

## 증기발생기 전열관 확관부의 초음파 검사장치 및 적용기술개발

### Development of Steam-Generator UT System and Experimental Verification

박재석\*<sup>†</sup>, 홍순신\*, 박치승\*

Jae Seok Park\*<sup>†</sup>, Soon Sin Hong\* and Chi Seung Park\*

초 록 원전 취약부위의 하나인 증기발생기 전열관의 확관/천이영역을 초음파로 검사하기 위한 장치를 개발하고 모의결함 시험편 및 자연결함 시험편을 이용하여 그 성능검증을 수행하였다. 10% 이상의 깊이를 가지는 모의결함은 모두 검출 가능했으며 20%이상의 깊이를 가지는 모의결함은 그 크기도 재현성 있게 측정할 수 있었다. 순차적인 깊이를 가지는 모의결함을 이용한 실험결과 표준편차 3.27로 비교적 재현성 있는 결과를 얻었다. 자연결함을 포함하고 있는 시험편을 이용한 실험결과, 결함의 진행 형태가 검출능에 영향을 미침을 알 수 있었고 결함의 깊이방향 형태가 비교적 잘 반영되므로 결함 단면 면적을 측정할 수 있는 가능성을 타진할 수 있었다.

주요용어: 증기발생기, 전열관, 초음파검사

**Abstract** The ultrasonic inspection system for the expansion/transition area of steam generator tube was successfully developed. Variety of artificial flaw and real crack specimen was tested using the UT system to verify the performance of the system. All artificial flaws of which through-wall depth larger than 10% was clearly detected by UT system. Measurement results of through-wall depth of flaws larger than 20% had good linearity and reproducibility with 3.27 of standard deviation. Results of real crack specimen test suggested that the detection limit of real crack strongly depends on the crack morphology. A potential for measurement of PRL(percentage of remaining ligament) was recognized by the real crack specimen test.

**Keywords:** Steam Generator Tube, Ultrasonic Testing

#### 1. 서 론

국내에서 가동되고 있는 가압경수로의 증기발생기 전열관은 관관에 견고하게 부착하기 위하여 다양한 기계적 방법을 동원해 확관/밀착한다. 이 과정에서 확관/천이영역이 생겨나게 되고, 이 영역에는 잔류응력이 다량 존재하게 되므로 결함 발생 시 매우 빠른 속도로 성장한다. 현재까지 관찰 결과, 증기발생기 전열관 1차측에서 PWSCC(primary water stress corrosion cracking) 2차측에서 IGSCC(inter-granular stress corrosion cracking)의 발생이

보고되고 있다[1]. 확관/천이영역에서의 균열은 먼저 천이영역의 하단에서 생성되며, 그 다음 천이영역 상단에서 생성된다. 이들 균열은 성장하여 결국 하나의 긴 균열을 형성하는 것으로 EdF(Electricite de France)는 보고하고 있다[2]. 이와 달리, 고온 증기 시험결과에 따르면 처음에는 확관영역에서 축방향 균열이 생성되고 이후 이 균열이 커짐에 따라 천이영역에서 원주 방향의 균열이 관찰된다고 알려져 있으며, 특히 축 방향 PWSCC는 대부분의 기계 확관(roll expansion)한 전열관에서 확관 정도에 관계없이 관찰되고 있다[3,4].

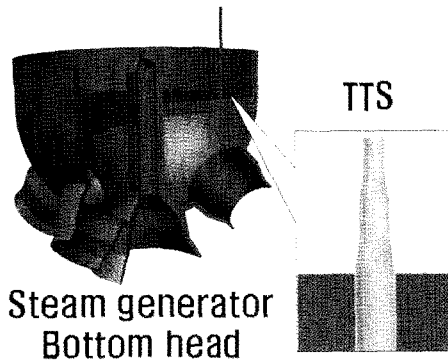


Fig. 1 Location and geometry of the expansion/transition area of SG tube

관관 및 환관 천이영역은 1, 2차 계통의 압력경계(class boundary, Fig. 1)이므로 상술한 바와 같은 균열의 성장은 증기발생기의 안전성에 위협을 주는 매우 중요한 문제이며, 최근까지 원전 건전성 확보에 주된 관심사로 논의되고 있다. 현재까지 국내에서 증기발생기 전열관에 대한 비파괴 검사는 Bobbin과 MRPC(motorized rotating pancake coil)를 이용한 와전류검사법이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 이들은 환관/천이영역의 형상 변화와 주변의 슬러지(sludge)에 의한 신호 왜곡 영향을 크게 받으며, 미세한 결함에 대한 정량적 평가에 근본적인 한계를 드러내고 있다. PWSCC 및 ODSCC는 체적을 가지지 않는 판상결함(planar flaw)이므로 와전류검사를 이용하여 미세한 결함 검출하고 그 크기에 대한 정량적인 평가를 내리기는 매우 어렵다. ASME Code 등 와전류검사와 관련된 규격들이 판상결함 결함의 검출을 위한 검사 방법, 결함 크기에 대한 정량적 평가방법, 검출된 결함 세관에 대한 처리 기준 등을 비교적 최근까지도 구체적으로 제시하지 못한 점은 이와 같은 어려움을 반영하는 것이다.

상술한 바와 같은 취약성 때문에 대체검사법 또는 보완검사법에 대한 요구는 국내외에서 꾸준히 있어왔으며, 그 결과 TOF(time of flight)에 기초한 초음파 검사법이 해외에서 제안되고[5-7], 이에 대한 검증이 이루어졌다[8]. 본 연구에서는 그 연장선으로, 와전류 검사법을 보완하기 위한 초음파 검사법에 대하여 기술한다. 국내에서의 증기발생기 초음파 검사 장치 개발에 대하여 요약하고, 모의/자연 결함 시편을 이용한 성능시험을 통하여 그 실효성을 검증한다.

## 2. 초음파 검사시스템 개발

### 2.1. 초음파 검사시스템 개요

개발된 초음파 검사 시스템은 신호수집 컴퓨터, 초음파 노드(node), 모션제어기(motion controller), 기계구동부, 초음파 탐촉자로 구성되며, 광케이블을 이용하여 격납용기 내/외부를 연결함으로써 장비 유입을 최소화 하였다(Fig. 2).

원자력 발전소의 자동 및 수동 초음파검사에 사용하는 초음파 탐촉자의 공진주파수는 2.25 MHz 가 대부분이다. 초음파 신호를 왜곡 없이 수집하기 위해서는 탐촉자 공진 주파수의 약 10배 이상의 속도로 샘플링(sampling)해야 한다. 일반적인 경우 50 MHz 이하의 초음파 샘플링으로 충분히 검사를 수행할 수 있다. 그러나 증기발생기의 전열관은 두께가 얇아서 10 MHz 이상의 탐촉자를 사용해야 하므로 100 MHz의 초음파 샘플링이 가능한 초음파 신호수집 하드웨어를 개발하였다.

증기발생기 전열관의 축방향, 원주방향, 두께방향에 대한 결함의 검출 및 결함의 크기측정을 위해 3 개의 탐촉자를 동시에 사용한다. 100 MHz 샘플링 속도의 다중채널에서 발생하는 대량의 초음파 정보를 기존의 하드웨어 알고리즘으로는 처리하기 어렵다. 이러한 문제점 극복을 위하여 독립된 초음파 하드웨어에서 신호의 최적압축(peak detect & run length recording)을 수행한 후, 컴퓨터에 초음파 정보를 넘겨주도록 설계하였다.

초음파 신호수집 노드는 격납용기 내부에 두고 외부와 100 Mbps의 광케이블로 연결하여 대용량의 초음파 검사 데이터를 전송할 수 있게 함으로써 원

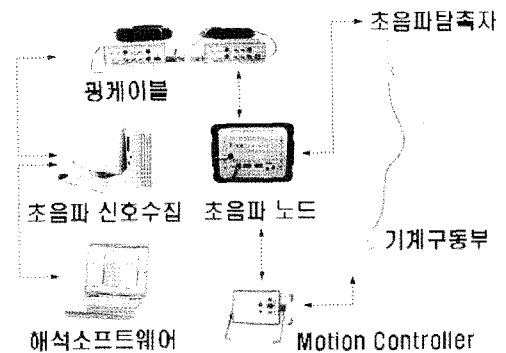


Fig. 2 Schematic diagram of the ultrasonic inspection system

격에서 실시간으로 초음파검사를 수행할 수 있도록 하였다.

## 2.2. 기계구동부

모션제어기는 초음파 신호수집 노드와 연결되어 동작명령을 받으며, 동작 중에는 동기신호를 노드에 발생시켜 초음파신호를 수집하도록 한다. 증기 발생기 수실 내부에 유입되는 기기를 최소화하기 위하여 flexible torque rod asse'y를 개발하여 장착하였다. 물을 초음파 접촉매질로 사용하기 위하여 일부 구간은 방수처리를 하였다. 개발된 기계구동부는 나선선 형태의 주사를 수행하며 최대 0.05 mm의 주사 정밀도를 가진다.

## 2.3. 초음파 탐촉자

약 1 mm 두께를 가지는 전열관에 대하여 10% 이상의 결함을 효과적으로 검출하기 위해서는 높은 주파수의 초음파 사용이 필수적이다. 선행 실험 및 기존의 연구결과를 참조하여 중심주파수 15 MHz를 가지도록 설계하였다. 또한 재료의 음파 감쇄특성을 극복하기 위하여 집속 초음파 빔을 사용하는 것이 유리하므로, 각각의 초음파 변환기 전면면에 구면 렌즈를 부착하여 10 mm 이상의 초점거리, 2 mm 이상의 심도, 그리고 1 mm이하의 유효빔직경을 가지도록 초음파 빔을 집속하였다.

개발된 초음파 탐촉자에는 원주방향 45° 횡파, 축방향 45° 횡파, 그리고 0° 종파를 송수신 할 수 있도록 3개 이상의 초음파 변환기가 설치되어있다. (Fig. 3) 이들 각각의 변환기는 독립적으로 작동하여 서로 영향을 주지 않으며, 15.92 MHz의 중심주파수, 0.232  $\mu$ s의 펄스폭을 가진다.(Fig 4, 5) 모든 변환기의 유효빔직경은 약 0.3 mm, 심도는 1.17 mm, 그리고 초점거리는 13 mm이다.

## 3. 개발된 초음파 검사시스템의 성능 검증

### 3.1. 실험방법 및 시편

실험에 사용된 시편은 다양한 깊이/형태를 가지는 모의결함 및 자연결함을 포함하고 있는 3/4 inch Inconel 600 HTMA 전열관이며, 외경 19.05 mm, 내경 16.87 mm의 크기를 가진다. 시편

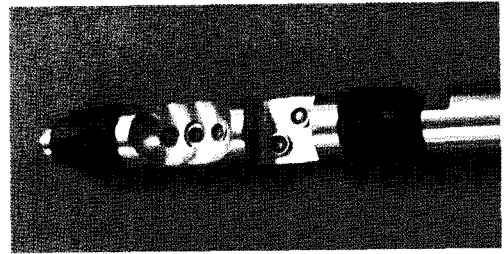


Fig. 3 Ultrasonic search unit

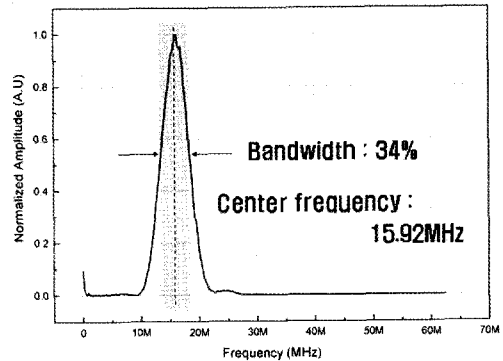


Fig. 4 Impulse response of the ultrasonic transducer

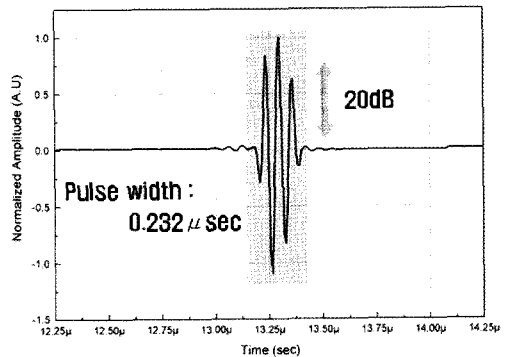


Fig. 5 Frequency spectrum of the ultrasonic transducer

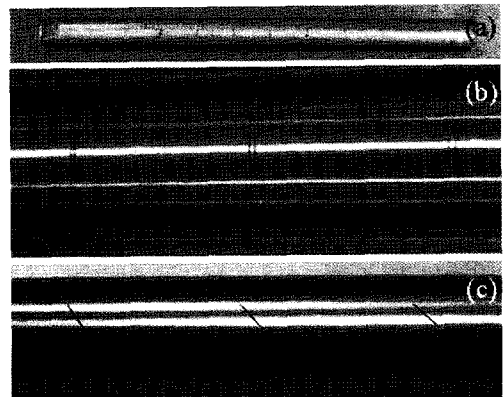


Fig. 6 Typical B-scan and A-scan of vertical planar flaw; (a) surface back-scattering, (b) tip diffraction, and (c) reflection

에 있는 모든 모의결함의 길이는 2~5 mm이고, 자연결함의 길이는 시편에 따라 상이하다. 특수한 형태의 결함에 대한 검출능을 살피기 위하여, 두 개의 결함이 가까이 위치한 형태, 초음파 빔의 방향에 대하여 직각이 아닌 기울어진 형태의 모의결함도 실험에 사용하였다(Fig. 6).

초음파 신호수집은 Table 1과 같은 조건으로 수행되었다. 모든 시편에 대하여 공통된 실험변수를 적용하였으며, 주사 간격은 초음파 빔 방향으로 0.05 mm, 결함의 길이방향으로 0.3 mm 이다.

### 3.2. 결과 및 고찰

#### 3.2.1. 깊이가 다른 모의결함의 크기 측정

Fig. 7은 개발된 초음파 검사 장치를 이용하여 Fig. 6 (a)와 같은 모의결함 시험편을 검사한 결과를 보여준다. 시편에 포함된 모의결함의 깊이와 길이는 Table 2에 나타난 바와 같으며 모두 바깥면에 가공되어있다. Fig. 7 (a)의 C-scan에서 알 수 있듯이 모든 모의결함은 검출 가능하며, 모의결함의

깊이가 C-scan에 정확히 반영된다. 100% 관통결함은 Fig. 7 (b)에서 3개의 줄로 나타나는 N-path 양상을 볼 수 있다.

유한한 크기를 가지는 판상 결함은 일반적으로 Fig. 8과 같은 양상의 B-scan을 가진다. 결함의 깊이는 B-scan에서 기준신호와 회절신호(Fig. 8(b)) 사이의 시간차이를 측정함으로써 이루어진다. 기준신호는 모의결함에서의 반사(Fig. 8(c)) 또는 내면에서의 후방산란(Fig. 8(a))을 이용한다.

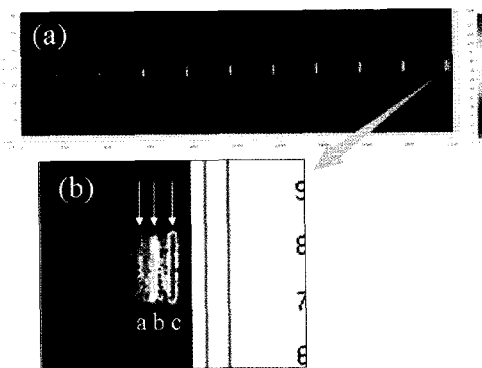


Fig. 7 (a) C-scan of EDM notch array having 10~100% through-wall depth and (b) detailed view of 100% notch for N-path reflections

Table 1 Inspection variables

항목	값
출력전압	400 V
출력임피던스	50 ohm
수신필터	band-pass
샘플링 주파수	100 MHz
샘플링 크기	8 bit
증폭도	70 dB

Table 2 Dimension of artificial flaws

length (mm)	depth (%)
2	10
3	20
4	30
5	40
5	50
5	60
5	70
5	80
5	90
5	100

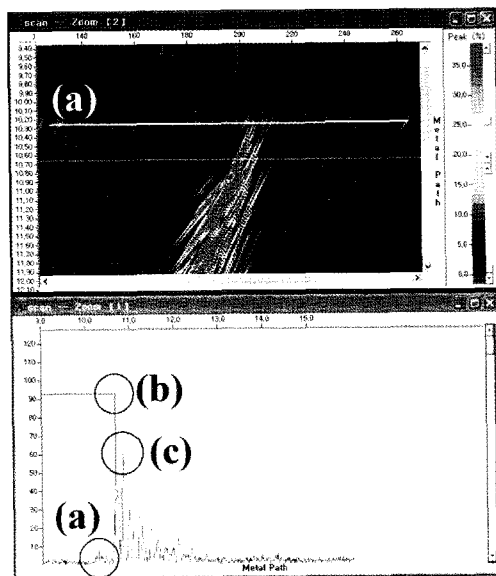


Fig. 8 Typical B-scan and A-scan of vertical planar flaw; (a) surface back-scattering, (b) tip diffraction, and (c) reflection

Fig. 9와 Fig. 10은 5명의 UT level II 검사자가 상술한 두 가지 기준신호를 이용하여 유한한 깊이를 가지는 모의결함에 대하여 깊이측정을 수행한 결과이다. 후방산란을 기준신호로 하였을 경우 더 높은 재현성 및 경향성을 가짐을 알 수 있다. (Fig. 10) 반사신호를 기준신호로 이용할 경우, 깊이가 깊을수록 측정의 오차가 커지며 실제 크기보다 작게 측정하는 경향이 강해짐을 알 수 있다(Fig. 9). 이는 반사신호 위치의 부정확성 때문에 기인한다. 회절신호가 B-scan에서 명확히 드러나기 위해서는 검사감도가 매우 높아야 하고 이는 필연적으로 포화된 반사신호를 야기하기 때문이다. 이에 반해 후방산란은 그 크기가 미약하나 B-scan 전체에 걸쳐서 고르게 나타나므로 기준선으로 사용하기 적합하다. 후방산란을 기준신호로 할 경우, 최대 편차는 70% 깊이를 가지는 모의결함에서 5.5이며 표준 편차는 3.27로 재현성이 높다.

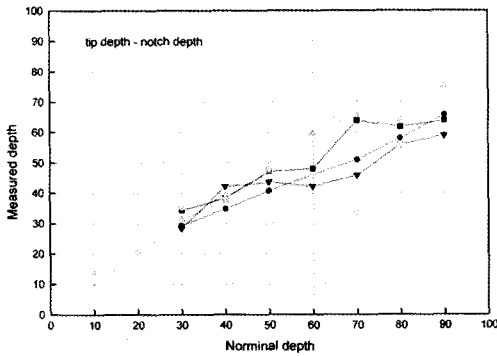


Fig. 9 Through-wall depth measurement using TOF of tip diffraction and reflection

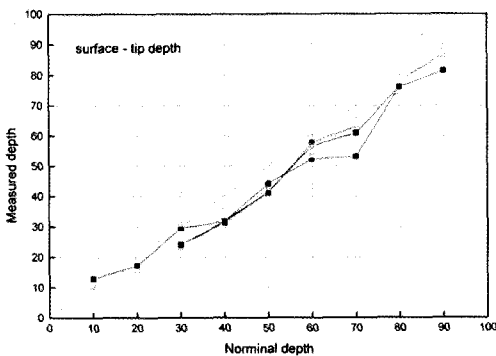


Fig. 10 Through-wall depth measurement using TOF of tip diffraction and surface back-scattering

### 3.2.2. 특별한 형태의 모의결함

두 개의 모의결함이 가까이 위치하는 경우, C-scan은 Fig. 11과 같은 양상을 가진다. 두 개의 모의결함이 0.2 mm 이하로 근접한 경우, 두 결함은 하나의 결함으로 나타나며 분리하여 판독되지 않는다. 0.3 mm 이상 떨어진 경우 Fig. 11의 (a)와 같이 분리된 두 개의 결함으로 판독이 가능하다. 단일구면을 이용한 빔의 집속은 간단한 에어리 함수(Airy's law)로 표현될 수 있으므로, 이러한 결과는 Rayleigh's criterion 및 Sparrow limit에서 얻을 수 있는 물리적 직관과 부합한다.

Fig 12에서 보였듯이, 초음파 빔의 방향과 결함의 방향이 정확히 수직이 되지 않고 약간의 기울어짐이 있는 경우 약 15°의 검출 한계를 가지는 것으로 정성적 판단을 할 수 있다. 검출 한계각도 이상으로 기울어진 결함도 C-scan에서 확인할 수 있으나 그 기울어진 각도를 반영하지 못하며, 결함의 중앙부보다는 양 끝단이 좀 더 명확히 나타난다.

### 3.2.3. 자연결함

10개의 자연결함 시편에 대하여 개발된 초음파 검사 장치를 이용하여 실험하고, 파괴 시험을 통하

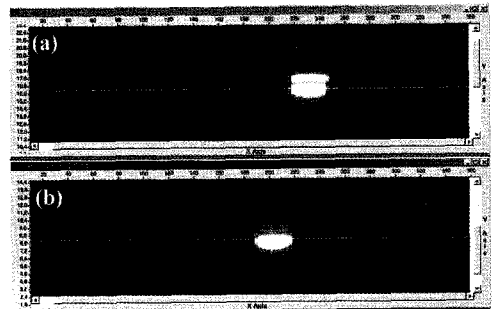


Fig. 11 C-scan of two close artificial flaws with (a) 0.4 mm and (b) 0.2 mm of distance respectively

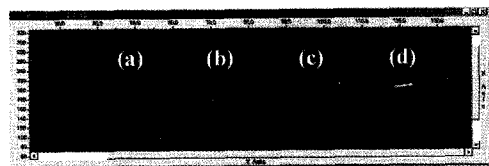


Fig. 12 C-scan of oblique oriented artificial flaws of which angles are (a) 25°, (b) 20°, (c) 15°, and (d) 10°

여 초음파 검사 결과를 검증하였다(Table 3). 길이 및 깊이 측정에 있어서 실제 결함보다 작게 측정되는 경향을 보였으며 반사파의 크기가 모의결함의 경우에 비하여 매우 작았다. 이러한 차이는 일관성을 가진 특성이 아니라, 자연 결함의 형태에 따라 매우 불규칙하다. 길이 측정은 약 0.73 mm, 깊이 측정은 약 15.76%의 RMSE(root mean square error)를 가지며 오차의 범위는 길이측정 -3.1~20.06%, 깊이측정-0.1~1.36 mm이다.

자연결함 성장형태(crack morphology)가 유효빔 직경에 비하여 조대한 경우 검출능은 매우 감소하며, 그 정도가 기울어짐 검출 한계를 초과하면 검출이 되지 않는 경우도 있다. 그 예로, Fig 13 (a)에 보인 결함은 길이 2.5 mm에 34%의 깊이를 가지는 깊은 결함임에도 불구하고 초음파 검사로 검출되지 않았다.

반면 Fig. 13 (b)과 같이 비교적 성장 경로가 매끈한 결함은 모의결함과 유사한 정도의 크기를 가지는 지시가 관측되었으며, 매우 명확한 결함 양상을 보여주었다. 원주방향의 결함에 대한 검출능이 축방향에 비하여 다소 떨어진다는 점과 파괴 시험을 통한 파면을 관찰한 결과, 대체로 축 방향 결함은 매끈한 형태를 가지며, 원주방향 결함은 결함 진행 형

태가 조대한 것으로 예상된다. 이에 대한 상세한 고찰은 본연구의 범위를 벗어나는 것이므로 생략한다.

Fig. 14는 자연결함의 전형적인 파단면을 보여주고 있다. 해당 결함에 대하여 초음파 검사를 수행

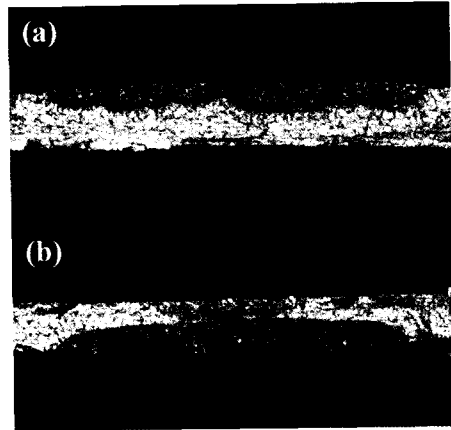


Fig. 14 Example of fracture surface; (a) OA31, (b) IA11

Table 3 Length and depth sizing result of real crack specimen

시편 번호	길이 (mm)	길이 측정 (mm)	깊이 (%)	깊이 측정 (%)
IA06	2.52	X	34	X
IA10	7.1	5.37	100	N/A
IA11	6.8	5.44	55	34,94
OA04	3.2	2.02	100	N/A
OA07	2.2	1.68	100	N/A
OA16	4.5	4.60	*	N/A
OA22	7.0	6.93	*	N/A
OA31	6.2	5.63	49	29,77
ODC50	3.0 **	2.15	50 **	53,10
ODC60	3.0 **	2.65	60 **	45,44

\* 경계가 분명하지 않음

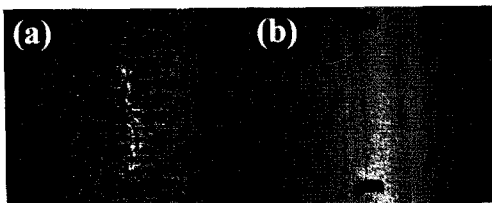


Fig. 13 Crack morphology; (a) rough, (b) fine

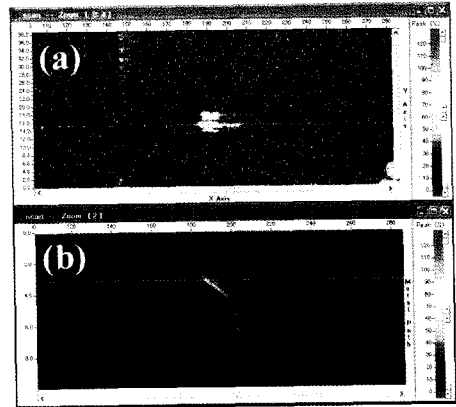


Fig. 15 UT result of OA31; (a) C-scan, (b) B-scan

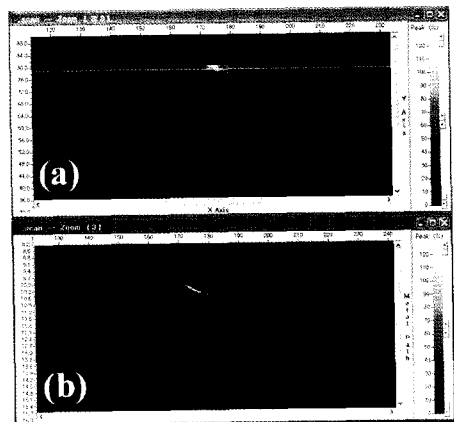


Fig. 16 UT result of IA11; (a) C-scan, (b) B-scan

할 경우 Fig. 15 및 16과 같은 결과를 얻을 수 있으며 결함의 단면을 비교적 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 초음파 검사를 이용한 파 단면 면적 측정의 가능성을 엿볼 수 있다. 이외에도 Table 3에 제시된 시편 중 ODC50과 ODC60의 B/C-scan을 Fig. 17, 18에 제시하였다.

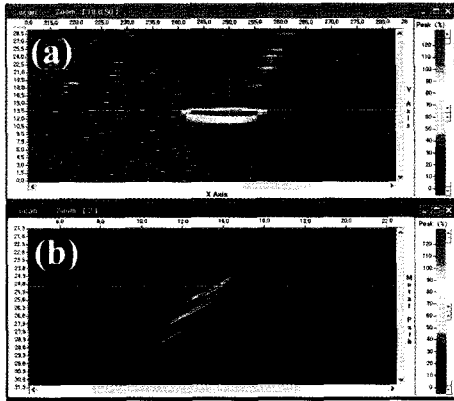


Fig. 17 UT result of ODC60; (a) C-scan, (b) B-scan

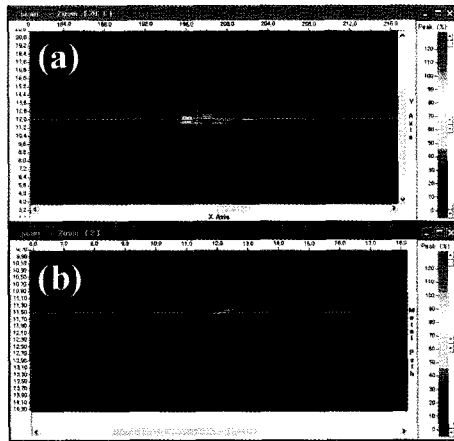


Fig. 18 UT result of ODC50; (a) C-scan, (b) B-scan

#### 4. 결론

원전 증기발생기 전열관에 적용할 수 있는 초음파 검사 장치를 개발하고 이를 다양한 모의결함 및 자연결함에 적용하여 그 성능을 검증하였다. 개발된 장치를 이용한 초음파 검사는 정밀한 결함 길이 측정이 가능하며, 20% 이상의 크기를 가지는 결함은 재현성 있는 크기 측정이 가능하다. 경사진 결함, 두 개 이상이 접친 결함, 여러 개의 꼭지점을 가지는 결함 등, 다양한 결함의 형태가 B/C-scan에

비교적 잘 반영되었으며, 이로부터 결함 파면 면적을 계산할 수 있는 가능성을 보였다.

자연결함에서 얻은 지시는 모의결함의 경우보다 매우 작음을 알 수 있었고, 이는 반사면의 불규칙성에 기인하는 것으로 예상된다. 즉, 집중빔 탐촉자에 대한 재고가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 전력산업연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] 김홍표 외, "원전 1차측 응력부식파괴에 관한 기술현황분석 보고서", KAERI/AR-556/2000, (2000)
- [2] J. Engstrom and K. Norring, "Primary and secondary cracking at ringhals 2," in Proceedings: 1983 Workshop on Primary-Side Stress Corrosion Cracking of PWR Steam Generator Tubing, EPRI NP-5498 (1987)
- [3] K. Norring, "Examination of fifteen tubes from steam generator 1 at ringhals 2," Studsvik report EI-84/56 (1984)
- [4] K. Norring "Influence of roll transition shape on primary side IGSCC of steam generator tubes," Specialist Meeting on Steam Generators, Stockholm, Sweden, (1984)
- [5] Steve Kenefick, "Ultrasonic examination of axial ODSCC," 19th Steam-Generator NDE Workshop, (2000)
- [6] Steve Swilley, "Field implementation of a qualified ultrasonic technique for SG tube inspection at comanche peak," EPRI Steam-Generator Conference, (2000)
- [7] Yutaka Harada, "Development of depth sizing technology using ultrasonic testing in SG tubes," 14th EPRI Steam-Generator NDE Workshop, (1995)
- [8] "Steam-Generator Examination Guidelines Rev. 6 App. J: Performance Demonstration for Ultrasonic Examination," Electric Power Research Institute, (2002)