한국압력기기공학회 논문집
제4권 제2호 2008년 9월 pp. 50－56

터빈 습분분리재열기 Type-439 스테인리스강 튜브 와전류검사

이희종† · 조찬희* · 정지홍* · 문균영**

Eddy Current Testing of Type-439 S/S Tube of MSR in Turbine System

Heejong Lee†, Chanhee Cho*, Jeehong Jung* and Gyoonyoung Moon**

ABSTRACT

The tubes in heat exchanger are typically made of 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 be found in low-pressure(LP) feedwater heaters and moisture separator reheaters(MSRs) in turbine system. LP feedwater heaters generally utilize thin wall Type-439 stainless steel tubing, whereas MSRs typically employ a heavier wall tubing with integral fins. Service-induced damage can occur on the O.D(outside diameter) surface of Type-439 ferritic stainless steel tubing which is employed for MSRs 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.

Key Words : Eddy Current Testing(와전류검사), Magnetic saturation(자기 포화), Permeability(투자율), Ferromagnetic(자성)

1. 서 론

발전소 터빈계통을 구성하는 열교환기 튜브는 일반적으로 구리합금, 스테인리스강, 탄소강, 티타니움합금 등의 재질로 제작된다. 이들 재질 중에서 페라이트계 Type-439 스테인리스강은 자성 재질로서 오스테나이트계 보다 더 높은 열전달율 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 저압급수가열기와 습분분리재열기에 사용된다. 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 발생되는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 Type-439 페라이트계 스테인리스강 핀튜브에 발생할 수 있는 결함을 검출하고 크기를 측정할 수 있는 자기포화 와전류탐상검사 기법의 능력을 평가하였다[1].

† 책임저자, 회원, 한국전력공사 전력연구원 비파괴평가센터
E-mail : hjlee@kepri.re.kr
TEL : (042)865-5671 FAX : (042)865-5699
* 한국전력공사 전력연구원 비파괴평가센터
** 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

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 튜브 검사를 위한 자기포화 와전류탐상검사 기법은 코일 근처의 튜브를 자기적으로 포화시킨다. 만약 튜브를 98%이상으로 포화시키게 되면 비자성체 튜브에서 얻어지는 결함 및 다른 이상신호가 얻어진다. 그러나 실제적으로 모든 자성체튜브를 완전하게 포화시킬 수 없으나, 자성 튜브를 효과적으로 포화시킬 때 평가가 가능한 와전류신호가 얻어지게 된다. 자성 재질 내에서 와전류침투깊이에 영향을 미치는 중요한 요소는 재질의 투자율이다. 일반적으로 투자율변화에 의해서 발생하는 코일의 어떠한 임피던스변화일지라도 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. 자성 재질의 투자율은 와전류 침투깊이를 크게 제한시킨다. 즉 와전류 침투깊이는 투자율에 반비례하며 투자율이 증가할수록 침투깊이는 감소하고 반대로 투자율이 감소하면 침투깊이는 증대된다[1,2].

3. 실험 방법

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. 1과 같은 자기포화 와전류탐상검사 시스템을 구성하였다. 자기포화 와전류탐상검사 시스템을 구성하는 와전류 주파수 발생 및 취득을 위한 장치로서 R&D Tech.사 TC-5800장비와 신호분석을 위한 프로그램은 EddyView를 사용하였다. EddyView 프로그램이 설치된 컴퓨터에서 신호를 취득하여 분석하였다. 또한, 자석의 자화력 측정에는 F.W.Bell사의 Model-6010 Gaussmeter를 사용하였다.

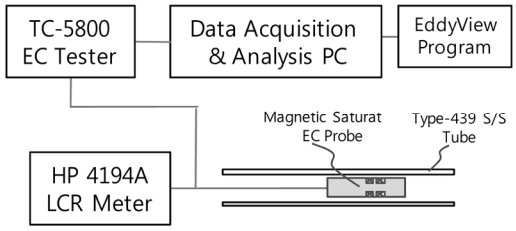


Fig. 1 Experimental setup for magnetic saturation eddy current testing

3.2 탐촉자 운전주파수

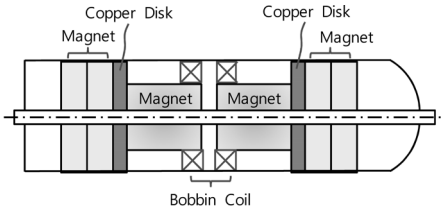
와전류검사에서 와전류의 표준 침투깊이는 식(1)로 표현된다. 자성체 튜브에서 표준 침투깊이는 비자성체 튜브와 다르게 운전주파수 뿐만 아니라 재질의 투자율에 반비례한다. 따라서 자성체 튜브를 자기적으로 포화시키지 않은 상태에서는 기존의 와전류검사가 불가능하다. Type-439 스테인리스강의 전기 및 자기적 특성은 고유저항(ρ)이 63 μΩ-cm, 상대 투자율(μ_r)이 1~700이다. Type-439 스테인리스강의 자기포화 시험주파수는 튜브의 포화정도 즉 상대투자율에 따라서 160 kHz~ 300 kHz 범위가 된다[2].

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

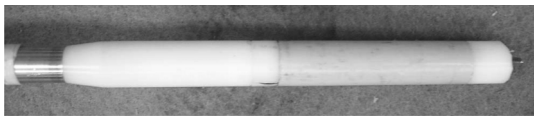
δ : 표준 침투깊이(mm)
ρ : 비저항(μΩ-cm) (1)
f : 운전 주파수(Hz)
μ_r : 상대투자율

3.3 탐촉자 설계

탐촉자의 코일이 위치하는 튜브 벽을 효율적으로 자화시키기 위해서 영구자석을 Fig. 2에서와 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 이물질을 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 보빈



(a)



(b)

Fig. 2 Magnetic saturation EC probe (a) schematic diagram (b) fabricated EC probe

코일은 직**경**이 0.14 mm인 동선와이어를 사용하여 권선수가 약 130인 코일을 제작하여 사용하였다.

3.4 보정시험**편** 설계 제작

교정 및 표준시험**편**은 터빈 습분분리재열기 튜브와 동일한 사양인 Type-439 스테인레스 강 튜브를 사용하여 제작하였다. Type-439 스테인레스 강 튜브의 치수는 외**경** 19.05 mm, 내**경** 14.2 mm, 관두께 1.07 mm 이다. 자성체 와전류검사 시스템의 교정을 위한 교정시험**편**은 ASME 코드요건에 따른 시험**편**을 제작하였으며, 교정시험**편**에 포함된 인공결함은 관통공(TWH: through wall hole), 평저공(FBH: flat bottomed hole), 원주 외**경** 및 내**경** 그루브(OD & ID groove)이다. 결함시험**편**은 교정시험**편**과 치수가 다른 관통공, 평저공, 원주 외**경** 및 내**경** 그루브를 포함하고 있다. 깊이 측정에 사용된 관통공과 360° 원주 그루브의 깊이는 동일하게 각각 튜브두께의 10%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80%, 100%이다.

4. 실험 및 고**찰**

4.1 자속밀도가 **잡음**-신호비에 미치는 영향

Type-439 스테인레스 강 튜브 검사에 필요한 최적의 자속밀도를 결정하기 위해**서** 탐촉자 코일 하부에 위치한 자석의 자속밀도 변화가 와전류신호의 S/N 비에 미치는 영향을 분석하였다. 탐촉자 코일을 구성하는 자석의 자속밀도가 와전류신호의

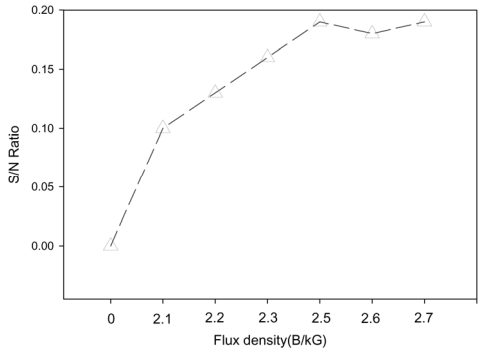


Fig. 3 Plot showing S/N ratio with respect to flux density

잡음-대-신호비에 미치는 영향을 측정한 결과를 Fig. 3에 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 **경**우 자속밀도가 2.5 kG 이상에는 S/N 비의 변화가 거의 발생하지 않았다. 따라**서**, Type-439 스테인레스 강 핀튜브 검사에 필요한 와전류탐촉자 자석의 적절한 자속밀도는 대략 2.5 kG 근처가 되는 것을 알 수 있다.

4.2 위상각 분리도

4.2.1 자속밀도 변화에 따른 위상각 분리도

자속밀도가 와전류신호 위상각에 미치는 영향을 분석하여 Fig. 4에 나타내었다. 최저 깊이인 20%와 최고 깊이인 60% 평저공에**서** 발생한 위상각 차이를 측정하였으며, 그림에**서**와 같이 자속밀도를

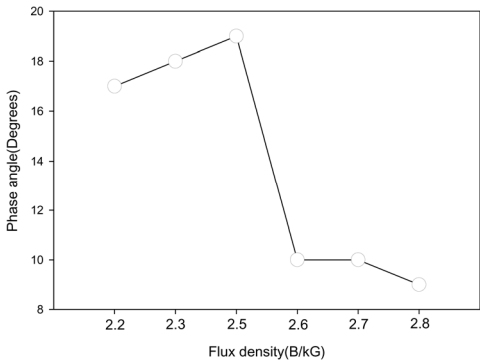


Fig. 4 Plot showing phase angle separation with respect to flux density

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.

4.2.2 주파수변화에 따른 위상각 분리도

탐촉자 코일에 가해지는 주파수변화에 따른 위상각의 퍼짐 정도를 분석하기 위해**서** 시험주파수를 5, 10, 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600 kHz로 변화시키며 각 주파수에**서** 깊이가 20%인 평저공과 60%인 평저공의 위상각 퍼짐을 관**찰**한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 위상각 퍼짐은 50 kHz에**서** 가장 크게 19°가 발생하였다. 그림에**서**와 같이 시험주파수 범위가 5~50 kHz까지는 위상각 퍼짐이 점차적으로 증가되었으나 이후 시험주파수 600 kHz까지는 감소하는 **경**향을 나타내었다.

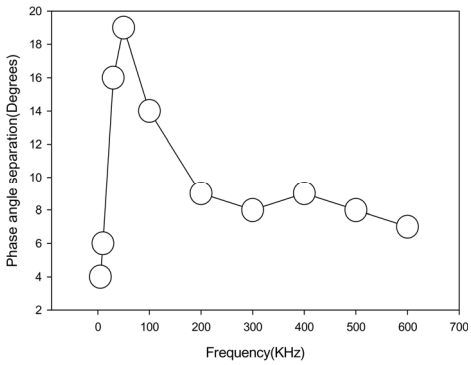
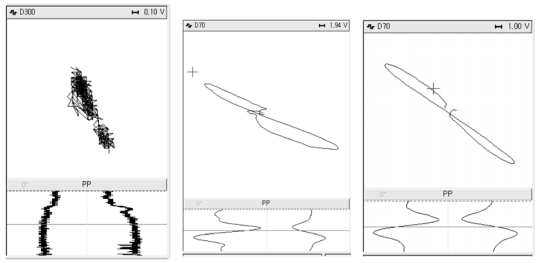


Fig. 5 Plot showing phase angle separation with respect to frequency

4.3 자속밀도가 신호**품**질에 미치는 영향

자속밀도가 와전류 로브신호 형상에 미치는 영향을 분석하기 위해**서** 영구자석 자속밀도를 각각 0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, 2.6, 2.7 kG로 증대시켜 이때 형성되는 신호형상변화를 관**찰**하였다. 신호는 Fig. 6에 나타낸바와 같이 자속밀도를 증대시킴에 따라 2.5 kG까지는 신호형상 **품**질이 향상되었으나 이후부터는 신호형상의 변화가 관**찰**되지 않았으며, 그림에**서**와 같이 낮은 자속밀도[Fig. 6(b)]에**서** 로브신호 형상은 높은 자속밀도[Fig. 6(c)]에**서**보다 상대적으로 왜곡이 더 발생하였다.

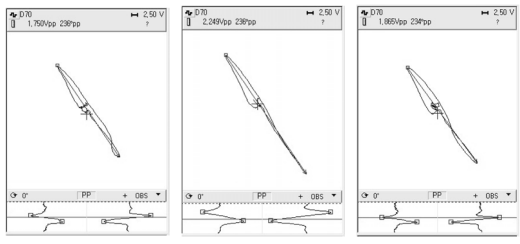


(a) (b) (c)

Fig. 6 Lissajous signal of 61% FBH in TP-439 S/S (a) with zero Gauss, (b) with 2.1 kG, (c) with 2.5 kG of flux density

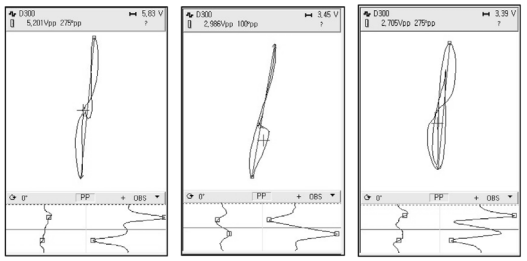
4.4 튜브 외부구**조**물이 와전류신호에 미치는 영향

튜브지지판 부위에 발생한 결함신호를 평가하기 위해**서** 3개 시험주파수 10, 50, 100 kHz에**서** 얻어진 튜브 지지판에 대한 3개 리사주신호의 위상각 차이를 관**찰**하였다. 각 주파수에**서** 얻어진 신호의 위상각 차이는 약 1° ~ 2°로**서** 매우 작아 주파수 혼합에 의한 지지판 신호 소거가 이루어지지 않았다. 이에 따라 튜브 지지판 부위에 위치한 평저공과 마모성 결함의 리사주신호 변화를 관**찰**하였다. 평저공은 지지판 신호형상 변화에 거의 영향을 미치지 않아 평저공의 검출이 어려웠으나(Fig. 7), 마모성 결함은 지지판 신호형상과 진폭에 변화가 발생하여 식별이 가능하였다(Fig. 8). 특히 리사주 신호형상 변화보다 신호 진폭전압이 보다 크게 변하여 지지판부위에 마모성 결함이 발생한 것을 구분할수 있었다. 지지판 부위에 위치한 마모성 결함에 의한진폭 변화를 측정하여 마모 깊이를 추정하기 위해**서** 깊이가 다른 마모성 결함을 지지



(a) (b) (c)

Fig. 7 TSP Lissajous signal affected by FBH flaws (a) no FBH, (b) 60% FBH, (c) 40% FBH



(a) (b) (c)

Fig. 8 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

판부위에 위치시켜 진폭을 측정한 결과 마모깊이-대-진폭전압의 상관관계가 선형적으로 이루어지지 않아 마모 깊이 추정이 되지 않았다.

4.5 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. 9에 나타내었으며, 각 결함형태에 대한 리샤주 신호형상은 비자성체 튜브에 대한 보빈탐촉자 신호형상과 거의 동일하였다. 평저공과 마모성 결함에 대한 크기측정 정확도 측정을 위해서 평저공 결함과 마모 결함이 각각 포함된 두가지 종류 결함시험편을 사용하였다.

두 가지 형태의 결함에 대한 크기측정을 위해서

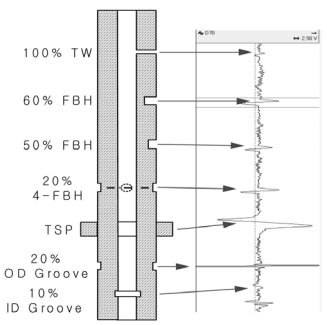


Fig. 9 Strip chart signals from TWH, FBH, TSP, ID & OD grooves when using saturation EC probe

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.

4.5.1 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. 10, 11에 나타내었다. 깊이가 다른 7개 평저공에 대한 포화와전류검사기법의 깊이 측정 평균오차는 RMS 20%로서 깊이가 얕은 결

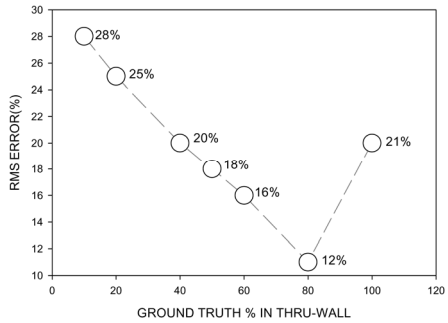


Fig. 10 Plot showing flaw sizing RMS error for FBHs of various depth when using saturation EC technique

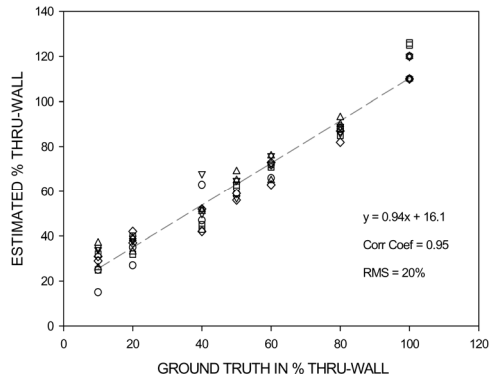


Fig. 11 Regression plot showing flaw sizing capability(RMS error) for FBHs by saturation technique when using saturation probe and a FBH standard.

함일수록 측정오차가 크고 깊이가 깊을수록 측정오차가 감소하는 **경**향을 나타내었다. 회귀선도에 대한 상관계수는 0.95로**서** 양호하였다. 또한 관통공 결함의 측정 RMS오차는 21%로**서** 얕은 결함의 측정오차와 유사한 결과를 나타내었다.

4.5.2 마모성 결함 측정 정**확**도

마모성 결함의 크기측정을 위해**서** 360° 원주**방**향 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. 12에 나타내었다. 깊이가 다른 7개 마모성 결함에 대한 포화와전류검사기법의 깊이측정 평균오차는 RMS 16%로**서** 깊이가 얕

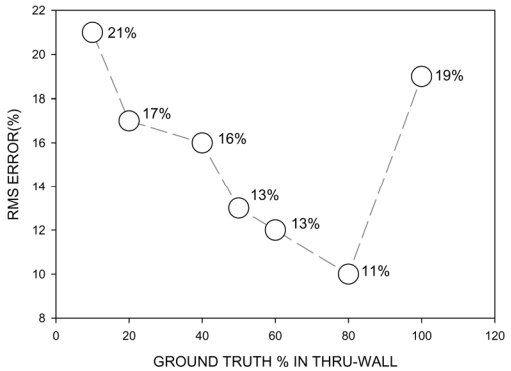


Fig. 12 Plot showing flaw sizing RMS error for FBHs of various depth when using saturation EC technique

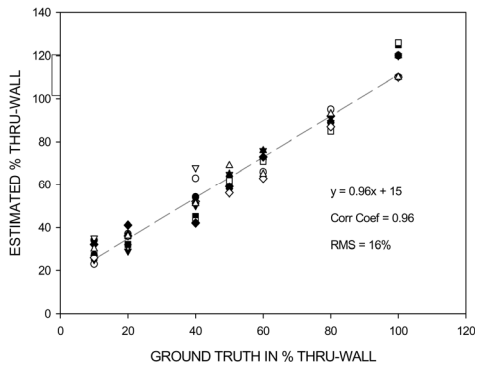


Fig. 13 Regression plot showing flaw sizing capability for wear flaw when using saturation EC technique

은 결함일수록 측정오차가 크고 깊을수록 측정오차가 감소하는 **경**향을 나타내었다. 회귀선도에 대한 상관계수는 0.96로**서** 양호함을 나타냈다. 또한 관통공 결함의 측정 RMS오차는 19%로**서** 얕은 결함의 측정오차와 유사한 결과를 나타내었다.

깊이가 다른 7개 마모성 결함에 대한 크기측정 정**확**도를 분석한 회귀선도를 Fig. 13에 나타내었다. 모든 마모성 결함이 검출되었으나, 그림에**서**와 같이 크기측정이 다소 과도하게 측정되는 **경**향을 나타내었다.

5. 결 **론**

본 연구에**서**는 자성체 튜브에 발생할 수 있는 결함을 검출하고 크기를 측정할 수 있는 자기포화 와전류탐상검사 기법의 능력을 평가하였으며 그 결과는 아래와 같다.

1) 자기포화 와전류탐상검사 기법에 의해 자성체 튜브에 가공된 모든 인공결함(평저공 및 마모)의 검출이 가능하였다.

2) 평저공에 대한 크기측정 정**확**도는 RMSE 20%로**서** 깊이가 얕은 결함일수록 오차가 크고 깊을수록 오차가 감소하는 **경**향을 나타낸다.

3) 마모에 대한 크기측정 정**확**도는 RMSE 16%로**서** 깊이가 얕은 결함일수록 오차가 크고 깊을수록 오차가 감소하는 **경**향을 나타낸다.

4) Type-439 스테인리스 강 핀튜브 검사에 필요한 포화 자속밀도는 약 2.5 kG이며, 이 자속밀도에**서** 위상각 분리가 최대로 발생한다.

5) 주파수변화에 다른 위상각 분리도가 작기 때문에 주파수 혼합에 의한 튜브지지판 신호 소거가 어렵다. 지지판 부위 튜브에 발생한 마모성 결함에 의해 진폭 변화가 발생하나, 깊이 측정에 필요한 진폭-대-깊이측정 상관관계가 비선형적으로 형성되어 깊이 추정에 적용이 어렵다.

6) 상기와 같은 능력을 가진 자기포화 와전류검사 기법을 현장에 적용할 **경**우 자성 튜브의 건전성평가를 위한 비파괴검사에 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

참고문**헌**

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. H.J. Lee, M.W. Nam, Y.S. Kim "Development of Diagnostic Technology for Rod Cluster Control Assembly" KEPRI, 1997
5. Zetec Inc., "TC-5800 manual", (2002)