계 제작

탄소강 편 튜브 내에서 원격장 와전류검사 신호 취득을 위한 탐촉자의 주사속도는 약 25 cm/초를 적용하였으며, 탐촉자는 이중 여자코일방식 탐촉자를 설계하여 사용하였다. 이중 여자코일 방식 탐촉자는 Fig. 3, 4에 나타낸바와 같이 두 개의 여자코일과 차동형 형태로 감겨진 한 쌍의 수신코일로 구성되어 있다. 탐촉자 외경은 11.2 mm로서 총진율이 약 80%이며, 차동형 형태로 감겨진 수신코일은 차동 및 절대형 모드로 운전이 가능하다. 여기에서 여자코일은 차동형 형태로 감겨진 수신코일 양쪽 반대쪽에 위치하게 되며, 수신코일은 두 개 여자코일의 정 중앙에 위치한 구조로 되어 있다. 특히 이중 여자코일 방식 탐촉자는 튜브지지판과 튜브 끝단에서 결함 검출능을 개선하도록 이중 구조로 설계되어 있다. 단일 여자(single exciter)방식 원격장 탐촉자는 일반적으로 튜브지지판을 기준으로 전후방 5~8 cm 이내에서 결함검출이 불가능한 사각지대가 존재하게 된다. 이와 같은 사각지대는 여자코일과 수신코일이 튜브지지판을 기준으로 각각 반대편에 위치할 때 발생하게 되며, 이것은 여자코일에서 발생한 대부분의 자장이 수신코일에 수신되기 전에 튜브지지판에 흡수되기 때문이다. 결론적으로

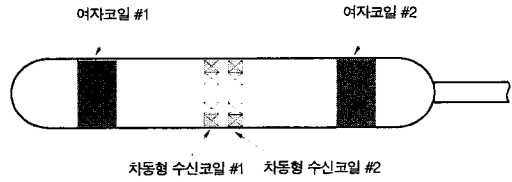


Fig. 3 Schematic diagram of remote field probe with dual exciter

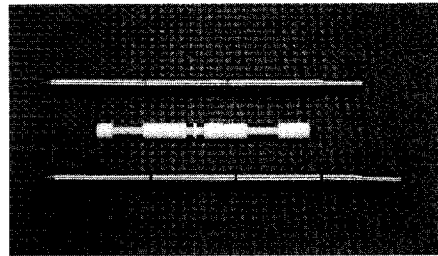


Fig. 4 Remote field probe body with dual exciter

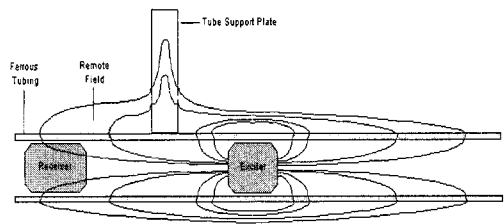


Fig. 5 Effect for the presence of tube support plate on the remote field technique

튜브지지판 부근에 위치한 결함에 대한 원격장신호는 크게 감소하게 된다(Fig. 5 참조). 원격장에 대한 사각지대는 여자코일이 튜브 외부에 위치하여 수신코일이 여자코일의 자장을 수신하지 못하게 될 때에도 발생한다. 이중 여자코일방식 탐촉자의 경우 두 개 여자코일 중에서 하나는 항상 튜브 내에 위치하거나 튜브지지판을 기준으로 할 때 수신코일과 같은 방향에 위치하게 된다. 이에 따라 결함이 검출되지 않는 사각지대가 소거된다. 하지만 이중 여자코일의 두 번째 여자코일은 복잡한 신호를 발생하여 원격장신호 해석을 어렵게 만드는 경향이 있다[1].

3.2.1. 탐촉자 운전주파수

와전류검사서 와전류의 표준 침투깊이는 식 (1)로 표현된다. 자성체 튜브에서 표준 침투깊이는 비자성체 튜브와 다르게 운전주파수 뿐만 아니라

재질의 투자율에 반비례한다. 따라서 자성체 튜브를 자기적으로 포화시키지 않은 상태에서는 기존의 와전류검사가 불가능하다. 탄소강의 전기 및 자기적 특성은 고유저항( $\rho$ )이 약 14~17  $\mu\text{ohm-cm}$ , 상대 투자율( $\mu_r$ )이 약 10~1000범위이다. 이를 적용하여 운전 주파수를 계산하면 시험주파수범위는 약 50 Hz~35 kHz가 된다.

$$\delta = 50 \sqrt{\rho / (f \cdot \mu_r)} \quad (1)$$

- $\delta$  : 표준 침투깊이(mm)
- $\rho$  : 비저항( $\mu\Omega\text{-cm}$ )
- $f$  : 운전 주파수(Hertz)
- $\mu_r$  : 상대투자율

3.3. 시험편 설계 제작

탄소강 편 튜브에 발생하는 결함의 검출 및 크기 측정 실험을 위해 1개 교정표준시험편과 2개의 결함 시험편을 설계·제작하여 활용하였다. 교정표준시험편(Fig. 6)에는 각 깊이를 다르게 하여 튜브두께의 20, 40, 60, 80, 100% 깊이의 5개 평저공과 ID 및 OD groove 20% 각 1개와 튜브지지판을 가공하였다. 또한 결함 크기측정을 위한 2개 결함시험편에는

평저공 및 원주방향 그루브를 각각 가공하였다. 2개 결합시험편 중 첫 번째 시험편에는 교정표준시험편에 가공한 평저공의 깊이와 다르게 5, 15, 25, 30, 50, 70, 90, 100% 깊이의 평저공을 가공하여 결합 평가 신뢰도 측정 및 최소 결합 검출능력에 활용하였으며(Fig. 7 참조), 두 번째 그루브 시험편에는 20, 40, 60, 80% 원주방향 그루브를 가공하였다(Fig. 8 참조). 또한 튜브지지판 부위에 발생하는 마모 신호의 특성을 측정하기 위하여 미모시험편을 가공하였다(Fig. 9 참조).

3.4. 탐촉자 구동장치 설계 제작

현재 발전소 보조설비 열교환기 세관 와전류검사에 사용되는 탐촉자는 주로 에어건을 사용하여 튜브 내부로 고속으로 삽입시킨 후 수작업으로 인출하면서 신호취득을 수행한다. 수작업 인출에 의한 인출속도의 불균일과 에어건을 이용한 삽입작업은 와전류 신호의 품질 감소와 탐촉자의 내구성에 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 와전류 신호 품질의 향상을 위해서 적절한 탐촉자 이송장치가 필요하다. 특히 자성체 열교환기 세관검사에 사용되는 원격장검사 및 자기편향 와전류검사는 탐촉자의 구동

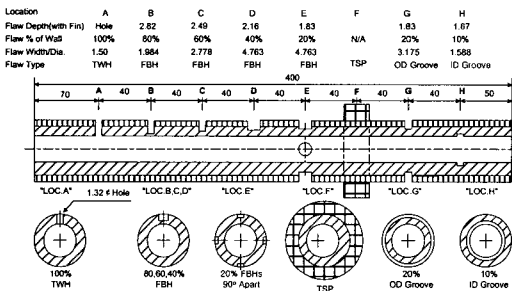


Fig. 6 Drawing of ASME FBH standard

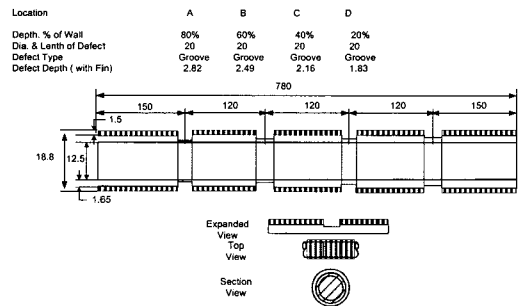


Fig. 8 Drawing of groove specimen

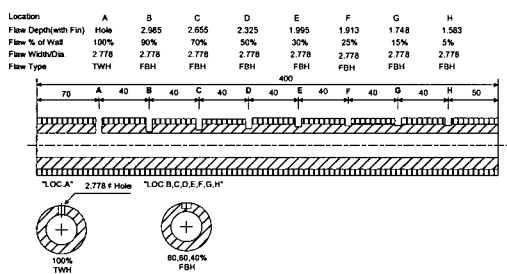


Fig. 7 Drawing of flat bottom hole specimen

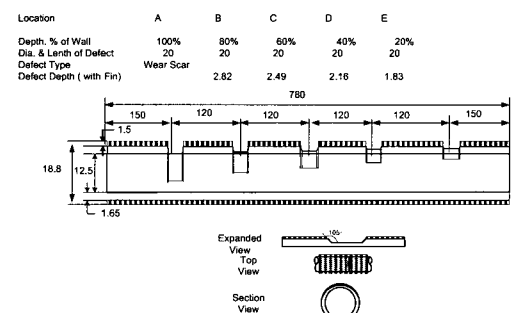


Fig. 9 Drawing of wear specimen

속도가 와전류 신호형성에 크게 영향을 미치므로 적절하고 일정한 속도로 신호를 취득하는 것이 필수적이다. 제작된 탐촉자 이송장치는 원격조작 삼입-인출 기구의 2가지 요소로 구성된다. 각 구성은 2개의 좌, 우 대칭형으로 동시 제어가 가능한 트윈 타입으로 제작하였다. 구동모터는 정격출력 1 kW, 정격토크 32.5 kgf·cm, 순시토크 97.5 kgf·cm의 AC 서보모터를 사용하였으며 0.2 m/sec ~ 3 m/sec로 속도조절이 가능하다. 속도의 설정값과 구동 순시값은 제어판에 표시되며 거리 설정값과 현재 거리값도 표시된다. 탐촉자의 구동제어는 주제어반과 원격 건에 의해 모두 가능하며 거리 센서에 의한 정상모드 구동과 조이스틱을 이용한 조그 운전 모드를 이용하여 탐촉자를 삼입, 인출할 수 있다. 본 이송장치는 최대 24 cm 외경의 탐촉자를 구동할 수 있으며 이송장치와 12 m 떨어진 거리에서 건에 의한 원격 제어가 가능하다. 따라서 이송장치를 일정한 곳에 위치시킨 후 건을 이용한 탐촉자의 이송을 통해 이송장치의 설치가 어려운 협소한 지역의 검사도 가능하다. 구동장치 프레임은 무게를 최소화시키고 적절한 강도를 갖기 위해 알루미늄으로 제작하였으며, 탐촉자를 구동시키는 휠은 강화 고무로 제작되었다. 탐촉자 이송장치의 원격조작 건 및 삼입-인출장치를 Fig. 10과 11에 나타냈다.

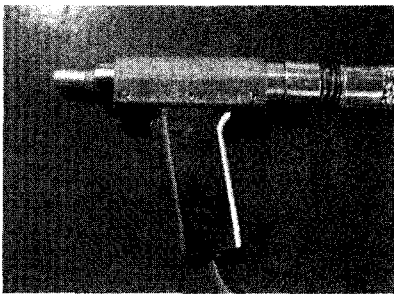


Fig. 10 Remote control air gun

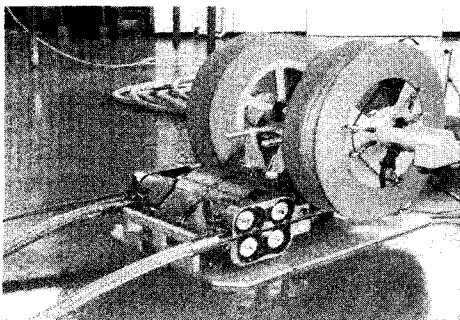


Fig. 11 Probe push-puller

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1. 원격장검사 신호평가 설정

탄소강 운전주파수에서 얻어진 원격장 신호평가를 위해서 Fig. 12에 나타낸바와 같은 위상각-대-결함깊이를 나타내는 교정곡선을 작성하였다. 이 교정곡선에 의해서 결함시편에 가공된 5, 15, 25, 30, 50, 70, 90, 100% 깊이가 평저공과 원주방향 그루브의 깊이를 측정하여 검사신뢰도를 측정하였으며, 탐촉자를 튜브내로 삼입 후 인출시 신호를 취득하였다. 신호평가는 기본주파수에서 100% 관통공 차동신호를 40°로 조정함으로써 튜브 지지판신호가 수평에 근접하도록 하여 결함 신호가 40°~100°범위에서 발생하도록 하였으며, 이때 20% 평저공신호의 위상각은 약 91°로서 관통공과의 위상각차이는 약 51°가 발생하였다. 결함시편에 가공된 깊이가 다른 5개의 ASME 평저공에서 얻어진 신호 위상각은 결함깊이가 증가함에 따라 시계방향으로 증가함으로써 비자성체 튜브 와전류검사시 발생한 신호 특성과 유사하였다. 교정시편에 가공된 100%와 20% 결함 신호에 대한 setup 결과를 Fig. 13과 14에 나타내었다.

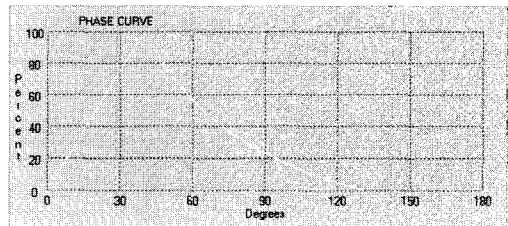


Fig. 12 Calibration curve with using calibration standard signal

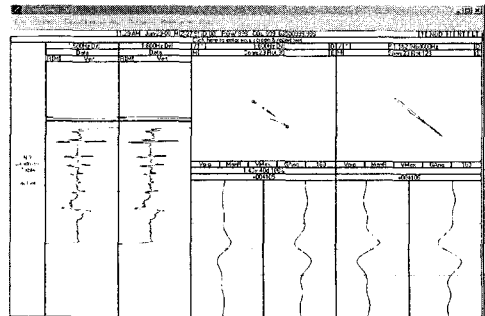


Fig. 13 100% flaw signal of calibration standard

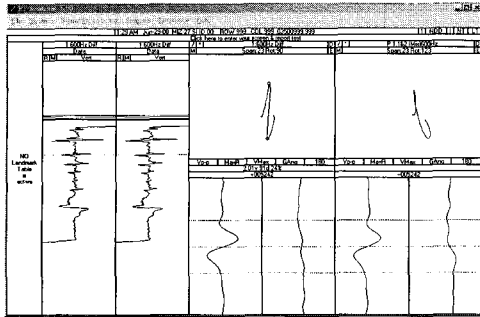


Fig. 14 20% flaw signal of calibration standard

4.2. 결함 크기측정 결과

결함시편에 가공된 균열성 평저공과 및 원주방향 그루브 형태의 인공결함을 이용하여 원격장 검사기술의 자성체 튜브 검사정확도를 평가하였다. 검출 가능한 관통공의 최소직경을 측정하기 위해서 직경 0.8, 1.5, 2.5 mm인 관통공의 신호를 취득한 결과 0.8mm 관통공은 평가가 가능할 정도의 신호가 검출되지 않고 1.5, 2.5 mm의 2개 관통공 신호만 검출되었다. 따라서 본 시험편에 가공된 3개 관통공 중 검출이 가능한 최소 관통공 직경은 1.5가 되는 것을 알수 있었다. 결함 크기측정 정확도평가를 위해서 각 결함별로 총 5회씩 신호를 취득하여 이를 통계 처리하였으며, 이 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 평저공과 그루브 결함에 대한 측정 오차는 Fig. 15에 나타낸 바와 같이 각각 15.2%, 5.5%로서 그루브 결함 측정오차가 평저공보다 작게 발생하였다. 또한 두 종류 결함에 대한 평균오차는 약 13%로서 비자성체 튜브검사에 적용되는 기존 와전류검사기술의 정확도보다는 다소 오차가 크게 발생하였다. 튜브지지판의 신호는 100% 결함을 40°로 조절할 때 위상이 결함과 반대로 형성되어 결함과 명확하게 구분된다. 마모시험편의 마모위치에 튜브지지판을 설치하여 신호측정을 수행한 결과, 마모결함이 작게 발생한 신호는 정확한 정량화가 불가능함을 알 수 있었고 단지 마모결함이 60% 이상 발생한 신호는 결함 신호가 튜브지지판 신호를 지배하여 결함의 검출과 크기 측정이 가능함을 알 수 있었다. 또한 표준시험편의 내부 및 외부 그루브 신호 평가는 두께감육에 대해 같은 위상으로 나타나는 점이 일반 와전류검사와 다르다. 따라서 내경 결함과 외경 결함의 명확한 구분을 위해서 파이버스코프와 같은 원격 육안검사 장비를 튜브 내부에 삽입

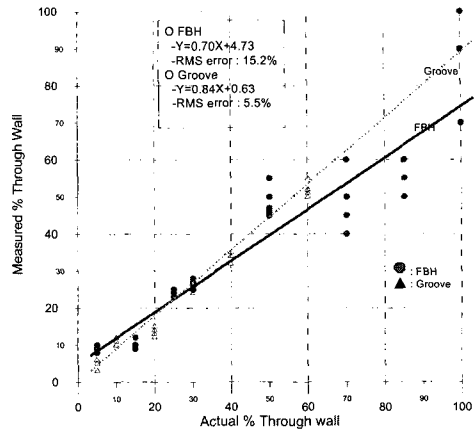


Fig. 15 Flaw sizing result for 1.65 mm wall thickness finned carbon steel tube

하여 결함이 발견되면 내경결함이고 결함이 발견되지 않으면 외경결함으로 판단해야 한다. 이는 원격장검사의 단점으로서 현장 적용성 증대를 위해서 향후 해결해야할 문제이다. 또한 균열성 결함과 마모성 결함의 구분은 시험주파수가 낮아 위상각차이가 적게 발생하여 위상각에 의한 판별이 어렵고, 단지 신호 진폭 크기로 결함 유형의 구분이 가능하였다. 즉 균열성결함의 진폭은 마모성 결함에 비해 상대적으로 작게 발생하였다. 절대형과 차동형 신호의 차이는 발생하지 않았다.

5. 결론

본 연구에서는 원자력발전소 습분분리재열기 세관(탄소강 핀 튜브)에 발생할 수 있는 증기 커팅, 침식, 기계적 진동 마모 등의 결함을 검사하기 위한 원격장검사 기술을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다. 개발된 원격장기법으로 검출이 가능한 핀홀성 관통공의 최소 직경은 시험에 사용된 3개 관통공중에서 1.5 mm 이며, 평저공과 그루브 결함에 대한 측정 오차는 각각 15.2%, 5.5%로서 결함의 체적이 큰 그루브에 대한 정확도가 더 우수하였다. 100% 결함과 20% 결함과의 위상각 차이는 51°로서 ASME 코드요건(50~120°위상각 차이)을 만족하였으며, 외경 그루브와 내경 그루브는 동일한 위상을 나타내었다. 튜브지지판의 신호는 결함 신호와 위상이 반대로 형성되어 결함과 구분이 가능하였다. 튜브지지판과의 진동에 의한 마모결함의 적어도 60% 이상 결함이 발생해야 검출 및 크기측

정이 가능하였다. 본 검사기술은 원전 습분분리재 열기의 총 540여개 튜브에 대한 검사를 수행한 결과 5개 튜브에서 감속결함이 발견되었다. 이 결함은 차기 계획예방정비시 재검사를 수행하여 추이를 감시할 예정이다.

#### 참고문헌

- [1] Electromagnetic NDE Guide for Balance-of-Plant Heat Exchanger, Revision 2 (EPRI TR 101772 R2s)
- [2] ASNT, Nondestructive Testing Handbook (Electromagnetic Testing), Vol. 4, pp. 56~88, (1986)
- [3] David L. Atherton, Wojtek M. Czura and David D. Mackintosh, "Remote field eddy current defect interactions: effects on the external field," Material Evaluation, Vol. 52, No. 11, pp. 1288~1291, (1994)
- [4] David D. Mackintosh, David L. Atherton, Thomas R. Schmit, and David E. Russel, "Remote field eddy current for examination of ferromagnetic tubes," Material Evaluation, Vol. 54, No. 6, pp. 652-657, (1996)
- [5] MIZ-27SI Eddy Current Test Instrument(미국 Zetec 사)
- [6] ET Analysis for Windows User Guide(미국 Zetec 사)