

## STS 316L 교정시험편을 이용한 재가열기 튜브의 와전류신호와 초음파 IRIS 신호 특성

### Eddy Current and Ultrasonic IRIS Signal Characteristics of Reboiler Tube by Using STS 316L Calibration Specimen

탁경주\*, 김병일\*\*, 국진선\*\*\*†

Kyeong-Joo Tak\*, Byung-Il Kim\*\* and Jin-Seon Gook\*\*\*†

**초 록** 본 연구에서는 가공된 오스테나이트계 STS 316L ASME 표준 교정시험편을 이용하여 튜브 두께 감소율과 잔존두께에 대한 와전류 신호와 IRIS 신호특성을 비교하여 리보일러 튜브의 현장 적용성을 평가하였다. 그 결과 두께감소율의 경우 와전류탐상검사는 20%×4 평저공, 10% 외면 그루브, IRIS는 80%홈, 10%외면 그루브에서 ±15% 이상의 편차가 발생하였다. 잔존두께의 경우 와전류탐상은 측정치가 모두 허용범위를 만족하였으나, IRIS는 80% 인공홈에서 ±15% 이상의 편차가 발생하였다. 따라서 와전류탐상검사 후 의사지시에 대한 해석, 두께감소율 측정을 위해 IRIS를 수행한다면 신뢰성이 향상될 것으로 판단된다.

**주요용어:** STS 316L, 와전류탐상, 리보일러, IRIS

**Abstract** In this study, a field applicability of reboiler tube was evaluated by comparing ECT signal with IRIS signal about wall loss rate and remaining wall thickness using worked austenite STS 316L ASME standard calibration tube. In the case of wall-loss rate, as a result, tolerance about 20%×4 flat bottom hole and 10% O · D groove(ECT), 80% defect and 10% O · D groove(IRIS) occurred up to ±15%. In the case of remaining wall thickness, ECT was satisfied with the both tolerance, but tolerance about 80% defect occurred up to ±15% in IRIS. Therefore, if the IRIS is performed for interpretation of non-relevant indication and measurement of wall-loss rate after ECT, reliability is supposed to be improved.

**Keywords:** STS 316L, Eddy Current Testing, Reboiler, IRIS

#### 1. 서 론

1960년대 초 정부의 경제개발 계획에 의한 중화학공업 육성 정책에 따라 석유화학공장 건설을 비롯한 발전소 건설 그리고 1970년대 조선공업, 방위산업 및 원자력발전소 건설 등 우리나라 공업은 급속도로 성장하여 왔다. 이들 중 산업규모가 확대된 1970년대에 건설된 석유화학 플랜트들은 고온, 고압 및 고 능률화를 지향하여 그 규모

가 대형화되어 왔다.

석유화학플랜트에서 운용되는 반응로, 저장탱크, 열교환기, 배관 등의 시설물은 장기간 사용함에 따라 고온, 고압, 부식성 분위기, 열응력, 피로 등 여러 가지 요인으로 경년열화 되어 노후화 된다. 따라서 이들 시설물에 대한 신뢰성 및 안전성 확보가 매우 중요하며, 관련 장치에 대한 비파괴검사 및 평가기술이 중요시 되고 있다[1,2].

석유화학 플랜트에서 사용중인 장치, 배관, 설

[접수일: 2011. 8. 16, 수정일: 2011. 9. 27, 게재확정일: 2011. 12. 8] \*한국폴리텍V대학 비파괴검사과, \*\*순천대학교 재료·금속공학과, \*\*한려대학교 방사선학과, †Corresponding Author: Department of Radiology, Hanlyo University, Gwangyang, 545-704, Korea (E-mail: jskook@hanmail.net)

비 등의 건전성 평가를 위해 방사선투과검사와 초음파탐상검사가 주로 사용되고 있다. 특히 석유화학공업에서 가열기, 예열기, 과열기, 증발기, 리보일러, 냉각기, 응축기 등 다양한 열교환기 튜브의 검사에 와전류탐상검사가 효과적으로 이용되고 있다. 여기서 리보일러(reboiler)는 응축한 액체를 재차 가열하여 증발시킬 목적으로 사용된다.

석유화학플랜트와 각종 발전 플랜트에서는 구조상 원통다관형(shell & tube type) 열교환기가 가장 많이 사용되고 있다. 원통다관형 열교환기의 전열관은 열전달 효율을 높이기 위해 재료가 허용하는 범위 내에서 가급적 얇게 하므로 구조적으로 손상에 취약하게 되어 있다. 따라서 열교환기용 튜브로 사용되는 재료는 열전달 효율과 더불어 부식, 침식, 마모, 균열 등과 같은 외적인 손상요인에 대하여 고온에서 저항성을 갖는 재질을 선택하며, STS 304L, STS 316L과 같은 오스테나이트계 스테인리스강은 내식성이 뛰어나기 때문에 열교환기용 튜브 재료로 많이 이용되고 있다[3]. 특히, STS 316L은 2%의 Mo이 첨가되어 있어 염수에 강한 특성을 갖고 있다. STS 316L 재질의 화학성분은 Table 1과 같다[4].

시임리스(seamless) 스테인리스강 튜브는 원형 봉강의 내부를 보링(boring)한 원 소재를 냉간 압연이나 냉간 인발 가공을 하여 원하는 치수로 만들어지게 된다. 이러한 가공 공정은 여러 단계에 걸쳐 반복적으로 이루어지며 중간에 산세척, 탈지, 교정, 열처리 등의 열적가공을 받았을 때 표면에 형성되는 여러 가지 산화물 층이 형성된다. 즉, 스케일을 제거하기 위하여 수행되는 산세척이 완전하게 이루어지지 않은 상태에서 냉간가공을 하게 되면 산화 스케일이나 이물질이 제품 표면에 압착되어 잔류하게 된다. 이와 같이 제조과정에서 발생되는 결함이나 국부적인 치수변화가 와전류 신호를 발생시킨다. 또한 고온 부식 환경에서 침식이나 마모 등에 의한 감육성 결함이 발생된다.

와전류탐상은 열교환기, 복수기, 증기발생기 등의 전열관 검사에 활용되고 있으나 결함에 의한 신호와 의사신호를 구분하는 것이 쉽지 않을 뿐

만 아니라 검사자의 지식기반과 경험에 따라 시험결과가 크게 달라진다. 결국 신뢰성 있는 결과를 얻어내기 위해서는 와전류 신호의 정량화된 평가 시스템을 도입하거나 주파수 변화에 따른 와전류 신호의 위상과 진폭 변화를 분석하는 기법이 실제 현장에서 적용되고 있다[5].

현재 플랜트 설비 열교환기 튜브검사에서는 결함에 대한 와전류 신호의 신뢰성을 확보하기 위해 내시경을 이용한 검사와 초음파 회전튜브검사법(IRIS: internal rotary inspection system)을 병행하고 있다.

본 연구에서는 열교환기 리보일러 튜브와 동일한 재질의 외경 19.05 mm 및 두께 2.11 mm로 인발 가공된 오스테나이트계 STS 316L의 ASME 표준 교정 시험편을 이용하여 각각 와전류탐상검사와 초음파탐상검사(IRIS)를 수행한 후 두 신호 특성을 비교 평가하였다.

## 2. 이론

### 2.1. 와전류탐상의 원리

교류 전류가 흐르는 코일에 도체를 접근시키면 도체에 와전류가 유도된다. 발생된 와전류는 도체의 표면에 집중되고 도체의 내부로 들어갈수록 적게 흐르게 되는데 이것을 표피효과라 한다. 표피효과가 일어나는 원인은 도체 내부의 임의의 위치에 발생하고 있는 와전류가 코일의 자속변화를 없애는 방향으로 자속을 발생하므로 와전류는 도체의 내부에 들어갈수록 감소하게 된다[6].

표피효과의 정도를 나타내는 기준으로 침투깊이가 정의된다. Maxwell 방정식으로부터 도체 표면에서  $x$ 거리인 곳의 와전류 밀도를  $J_x$ 라고 하면  $J_x$ 는 식(1)과 같이 표현된다.

$$J_x = J_o \exp(-x \sqrt{\pi f \mu \sigma}) \quad (1)$$

여기서  $J_o$ 는 도체표면의 전류밀도[A/m<sup>2</sup>],  $f$ 는 주파수[Hz],  $x$ 는 도체표면에서의 깊이[m],  $\sigma$ 는 도체의 도전율[S/m],  $\mu$ 는 도체의 투자율[H/m]

Table 1 Chemical composition of STS 316L high alloy

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Wt. %	0.019	0.57	0.69	0.025	0.003	12.24	17.69	2.20	0.43

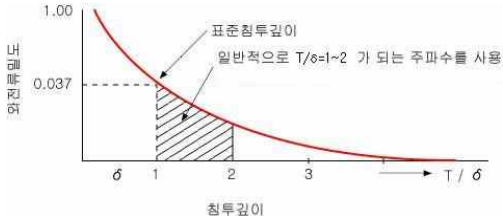


Fig. 1 A change in eddy current density with depth of penetration

이다. 표준침투깊이를  $\delta$ 라 하고,  $x = \delta$ 이면 표면에서부터 와전류 밀도가  $\frac{1}{e}=0.37$ 배 되는 깊이인 표준침투깊이는 식(2)와 같이 표현된다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2)$$

Fig. 1은 도체내에서 와전류 밀도의 변화를 나타낸 것이다. 와전류의 침투깊이는 주파수, 전도율, 투자율이 클수록 감소하게 되는데, 실제 검사에서 검사 주파수의 선정은 결합 검출능에 큰 영향을 준다. 와전류신호는 신호 원인별로 검사 주파수에 따라 특징적인 신호위상 및 진폭의 변화를 나타낸다. 다중주파수 와전류검사는 이를 이용하여 서로 다른 주파수에서 얻은 신호들에 대해 위상분석을 수행함으로써 중첩되어 존재하는 신호 원인들에 의한 복합신호로부터 원하는 신호에 관한 개선된 신호 대 잡음비(S/N)를 얻을 수 있다[7].

2.2. ASME 표준시험편 교정

배관검사의 와전류탐상은 ASME 표준 교정용 튜브를 이용하여 교정 후 실시한다. 탐상감도가 최적인 검사 주파수를 기본주파수로 맞춘 후 탐촉자의 흔들림으로 인한 잡음 신호를 X축 방향에 대해 수평으로 위상각을 조정하고 검사주파수에서 100% 관통 드릴 홀에 대한 위상각을  $40 \pm 5^\circ$ 로 한 후 20%×4개의 평저공(flat bottom hole)으로부터 신호의 위상각은 관통 홀 신호로부터 시계 방향으로  $50 \sim 120^\circ$  사이가 되어 나타난다.

Fig. 2는 차동형 보빈코일을 적용하고 기본주파수를 선정하여 시스템 교정할 때 대표적 신호를 표현한 것으로 프로브를 당길 때 20%×4개 평저공 신호는 처음에는 왼쪽 아래방향으로, 다음에

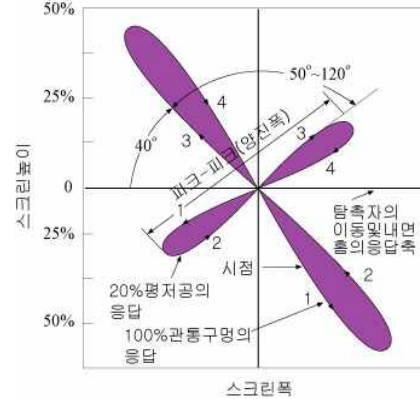


Fig. 2 Typical signal response from a properly calibrated differential bobbin coil probe system

는 오른쪽 위 방향으로 마지막에 아래방향으로 이동하며 원래 지점으로 돌아간다. 신호의 강도는 100% 관통 홀의 크기를 1V로 설정하여 20%×4개 평저공으로부터 최소 신호크기(peak to peak)가 전 수평축 표시의 30%가 되도록 조정한다. 위상 또는 회전 조정기를 조정하여 프로브의 이동, 또는 10% 깊이의 원주방향 내면 홈, 혹은 둘다로 인한 신호응답이 화면의 수평축에 대해  $\pm 5^\circ$ 에 위치하도록 한다[8].

100% 관통 홀에 의한 신호를  $40^\circ$ 의 위상으로 하면 관의 외면 결함에 의해 생기는 신호의 위상은  $40 \sim 160^\circ$  범위에 형성되고, 관의 내면 결함에 의해 생기는 신호의 위상은 일반적으로  $0 \sim 40^\circ$ 의 범위가 된다.

2.3. 초음파와 IRIS 작동 원리

IRIS는 석유화학 및 원자력발전소의 열교환기와 증기발생기 튜브와 파이프의 비파괴검사를 위한 초음파검사기법이다. 이 기술은 관두께의 일반적인 결함뿐 아니라 홀 및 손상된 부분을 발견하고 양을 측정하는데 사용된다. 최근 원격장 와전류, 누설자속, 초음파 방법 같은 다양한 검사기술이 이용되고 있다. 와전류탐상은 결함의 위치를 찾는 데 매우 유용하지만 전기적 신호를 해석하기 어렵기 때문에 정확한 결함 크기를 알기는 어렵다. 반면 초음파탐상은 관두께 손실을 정확히 측정할 수 있고 부식에 대한 검사 신뢰성이 크다. 게다가 초음파탐상은 지지대, 튜브 시트 (tube sheet), 전기전도도, 투자율의 변화에 영향을

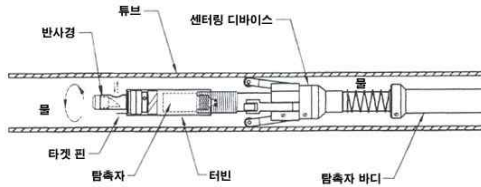


Fig. 3 Schematic diagram of typical IRIS probe

받지 않는다. 또한, 초음파 데이터는 잔존 관두께가 기록되기 때문에 보다 쉽게 분석되고 튜브에서 결함 크기를 측정하기 위한 중요한 요소이다. 게다가 전자기 데이터를 보완하기 위한 결함 평가 요소나 와전류나 원격장 와전류 결과를 신뢰할 수 없는 상황에서도 유용하다. 초음파 IRIS는 잔존 관두께의 일반적인 손실, 홈, 내·외부 부식 등을 감지하고 측정할 수 있다[9].

IRIS의 작동 원리는 펄스에코방식을 기초로 하는데, 프로브(probe)는 물로 채워진 튜브에 삽입된 후 프로브가 튜브에서 천천히 빠져나오면서 데이터가 화면에 나타나고 기록되며, 초음파 빔은 관벽 내외부의 금속 손실을 검사한다. Fig. 3에 표현된 것처럼 IRIS 프로브는 튜브내벽을 따라 초음파 빔 방향으로 45° 회전하는 반사경으로 구성되며 이 반사경은 연속적으로 펌프 되어 주입되는 물의 압력으로 회전하는 작은 터빈에 의해 구동된다. 물은 터빈을 회전시키는 에너지로 사용되며 초음파 탐촉자와 튜브 간 couplant 역할을 한다. 프로브는 2.5 cm/s의 속도로 매우 천천히 구동하는데 약 0.13 mm의 범위 내에서 관두께 측정이 가능하며, 물속의 이물질이나 파편 등 잔류물은 터빈 고장의 원인이 되기 때문에 시험 전 튜브는 0.4 MPa 압력을 갖는 깨끗한 물로 전처리한다[9,10]. 보통 13 mm 이상의 외경을 갖는 튜브 검사에 이용되며 보다 큰 직경을 갖는 튜브 검사에는 센터링 조정이 가능한 특수 탐촉자를 사용하고 30 m 이상의 깊이까지 검사 가능하며 검사 속도를 자유롭게 조절할 수 있다. 길이 6 m 튜브 한 개를 검사하는데 약 10분 정도 소요된다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1. 실험 장치의 구성

본 실험에 사용된 검사 장치는 Olympus사의

MS-5800E 시스템과 코일 외경이 13 mm인 내삽식 보빈프로브를 이용하여 와전류탐상을 수행하였고, IRIS사의 IRIS-9000 V3.08 시스템과 V15.1 초음파 회전식튜브를 사용하여 IRIS검사를 수행하였다.

#### 3.2. 시험편 제작

Fig. 4, Fig. 5와 같이 ASME 표준 교정튜브를 근거로 하여 길이 400 mm, 외경이 19.05 mm이고 두께가 2.11 mm으로 인발 가공된 오스테나이트계 STS 316L 재질 튜브에 100% 관통홀 1개, 80%감육, 60%감육, 40%감육, 20%×4개 평지공, 10% 외면 홈, 10% 내면 홈 등 7개의 인공결함을 가공하였고 Table 2에 교정용 튜브의 인공결함의 크기를 나타내었다.



Fig. 4 Picture of STS 316L calibration tube

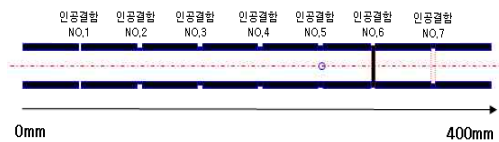
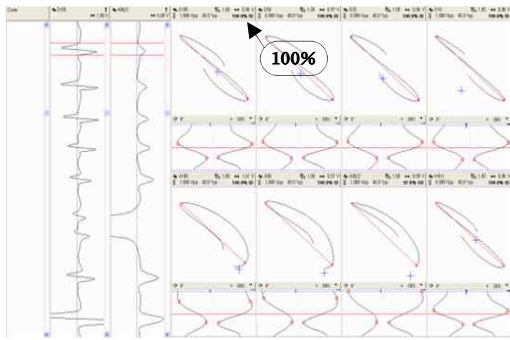


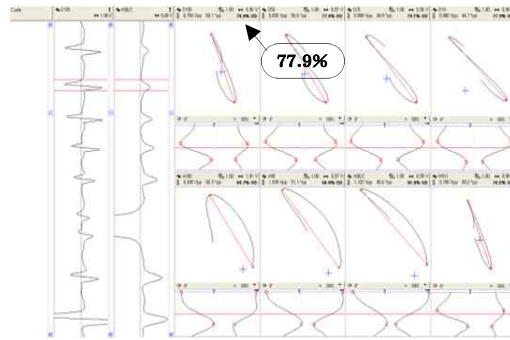
Fig. 5 Schematic diagram of calibration tube

Table 2 Dimension of artificial defects in calibration tube

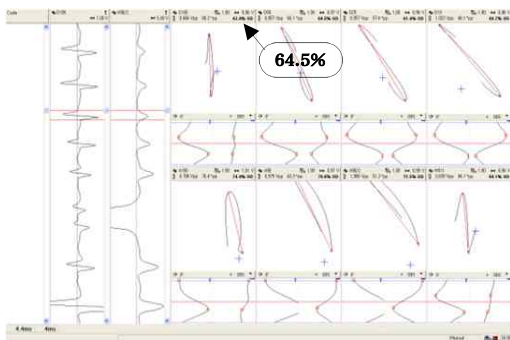
dimension defect	dia. (mm)	depth. (%)	location	remark
No. 1	1.3	100	out	
No. 2	2	80	out	
No. 3	2.8	60	out	
No. 4	4.8	40	out	
No. 5	4.8	20	out	90°×4
No. 6	3.2	10	out	
No. 7	1.6	10	in	



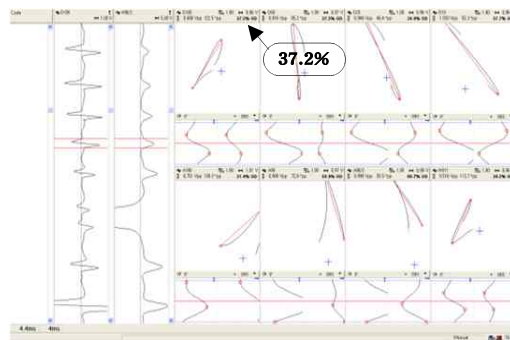
(a) No. 1



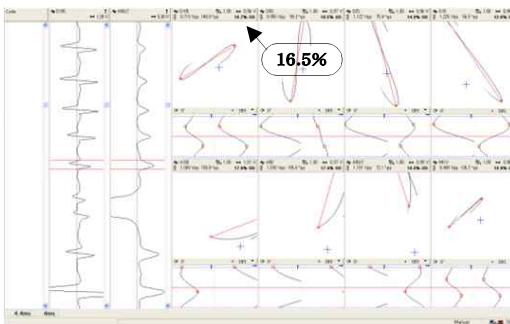
(b) No. 2



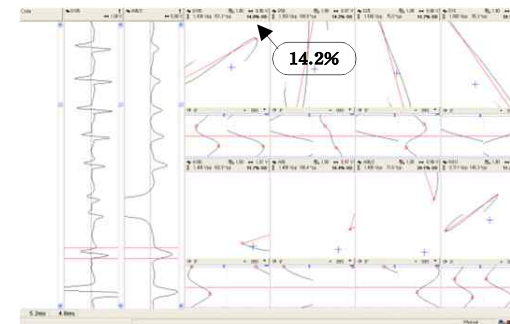
(c) No. 3



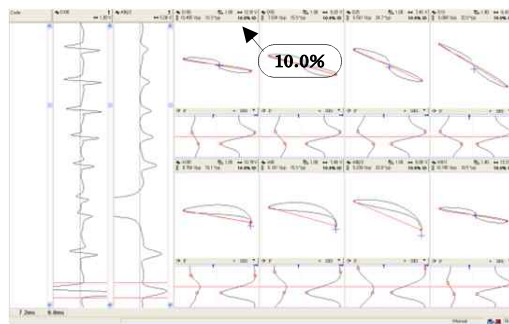
(d) No. 4



(e) No. 5

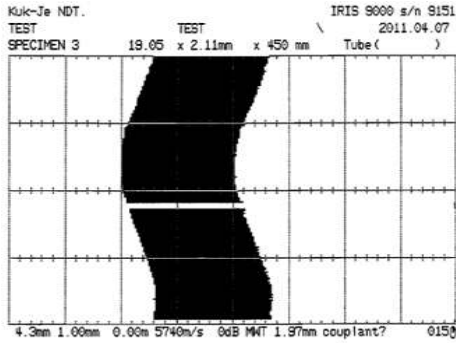


(f) No. 6

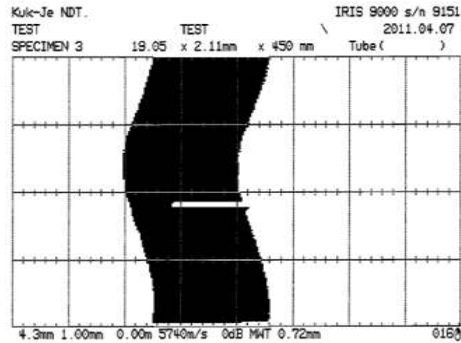


(g) No. 7

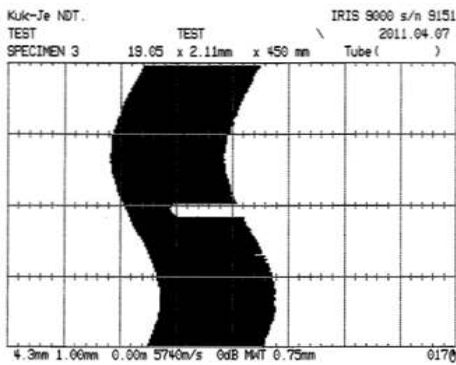
Fig. 6 Signal by bobbin probe from artificial defects in the calibration tube



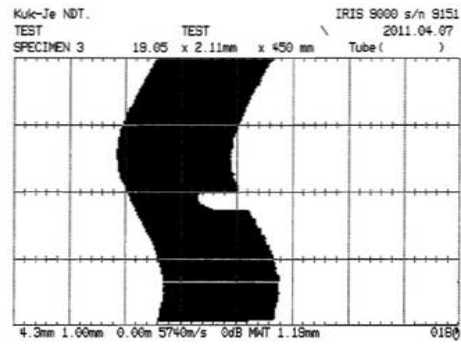
(a) No. 1



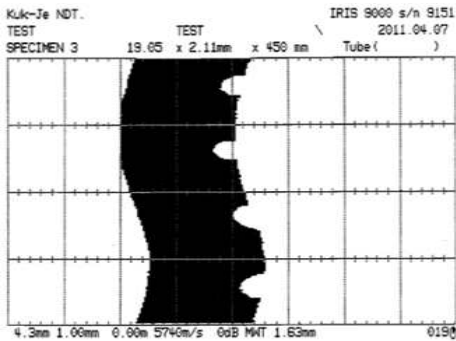
(b) No. 2



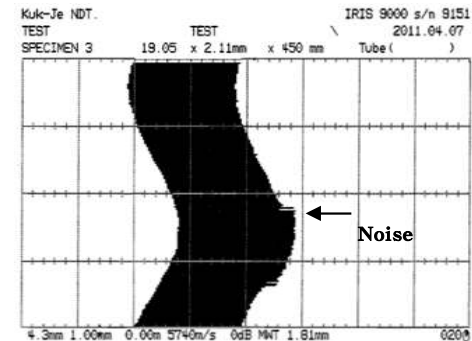
(c) No. 3



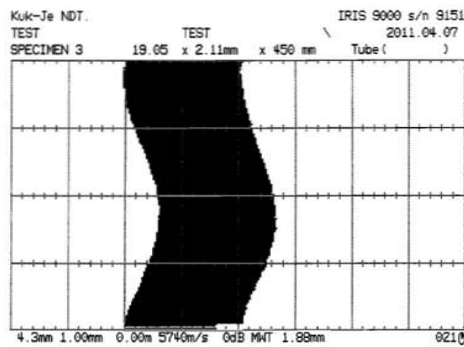
(d) No. 4



(e) No. 5



(f) No. 6



(g) No. 7

Fig. 7 Signal by IRIS from artificial defects in the calibration tube

Table 3 Defect sizing performance of ECT vs IRIS(wall loss damage rate : %, remaining wall thickness : mm)

Defect No. / Method	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4		No. 5		No. 6		No. 7	
	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm
Cal. tube	100	2.11	80	0.42	60	0.84	40	1.27	20	1.69	10	1.89	10	1.89
ECT	100	2.11	77.9	0.46	64.5	0.74	37.2	1.32	16.5	1.76	14.2	1.81	10	1.89
IRIS	100	2.11	65.9	0.72	64.5	0.75	43.6	1.19	22.7	1.63	14.2	1.81	10.9	1.88

### 3.3. 실험 조건 설정

#### 3.3.1. 와전류탐상 실험 조건

ASME 표준 교정 시험편을 사용하여 보빈 코일로 오스테나이트계 STS 316L (외경 19.05 × 2.11 mm)에 대한 시험주파수( $F_{180}$ )를 구한 결과 적합한 시험주파수 조건이 105 kHz임을 확인하였다. 1.3 mm 관통홀 신호의 위상을 40°로, 20%×4개 평저공과 100% 관통홀 사이의 위상각의 차이는 103°이며 100% 관통홀에 대한 신호진폭(peak to peak)을 1V로 설정하였다. 또한 지지판에 의한 신호를 억제하기 위해 50 kHz, 25 kHz, 10 kHz 주파수를 혼합하여 사용하였다. 프로브의 충전율은 84%이고 검사 속도는 1.5 m/s였다.

#### 3.3.2. IRIS 실험 조건

400 mm 튜브시험편에 대해 시험주파수 15 MHz, 물 압력 및 온도는 340 kPa과 20°C, 검사 속도는 0.04 m/s로 설정하여 IRIS 검사를 수행하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

교정시험편에 존재하는 각각의 인공 흠의 위상을 측정, depth curve를 이용하여 감육 깊이로 환산하였다. Fig. 6은 316L 교정시험편에 대한 100% 관통홀(a), 80%(b), 60%(c), 40%(d), 20%×4개 평저공(e), 10% 외면흠(f), 10% 내면흠(g) 와전류신호 결과를 나타내었다.

Fig. 7은 STS 316L 교정시험편에 대한 100% 관통홀(a), 80%(b), 60%(c), 40%(d), 20%×4개 평저공(e), 10% 외면흠(f), 10% 내면흠(g) IRIS 신호 결과를 나타낸 것이다. 검은색 바는 관벽 두께를 나타내고 바의 왼쪽은 튜브 내면 형태에 해당하며 오른쪽 부분은 튜브 외면에 해당한다. IRIS

는 튜브의 원주방향을 검사하는 방법으로서 10% 외면흠(f)과 10% 내면흠(g)은 원주 전체를 가공하였기 때문에 관벽의 두께 감소로만 화면에 나타나게 된다.

일반적으로 오스테나이트계 스테인리스 튜브에서는 와전류탐상이 가장 좋은 결함검출능(91%)을 갖고 자성체 튜브에서는 IRIS 검사가 우수한 결함 검출능(83%)을 갖는다. 스테인리스강에서는 ±10% 허용율 범위에서 와전류탐상기 47%, IRIS가 59%의 결함크기 측정율을 갖는다[10].

Fig. 6과 Fig. 7의 결과로 볼 때, No. 1, No. 3, No. 4, No. 5, No. 7 결함에 대한 IRIS 신호의 두께 감소율과 No. 1, No. 3, No. 4, No. 5, No. 6, No. 7 결함에 대한 잔존두께 검출율은 허용 오차 범위(±10%)를 만족하였고, 와전류탐상은 No. 5, No. 6 결함을 제외하고 두께 감소율을 만족하였고, 잔존 두께 측정은 전 결함에 대해 허용범위를 만족하였다. 와전류탐상검사 전용 교정시험편을 사용하여 신호비교를 하였기 때문에 와전류신호 측정결과가 단순비교해서 볼 때 보편적으로 양호함을 보였다.

부식과 산화에 기인된 현장 실물 시험편의 결함은 폭과 길이가 크고 축 방향으로 존재하기 때문에 IRIS 측정값의 정확도가 높지만 교정시험편에 존재하는 인공흠은 비교적 크기가 작아 허용 오차범위를 초과하는 값이 나타났다.

Table 3에 와전류탐상과 IRIS 시험 결과에 따른 결함별 두께감소율과 잔존두께를 제작된 교정시험편과 비교하여 표시하였다.

### 4. 결론

ASME 표준 교정시험편에 대한 와전류탐상에서는 20%×4개 평저공(No. 5) 결함과, 10% 외면원주흠(No. 6) 결함에 대한 두께 감소율 측정치에서 교정용 튜브와 큰 편차를 보였고, IRIS 검

사에서는 80% 외면(No. 2)결함의 잔존두께와 10% 외면홈(No. 6) 결함의 두께감소율에서 가공 시험편과 큰 차이를 발생하였다.

기타의 결함에 대한 감소율과 잔존두께 측정비율은 두 방법 모두 허용오차범위 내에서 결과를 제공하였다. 신호해석 및 평가의 불리함에도 불구하고 와전류탐상은 신호수집 능력과 빠른 검사속도로 인해 한 곳에서 다량의 튜브를 검사하는데 효과적이었다.

IRIS 검사는 나선형 주사, 부정확한 초음파 시스템 연결과 검사자의 능력 등으로 인한 데이터 손실이 발생할 수 있으나 와전류탐상 결과의 신뢰도를 향상하기 위한 결함크기 산정(sizing)과 열교환기 튜브의 두께 감소율을 정확히 측정할 수 있었다.

두 방법을 동일한 조건에서 열교환기 튜브 전수검사에 적용하여 비교하는 것은 의미가 없다. 와전류탐상검사를 선행하고 의사지시에 대한 신호해석, 두께감소율 측정을 위해 IRIS 검사를 병행한다면 검사 결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있다고 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] 이주석, "비파괴검사에 의한 석유화학설비의 안전진단", *대한기계학회지*, 제34권 제11호, pp. 859-866 (1994)
- [2] 김진영, "기계, 구조물의 경년열화와 수명평가기술", *비파괴검사학회지*, 제19권 제2호, pp. 129-143 (1994)
- [3] Metal Handbook, "Failure analysis and prevention," *American Society for Metals*, Vol. 11, 9th, pp. 629-642 (1998)
- [4] 백승현, 이태훈, 김정석, 장경영, "STS 316L 강의 초음파 비선형 특성평가를 위한 경사입사기법", *비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집*, SC0026, pp. 120-124 (2008)
- [5] 박익근, 김용권, 박세준, 조용상, 길두송, "내부 삽입형 유도초음파 센서를 이용한 열교환기 튜브 결함 검출", *비파괴검사학회지*, 제30권 제4호, pp. 345-351 (2010)
- [6] 정용무, "와전류탐상법( I )", *비파괴검사학회지*, 제13권 제2호 pp. 94-100 (1993)
- [7] 이의중, "비파괴검사시리즈VI 와전류탐상시험", 초판, 제3-163호, 도서출판 골드, 서울, pp. 70-72 (2000)
- [8] ASME, "Boiler & Pressure Vessel Code," The American Society of Mechanical Engineers, Vol. V Art. 8, pp. 127-129 (2004)
- [9] A. Joseph, G. K. Sharma and T. Jayakumar, "Ultrasonic internal rotary inspection system(IRIS) for heat exchanger and steam generator tubes," *Journal of Pure and Applied Ultrasonic*, Vol 31, No. 1, pp. 24-30 (2009)
- [10] A. S. Birring, "Selection of NDT techniques for inspection of heat exchanger tubing," *Materials Evaluation*, Vol. 59, No. 3 (2001)