

증기발생기 전열관의 균열성 결함에 대한 와전류 신호 평가

강 기 원

An Analysis of Eddy Current Signals for the Crack-like Defects in the Steam Generator Tubes

Ki Won Kang

Abstract. The steam generator tubes of the nuclear power plant should be inspected using eddy current techniques. Recently the crack-like defects become a major concern for the integrity of the steam generator tubes. These defects could be detected by the MRPC(Motorized Rotating Pancake Coil) method, not by the conventional bobbin coil method. In this paper it has been attempted to estimate the length of the cracks at the tube expansion region using of MRPC technique. The lengths of both axial and circumferential cracks show a tendency of overestimation compared to the real lengths. As the depths of the defects decrease from 100% through 50% of the wall thickness, the error of the length estimation is increased.

1. 서 론

국내 원자력발전소의 증기발생기 전열관 손상 원인으로서는 denting, pitting, fretting wear, 응력부식균열 등이 있는데 와전류탐상법에 의해 이들 결함이 탐지, 평가되고 있다. 특히 응력부식균열결함은 tubesheet crevice영역, row-1 U-bend transition영역, tubesheet roll transition영역 등에서 주로 발생하고 있는데 이들 결함신호는 외부구조물, 전열관의 기하학적 변화 등에 의한 신호

와 복합적으로 나타나므로 종래의 bobbin coil탐촉자를 사용하는 와전류탐상법으로는 결함신호를 정확히 분류하고 평가하는데 어려움을 주고 있다.

증기발생기에서 결함이 탐지되면 보수규정에 근거하여 사후조치를 수행하여야 하는데 fretting wear 등과 같은 체적성 결함에 대해서는 ASME code section XI에 따라 결함깊이를 기준으로하여 관막음을 시행하고 있지만 균열 결함과 같은 비체적성 결함은 정확한 깊이 측정이 어려워서 ASME code

를 적용할 수 없으며 균열결함을 위한 보수 규정이 따로 명시되어 있지 않기 때문에 벨기에나 프랑스 등 유럽 국가의 경우 균열 길이를 측정하여 균열 길이에 따른 관막을 기준을 설정해 놓고 있다.^(1, 2)

와전류탐상법에 의한 응력부식결함의 깊이를 정확히 측정하기가 곤란하므로 균열의 길이를 전열관 건전성 판단의 변수로 택하는 것은 타당하다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 tubesheet 확관부위에서 발생하는 균열결함을 방전가공으로 모사하고 균열결함 탐지능력이 뛰어난 MRPC(Motorized Rotating Pancake Coil) 탐촉자를 사용하여 결함의 깊이를 평가함으로써 균열결함에 대한 와전류 신호 평가 기술 향상에 기여하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 시편제작

본 실험에 사용한 시편은 고리원자력 1호기 증기발생기 전열관과 동일한 규격과 재질로써 외경 0.875inch(22.23mm)이고 두께 0.05inch(1.27mm)이며 재료는 Inconel 600인 tube를 사용하였다. Tube에 기계식 확관을 시행한 후 확관부위 외면에 Fig. 1과 같이 축방향 및 원주방향으로 폭 0.2mm, 길이 2, 4, 6, 8mm로 하고 각각의 길이에 25%, 50%, 75%, 100% 깊이로 방전가공을 하였다. (결함 깊이는 tube 두께대비 백분율(%)로 나타내었다.)

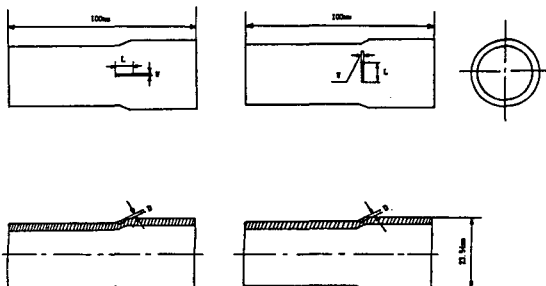


Fig. 1 Specimen shape

2.2. 실험장비 및 방법

실험장비는 미국 Zetec사 MIZ-18 digital data acquisition system과 DDA-4 digital data analysis system을 사용하였다. MIZ-18 system의 구성은 HP 9836A computer, 교류를 발전하는 remote data acquisition unit (RDAU)로부터 나오는 신호를 받아 computer에 보내는 HPIB interface unit, 신호를 기록 재생할 수 있는 HCD 75Z data cartridge recorder, HP 2671G graphics printer 및 탐촉자의 scanning 속도를 일정하게 유지하기 위해 computer controlled scanner 등이 사용되었으며 Fig. 2에 실험장비의 block diagram을 나타내었다. ASME standard 보정시험편을 사용하여 기준보정을 실시하였고 주파수는 400, 300, 200, 100kHz를 사용하였으며 탐촉자 인출속도는 0.2inch/sec로 하였다. 실험에 사용된 탐촉자는 미국 Zetec사 제품 MRPC-720-3C/7PH인데 유도된 와전류가 결함과 직각인 평면형 코일, 축방향으로 와전류를 형성시켜 원주방향의 결함의 탐지에 민감하도록 제작한 원주방향 결함 감지코일, 축방향 결함 감지코일 등 3개의 코일로 구성되어 있으며 Fig. 3과 같이 나선형 주사(helical scanning)를 함으로써 360도 방향 전부를 검사할 수 있도록 설계되어 기존의 bobbin coil 탐촉자와 8X1 array coil 탐촉자의 단점을 보완했을 뿐만 아니라 결함의 형태를 C-scan display로 나타낼 수 있으므로 결

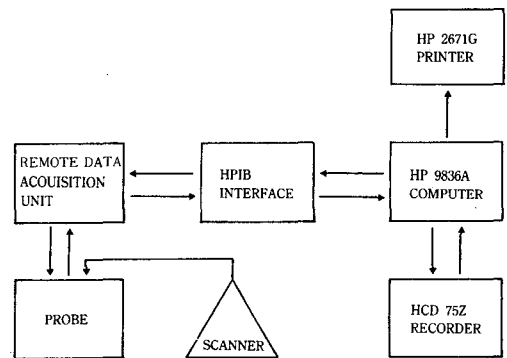


Fig. 2 Block diagram of experimental equipment

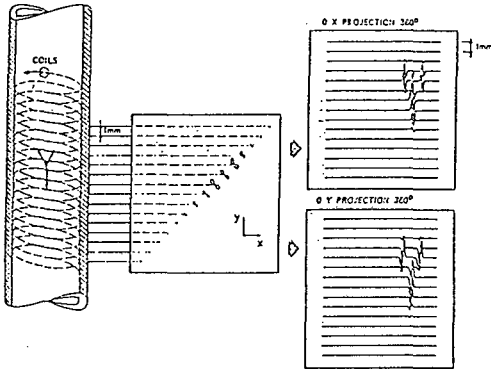


Fig. 3 Principle of the helical scan of the Motorized Rotating Pancake Coil(MRPC) and display

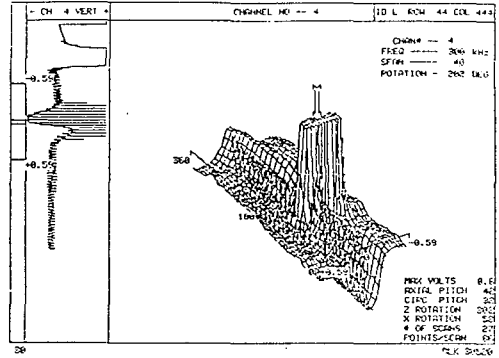


Fig. 4(a) C-scan display of the 100% through wall defect(axial, 8mm)

함 형상의 단면적, 결함의 길이, 방향 등 결함 특성의 관찰에 용이하도록 되어있다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4의 a)와 b)는 폭 0.2mm, 길이 8mm의 100% 관통된 축방향결함에 대한 C-scan display와 clip plot 그림이며 Fig. 5는 각각 결함길이 2, 4, 6, 8mm인 100% 관통결함에 대한 길이 측정 결과 그래프인데 모든 주파수에서 측정결과가 실제 결함길이보다 과대평가됨을 보여주고 있다. Fig. 6, 7은 결함깊이가 감소될 경우 (관 두께 대비 75%, 50%)인데 100% 관통결함보다 측정된 결함길이 감소됨을 보여주고 있다. Fig. 8은 원주방향 100%관통결함에 대한 길이측정 결과 그래프이고 Fig. 9, 10은 각각 원주방향 75%, 50%에 대한 길이측정 결과 그래프이다. 50%결함 일부와 25%결함 전체에 대해서는 축방향, 원주방향결함 모두 결함길이 측정이 곤란하였다. 축방향결함과 원주방향결함의 길이 측정시 100% 관통된 결함에서 실제 결함길이보다 과대평가되었는데 이것을 C.V Dodd⁽³⁾등에 의해 제안된 와전류현상의 해석 제작된 프로그램⁽⁴⁾을 기초로 컴퓨터 simulation하여 나타난 결과로 설명하면 다음과 같다. Fig. 11과 같이 코일의 공칭반경을 r 로 나타내고 코일과 결함사이의 간격을 0에

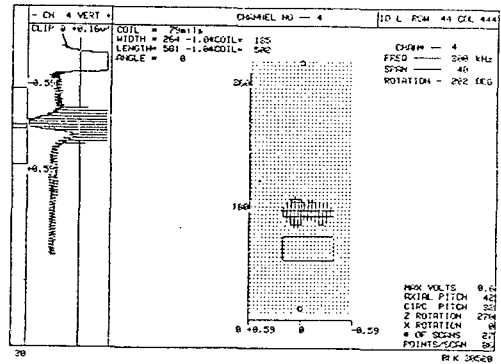


Fig. 4(b) Clip plot display of the 100% through wall defect(axial, 8mm)

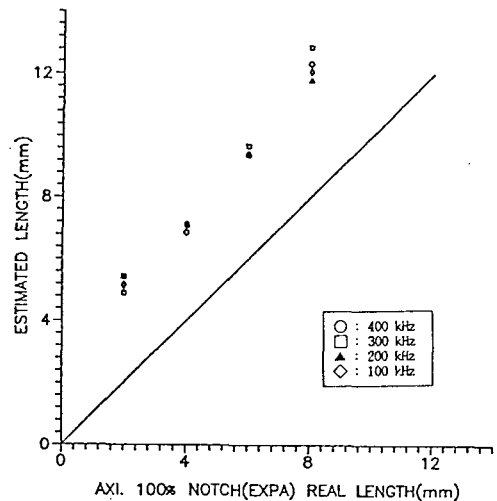


Fig. 5 Experimental result of the 100% through wall defects(axial)

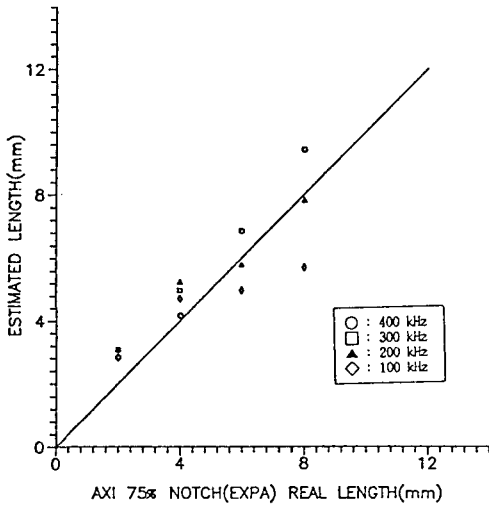


Fig. 6 Experimental result of the 75% through wall defects(axial)

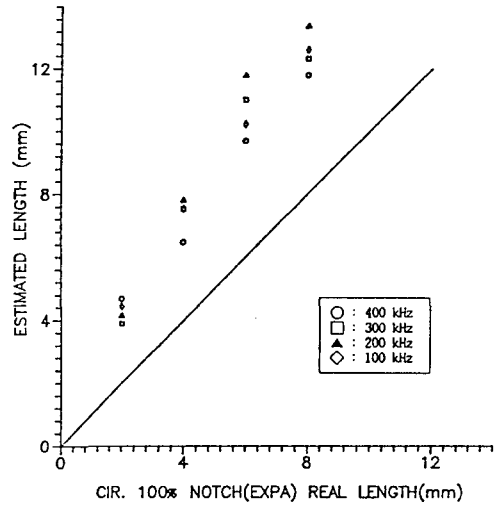


Fig. 8 Experimental result of the 100% through wall defects(circumferential)

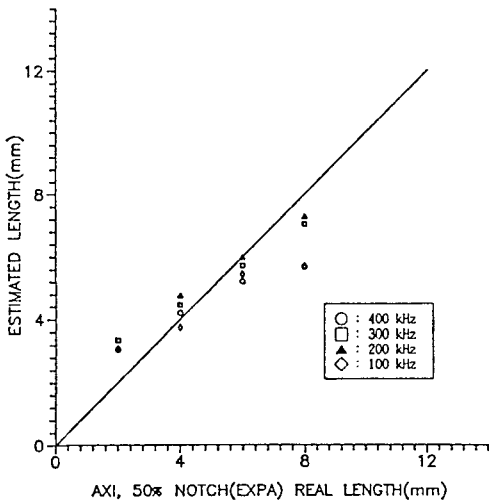


Fig. 7 Experimental result of the 50% through wall defects(axial)

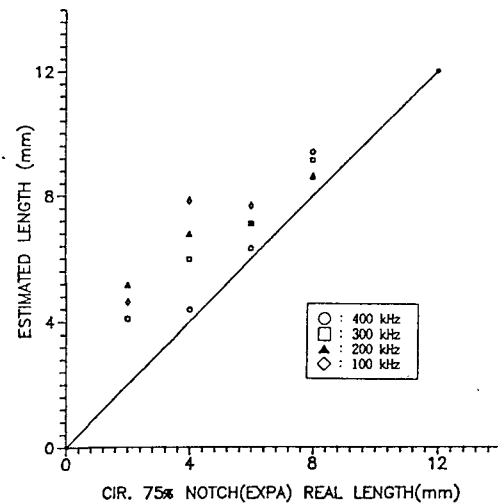


Fig. 9 Experimental result of the 75% through wall defects(circumferential)

서 시작하여 \bar{r} , $2\bar{r}$, $3\bar{r}$ 로 증가 시킬 때 결함으로 부터의 임피던스 변화를 거리의 함수로 plot하면 Fig. 12와 같이 약 $3\bar{r}$ 거리에 결함이 있을 때에도 코일은 이를 감지하여 임피던스 변화가 나타나기 시작하며 거리가 가까와 짐에 따라 임피던스가 증가하여 거리 \bar{r} , 즉 코일의 공칭반경 직하에 결함이 위치할 때 최대값을 나타낸 뒤 $\bar{r} < 1$, 즉 결함이 코일 반경 안쪽으로 이동함에 따

라 감소하여 $\bar{r} = 0$, 즉 코일의 중심에서는 0의 값을 나타낸다. 이때 임피던스의 진폭은 거리가 약 $3\bar{r}$ 에서는 대략 noise 신호의 크기이내로 제한되고 약 $2\bar{r}$ 에서 부터 noise 신호와는 구분 가능한 정도의 결함신호 amplitude가 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 13, 14에서와 같이 본 실험의 와전류신호로써 나타난 축방향과 원주방향 결함에 의한 신호를 확대하여 볼 때 실제 결함

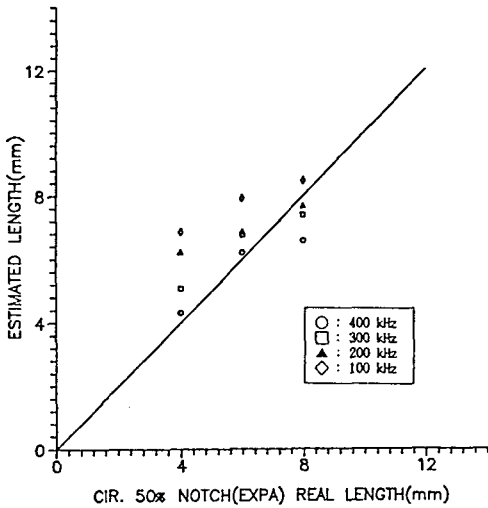


Fig. 10 Experimental result of the 50% through wall defects(circumferential)

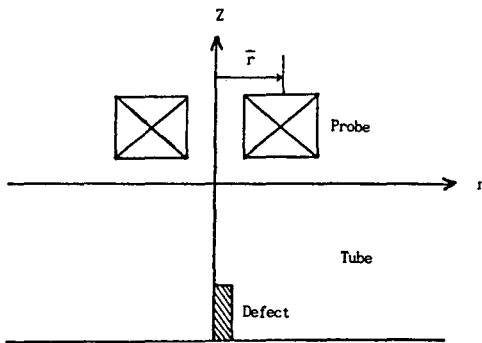


Fig. 11 The configuration of the defect and coil

이전과 이후에서 코일이 미리 결함을 감지하는 영향에 의하여 실제 결함크기보다 과대평가된 원인이라 생각되고 100%관통된 축방향 결함 및 원주방향 결함길이 측정시 과대평가된 크기의 정도는, 즉 코일이 결함의 edge부분 전방 $2\bar{r}$ 정도부터 임피던스가 감지되므로 실제 결함 길이에 전방 $2\bar{r}$, 후방 $2\bar{r}$ 을 고려한 만큼 과대평가된 것으로 예측되는데 본 실험에 사용된 코일의 반경이 1mm이므로 약 2~4mm정도 과대평가되었다고 판단된다. 그러나 결함깊이가 감소하게 되면 (관두께 대비 75%, 50%) 결함깊이 측정값은 축방향, 원주방향결함 모두 100%

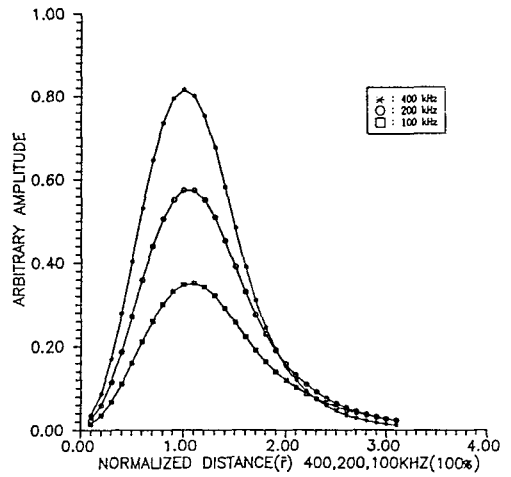


Fig. 12 The variation of the defect signal amplitude with the distance change between defect and coil(100% through wall defect)

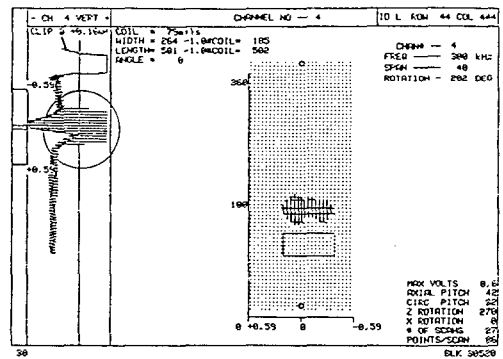


Fig. 13 The magnified signal of axial defect on the strip chart

관통된 결함보다 감소하였는데 이는 Fig. 15, 16에서와 같이 탐촉자의 결함에 대한 임피던스의 amplitude도 감소할 뿐만 아니라 와전류밀도는 결함깊이에 따라서 지수함수적으로 감소한다는 와전류 이론에 근거를 두어서 생각하면 과대평가 정도가 100%관통결함에 비하여 감소되었다고 사료된다.

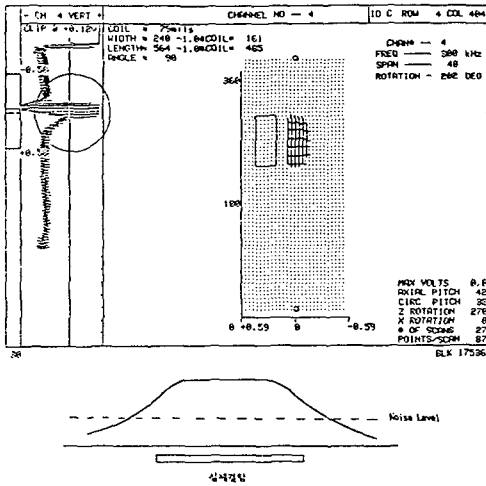


Fig. 14 The magnified signal of circumferential defect on the strip chart

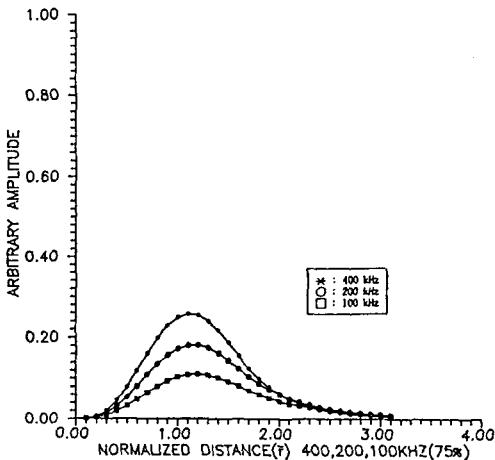


Fig. 15 The variation of the defect signal amplitude with the distance change between defect and coil(75% through wall defect)

4. 결 론

100% 관통된 축방향결함과 원주방향결함의 길이 측정시 실제 결함보다 약 2~4mm 정도 과대평가되었고 그 이유는 코일이 결함 전, 후 $2r$ (r : 코일 반경)부터 임피던스변화를 감지하기 때문에 실제 결함 길이 전, 후방 $2r$ 을 고려한 길이만큼 과대평가되었고 결함깊이가 감소(관벽대비 75%, 50

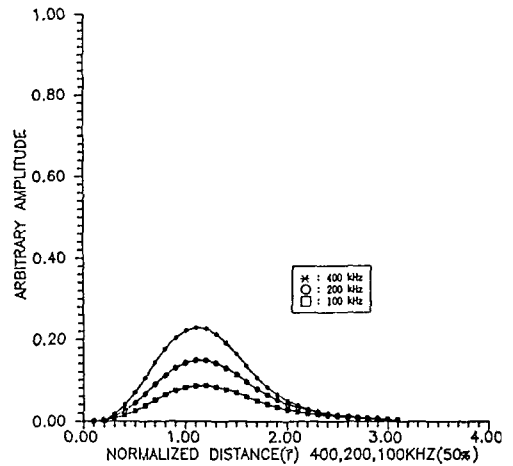


Fig. 16 The variation of the defect signal amplitude with the distance change between defect and coil(50% through wall defect)

%)할때 길이 측정값은 100%관통결함보다 감소하였지만 길이측정 오차는 컸다. 균열성 결함의 깊이 측정 방법이 개발된다면 길이 측정 오차도 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

References

- 1) J. Mathonet, P. Hernalsteen, "Belgian Tube Criteria for PWSCC Circumferential Cracks", EPRI Workshop on Circumferential Cracking of S/G Tubes, Feb.19 90, pp22~23
- 2) R. Comby, B.Flesch, F. De Keroulas, "Circumferential Cracking of Franch Reactor Steam Generator Tubes in the Roll Transition Zones under the Effect of Stress Corrosion" EPRI Workshop on Circumferential Cracking of PWR S/G Tubes, Feb. 1990
- 3) C.V.Dodd, W.E.DEEDS, J.W.Luquire and W.G.Spoeri, Materials Evaluation, July, 1969, pp165~168
- 4) W.A.Simpson, C.V.Dodd, J.W.Luquire and W.G.Spoeri, "Computer Programs for Some Eddy Current Problems." ORNL-TM-3295. 1971 Oak Ridge National Lab.