

## 와전류신호를 이용한 투브시트 영역에서의 확관 검사

신영길, 송성철, 정희성  
군산대학교 전자정보공학부

### Examination of Tube Expansion at Tubesheet Area using Eddy Current Test Signal

Young-Kil Shin, Sung-Chol Song and Hee-Sung Jung  
School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University

**Abstract** - 본 논문에서는 투브시트 내, 외부의 여러 다른 위치에서 확관이 이루어졌을 때 절대 및 차동 와전류신호를 유한요소 모델링으로 예측하고, 신호에서 자성 투브시트로 인한 신호변화와 확관으로 인한 신호변화를 관찰하였으며, 이들에 미치는 주파수의 영향을 조사하였다. 그 결과, 절대 및 차동신호 모두 투브시트의 위치 파악에는 저주파가 유리하고, 주파수가 높을수록 확관된 내경의 측정 및 확관 천이부의 파악이 용이하였으며, 절대신호가 차동신호에 비해 신호변화가 더 크고 지속적이어서, 확관 품질을 조사하기에 더 적합한 신호형태를 가지고 있음을 알 수 있었다.

### 1. 서 론

증기발생기 전열관은 투브시트에서 확관되어 고정된다. 확관에는 기계적 틀 확관, 폭발확관, 수압확관 등의 방법이 사용되고 있으며, 한국형 원자력발전소 증기발생기의 경우에는 화약을 사용한 폭발확관 공정이 적용되었다. 확관시 요구되는 사항중 하나는 투브시트와 확관 천이부 사이의 틈새 깊이를 최소화시키는 것이다. 이는 증기발생기가 수직으로 설치되므로 이 틈새에 각종 이물질이 쌓이게 되며 중국에 가서는 전열관에 텐트와 균열을 발생시키고 성장시키기 때문이다.[1]. 따라서, 투브시트 내에서 확관 공정이 제대로 수행되었는지 정확히 파악할 필요가 있다.

본 논문에서는 투브시트 내, 외부의 여러 다른 위치에서 확관이 이루어졌을 때 절대 및 차동 와전류신호를 유한요소 모델링으로 예측하고, 신호에서 자성 투브시트로 인한 신호변화와 확관으로 인한 신호변화를 관찰하였으며, 이들의 위치파악이 용이한 탐상 주파수를 조사하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 유한요소 모델링

와전류탐상은 시변계에서의 전자기 유도현상을 이용하는 방법으로 지배방정식은 다음과 같다[2].

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

여기서  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\bar{J}_s$ ,  $\bar{A}$ 는 각각 투자율, 전도도, 코일의 전류밀도, 자기베타 포텐셜을 나타낸다. 보빈코일에 의한 와전류탐상에서 축대칭 형상만을 가정하면 축대칭 해석이 가능하며, 유한요소 정식화 과정을 거쳐 형성된 대형 행렬식을 풀면 모든 절점에서의 자기베타 포텐셜을 구할 수 있고, 이를 사용하여 와전류신호인 코일 임피던스를 구할 수 있다[2,3]. 모델링은 한국형 원전 증기발생기 전열관을 대상으로 하였고, 확관 천이부의 길이는 19.26 mm로 하였으며, 확관시 관의 두께 변화는 없는 것으로 가정하였다.

#### 2.2 신호 도시법 결정 및 확관신호 예측

신호의 도시는 ASME code[4]에서 제시한 방법을 따랐는데, 100% 관통결합 신호가 제4사분면에서 시작하여 수평축과 40°의 각도를 이루도록 수치해석 결과를 회전시켰고 다른 신호들도 마찬가지로 회전시켜 도시하였다.

Fig.1과 2는 프로브가 전열관의 확관부로 들어갈 때 발생되는 절대 및 차동 신호를 수평성분과 수직성분으로 나누어 보인 것으로, 가로축은 프로브 앞부분의 이동위치를 나타낸다. 절대신호의 두 성분들은 확관 천이부(110~200)에서 모두 변화를 보였으며, 차동신호에서는 확관이 시작되거나 끝나는 위치에서만 크게 신호가 변화하였고 확관 천이부 내에 프로브가 있을 때에는 신호변화가 완만하였다. 또한, 차동 프로브가 확관 천이부를 완전히 빼져 나올 때 까지는 신호변화가 지속되는 것을 볼 수 있다.

#### 2.3 투브시트와 확관부에서의 신호 예측

확관공정이 끝난 후 확관 천이부가 투브시트 상단(TTS)에서 얼마나 떨어져 발생하였는지 확인할 필요가 있다. 본 논문에서는 투브시트를 Fig. 3에 보인 바와 같이 다섯 개의 위치로 변화시키면서 신호를 조사하였다. 또한, TTS와 확관 천이부의 위치파악이 용이한 검사조건을 찾기 위하여 900, 550, 100, 20 kHz의 주파수를 사용하여 신호를 예측하고 비교하였다.

##### 2.3.1 TTS의 위치 파악

TTS의 위치는 전열관 밖이고 투브시트가 자성체이므로 저주파를 사용할 필요가 있다. 본 연구에서는 저주파를 사용한 경우의 투브시트 신호를 수직방향으로 나타나도록 신호를 회전시켜 도시하였다.

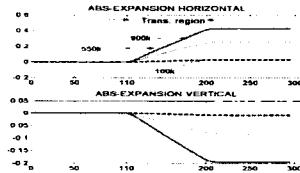


Fig. 1 Absolute signals from transition region of tube diameter

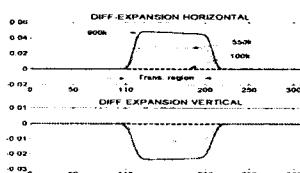


Fig. 2 Differential signals from transition region of tube diameter

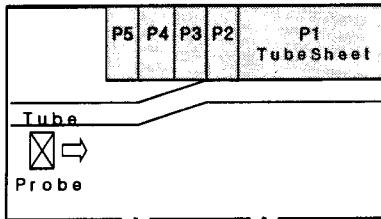


Fig. 3 Five different positions of TTS

여러 주파수에서 설정된 기준에 의해 도시된 절대 및 차동 신호의 수평성분과 수직성분들을 Fig. 4와 5에 스트립 차트 형태로 보였는데, 각각의 주파수에서 Fig. 3의 다섯 TTS 위치에서의 결과들을 함께 나타내었다. 스트립 차트 신호들에는 프로브가 TTS를 지나는 순간에 나타내는 값을 스타(\*)로 표시하였다.

Fig. 4와 5에 보인 절대신호와 차동신호들에서 주파수가 20 kHz일 때에는 다섯 곳의 TTS 위치 모두에서 수평성분 신호의 경향이 급격히 변하는 것을 볼 수 있다. 따라서 이를 통해 TTS의 위치를 정확히 파악할 수 있을 것이다. 수직성분 신호에서는 TTS의 위치 파악이 거의 불가능하다. 그런데 특이하게도 900 kHz의 차동 수평성분 신호에서는 TTS의 위치 파악이 가능하다는 것을 발견할 수 있었다.

### 2.3.2 확관 천이부의 판별

신호들을 비교해 보면 확관 천이부의 영향은 주파수가 높아질수록 커지는 것을 관찰할 수 있는데, 550 및 900 kHz를 사용하였을 경우 TTS의 위치와는 상관없이 수평성분 신호의 크기가 확관 천이부에서 증가하고, 수직성분 신호는 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 이번에는 각각의 투브시트 위치에서 고주파 신호들을 모아 비교해 보았다. Fig. 6은 절대신호를 비교한 것이고 Fig. 7은 차동신호를 비교한 것이다.

수평성분 신호들은 확관 천이부에서 투브시트의 위치에 상관없이 항상 증가하며, 주파수가 높아질수록 기울기가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 투브시트 위치가 1인 경우에 수평성분 신호를 보면 신호의 증가가 처음 발생하는 부위가 확관 천이부이며, 투브시트의 위치가 5인 경우를 보면 주파수가 550, 900 kHz인 경우에는 투브시트 보다는 확관 천이부가 수평성분 신호에 미치는 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 절대신호에서는 고주파를 사용하여 수평성분 신호의 갑작스런 증가를 관찰하면 관의 구경 증가를 예측할 수 있을 것이므로 확관 천이부의 판별도 가능할 것이다.

Fig. 7의 차동코일 신호는 확관 천이부에서 절대신호와 비슷한 신호크기 양상을 보이나, 갑작스런 주변상황의 변화에 차동코일이 민감하게 반응하여 확관 천이부 액단과 TTS 위치에서 각각 신호변화가 발생되는 것을 볼 수 있다. 차동 수평성분 신호에서는 100, 550 kHz를 사용하였을 경우 확관의 영향보다 투브시트의 영향이 더 크게 나타났으나, 900 kHz를 사용하면 투브시트의 영향이 확관의 영향과 반대방향으로 크기도 더 작게 나타나므로 확관 천이부의 판별이 용이할 것이다.

### 2.3.3 확관부위에서의 절대 및 차동 신호 비교

절대신호는 확관 천이부나 TTS를 지난 후 일정하게 유지되는 반면, 차동신호는 두 코일 임피던스의 차이를 이용하므로 확관 천이부나 TTS를 지나고 나면 신호가 다시 0으로 되돌아가, 절대코일에 비해 확관 천이부나 TTS를 잘 지시하기는 하지만 그 지시신호는 짧게 발생했다. 사라진다. 절대코일을 사용하여 검사하면 확관 전 내경과 확관 후 내경의 차이를 수평성분 신호의 세기로 나타낼 수 있으므로, 확관 공정에서 발생한 이상확관 부위의 확관 정도를 추정할 수 있을 것이다.

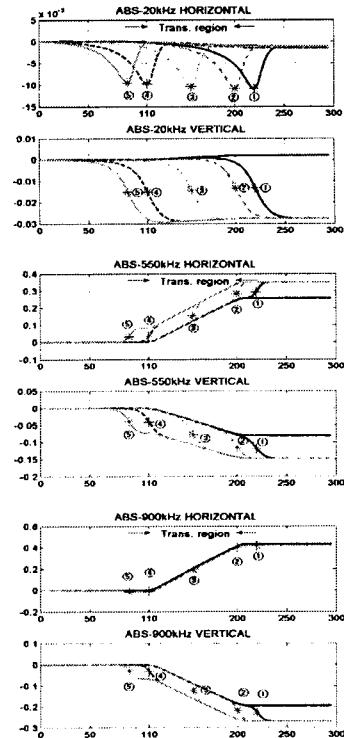


Fig. 4 Horizontal & vertical components of absolute signals at 3 different frequencies

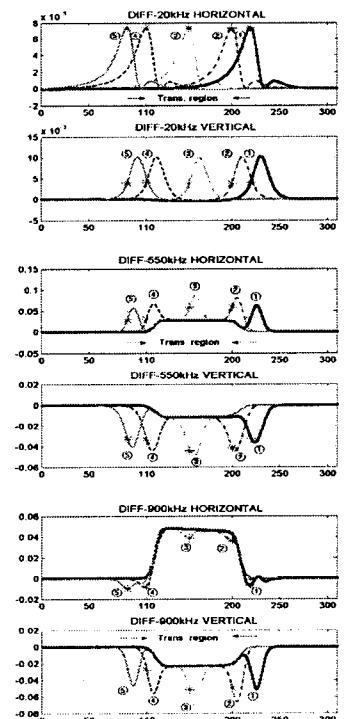


Fig. 5 Horizontal & vertical components of differential signals at 3 different frequencies

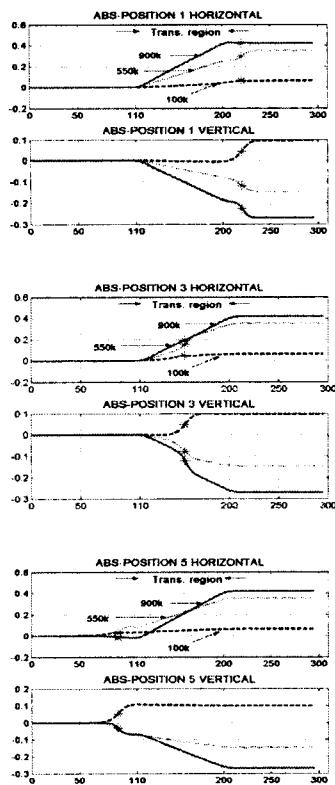


Fig. 6 Horizontal & vertical components of absolute signals at 3 different tubesheet positions

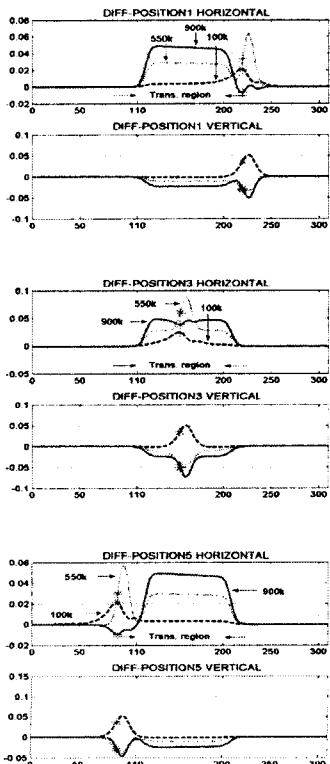


Fig. 7 Horizontal & vertical components of differential signals at 3 different tubesheet positions

### 3. 결 론

본 연구에서는 투브시트의 위치 파악과 확관 천이부의 판별을 용이하게 하는 검사조건을 알아보기 위하여, 확관 천이부와 투브시트의 상대적인 위치를 달리하면서 여러 탐상주파수를 사용한 절대신호와 차동신호들을 수치해석으로 예측하고 비교하였다. 우선 확관 천이부의 신호특성을 유한요소 모델링을 통해 예측하고, 투브시트의 위치에 따른 확관 천이부의 신호변화를 관찰하고 분석하였다.

그 결과, 투브시트의 위치는 절대신호와 차동신호 모두 저주파를 사용하면 파악할 수 있고, 확관의 정도나 확관 천이부의 파악은 고주파를 사용할수록 유리하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 900 kHz를 사용한 차동신호의 수평성분을 사용하면 투브시트의 위치 파악과 확관 천이부의 판별을 동시에 할 수 있다는 사실도 알게 되었다. 한편, 절대신호는 확관 천이부를 지난 후 일정하게 유지되므로 투브의 확대된 내경을 측정하는데 수월한 반면, 차동신호는 확관 천이부를 지시하는 신호가 상대적으로 빽빽하게 나타났다가 사라지므로 확관의 정도를 파악하는데 불리한 신호형태를 가지고 있다고 판단되었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 공창식, 이상철, 심덕남, "증기발생기 전열관 확관 공정별 품질 특성 비교", 증기발생기 안전성 실포지엄, Vol. 3, pp. 155-164, 2004
- [2] 신영길, "와전류 탐상신호 예측을 위한 3차원 수치해석 프로그램 확립", 기초전력공학공동연구소, 96-중-02, 최종보고서, 1999
- [3] 신영길, 이윤태, 이정호, 송명호, "유한요소해석에 의한 절대코일 와전류 신호의 임피던스 평면도 작성", 비파괴검사학회지, Vol. 24 No. 4, pp. 315-324, 2004
- [4] ASME Section V, Article 8, Appendix I, "Eddy Current Examination Method for Installed Nonferromagnetic Steam Generator Heat Exchanger Tubing", 1986
- [5] V.S. Cecco, G. Van Drunen, F.L. Sharp, "Eddy Current Testing", GP Courseware, Inc., Columbia, MD 21044, 1987