

강자성체 지지판의 영향이 고려된 와전류탐상의 신호해석

김용택, 이항범, 임창재*, 최영환**

승실대학교 전기공학과, (주)카이텍*, 한국원자력안전기술원**

The Analysis of Eddy Current Testing Signals Considering Influence of Ferromagnetic Support Plate

Yong-Taek Kim, Hyang-Beom Lee, Chang-Jae Yim*, Young-Hwan Choi**
Soongsil University, KAITEC*, KINS**

Abstract - In this paper, the analysis of the eddy current testing(ECT) signals under the influence of the ferromagnetic support plate was performed in steam generator(SG) tube of nuclear power plant. In order to remove the influence of the ferromagnetic support plate, a multi-frequency ECT was used. The models which was established for the analysis of the signals is calculated using numerical analysis of finite element method. Through the result of numerical analysis, improved signals is acquired considering the influence of the ferromagnetic support plate using mixing of multi-frequency. This paper is presented the residual errors and the phase changes for analysis of the defect signals which should be considered when conducting a ECT using multi-frequency.

1. 서 론

원자력 발전소의 증기발생기(Steam Generator, SG) 세관은 구조적인 요인 및 재료의 특성에 따라 여러 유형의 손상의 나타난다. 이러한 손상은 원전의 안전성과 가동률을 저해하며, 방사능 누출 등의 사회적 여론의 악화로 이어져 국가적인 전력정책에 큰 영향을 미치게 된다. SG 세관의 손상을 평가하기 위해 와전류 탐상은 정기적으로 이루어지고 평가에 따른 예방대책과 유지보수가 실행되고 있다.

와전류 탐상은 도체에 와전류를 발생 시켜 재료의 여러 가지 특성을 검사하는 비파괴검사방법중 하나이다. 와전류 탐상은 결함의 크기 및 재질의 변화 등을 고속으로 검사 가능하여 on-line화가 가능하다. 그러나 검사재료의 표면 아래의 결함의 검출이 곤란하며 검사 재료 이외의 구조적인 인자의 영향에 의한 영향으로 검사의 평가가 어려워진다.

본 논문에서는 와전류탐상을 사용하여 SG 세관을 검사할 경우 강자성체 지지판 부근에서 발생하는 구조적인 영향을 고려한 와전류탐상의 결합신호를 해석하였다. 다중주파수법을 이용함으로써 지지판 부근의 구조적인 영향을 감소시켰다. 지지판의 영향을 제거할 수 있는 보상주파수를 선정하고 결합주파수와 보상주파수의 신호의 처리 및 해석을 통해 지지판 부근의 영향이 고려된 다중주파수법 결합검출신호의 특성을 얻을 수 있었다.

2. 와전류 탐상

와전류탐상은 재료에서 발생하는 와전류의 흐름이 불연속부 등의 영향을 받아 와전류의 흐름이 방해되거나 변화되면, 와전류의 자장이 변하여 탐상코일의 임피던스가 변하는 것을 측정함으로써 결합이나 재료의 특성을 파악하는 검사법이다.

2.1 주파수와 침투깊이

발생되는 와전류는 탐상프로브에 근접한 재료의 표면에 크게 발생되며 표면에서 멀어질수록 작아진다.

$$A(x, t) \propto e^{-2x/\delta} \cdot e^{i(\omega t - 2x/\delta)} \quad (1)$$

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

식(1)은 재료표면에서의 깊이(x)에 따라 발생하는 와전류의 크기이고, 식(2)는 주파수에 따른 침투깊이를 나타낸다. 그림 1은 깊이에 따른 전류의 밀도를 나타내고 있다. 같은 크기의 신호가 입력되더라도 주파수에 따른 침투깊이에 따라 표피전류의 밀도는 달라진다.

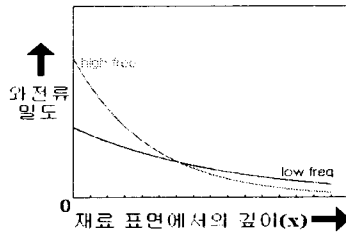


그림 1. 깊이에 따른 와전류 밀도

2.2 다중주파수방식

와전류탐상은 재료의 전자기 특성, 균열 등의 불연속, 코일의 상대적 위치, 구조적 특성 등 다양한 조건에 의한 검출신호의 변화가 나타난다. 그러나 특정요인을 측정하는 검사에서 그 밖의 조건들로 인한 영향은 신호의 평가 및 판단에 어려움을 준다. 그래서 기타 조건들을 제거하는 신호를 추가적으로 입력하여 측정하고자 하는 신호의 평가를 용이하게 하는 방법으로 다중주파수법이 사용된다.

다중주파수 와전류탐상은 각 신호들의 중첩의 원리를 응용한 방법이다. 재료에 따라 발생하는 결합주파수의 신호(J_1)와 보상주파수의 신호(J_2)를 Vector적인 합(mixing)으로 처리함으로써 특정요인의 신호의 평가를 용이하게 한다.

$$\vec{J} = \vec{J}_1 + \vec{J}_2 \quad (3)$$

식(3)와 같이 특정요인의 신호가 발생되어야 하나 일반적으로 다중주파수 Mixing결과인 \vec{J} 에서는 서로 접근해있는 두 신호의 섭동에 의한 신호(\vec{J}_0)가 나타난다.

$$\vec{J} = \vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \vec{J}_0 \quad (4)$$

그러므로 순수한 특징요인의 신호를 검출하기는 어려우나 기타 조건의 신호를 감소시킴으로써 보상된 검출신호의 특징요인에 대한 평가 및 판단이 용이해진다.

3. SG세관의 강자성체 지지판 영향의 해석과 모델

그림 2는 강자성체 지지판 부근에서 SG세관의 모형을 나타내고 있다. 와전류탐상에서 강자성체로 이루어진 지지판은 SG세관의 손상요인인 결함을 측정할 때 출력되는 결함검출신호에 많은 영향을 준다.

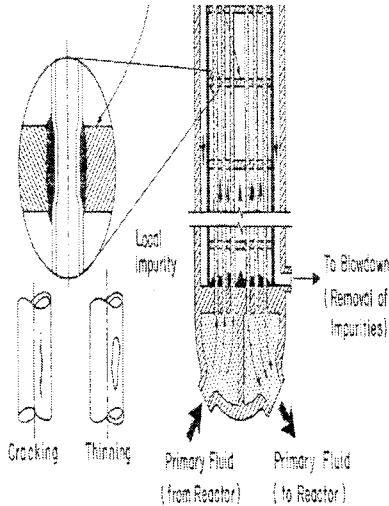


그림 2. 증기 발생기 세관 모형

SG세관의 와전류탐상은 내삼코일을 사용하고 있다. 세관의 외부에 존재하는 지지판의 영향은 다중주파수법을 통해 제거시킬 수 있으며 이때 사용되는 보상 주파수는 침투깊이가 깊은 저주파수가 사용된다.

3.1 주파수 선정

다중주파수법을 사용하기 위해 결함을 검출하기 위한 결함주파수(f_1)와 강자성체 지지판의 영향을 제거하기 위한 보상주파수(f_2)를 선정해야 한다. 일반적으로 결함주파수가 선정된 경우 외부의 영향을 제거하기 위한 보상주파수는 결함주파수의 1/2 ~ 1/4 정도의 낮은 주파수에서 선정된다.

SG세관의 결함주파수는 400[kHz]가 주요 사용되고 있으며, 와전류탐상에 대한 KS-D-0232에 의거하여 표 1과 같은 실험 주파수를 선정하였다.

표 1. 다중주파수 와전류탐상을 위한 실험 주파수

| | 실험 주파수 [kHz] |
|------------------|----------------------------|
| 검사 주파수 (f_1) | 400, 500 |
| 보상 주파수 (f_2) | 50, 64, 100, 128, 200, 250 |

3.2 수치해석 모델

SG세관의 지지판과 같은 강자성체를 수치해석 할 경우 교류정상상태에 근거한 페이저 해석이 불가능하다. 그러나 와전류 탐상에서 사용되는 전류는 매우 낮은 수준이므로 강자성체의 선형적인 투자를 적용이 가능하다.

본 논문은 유한요소법(FEM)을 이용하여 SG세관의 와전류 탐상을 할 때 탐상코일(bobbin probe)의 임피

던스의 변화를 해석하였다.

표 2. SG세관 수치해석 모델 수치

| | | |
|--------------|------|----------------|
| SG세관 | 재질 | Inconel 600 |
| | 도전율 | 1.1e+06 [S/m] |
| | 비투자율 | 1 |
| | 외경 | 9.525 [mm] |
| Bobbin Probe | 내경 | 8.425 [mm] |
| | 외경 | 7.725 [mm] |
| | 내경 | 6.225 [mm] |
| 지지판 | 폭 | 1.5 [mm] |
| | 재질 | SM45c |
| | 도전율 | 6.25e+06 [S/m] |
| | 비투자율 | 1200 |
| 결함 | 폭 | 18.9 [mm] |
| | 깊이 | 0.9 [mm] |
| | | 내부결함 40% |

수치해석 대상 모델은 표 3과 같이 4가지로 분류하였다.

표 3. 수치해석 모델 분류

| 모델명 | 지지판 유무 | 결함 유무(위치) |
|----------|--------|------------|
| Z_0_m | O | X |
| Z_ID40_c | X | O |
| Z_ID40_m | O | O (지지판 중간) |
| Z_ID40_e | O | O (지지판 끝단) |

4. 결 과

FEM을 이용한 수치해석 결과를 이용하여 결함주파수(f_1)와 보상주파수(f_2)에 크기비율(V_1/V_2)과 위상차를 계산하여 두 주파수를 Mixing하여 보상된 신호를 얻었다.

4.1 다중주파수법에 따른 크기비율과 위상차

f_1 과 f_2 를 크기비율과 위상차를 구하기 위해 각 주파수에 따른 지지판만 존재(Z_0_m)하는 모델의 차동임피던스를 사용하였다.

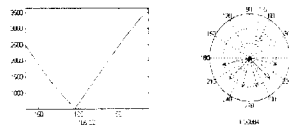
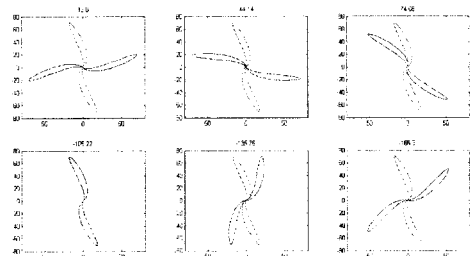


그림 3. f_1 과 f_2 의 신호처리 그래프

그림 3은 400kHz(f_1)과 100kHz(f_2)의 그래프이다. 좌측 중간에 그래프와 같이 크기비율(V_1/V_2)이 1.0684이고 위상차가 -106.3 일 때 두 주파수 신호의 mixing함을 경우 오차가 가장 적다는 것을 알 수 있다. 표 4는 각 다중주파수법에 따른 오차가 가장 작은 경우의 크기비율과 위상차이다.

표 4. 최소오차를 가지는 크기비율과 위상차

| 결함 주파수 | 보상 주파수 | 크기비율 (V_1/V_2) | 위상차 |
|---------|---------|--------------------|--------|
| 400 kHz | 50 kHz | 1.62509 | -146.1 |
| | 64 kHz | 1.36829 | -132.2 |
| | 100 kHz | 1.06884 | -106.3 |
| | 128 kHz | 0.969405 | -90.9 |
| | 200 kHz | 0.88356 | -59.9 |
| | 250 kHz | 0.883827 | -42.4 |
| 500 kHz | 50 kHz | 1.43298 | -169.3 |
| | 64 kHz | 1.20654 | -155.4 |
| | 100 kHz | 0.942488 | -129.5 |
| | 128 kHz | 0.854809 | -144.1 |
| | 200 kHz | 0.779112 | -83.1 |
| | 250 kHz | 0.779348 | -65.5 |

4.2 다중주파수 와전류탐상 해석

표 4의 결과를 통해 다중주파수 와전류탐상을 해석하였다. 수치해석을 통해 얻어진 4가지의 모델별 차동임피던스를 mixing한 결과는 표 5와 같이 나타난다.

표 5. 단일주파수와 다중 주파수의 mixing 결과 비교

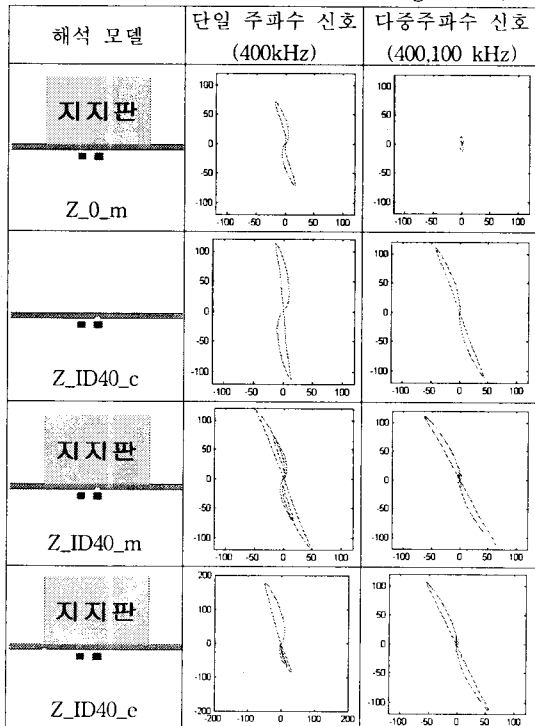


표 5를 통해 다중주파수 와전류탐상에서 강자성체 지지판의 영향을 나타내는 신호가 작아지는 것을 알 수 있다. 지지판의 영향에 의한 두 신호가 완전히 일치하지 않는다. 이 결과를 통해 다중주파수 결합검출신호는 지지판 부근에서 오차가 발생하며 단일주파수의 결합검출

신호와 다른 위상의 변화를 가지게 된다. 표6.는 각 다중주파수에 따른 결합검출신호의 오차비율과 위상변화를 나타내고 있다.

표6. 결합검출신호의 오차비율과 위상변화

| 결함 주파수 | 보상 주파수 | 오차비율 | 위상변화 |
|---------|---------|----------|-------|
| 400 kHz | 50 kHz | 6.356336 | 8.19 |
| | 64 kHz | 5.378921 | 10.18 |
| | 100 kHz | 3.711986 | 14.80 |
| | 128 kHz | 2.869223 | 18.18 |
| | 200 kHz | 1.598199 | 26.62 |
| | 250 kHz | 1 | 32.41 |
| 500 kHz | 50 kHz | 4.771022 | 4.12 |
| | 64 kHz | 4.086781 | 5.48 |
| | 100 kHz | 2.917319 | 8.79 |
| | 128 kHz | 2.204385 | 11.34 |
| | 200 kHz | 1.394287 | 18.05 |
| | 250 kHz | 1 | 22.82 |

다중주파수 와전류탐상은 결합주파수와 보상주파수의 주파수 차이에 따라 결합검출신호의 오차와 위상변화를 다르게 검출된다. 주파수 차이가 감소할수록 오차는 작아지지만 위상변화는 크게 발생하며 주파수 차이가 증가할수록 위상변화는 작아지지만 오차가 증가한다. 오차와 위상변화가 작을수록 단일주파수의 결합검출신호와 비슷한 검출신호를 나타내는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 다중주파수 와전류탐상을 이용하여 강자성체 지지판 부근의 영향을 감소 시켰다. 신호해석 결과에서 주파수의 차이에 따라 오차가 나타났으며, 단일주파수의 결합검출신호와 위상차도 나타났다. 본 논문의 결과를 통해 와전류 탐상에 다중주파수법의 도입될 경우 주파수의 선정은 중요한 요소로 고려될 것으로 사료된다. 본 논문은 SG세관의 한계결함깊이인 40%의 내부결함에 대해 연구 되었다. 추후 진행될 다양한 결함깊이를 통해 다중주파수 와전류탐상의 데이터 베이스를 구축할 수 있다. 또한 강자성체 지지판 이외의 기타요인에 대한 다중주파수 와전류탐상의 연구가 진행됨으로써 SG세관의 결합검출신호의 평가는 높은 신뢰성을 가지게 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이용, "와전류탐상검사", 한국비파괴검사학회, 2001
- [2] 김세운, "전자기학(개정판)", 사이텍미디어, 2001
- [3] 신영길, "와전류 탐상신호 예측을 위한 3 차원 수치 해석 프로그램 확립", 기초전력공학공동연구소, 1999
- [4] 안병완 외, "와전류탐상법에 의한 Sludge Pile 속의 결함검출", 한국비파괴검사학회, 제 13호 Vol.7 No.2, 1988
- [5] K. Arunchalam, "Nonlinear Mixing Algorithms For Suppression Of TSP Signals In Bobbin Coil Eddy Current Data",
- [6] Herbert H. Woodson and James R. Melcher, "ELECTROMECHANICAL DYNAMICS", ROBERT E. KRIEGER PUBLISHING COMPANY, Part II, 1985.