

증기발생기 세관의 Bulge결함에 대한 보빈프로브 신호해석

이향범
승실대학교 전기제어시스템공학부

Analysis of Bobbin Probe Signal in Steam Generator Tube with Bulge Defect

Hyang-beom Lee
School of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - In this paper, analysis of bobbin probe signal in steam generator tube with bulge defect on CE system 80 nuclear power plant is represented. The CE system 80 steam generator is adopted in ULJIN-4 nuclear power plant. From Maxwell's equation, the electromagnetic governing equation for eddy current problem is derived and by performing the finite element formulation the 3-dimensional finite element code with brick element is developed. For the ease of the comparison the numerical results with experimental ones, the calculated signals are adjusted by using the ASME standard 100(%) through hole signal. For analysis of the effect of variation of the bulge depth on the impedance signal, 0.2[mm] and 0.4[mm] depth of bulge defect signals are calculated and analyzed. As the depth of the bulge defect is increased, the magnitude of the signal is increased, too. But the rate of the increment of the signal is less than that of the depth of defect. From the result of this paper, we can obtained the information of the effect of bulge defect on the impedance signal.

1. 서 론

산업화 및 경제의 발전에 따라 전력에너지 수급을 위하여 전 세계적으로 1950년대 이후 상업용 원자력발전소가 건설되기 시작하였다. 1970년대 전 세계를 강타한 석유파동으로 에너지의 중요성을 절감한 우리나라는 1978년 4월 준공된 고리 1호기를 시작으로 원자력 발전을 시작하였다. 1999년 12월 31일 울진 4호기가 상업운전을 시작함에 따라 1999년 말 현재 우리나라는 총 16기의 원자력발전소가 가동 중에 있다. 1999년 기준으로 원자력 발전설비는 총 1371만 6천[kW]로 전체 발전설비의 29.2%를 차지하고 있으며, 발전량은 103,064[GWh]로 전체 발전량의 43.1%를 차지하고 있다[1].

원자력발전소 증기발생기 전열관은 1차 계통인 원자로에서 2차 계통인 터빈발전기부분에 열을 전달하는 중간역할을 하면서 동시에 방사능차단벽으로서 중요한 기능을 하고 있다. 따라서 발전소 안전성 확보를 위하여 다른 부분과 마찬가지로 증기발생기 전열관에 대한 비파괴검사가 정기적으로 실시되고 있다. 이러한 증기발생기

전열관에 대한 건전성확보를 위한 비파괴검사방법으로는 와전류탐상법이 널리 사용되고 있다. 와전류탐상법은 교류전류가 인가된 탐상코일을 결함이 존재하는 도체관에 관통시켜 탐상코일단에서의 임피던스 변화를 획득하고, 이 신호로부터 결함의 유무, 크기 및 종류 등을 판단하는 방법이다. 결함의 정도를 정확히 판단 및 예측하기 위해서는 많은 탐상신호자료가 필요하다. 많은 탐상신호를 확보하기 위하여 시편을 제작하여 실험을 수행하면서 신호를 확보할 수도 있지만, 시간 및 비용이 많이 소모되므로, 수치해석프로그램을 이용하게 되면 상대적으로 빠른 시간에 적은 비용으로 많은 신호를 확보할 수 있게 된다[2].

본 논문에서는 울진 4호기에 채용되어 있는 CE System 80형 증기발생기 세관에 Bulge형 결함이 있는 경우 와전류탐상 프로브에 나타나는 신호를 해석하였다. Bulge형 결함은 관 바깥부분으로 볼록하게 튀어 나가는 결함으로, 튜브시트(tube sheet)의 확장세관에서 나타나기도 하는 결함형태의 하나이다. 또한 Bulge형 결함에 부피성결함이 있는 경우의 신호변화에 대하여 살펴본다. 또한 실제 현장에서 얻을 수 있는 신호와 유사한 결과를 얻기 위하여 ASME 표준결함에 대하여 신호를 얻은 후, 이 신호를 기준으로 각 결함에 대한 신호를 교정하였다[3].

2. 와전류탐상 수치해석

비파괴검사는 검사대상인 재료, 부품, 구조물 등에 손상을 가하거나 파괴하지 않고 내부 및 외부에 존재하는 불연속 또는 결함을 탐지하거나 물성값을 판단하는 기술이다. 비파괴검사방법 중 와전류탐상법은 금속 등의 도체에 시간적으로 변화하는 자속을 인가하면 도체의 내부에는 와전류가 유도되고 도체 내에 균열 등의 불연속이 존재하면 그 크기와 분포가 변화하는 와전류의 변화를 이용해 결함을 검출하는 방법이다. 자속이 시간적 변화에 따라 도체 내에 와전류의 유도 및 와전류에 의한 반작용의 검출은 전자유도법칙을 기초로 하므로 와전류탐상시험을 전자유도시험이라고도 한다. 교류를 코일에 흘려 보내 자속을 발생시키고 그 코일을 시험 도체에 근접시켜 코일의 임피던스 변화 또는 코일에 유기되는 전압 변화를 검출한다. 시험품에 생기는 와전류는 균열 등 결함의 존재 외에 시험품의 도전율, 투자율, 형상 치수 및 코일과 시험품간의 거리등 여러 가지 영향을 받는데 이러한 변화는 시험의 지시로써 나타난다. 따라서, 와전류탐상시험은 검출 대상이 되는 인자에 의해 탐상 시험, 재질 시험, 막두께 측정, 치수 시험 등 많은 분야에 적용된다.

각 결함에 대한 와전류탐상신호를 얻기 위한 전자기수치해석방법으로 3차원 유한요소법을 사용하였다. 와전류탐상문제는 전자기적으로 교류자장문제이다. 이를 해석하기 위해서는 와전류탐상문제를 기술하는 맥스웰방정식[4]을 사용하여 지배방정식을 구한다. 이 지배방정식과

경계조건으로부터 유한요소정식화를 거쳐 와전류탐상용 3차원유한요소해석프로그램을 완성한다(5-6). 사용되는 요소망은 육면체요소망이며, 변수로 자기벡터포텐셜 및 전기스칼라포텐셜을 사용한다. 계산된 포텐셜로부터 임피던스를 계산하여 와전류탐상신호를 확보하게 된다.

와전류탐상을 기술하는 맥스웰방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

여기서, \vec{H} 는 자계의 세기, \vec{J}_s 는 전원전류밀도, \vec{J}_e 는 와전류밀도, \vec{E} 는 전기계의 세기, \vec{B} 는 자속밀도이다. 여기에 추가되는 방정식은 다음과 같다.

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

여기서 σ 는 도전율이며, μ 는 투자율이다. 위 식들로부터 지배방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_s - j\omega \sigma \vec{A} - \sigma \nabla \phi \quad (6)$$

여기서, \vec{A} 는 자기벡터포텐셜이며, ϕ 는 전기스칼라포텐셜, ω 는 각주파수이다.

위의 지배방정식 및 경계조건인 자연경계조건 및 고정경계조건에 유한요소정식화과정을 수행하면 다음 식과 같은 대형방정식이 얻어진다.

$$[K]\{x\} = \{f\} \quad (7)$$

여기서, $[K]$ 는 시스템행렬, $\{x\}$ 는 미지수벡터, $\{f\}$ 는 구동벡터이다. 식 (7)을 계산하여 미지수인 포텐셜을 구하고, 이 포텐셜로부터 임피던스를 계산하게 되면 원하는 와전류탐상신호를 획득하게 된다.

3. 해석 결과

Bulge 결함의 크기변화에 따른 와전류탐상신호의 변화를 살펴보기 위하여 수치해석을 수행하였다. 해석대상은 울진 4호기 원자력발전소의 CE System 80형 증기발생기에서 사용되는 Inconel 600HTMA로, 해석대상에 대한 사양은 표 1에 나타내었다.

표 1. 해석대상의 사양

항목	값	항목	값
Pipe 외경	19.0500[mm] 0.7500[in.]	Pipe 내경	16.9164[mm] 0.6660[in.]
Pipe 두께	1.0668[mm] 0.0420[in.]	Coil 두께	1.5000[mm] 0.0591[in.]
Coil 외경	15.4500[mm] 0.6083[in.]	Coil 내경	12.4500[mm] 0.4902[in.]
Pipe 재질	Inconel 600HTMA	Pipe 도전율	1.1x10 ⁶ [S/m]
주파수	550[kHz]	Skin Depth	0.6471[mm] 0.0255[in.]
Bulge 길이	80.0[mm] 3.1496[in.]	Bulge 폭	9[mm]
Bulge 깊이	① 0.20[mm], 0.0079[in.] ② 0.40[mm], 0.0157[in.]		

사용된 프로브는 차동프로브(differential probe)이며, 해석값은 절대프로브 및 차동프로브의 값을 모두 나타내었다. 수치해석을 통해 얻어진 탐상신호는 ASME 표준결함을 이용하여 교정되어야 한다. 이는 사용하는 장비에 따라 측정되는 값의 차이를 최소화하고, 출력을 표준화하기 위한 기준으로 검사를 수행하는 대상체의 크기에 따라 결함이 다르다. 교정을 위하여 사용되는 결함은 100[%] 관통결함이다. 100[%] 관통결함은 도체관 직경이 3/4 [in.]이하인 경우 직경이 0.0052[in.]인 관통결함, 도체관 직경이 3/4[in.]를 초과한 경우 직경이 0.0067[in.]인 관통결함이다[2]. 따라서, 본 논문에서는 판의 직경이 3/4[in.]이므로 직경이 0.0052[in.]인 100[%] 관통결함의 탐상신호를 이용하여 탐상신호를 교정하였다. 3차원 유한요소해석 프로그램으로 정확한 원을 구현하기 어렵기 때문에 면적이 동가인 사각형으로 표현하였으며, 이 동가 사각형 표준결함을 이용하여 기준결함신호를 생성하였다.

그림 1은 ASME표준결함에 대한 교정 전의 차동임피던스신호이다. 100[%] 관통결함을 지나는 차동프로브의 차동임피던스의 좌측하단신호가 (-X)축으로부터 시계방향으로 40°의 위치에 와야 한다. 따라서 550 [kHz]를 사용하는 경우 신호는 반시계방향으로 71°만큼 회전시켜야 한다. 그림 2에 교정된 신호를 나타내었다.

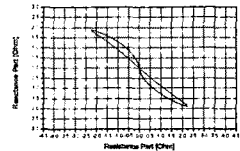
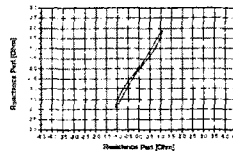


그림 1. 교정 전의 기준신호

그림 2. 교정 후의 기준신호

본 연구에서는 Bulge결함의 변화에 대한 신호를 살펴보기 위하여 Bulge의 크기를 반경방향으로 0.2[mm] 및 0.4[mm]로 변화시켜 신호를 생성하였다. 그림 3부터 그림 5에 0.2[mm] Bulge결함에 대한 신호를 나타내었으며, 그림 6부터 그림 8에 0.4[mm] Bulge결함에 대한 신호를 나타내었다. 이 신호들은 ASME표준결함인 100[%] 관통결함의 신호를 이용하여 교정되었다.

그림 3에서는 0.2[mm] Bulge결함의 절대 임피던스의 크기를 나타내었다. Bulge결함의 중심을 기준으로 절대프로브가 이동함에 따른 신호의 크기를 나타내고 있으며, Bulge결함이 발생하면 신호의 크기가 커지는 것을 살펴볼 수 있다. 그림 6의 0.4[mm] Bulge신호와 비교하면 반경방향으로 결함의 크기가 커짐에 따라 신호의 크기가 증가됨을 확인할 수 있다. 그림 3에서 전전부 위에 비하여 Bulge부분의 신호의 최대 차이가 50인데 반하여 그림 6에서의 신호의 최대 차이가 90정도로 결함의 크기에 비례하여 증가하지는 않는다는 것을 알 수 있다.

그림 4에서는 위치에 따른 차동임피던스의 변화를 나타내고 있다. 결함의 중심 및 결함에서 먼 부분에서는 차동프로브에 나타나는 임피던스의 크기가 유사하기 때문에 그 차가 영이 되지만, 결함의 변화가 나타나는 부분에서는 신호가 크게 나타난다. Bulge결함의 크기가 커짐에 따라 결함의 변화가 급격하고, 차동임피던스의 크기 또한 커지게 된다. 그림 5에서는 임피던스좌측상에 차동임피던스 신호를 나타내었다. 이 신호의 크기, 위상 등을 관찰하여 결함의 크기, 위치, 형상 등을 예측하게 된다. 그림 5 및 그림 8에서는 위상의 변화는 크게 나타나지 않으면서, 신호의 크기가 변하고 있음을 볼 수 있다. 그림 9부터 그림 18에서는 축방향으로 20[mm], 깊이 0.4[mm], 폭 9[mm]인 Bulge결함내부에 축방향으로 6.3[mm], 폭 3[mm]의 부피성결함의 깊이가 변화하는 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. 그림 9부터

그림 12에서는 내부결합의 깊이가 증가함에 따른 신호이며, 그림 13과 그림 14는 관통결합, 그림 15부터 그림 18은 외부결합에 대한 신호이다.

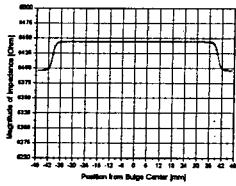


그림 3. 0.2[mm] Bulge결합의 절대임피던스 신호

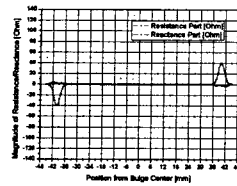


그림 4. 0.2[mm] Bulge결합의 차동임피던스 신호

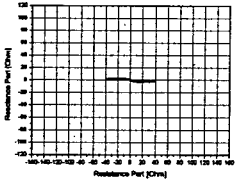


그림 5. 0.2[mm] Bulge결합의 차동임피던스 신호

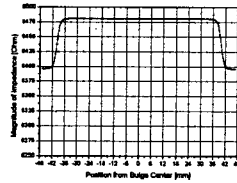


그림 6. 0.4[mm] Bulge결합의 절대임피던스 신호

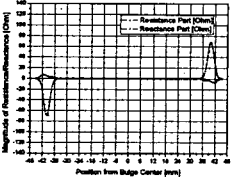


그림 7. 0.4[mm] Bulge결합의 차동임피던스 신호

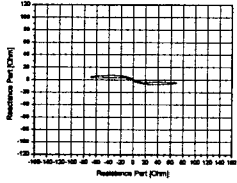


그림 8. 0.4[mm] Bulge결합의 차동임피던스 신호

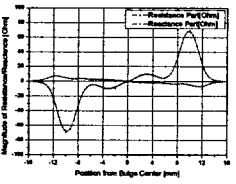


그림 9. 0.4[mm]깊이 내부결합

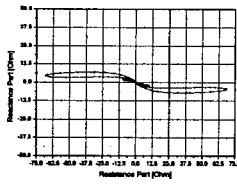


그림 10. 0.4[mm]깊이 내부결합

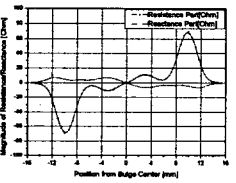


그림 11. 0.8[mm]깊이 내부결합

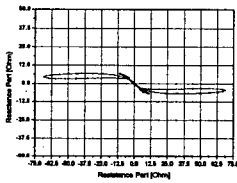


그림 12. 0.8[mm]깊이 내부결합

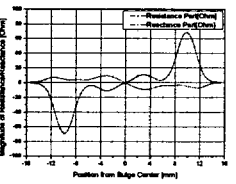


그림 13. 100[%] 관통결합

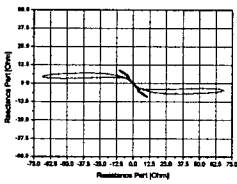


그림 14. 100[%] 관통결합

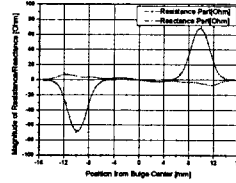


그림 15. 0.4[mm] 외부결합

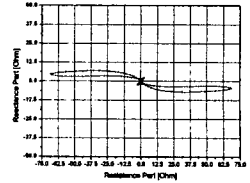


그림 16. 0.4[mm] 외부결합

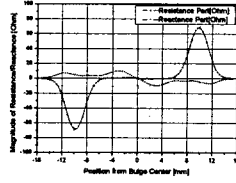


그림 17. 0.8[mm] 외부결합

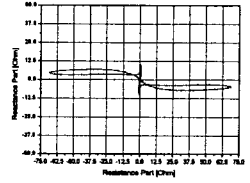


그림 18. 0.8[mm] 외부결합

4. 결 론

본 논문에서는 올진 4호기에서 채용하고 있는 CE System 80형 증기발생기관에서의 Bulge결합의 크기변화에 따른 와전류탐상 수치해석을 수행하였다. 와전류탐상문제를 해석하기 위하여 맥스웰방정식으로부터 와전류탐상문제에 맞는 지배방정식을 유도하였으며, 이 식으로부터 3차원 유한요소 수치해석코드에 대한 수식을 유도하였다. 실험신호와 수치해석결과의 비교를 용이하게 하기 위하여 ASME표준결함인 100[%] 관통결합에 대한 신호를 생성한 후, 이 신호를 기준으로 반시계방향으로 71°를 회전시켜 각 결함에 대한 신호를 교정하였다. Bulge 결합의 크기를 반경방향으로 0.2[mm], 0.4[mm]로 변화시키면서 해석을 수행하였으며, 0.4[mm] Bulge 결함내부에 결함이 있는 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. Bulge 깊이변화에 따라 결합의 크기가 증가함에 따라 임피던스신호의 크기가 증가함을 알 수 있었다. 이 신호의 크기변화는 결합의 크기변화에 비례하지는 않지만, 증가정도가 둔화됨을 알 수 있었다. Bulge결합에 내부결합이 있는 경우 결함깊이 증가에 신호의 크기가 증가하면서 반시계방향으로 회전하는 것을 살펴볼 수 있었다. 외부결합의 경우 깊이가 증가함에 따라 시계방향으로 회전하는 것을 볼 수 있었다. 본 연구의 결과를 이용하여 Bulge형 결함에 대하여 결합의 크기변화에 따른 신호의 변화를 살펴볼 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] 전기연감, 대한전기학회, 2001.
- [2] 비파괴검사 신뢰도 개선연구, 한국원자력안전기술원(KINS), 2002.
- [3] 1998 ASME Section V Non- destruction Examination Article 8 : Eddy Current Examination of Tubular Products.
- [4] N. N. Rao, Elements of Engineering Electromagnetics, Prentice Hall, 1994.
- [5] Morisue and M. Fukumi, "3-D Eddy Current Calculation Using the Magnetic Vector Potential," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, No. 1, pp. 106-109, 1988.
- [6] O. Biro and K. Preis, "In the Use of the Magnetic Vector Potential in the Finite Element Analysis of 3-D Eddy Currents," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, pp. 3145-3159, July 1989.