

## 초음파를 이용한 원자력발전소 증기발생기 전열관의 정량적 결함 평가에 관한 연구

### A Study on Quantitative Flaw Evaluation of Nuclear Power Plant Steam Generator Tube by Ultrasonic Testing

윤병식\*<sup>†</sup>, 김용식\*, 이희중\*, 이영호\*\*

Byung-Sik Yoon\*<sup>†</sup>, Yong-Sik Kim\*, Hee-Jong Lee\* and Yong-Ho Lee\*\*

**초 록** 원자력발전소의 증기발생기는 수천 개의 매우 얇은 두께의 튜브로 구성되어 있다. 이러한 증기발생기의 튜브는 원자력발전소의 1차 계통과 2차 계통의 압력경계를 유지하는 데에 매우 중요한 역할을 하고 있으며, 고온 고압의 열 수력적 상호작용으로 인한 가혹한 운전조건으로 인하여 손상되기 쉽다. 따라서 증기발생기의 구조적 건전성을 평가하기 위하여 많은 시간과 노력이 투입되고 있다. 와전류 검사 방법이 증기발생기 튜브의 건전성을 평가하기 위한 가장 보편적인 비파괴 방법이지만, 와전류 검사의 특성상 결함의 전체 체적에 의하여 신호의 특성이 나타나게 되어 정확한 결함의 크기를 평가하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 증기발생기 튜브의 결함 검출과 정확한 측정을 위하여 초음파 검사기법의 적용 가능성을 확인하였으며, 연구결과를 증기발생기 튜브 검사에 적용할 경우 검사결과가 크게 향상 될 것으로 기대된다.

**주요용어:** 증기발생기, 비파괴검사, 초음파 검사, 펄스-에코법, 결함 평가

**Abstract** A steam generator of nuclear power plant has thousands of thin tubes. These tubes play an important role in maintaining the pressure boundary between the primary and secondary side of nuclear power plant. The steam generator tube is easy to be damaged because of the severe operating conditions such as the high temperature and pressure. Therefore, tremendous efforts are made to assess the structural integrity of the steam generator tubes. The eddy current test is the most popular non-destructive test to assess the integrity of the tubes. However, the eddy current test has the limitation to size the flaw accurately because the eddy current signal behavior depends on the total volume of flaw. This paper shows the possibility that the ultrasonic test method can be applied to detect the flaws in the steam generator tubes and to measure them quantitatively. From the test results, it is expected that if the ultrasonic test is put to practical use in the steam generator tube inspection, the inspection results will be improved.

**Keywords:** Steam Generator, Non-Destructive Evaluation, Ultrasonic Testing, Pulse-Echo Method, Flaw Sizing

#### 1. 서 론

원자력발전소의 증기발생기 전열관은 방사성 물질이 존재하는 1차측과 방사성 물질에 오염되지 않은 2차측의 압력경계를 이루는 설비로서 증기발생기의

전열관 손상으로 인한 파단이 발생할 경우 1차측의 방사성물질이 누설되어 중대사고로 이어지게 되므로 원전의 안전성에 중요한 영향을 미치는 설비이다. 따라서 증기발생기의 전열관 손상이나 파손 문제는 원자력 발전소의 수명과 밀접한 관계가 있다고 할

수 있다. 현재까지 알려진 증기발생기 전열관 손상의 원인에는 여러 가지가 있으나 주 원인으로는 1차 측인 튜브의 내경에서 발생된 응력부식균열(PWSCC, Primary Water Stress Corrosion Cracking)과 2차 측인 튜브 외경에서의 응력부식균열(SWSCC, Secondary Water Stress Corrosion Cracking)이 결합의 60%를 차지하고 있어 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타나 있다[1]. 이외에도 증기발생기는 고온 고압의 운전조건으로 인하여 프레팅과 같은 피로균열 및 마모, 덴팅(denting), 피팅(pitting) 등의 다양한 손상을 받게 된다. 국내 증기발생기 전열관에서 발생하는 가장 빈번한 손상은 1차측 응력부식균열과 마모에 의한 것이다. 특히 1차측 응력부식균열은 전열관의 내면에서 균열이 발생하여 전열관의 관두께를 따라 외면 쪽으로 균열깊이가 깊어지는 형태의 균열이다. 이때 균열의 길이가 전열관의 길이방향으로 성장하는 축방향 균열과 전열관의 둘레를 따라 성장하는 원주방향 균열로 나눌 수 있으며, 국내 원전에서는 두 가지 형태의 균열이 모두 발생한 바 있다[2]. 현재 국내 원자력발전소 가동중검사 기간 중 수행되는 증기발생기 전열관 검사는 와전류검사(eddy current test)에 의하여 수행되고 있다. 와전류검사는 빠른 검사 속도와 검사의 편리성이라는 장점이 있으나 와전류에 의한 결합 검출 원리의 특성상 검출된 결함의 크기는 결함의 체적에 의하여 평가되므로 결함의 정확한 크기를 평가하기에는 제한사항이 존재하게 된다. 초음파를 이용한 증기발생기 튜브 검사는 1981년 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 "PWR Steam Generator Examination Guideline" 요건이 작성됨에 따라 검사 요건을 만족하기 위하여 다양한 검사기법을 개발하기 위하여 시작이 되었다 [3]. L. Gay는 회전형 초음파 탐촉자를 이용하여 증기발생기 튜브검사 및 적용성을 보였으며[4], Kenefick 등은 초음파를 이용한 증기발생기 튜브검사 및 위상배열검사기법을 이용한 증기발생기 튜브 검사기술 개발에 관한 연구를 수행하였다[5-7]. 국내에서는 초음파를 이용한 증기발생기 튜브의 결함 검출 및 크기평가에 관한 연구사례가 아직까지 전무한 실정이다.

본 연구에서는 와전류검사에 의하여 발견된 결함의 크기를 정밀하게 측정하기 위하여, 증기발생기 전열관 튜브내부에 5개의 고주파 집속형 초음파 탐촉자가 배열된 배열형 탐촉자를 증기발생기 튜브에 삽입하여 전열관 두께에 대하여 체적검사(volumetric

examination)를 수행하였다. 본 연구에서는 증기발생기 전열관 결합의 크기평가를 초음파를 이용하여 실험적으로 검증함으로써 원자력발전소 증기발생기 튜브에 대한 초음파검사의 정확성과 신뢰성을 입증하고자 하였다.

## 2. 시험편 및 시험방법

### 2.1. 탐촉자 설계

증기발생기 전열관에는 SCC(Stress Corrosion Crack)와 같은 균열성 결함외에도 마모(wear), bulge, dent 등의 다양한 결함이 발생된다. 이와 같은 다양한 결함들은 축방향 또는 원주방향의 방향성을 가지고 있으므로 전열관 검사시에는 모든 방향에 대하여 검사를 수행하여야 한다. 본 연구에서는 실험을 위하여 16 mm 직경의 원통형 몸체에 5개의 탐촉자를 배열하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 배열형 탐촉자를 나타내었다. 본 실험에서 사용한 탐촉자에는 하나의 수직 탐촉자와 4개의 사각 탐촉자가 배치되어 있다. 4개의 사각탐촉자는 모두 튜브내부에서 45도 횡파가 생성되도록 입사각도를 조절하여 설계를 하였다. 4개의 탐촉자 중에서 2개의 탐촉자는 원주방향으로 주사를 하여 축방향 결함을 검출하도록 하였으며, 나머지 2개의 탐촉자는 축방향으로 주사를 하여 원주방향으로 발생된 결함을 검출하도록 하였다. 수직 탐촉자는 전열관 두께변화 및 마모를 검사하도록 하였다. 탐촉자 배열부 상부 및 하부에는 검사대상과 일정한 거리를 유지하기 위한 Centering 장치들 부착하여 lift-off에 의한 영향을 최소화 하였다.

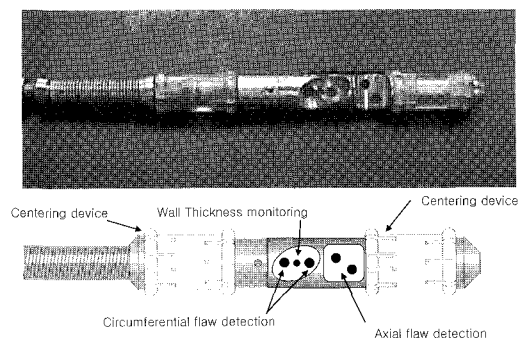


Fig. 1 The ultrasonic probe for steam generator tube experiment

또한 각 탐촉자는 15 MHz의 고 주파수 탐촉자로 서 전열관 튜브의 외경에 초음파 빔이 집중되도록 집중형 탐촉자로 설계하였다.

축방향 및 원주방향 결함검출을 위한 탐촉자의 제작을 위한 굴절각도 결정을 위하여 Ray tracing 모델링을 수행하였다. 모델링 결과 축방향 결함검출을 위한 탐촉자는 튜브내부에서 45°의 굴절각을 가지게 하기 위하여 10.5°의 각도로 탐촉자를 기울였다. 원주방향 결함검출을 위한 탐촉자 또한 튜브내부에 45°의 굴절각을 가지도록 하기 위하여 탐촉자를 수직으로 입사하면서 탐촉자를 중심점에서 약 1.78 mm 편차를 두었다. Fig. 2는 Ray Tracing 모델링에 대한 결과를 나타낸 그림이다. 모델링 시 전열관의 횡파속도는 3020 m/s이며 튜브내부는 물이 있다고 가정을 하였다. 제작후 각 진동자에 대한 초음파 특성평가 결과는 Table 1과 같다. 이때 사용한 타깃의 지름은 3.2 mm이다.

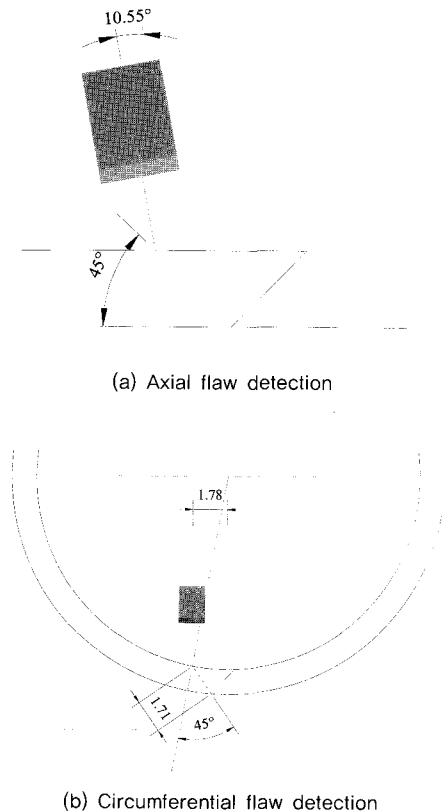


Fig. 2 Ultrasonic ray trace modelling result to determine incident angle of steam generator tube for axial and circumferential oriented flaws detection

Table 1 Ultrasonic characteristic measurement of each element(at -6dB)

| Ch. no  | Focal distance (mm) | Beam diameter (mm) | Depth of field (mm) | Center frequency (MHz) |
|---------|---------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| 0°      | 10                  | 0.51               | 11.6                | 14.7                   |
| 45° DN  | 14.1                | 0.36               | 6.4                 | 14.1                   |
| 45° UP  | 13.8                | 0.33               | 6.7                 | 13.8                   |
| 45° CW  | 15.5                | 0.30               | 6.2                 | 15.5                   |
| 45° CCW | 14.7                | 0.30               | 6.7                 | 14.7                   |

2.2. 시편

본 연구에서는 PWSCC 및 ODSCC 결함이 빈번하게 발생되는 것으로 알려진 울진 1, 2호기의 증기발생기를 대상으로 실험을 수행하였다. 울진 1, 2호기 증기발생기 전열관은 외경이 22.22 mm이며 두께는 1.27 mm인 Framatom형 증기발생기로서 튜브의 상세한 사양은 Table 2와 같다. Framatom형 증기발생기 전열관은 웨스팅하우스 또는 CE형 증기발생기 전열관에 비하여 직경이 가장 크다.

Table 2 Specification of steam generator tube specimen

| Material    | Diameter | Thickness |
|-------------|----------|-----------|
| Inconel 600 | 22,22 mm | 1,27 mm   |

본 연구에서는 균열성 결함의 검출 실험을 위하여 울진 1, 2호기 증기발생기 전열관과 동일한 시편을 이용하여 EDM(Electric Discharge Machining) Notch가 가공된 전열관 시편을 제작하였다. 시편내에는 여러 가지 방향성을 가지는 결함을 모의하기 위하여 원주방향 결함과 축방향 결함을 다양한 깊이에 대하여 가공을 하였다. Fig. 3은 본 연구에서 제작한 노치 시험편의 상세치수 및 배열을 나타내었다.

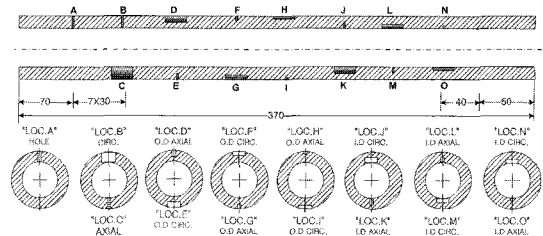


Fig. 3 Test tube drawing for the steam generator ultrasonic testing experiment with artificial flaws

Table 3은 Fig. 2의 각 결함에 해당하는 깊이와 결함의 위치를 나타내었다.

Table 3 Dimensions of the each EDM flaws embedded in experimental tube

| No | Location | Flaw Orient. | Depth [%] | Width [mm] | Length [mm] |
|----|----------|--------------|-----------|------------|-------------|
| A  | N/A      | Hole         | 100       | 1.69       | 1.69        |
| B  | N/A      | Circ.        | 100       | 0.14       | 9.54        |
| C  | N/A      | Axial        | 100       | 0.14       | 9.53        |
| D  | OD       | Axial        | 60        | 0.15       | 9.54        |
| E  | OD       | Circ.        | 60        | 0.15       | 9.54        |
| F  | OD       | Circ.        | 40        | 0.14       | 9.53        |
| G  | OD       | Axial        | 40        | 0.14       | 9.52        |
| H  | OD       | Axial        | 20        | 0.14       | 9.51        |
| I  | OD       | Circ.        | 20        | 0.14       | 9.51        |
| J  | ID       | Circ.        | 60        | 0.15       | 9.54        |
| K  | ID       | Axial        | 60        | 0.15       | 9.54        |
| L  | ID       | Axial        | 40        | 0.14       | 9.53        |
| M  | ID       | Circ.        | 40        | 0.14       | 9.52        |
| N  | ID       | Circ.        | 20        | 0.14       | 9.52        |
| O  | ID       | Axial        | 20        | 0.14       | 9.52        |

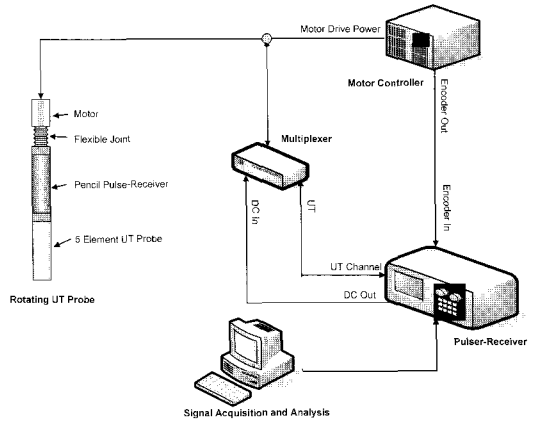


Fig. 4 The schematic diagram for experiment system

### 2.3. 실험 장치 구성

증기발생기 전열관 튜브 초음파 검사 시스템은 크게 초음파 시스템과 수직 구동부(vertical work bench) 두개의 부분으로 나누어진다. 초음파 시스템은 아래 Fig. 4와 같이 구성되어 있다.

초음파 시스템의 펄스-리시버는 RD-Tech사의 Tomoscan III를 사용하였으며, Multiplex를 펄스-리시버와 탐촉자 사이에 설치하여 5개의 탐촉자에서 하나의 케이블을 이용하여 신호를 송수신할 수 있도록 시스템을 구성함으로써 전열관내로 삽입되는 케이블의 직경을 최소화하였다. 모터 컨트롤러는 탐촉자 몸체가 360° 회전하면서 튜브의 축방향으로 진행할 수 있도록 2축 제어용 모터 컨트롤러를 사용하였다.

수직 구동부는 실험용 증기발생기 전열관을 고정하고 회전하는 탐촉자를 수직으로 전열관 내부로 이송할 수 있도록 제작되었으며 Fig. 5와 같다. 주사 형태는 나선형으로서 원주방향으로 회전하면서 축방향으로 이송하며 실험을 수행하였다. 탐촉자의 원주방향 회전속도는 초당 90도이며, 축방향 이송속도는 0.125 mm/s로써 데이터를 취득 하였다.

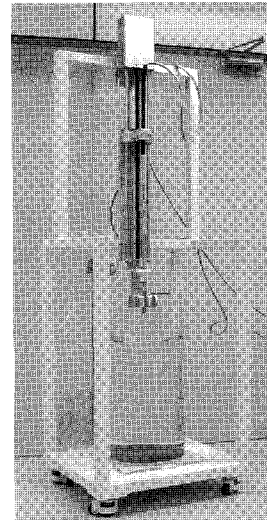


Fig. 5 Experimental apparatus for linear driving of rotating ultrasonic probe

### 3. 결과 및 고찰

증기발생기 전열관에 대한 결함검출 및 정량적인 결함 평가에 대한 초음파검사 실험 결과 전열관에 가공된 15개의 인공결함은 모두 검출이 되었다. Fig. 6은 0° 수직 탐촉자로부터 검출된 결함의 배열을 나타내었다. Fig. 6에서 수평방향은 튜브의 원주방향이며 수직방향은 튜브의 축방향을 나타낸다. 그림에서와 같이 15개의 결함이 모두 검출이 되었으며 결함의 기하학적인 형상 또한 시각적으로도 확인이 가능하였다. 본 실험에서 사용한 0° 탐촉자이외의 4개의 45° 횡파 탐촉자에 대하여도 모든 결함이 검출이 되었다.

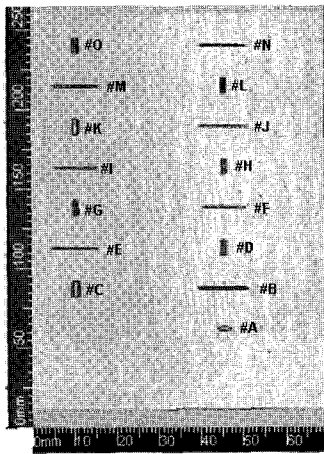


Fig. 6 The experimental result showing C-Scan image from 0 degree transducer signal

본 실험에서 사용된 전열관의 인공결함에 대한 결함의 길이 측정은 결점의 최고 진폭에서 신호가 6dB 수준으로 떨어지는 지점까지를 결점의 길이 및 폭으로 평가를 하였으며, 깊이 평가 기법은 기본적으로 결함의 끝단에서 회절된 초음파신호를 이용한 tip-diffraction 기법을 이용하였다. Fig. 7은 축방향 결함에 대한 노치 결함의 크기평가를 위한 그림이다. 왼쪽의 그림은 결함의 길이와 폭을 측정하기 위한 측정화면이며, 오른쪽은 결함의 깊이 측정을 위한 화면으로서 튜브 외경에 가공된 축방향 결함들만을 하나의 화면에 투영하여 모두 나타낸 그림이다. 결함 #A는 0.17mm 직경의 관통 구멍이며, #C, #D, #G, #H는 각각 100%, 60%, 40%, 20% 깊이 노치에 해당된다.

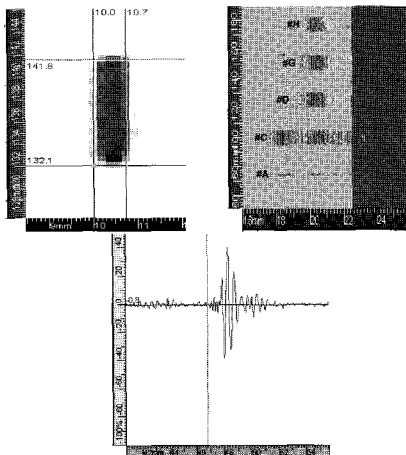


Fig. 7 The C/D-scan and A-scan images for flaw measurement

Fig. 8은 본 실험에서 측정된 노치의 길이와 폭 그리고 깊이를 실제 결함 크기와의 차이를 하나의 그래프로 나타낸 그림이다. 수평축은 결함의 번호이며 수직축은 실제의 치수에서 실험으로부터 측정된 치수의 오차를 나타내었다. 그래프에 나타낸 것과 같이 가장 많은 오차를 나타낸 것은 노치의 폭이며, 길이가 폭에 비하여 오차가 적게 나타났으며, 깊이가 가장 정확한 결과를 도출하였다. 길이 측정 결과의 최대 오차는 1.18 mm이며, 전체 결함에 대한 RMSE는 0.52 mm로 계산되었다.

RMSE는 아래의 식으로부터 산출하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - t_i)^2}{n}} \quad (1)$$

여기서  $m_i$  = 실험에서 측정된 결함의 길이 또는 깊이  
 $t_i$  = 실제 결함의 길이 또는 깊이  
 $n$  = 측정된 결함의 수

결함 폭에 대한 평가결과의 오차는 RMSE 0.55 mm로 실제의 결함보다 다소 크게 평가가 되었다. 이는 집속형 초음파 탐촉자를 사용하여 결함의 영역에서 초음파 빔의 초점을 최소화하고자 하였으나, 노치의 폭이 상대적으로 미소하여 노치 폭이 시작되는 양쪽 모서리에서 집속점의 중첩으로 인하여 0.12 mm의 미소폭을 가진 노치가 과대하게 평가된 것으로 사료되었다. 오차가 가장 적은 것으로 평가된 결함의 깊이에 대한 RMSE는 0.076 mm로서 tip-diffraction 기법으로 측정된 결과가 매우 정확하였음을 확인 할 수 있었다.

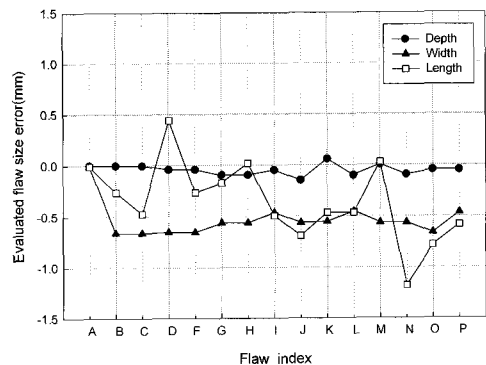


Fig. 8 Comparison of evaluated flaw size errors based on flaw length, width and depth for each flaws

#### 4. 결 론

원자력발전소 증기발생기 전열관의 내경과 외경에 다양한 형태의 인공결함을 가공하고 초음파 tip-diffraction 기법을 적용하여 결함의 검출 및 크기평가에 대하여 적용한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 초음파를 이용하여 증기발생기 전열관의 내부와 외부에 가공된 결함을 검출하고 크기를 정확하게 측정할 수 있었다.
- 2) 내경 및 외경에 가공한 모든 결함에 대하여 검출이 가능하였으며, 검출된 결함에 대하여 길이 측정을 수행한 결과 RMS 0.52 mm의 오차로 측정이 되었다.
- 3) 증기발생기 전열관 두께의 20%에서 100% 관통홀까지 결함의 깊이를 측정한 결과 RMS 0.07 mm의 정확한 측정 결과를 얻을 수 있었다.
- 4) 향후 폐기된 원전 증기발생기 전열관에 적용하여 실제 결함에 대한 측정결과를 도출하고 본 검사기술을 원전에 적용함으로써 증기발생기 검사에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대 된다.

#### 참고 문헌

- [1] 최명식, 허도행, 이덕현, 조세곤, 임창재, 한정호, "증기발생기 전열관의 입계부식에 대한 와전류 검사 신호특성", 비파괴검사학회지, 22권, 2호, pp. 198-199, (2002)
- [2] 최명식, 허도행, 이덕현, 박중암, 한정호, "증기발생기 전열관의 내면 축방향 균열에 대한 ECT 특성 평가", 비파괴검사학회지, 21권, 5호, pp. 501-509, (2001)
- [3] M. Behraves, G. Henry, "Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines," Revision 6", EPRI NDE Center, TR-1003138, (2002)
- [4] L. Gay, R. Bourgogne, "Steam Generator Tubes: Crack Sizing by Ultrasonic Inspection Using a Rotating Multi-Transducers Probe" Proceedings of the 7th European Conference on Non-Destructive Testing, pp. 26-29(1998)
- [5] S. Kenefick, G. Henry, "Field Implementation of Ultrasonic Crack Tip Diffraction Sizing Techniques in Steam Generator Tubing at Comanche Peak Steam Station," EPRI NDE Center, TE-114508, pp. 1-2, (1999)
- [6] S. Kenefick, "Recent Applications of Ultrasonic Examination of Steam Generator Tubes," 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, EPRI, Vol. 3, pp. 3-5, (2000)
- [7] S. Kenefick, G. Henry, "Phased Array Ultrasonic Inspection of Steam Generator," EPRI NDE Center, TE-114394, pp. 1-2, (1999)