

지지대 부근의 전열관 결함으로 인해 발생되는 보빈 와전류신호의 예측 및 분석

신영길, 이윤태
군산대학교 전자정보공학부

Prediction and Analysis of Bobbin ECT Signals generated by Tube Defects near Support Plate

Young-Kil Shin and Yun-Tai Lee
School of Electronic and Information Engineering, Kunsan.National University

Abstract - In this study, eddy current signals from various anomalous defects in the heat exchanger tube are predicted and their signal slope characteristics are analyzed. The signal changes due to frequency increase are also observed. Based on the accumulated knowledge, the analysis of superimposed signal is attempted which includes the effects of support plate. Both differential and absolute bobbin probe signals are analyzed. For the prediction of signals, axisymmetric finite element modeling is used and this leads us to the utilization of slope angle analysis of the signal. Results show that differential signals are useful to locate the position of defect under the support plate and absolute signals are easy to predict and analyze even though they are superimposed signals. Combined use of these two types of signals will accomplish a reliable inspection.

1. 서 론

열교환기에는 세판을 지지해 주기 위한 여러 지지설비가 있는데, 이들에 인접한 전열관 부위에 결함이나 이상이 집중하여 발생되는 경향이 있다. 대표적인 지지설비로 tubesheet이나 지지대(support plate, SP)를 들 수 있는데, 이들은 와전류 검사가 어려운 자성체인데다 주변 전열관에 결함이나 이상까지 발생되어 있는 경우에는 이들 모두의 영향이 복합된 신호가 나타나게 되어 신호 해석이 매우 어려워진다.

본 논문에서는 먼저 여러 비정상적인 결함들을 차동 및 절대형 보빈코일로 검사할 때 나타나는 개별신호들을 유한요소 모델링을 통해 예측하고, 주파수 증가에 따른 신호들의 변화추이를 관찰하였다. 그리고 지지대 주변의 전열관에 그러한 비정상적인 결함들이 발생되었을 때 어떤 신호들이 발생되는지를 예측하고, 각 결함별 신호의 특성들이 어떻게 복합된 신호에 포함되어 나타나는지를 분석하였다.

2. 유한요소 모델링

와전류 템파는 시변계에서의 전자기 유도현상을 이용하는 것으로 지배방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다[1].

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \bar{A}) = \bar{J}_s - \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 μ , σ , \bar{J}_s , \bar{A} 는 각각 투자율, 전도도, 코일의 전류밀도, 자기벡터 포텐셜이며, 우변의 두 번째 항이 와전류 밀도를 나타낸다. 본 연구에서는 축대칭 해석을 하였는데, 이는 결함의 깊이가 일정하고 원주방향의 길이만 증가하는 경우 차동신호의 기울기는 변하지 않고 신호크기만 커진다는 이전의 연구결과[1,2]를 활용한 것이다. 그 결과, 신호를 판단하는 기준은 신호의 기울기에 서 찾게 되었다. 모델링에 사용된 판, 코일, 각종 결함들

의 치수들은 표 1에 정리하였다.

3. 비정상적인 결함의 개별신호 예측

신호도시방법으로 차동신호는 ASME code[3]에 따라 도시하였고, 절대신호는 fill-factor 감소가 음의 수평축으로 나타나도록[4] 수치해석 결과를 회전시켰다. Fig. 1-2와 Fig. 3-4는 각각 차동신호와 절대신호를 보인 것으로, 판두께 대비 100% 깊이의 결함, 지지대, 20% 깊이의 내부 및 외부결합, dent 및 bulge에서 주파수가 100, 300 kHz일 때 발생되는 신호들을 비교한 것이다.

차동신호의 시작부분과 절대신호는 거의 같은 모양과 방향을 갖게 되는데[5], 본 논문에서는 신호도시법의 차이에 의해 절대신호를 약 210° 정도 시계방향으로 회전시켜야 차동신호의 시작부분과 같아진다. 내부결합과 외부결합 신호들은 주파수가 높아질수록 그 사잇자이 더 커지는 것을 볼 수 있는데, 이는 주파수가 증가함에 따라 내부결합은 반시계 방향으로 약간 회전하고 외부결합은 시계방향으로 크게 회전하기 때문이다. 주파수가 증가하면 표피두께의 감소로 외부결합에서는 위상지연이 증가하고 이는 외부결합신호의 기울기 증가로 나타난다[4]. 한편, 주파수 증가에 따라 내부결합의 크기는 증가하나, 외부결합의 크기는 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 지지대는 자성체이므로 주파수가 증가함에 따라 신호의 크기가 급격히 줄어들며, 시계방향으로 회전하는 것을 볼 수 있는데, 이는 지지대가 판 외부에 있으므로 앞서 설명된 외부결합신호의 주파수 증가에 따른 시계방향 회전과 마찬가지의 영향을 받기 때문이다. Dent와 bulge는 각각 코일과 가까워지거나(fill-factor 증가), 멀어지는 (fill-factor 감소) 것에 해당되므로, 절대코일 신호에서 dent는 fill-factor 감소계적과 반대방향으로 오른쪽으로 나타나고, bulge는 같은 방향으로 왼쪽으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 차동신호에서는 두 신호 모두 거의 수평하게 나타나므로, x 및 y 성분 혹은 신호의 시작방향을 확인하지 않는 한 구별하기 어렵다. Dent나 bulge 신호는 주파수 증가에 따른 회전은 거의 볼 수 없었고, 수평 성분 크기만 증가하는 것으로 관찰되었다.

Table 1 Dimensions of tube, coil and defects [mm]

판 외경	19.05	코일 외경	15.65
판 두께	1.3	코일 두께	1.5
판 재질	Inconel600	코일 폭	1.5
지지대 두께	19.05	코일 간격	1.5
내부결합	폭 1.5, 깊이 0.26	외부결합	폭 1.5, 깊이 0.26
dent	폭 4.5, 깊이 0.13	bulge	폭 4.5, 깊이 0.13

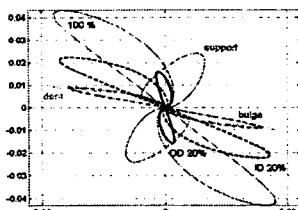


Fig. 1 100 kHz, differential signal

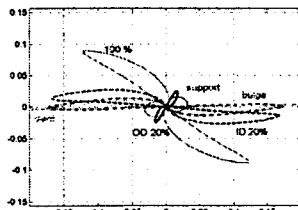


Fig. 2 300 kHz, differential signal

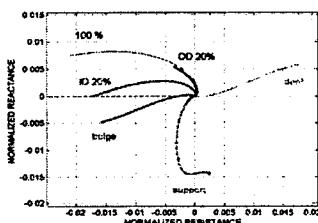


Fig. 3 100 kHz, absolute signal

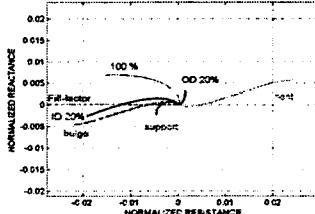


Fig. 4 300 kHz, absolute signal

4. 지지대 주변의 여러 결합에 의한 복합신호 예측

복합신호를 예측하기 위하여 먼저 Fig. 5와 같은 상황에서 모델링을 통해 예측된 차동신호를 Fig. 6에 보였고, 절대신호는 Fig. 7에 보였으며 절대신호의 x 성분과 y 성분 신호를 Fig. 8과 9에 각각 보였다.

Fig. 5와 같이 코일이 복합결합 부위를 먼저 만나고 지지대를 나중에 빠져 나오게 되면, 100 kHz에서의 지지대 차동신호(Fig. 1)에서 나중에 형성되는 왼쪽 아래의 폐곡선이 Fig. 6에 나타나며, Fig. 10과 같은 상황에서는 지지대 차동신호 중 먼저 형성되는 오른쪽 위의 폐곡선이 Fig. 11에 나타나게 된다. 따라서 차동신호는 지지대내에서 결합의 위치를 판단하는데 유용함을 알 수 있다. 반면에, Fig. 7과 12에 보인 절대신호에서는 코일이 어느 부위를 먼저 만나는지, x 및 y 성분 신호 혹은 신호의 시작방향을 확인하지 않는 한 알 수가 없다.

한편, 차동신호에서 복합결합 부위로 인한 신호를 짐작하는 것은 쉽지 않다. 그러나 절대코일에서는 개별 지지대 및 외부결합 신호의 기울기 특성이 Fig. 7에 그대로 남아 있으며, Fig. 12에는 지지대와 내부결합 신호의

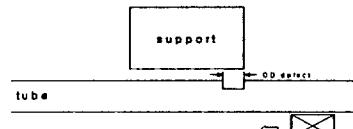


Fig. 5 Case of an OD defect under the right edge of the support plate

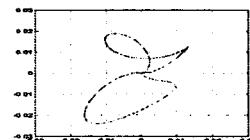


Fig. 6 Simulated differential signal at 100 kHz from the situation in Fig. 5

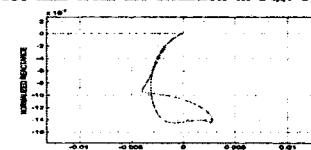


Fig. 7 Simulated absolute signal at 100 kHz from the situation in Fig. 5

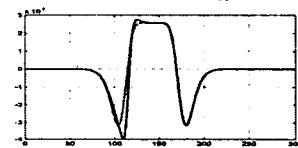


Fig. 8 X-component of Fig. 7

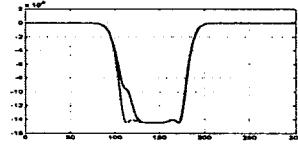


Fig. 9 Y-component of Fig. 7

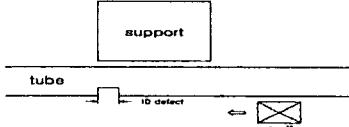


Fig. 10 Case of an ID defect under the left edge of the support plate

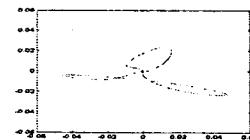


Fig. 11 Simulated differential signal at 100 kHz from the situation in Fig. 10

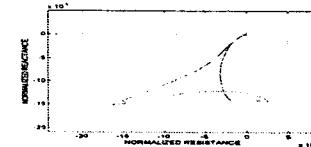


Fig. 12 Simulated absolute signal at 100 kHz from the situation in Fig. 10

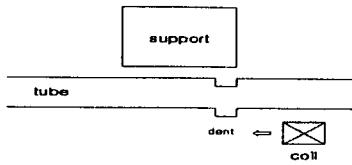


Fig. 13 Case of a dent under the right edge of the support plate

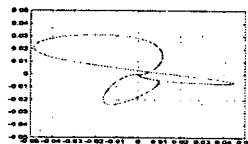


Fig. 14 Simulated differential signal at 100 kHz from the situation in Fig. 13

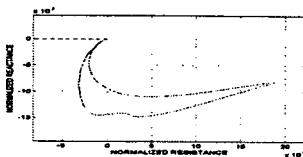


Fig. 15 Simulated absolute signal at 100 kHz from the situation in Fig. 13

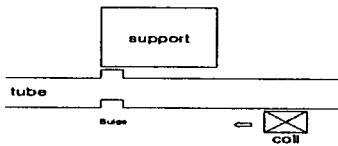


Fig. 16 Case of a bulge under the left edge of the support plate

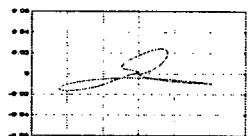


Fig. 17 Simulated differential signal at 100 kHz from the situation in Fig. 16

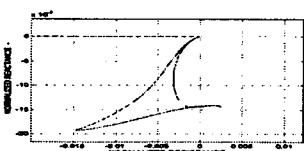


Fig. 18 Simulated absolute signal at 100 kHz from the situation in Fig. 16

기울기 특성이 나타나 있는 것을 쉽게 알 수 있다. 즉, 절대신호는 복합신호라 하더라도 신호의 해석과 예측이 비교적 수월하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13-15는 dent가 지지대의 오른쪽 끝 내부에 존재하는 경우의 차동 및 절대신호를 예측한 것으로, Fig. 5의 상황과 비교해 볼 수 있다. 이 경우에는 관 내부에 코일 쪽으로 돌출부가 추가된 것으로 볼 수 있으며, 코일에 가까운 내부이므로 그 영향이 클 수밖에 없다. 따라서 Fig. 7과 15의 절대신호들은 상당히 다른 형태를 보인다. 그러나 Fig. 16의 bulge와 Fig. 10의 내부결함이 존재하는 상황을 비교하면 Fig. 16에서 관 외부에 돌출부가 추가된 것으로 볼 수 있고, 이 경우에는 코일에서 멀리 떨어진 위치에 발생한 것이라 그 영향이 그리 크지 않을 것이다. 따라서 차동신호들(Fig. 11, 17)과 절대신호들(Fig. 12, 18)이 크게 다르지 않다. 그러나 Fig. 12와 18의 절대신호에는 내부결함과 bulge 신호의 기울기 특성이 그대로 살아 있어 구별이 가능할 수도 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 지지대 부근의 세관에 여러 비정상적인 결함들이 존재할 경우, 차동 및 절대형 보빈코일로 검사할 때 발생되는 복합신호들을 예측하고 그 신호패턴을 비교, 분석해 보았다.

우선, 여러 비정상적인 결함들의 개별신호들을 유한요소 모델링을 통해 예측하고, 각 결함별 신호의 기울기 방향 특징과 주파수 증가에 따른 신호들의 변화추이를 관찰하였다. 그리고 나서, 지지대 주변의 세관에 비정상적인 결함들이 발생되었을 때 어떤 신호들이 발생되는지를 예측하였고, 각 결함별 신호의 특징들이 어떻게 복합된 신호에 포함되어 나타나는지를 분석하였다.

그 결과, 절대신호는 복합신호라 하더라도 신호해석과 예측이 비교적 수월하다는 장점이 있으며, 차동신호는 지지대내 결함의 위치파악에 유용하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 결함유형에 따라 두 신호에 정, 단점이 존재하므로 이 두 신호들을 함께 사용한다면 보다 신뢰할만한 검사가 이루어 질 수 있을 것이다. 그밖에 본 논문에서는 지면의 제약 때문에 결과들을 다 보이지는 못하였으나, 주파수를 이용하여 지지대의 영향을 효과적으로 차단할 수 있으며, 검사목적에 따라 주파수를 조절해야 한다는 것을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 신영길, “와전류 탐상신호 예측을 위한 3차원 수치해석 프로그램 확립”, 기초전력공학공동연구소, 과제관리번호 96-중-02, 최종보고서, 1999
- [2] 이향범, 원성연, 신영길, “3차원 관결함에 대한 와전류탐상의 유한요소해석”, 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 3, pp. 191-199, 2000
- [3] ASME Section V, Article 8, Appendix I, “Eddy Current Examination Method for Installed Nonferromagnetic Steam Generator Heat Exchanger Tubing”, 1986
- [4] V. S. Cecco, G. Van Drunen, F. L. Sharp, “Eddy Current Testing”, GP courseware, Inc, Columbia, MD 21044, pp. 8-142, 1987
- [5] 신영길, 이윤태, 이정호, 송명호, “유한요소해석에 의한 절대코일 와전류 신호의 임피던스 평면도 작성”, 비파괴검사학회지, Vol. 24, No. 4, pp. 315-324, 2004