

## Fin 튜브의 와전류탐상을 위한 최적 탐촉자의 설계

김영주, \* 이세경, \* 안봉영, \* 정민화\*\*  
\* 한국표준과학연구원  
\*\* 한전전력연구원

**요 약** 열 전달 효율을 증가시키기 위하여 튜브의 내·외면에 울퉁불퉁한 지느러미가 부착된 fin 튜브의 와전류탐상을 위하여 와전류 탐촉자를 설계하고 시험하였다. Fin 튜브는 거친 표면으로 인하여 와전류탐상으로 결함을 찾기 위해서는 많은 주의가 필요하다. 본 연구에서는 규격이 다른 와전류 탐촉자를 제작하고 인공 결함 시험편에 대하여 탐상을 실시하였다. 실험한 와전류탐상 신호에 대하여 FFT를 통하여 주파수 스펙트럼을 구하였고 디지털 필터링의 신호 처리를 하여 신호의 주파수 특성을 고찰하였다. 신호와 주파수 특성을 분석한 결과, 본 연구 대상 시험편에서와 같이 1mm 피치의 fin 튜브의 경우 4mm의 코일 거리를 지닌 탐촉자가 가장 좋은 S/N비를 나타내었다.

### 1. 서론

금속 표면결함을 찾기 위한 비파괴검사의 일종인 와전류탐상에서 센서의 역할을 하는 와전류 탐촉자는 결함 검출 능력을 향상시키기 위하여 대상 재료(시험체)의 재질과 형상에 따라 다르게 설계하여 제작되어진다. 내삽형 탐촉자(inside probe)는 튜브형 시험체의 내부에 삽입하여 균열, 마모, 부식 등 시험체 표면 근처에 발생한 결함을 검출하기 위한 것으로 주로 열 교환기 내부의 검사에 많이 이용되고 있다. 그런데 열 교환기를 구성하고 있는 튜브 중에는 표면적을 크게 하여 열 전달 효율을 증가시키고자 튜브의 내, 외 표면에 지느러미가 달린 fin 튜브로 제작되어진 것들이 사용되는 경우가 있다.

그런데 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 튜브의 표면적을 증가시키기 위해 튜브 외벽에 fin을 가공하는 단계에서 튜브 내면에도 fin 간격과 동일한 간격의 높고 짧은 물결 모양의 굴곡과 fin 피치의 3~

4배 가량 주기로 반복되는 낮고 긴 물결 모양의 굴곡이 표면에 생성되어 있는 경우가 보통이다. 이러한 fin 튜브를 와전류시험법으로써 검사하게 되면 튜브 벽에 생성된 결함 뿐만 아니라 fin과 물결 모양의 내면에서도 큰 와전류 신호가 발생되어지므로 ECT 검사가 곤란할 수 있다.<sup>1,2)</sup>

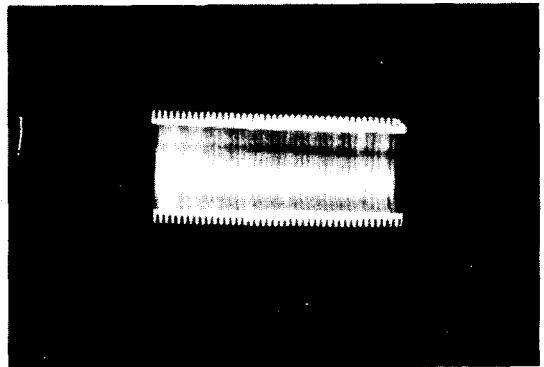


Fig. 1. Sectional image of a fin tube

본 논문은 fin 튜브를 와전류탐상으로써 검사하기 위하여 여러 가지 코일 규격을 지닌 탐촉자와 인공결함 시험편을 제작하여 시험하고 결과 신호의 파형과 주파수 스펙트럼 분석을 통하여 최적의 탐촉자의 규격을 결정한 연구의 내용 및 결과를 기록한 것이다. 탐촉자의 형태는 일반적으로 콘덴서 튜브의 검사에 널리 사용되고 있는 브리지형<sup>3)</sup>으로 하고 탐촉자에 감겨있는 코일의 길이에 변화를 주었다. 코일 길이가 달라짐으로 인한 와전류탐상 신호의 파형의 차이를 비교하였으며 측정된 신호를 FFT(fast Fourier Transform)와 디지털 필터링 등의 신호 처리를 통하여 신호의 주파수 특성을 분석하였다. 이 결과로부터 가장 적합한 탐촉자의 규격을 결정하였다.

**2. 와전류 탐촉자 및 결함 시험편 제작**

본 연구에서 제작한 내삼형 와전류 탐촉자는 브리지형으로서 Fig. 2의 형태를 지니며 모두 네 개를 제작하여 시험하였다.

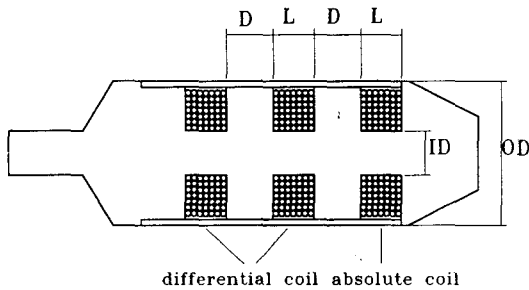


Fig. 2. The structure of the eddy current test probe

각 탐촉자의 치수를 Table 1에 나타내었는데 이 Table에서 보는 바와 같이 차동형 코일간의 거리를 4mm로 유지하고 코일의 길이가 서로 다르게 제작하였다. Table 1에 나타낸 탐촉자 이외에 코일의 길이가 6mm, 7mm인 탐촉자도 제작하여 시험을 하였으나 감도가 낮아 탐촉자의 구실을 거의 못하는 것으로 나타나 5mm길이 까지의 코일로 실험한 결과만을 나타내었다.

차동 코일에서 코일간의 거리와 결함 신호와의 관계는 두 코일이 너무 밀접하게 제작하지만 않으면 결함 신호의 파형에는 그리 큰 영향을 주지 않는다<sup>4)</sup>. 두 코일이 서로 붙어 있는 상황에서 점점 거리를 떨어뜨리는 경우를 고려하면 거리를 넓힐수록

두 코일간의 간섭이 줄어들어 깨끗하고 예리한 파형의 신호를 얻을 수 있다. 그러나 어느 정도 떨어지고 난 후에는 더 이상의 파형의 차이는 없어진다. 그러나 탐촉자의 길이가 증가할수록 시험편 에지(edge)에서의 검사가 어려워지므로 두 코일간의 간섭이 무시할 수 있는 최소의 거리를 지니도록 탐촉자를 제작하는 것이 바람직하다. 본 연구에서 차동 코일을 이루는 두 코일의 간격을 4mm로 정한 것은 이러한 점을 고려하여 결정한 것이다. 이 밖의 코일 길이 이외의 다른 치수들, 즉 코일의 권수(turns), 선경(wire diameter), 코일의 내경, 코일의 외경 등은 시험체의 내경, 재질, 보빈의 코일을 감는 공간의 크기 등과 연구에 사용된 와전류탐상 장비인 Dr. Förster 사의 Model Defectomat 2.825 F에 임피던스가 적절히 정합되도록 하여 결정하였다. 즉 코일 길이 이외의 사양들은 시험편과 사용하는 장비에 맞추어 결정하여야 하는 것<sup>5)</sup>으로 튜브에 fin이 있고 없고 하는 것은 상관없는 것으로서 본 논문에서는 이의 결정 과정은 상술하지 아니하고 그 수치만 Table 1에 나타내었다. 또한 탐촉자는 사용하는 장비에 따라 맞추어 제작하여야 하므로 Fig. 2에 나타난 바와 같이 절대 코일을 차동 코일과 별도의 위치에 놓이도록 제작하였으나 기중에 따라서는 차동 코일의 한쪽 부분에서 신호를 얻을 수도 있다. 본 연구에서와 같이 절대 코일을 별도로 제작하는 경우는 절대 코일과 차동 코일에 걸여주는 신호의 크기가 서로 다르거나 증폭기의 설계시 편의상 그렇게 할 수 있다. 본 연구에서는 차동 코일의 신호만을 측정하였으므로 절대 코일에 관해서는 논문 내용에 포함시키지 않았다.

Table 1. The dimensions of the fabricated eddy current probes

번호	코일 길이 (mm)	코일 간격 (mm)	내경 (mm)	외경 (mm)	선경 (mm)	Inductance (μH)
1	2	4	9.5	13.5	0.16	140
2	3	4	9.5	13.5	0.16	360
3	4	4	9.5	13.5	0.16	700
4	5	4	9.5	13.5	0.16	820

Fin 튜브를 이용하여 Fig. 3과 같이 결합 시험편을 제작하여 와전류탐상에 사용하였다. 결합은 축방향, 원주 방향, 핀홀(pin hole 또는 cylindrical hole) 등 세 가지 형태의 결합을 튜브 내면에 가공하였으며 결합 깊이는 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.6mm, 관통 등 다양하게 제작하였다. 각 결합들은 EDM(electric discharge machining) 방법으로 가공하였으며 fin 튜브는 거의 순동에 가까운 재질을 사용하였다.

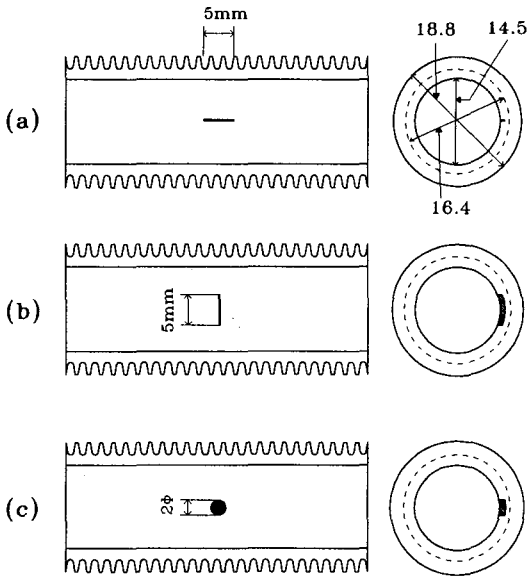


Fig. 3. The fin tube specimens with artificial flaws

### 3. 와전류탐상 결과 및 분석

코일 길이가 서로 다른 와전류 탐촉자를 사용하여 Fig. 3의 여러 가지 인공 결합에 대하여 검사하였다. 시험 주파수는 10kHz로 선택하였는데 이때 시험 재료에서의 와전류의 표준 침투 깊이를 나타내는 skin depth는 약 0.7mm로 계산되었다. 한편 와전류탐상시 탐촉자의 주사 속도가 일정하지 않게 되면 필터를 거치는 과정에서 신호의 파형이 변화할 수 있기 때문에 탐촉자의 주사 속도를 일정하게 유지하기 위한 탐촉자 이송 장치를 제작하여 사용하였다. Fig. 4는 시험 장비의 구성도를 나타낸다. 와전류탐상기에 의해 측정된 와전류 신호는 digital oscilloscope로 보내어 sampling한 후 컴퓨터에 전송하여 저장시켰다.

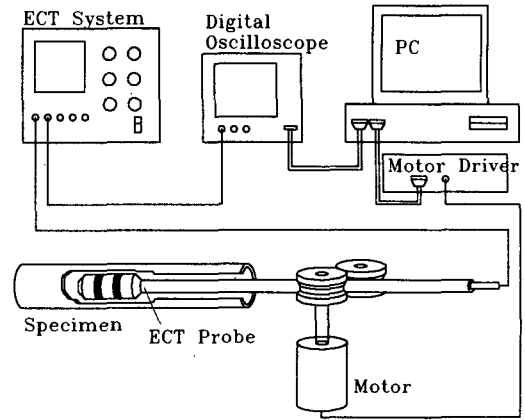


Fig. 4. The ECT system for the experiment

Fig. 5는 결합 깊이가 0.4mm인 축방향 결합, 핀홀, 원주방향 결합에 대하여 코일 길이가 각각 2, 3, 4, 5mm인 탐촉자를 사용하여 와전류탐상한 신호이다. 실험 과정에서는 깊이가 0.4mm인 결합 뿐만 아니라 깊이가 0.2mm, 0.3mm, 0.6mm, 1mm(관통)의 결합에 대하여 시험하였으나 결합 신호의 진폭이 결합 깊이에 따라 변화할 뿐 결합 형태에 따른 파형은 유사하게 나타나 0.4mm 깊이의 결합에 대한 결과만을 나타내었다.

Fig. 5에서 영문 소문자 번호에 기록한 단축 설명은 결합의 형태/결합의 깊이/사용한 탐촉자의 코일 길이를 나타낸 것이며 이것은 다음의 Fig. 6과 Fig. 7에도 똑같이 적용된다. Y축은 측정된 전압을 나타낸 것으로 그림에 표시하였듯이 한 구간(division)당 0.2볼트이고 X축은 시간축으로서 한구간당 0.4초를 나타낸다. Fig. 5의 결과로부터 S/N비가 축방향 결합, 핀홀(pin hole), 원주방향 결합 순서인 것을 알 수 있었으며 이 같은 결과는 튜브 내에서의 와전류 생성 방향이 원주 방향인 것과 튜브에 생성된 fin으로부터 발생하는 신호의 간섭을 고려할 때, 축방향으로 긴 결합일수록 큰 신호가 나타날 것을 예상한 것과 일치하는 결과이다.

한편 단순히 잡음 신호의 크기만을 비교하자면 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 코일의 길이가 길수록 고주파 noise가 가장 작게 나타났다. 즉 5mm 코일의 경우가 고주파 잡음 신호가 가장 작다. 이는 모든 센서의 경우가 그렇듯이 탐촉자의 크기가 클수록 분해능이 떨어져서 fin에 대하여 무감각해질 것을 예상하면 당연하다. 그러나 문제는 길이가 필요이상

길어지면 결함의 신호도 줄어들 뿐만 아니라 fin 가공시 생성된 것으로 판단되는 fin 피치의 3~4배 정도 길이의 표면의 완만한 굴곡으로 인한 저주파 잡음 신호가 증가하는데 있다. 이러한 사실은 본 연구 결과에서도 확인할 수 있다. 즉 4mm 코일로 검사한 Fig. 5의 (g), (h), (i)의 경우 2mm, 3mm 코일로 검사한 신호에 비하여 저, 고주파 잡음 신호는 감소하나 결함 신호는 그대로 유지하거나 오히려 큰 반면 5mm 코일로 검사한 (j), (k), (l)에서는 고주파 잡음 신호는 완전히 제거되었으나 저주파 잡음 신호는 오히려 증가한 것을 확인할 수 있으며 결함 신호도 줄어들어 있는 것을 볼 수 있다. 이 결과와 다른 길이의 결함에 대하여 실험한 결과<sup>1)</sup>들을 종합 분석한 결과 비록 5mm 코일에서의 신호가 4mm 코일로 측정된 신호에 비하여 고주파 잡음 신호가 덜 포함되었다 하더라도 결함에 대한 신호가 작고 저주파 잡음 신호가 크기 때문에 적당치 않으며 코일의 길이가 4mm인 탐촉자가 신호의 S/N비가 가장 양호한 것으로 판단할 수 있다.

이 결과로부터 결국 fin의 간격에 따라 코일의 길이를 조절해야 하는 것을 알 수 있었으며 본 연구에서와 같이 fin간의 피치가 1mm 정도일 경우 코일의 길이를 4mm 정도가 되도록 탐촉자를 제작하는 것이 S/N비가 가장 좋은 것으로 결론지었다.

제작된 여러 가지 탐촉자들로부터 발생된 와전류 신호의 주파수 특성을 분석하기 위하여 FFT를 통하여 주파수 스펙트럼을 구하였다. Fig. 6은 Fig. 5의 와전류 신호를 FFT한 결과이다. Fig. 6에서도 Fig. 5에서와 같이 영문 소문자 번호에 기록한 단축 설명은 결함의 형태/결함의 깊이/사용한 탐촉자의 코일 길이를 나타낸다. Y축은 한 구간당 10데시벨이고 X축은 한 구간당 10Hz를 나타낸다. 이를 살펴보면 전반적으로 각 신호의 크기는 주파수가 10Hz 부근과 30Hz 부근에서 큰 것으로 나타났다. 이 두 주파수 영역에서의 신호원을 추적하기 위하여 각 신호를 20Hz를 cut off frequency로 하는 low pass filtering을 시행하였다. Fig. 7은 Fig. 5의 신호를 filtering한 결과이다. 역시 영문 소문자 번호에 기록한 단축 설명은 결함의 형태/결함의 깊이/사용한 탐촉자의 코일 길이를 나타낸다. Fig. 7의 결과는 결함에서의 신호는 거의 원형을 유지하는 반면 고

주파 잡음 신호는 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다. 그러므로 20Hz 이상의 신호가 주로 fin과 기타 고주파 성분의 noise로부터 발생된 신호이며 그 이하의 주파수의 신호원은 결함이나 표면의 낮고 긴 굴곡에서 비롯된 것으로 판단된다. 즉 튜브 표면의 결함에 의한 신호는 주로 20Hz 이하의 주파수 성분을 갖는 것을 알 수 있었다.

다시 Fig. 6의 FFT 결과를 고찰하기로 하면, 우선 5mm 코일로 검사한 신호를 FFT한 결과는 20Hz 이상의 신호 즉 잡음 신호가 다른 탐촉자로 검사한 신호에 비하여 월등히 낮은 것을 볼 수 있으나 5~20Hz의 신호 또한 다른 길이의 코일로 검사한 신호에 비하여 낮은 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 그나마 그림에서 나타난 20Hz 이하의 봉우리 형태의 스펙트럼은 Fig. 5에 나타난 신호 형태를 아울러 고려할 때, 앞서 설명한 저주파 노이즈 성분이 상당히 섞여 있다고 생각된다. 즉 여기서 보여주는 봉우리는 결함만으로부터 유래한 것이 아니라고 할 수 있다. 따라서 결함 검출용 탐촉자로서는 적절하지 않은 것으로 판단하였다.

따라서 5mm 코일을 제외한 나머지 세 종류의 탐촉자만을 비교해 보면 2mm와 3mm의 코일 길이의 탐촉자들은 30Hz 부근의 noise 들의 크기가 10Hz 이하의 결함 신호의 크기 보다 오히려 크게 나타나 있는 반면 4mm의 코일 길이를 갖는 탐촉자의 주파수 스펙트럼에서는 결함 신호의 크기가 noise 신호 보다 크게 나타나 있는 것을 확인할 수 있다.

물론 이러한 주파수 특성은 실험실에서 자동 이송 장치를 이용하여 10cm/sec 정도의 저속으로 탐촉자를 이송할 때 나타나는 것이며 실제 탐상 시에는 탐상 속도에 따라 신호의 주파수 대역이 수 십, 수 백배 고주파수 영역으로 올라가게 되나 결함과 fin에 의한 신호는 같은 비율로 증가된 서로 다른 주파수 영역에서 본 실험에서 실시한 것과 유사한 형태의 주파수 특성을 나타낼 것으로 예상된다.

결국 시간 영역의 신호와 주파수 영역에서의 신호를 자세히 분석함으로써 fin의 간격이 1mm정도가 되는 fin 튜브를 검사하기 위한 탐촉자는 코일 길이가 4mm 정도가 되도록 탐촉자를 제작할 때 가장 S/N비가 커지는 것으로 결론지을 수 있다.

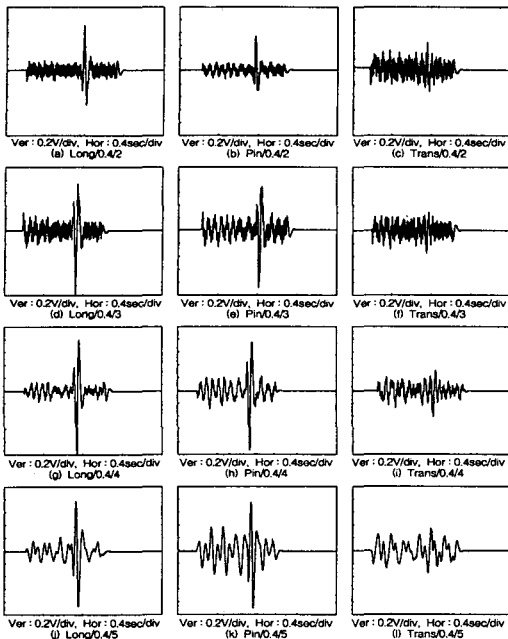


Fig. 5. The eddy current signals on the condition of ; flaw type / flaw depth / coil length  
 Long : Longitudinal, Trans : Transverse,  
 Pin : Pin Hole

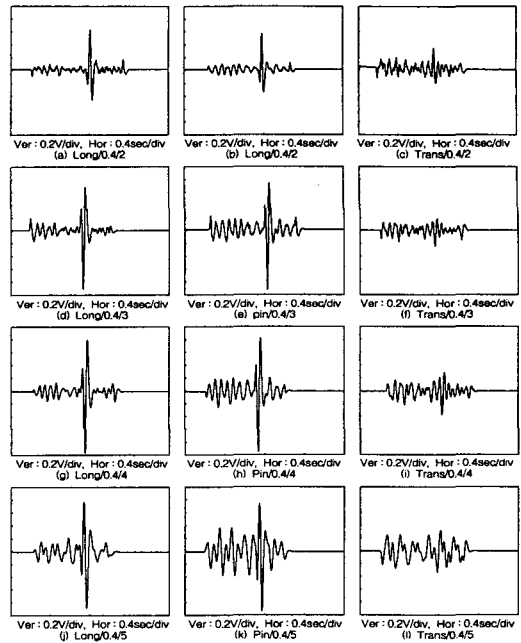


Fig. 7. The low pass filtered results of the signals in Fig. 5.

#### 4. 결론

열 교환기를 구성하는 fin tube의 와전류탐상에 적합한 탐촉자를 개발하기 위하여 탐촉자를 구성하는 코일의 길이가 다른 여러 가지 탐촉자를 제작하였다. 이 탐촉자들을 사용하여 축방향 결함, 핀홀, 원주 방향 결함 등 세 가지 형태의 결함에 대하여 탐상해 본 결과 코일의 길이가 4mm인 탐촉자가 모든 형태의 결함에 대해서 가장 검사능이 우수하였다.

와전류검사시 발생하는 신호중 결함에 의한 신호와 fin에 의한 신호는 서로 상이한 주파수 영역에 있는데 두 신호중 fin에 의한 신호가 더 높은 주파수 영역에 있다. 코일의 길이가 4mm인 탐촉자를 사용하면 다른 규격의 탐촉자를 사용했을 경우 보다 결함 신호 대 fin 신호의 비율이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

코일의 길이가 4mm인 탐촉자를 사용하여 fin간의 피치가 1mm인 fin tube를 와전류탐상하면 결함에서 발생하는 와전류 신호는 거의 보존하면서 fin에 의한 noise를 상당히 감소시킬 수 있다.

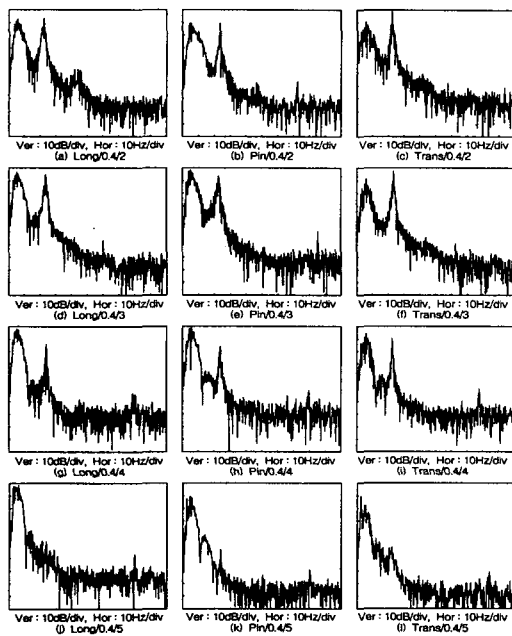


Fig. 6. The frequency spectra of the signals in Fig. 5.

**참고 문헌**

- 1) KRC - 89G - J02 "Development of the ECT Technique for Fin Tubes in Nuclear Power Plants" Report of Research Center, Korea Electric Power Corporation
- 2) V. M. Bhole, V. K. Pareek and A. R. Biswas "6th International Conference on NDE in the Nuclear Industry and Equipment / Services Ex-position"(1984), pp. 647-651
- 3) V. S. Cecco, G. Van Drunen and F. L. Sharp "Eddy Current Testing" Vol. 1(1984), pp. 34-38
- 4) "와전류 탐상용 탐촉자 개발" 한국표준과학연구원 연구보고서 KSRI-IR-78(1984), pp. 148, 246-259
- 5) R. C. McMaster "Nondestructive Testing Handbook vol. 4. Electromagnetic Testing", 2nd edition(1986), pp. 53-86

## **Design of the Fittest Eddy Current Probe for the Fin Tubes**

Y. J. Kim,\* S. K. Lee,\* B. Y. Ahn\* and M. H. Chung\*\*

\* Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600

\*\* Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380

**Abstract** The eddy current probe was designed for the test of fin tubes that have uneven outer and inner surfaces to enhance the efficiency of heat emission. Because of the surface roughness of the fin tube, it needs much care to detect flaws in the tube employing eddy current test(ECT). We made ECT probes with different coil lengths and performed eddy current test using these probes for artificially flawed specimens. By the fast Fourier transform and digital filtering, signals from these probes were processed to characterize frequency spectra. From the analysis of eddy current signals and their frequency spectra, we concluded that, for the effective testing of the tubes with the fins of 1mm pitch, 4mm coil length gave the highest S/N ratio.