

Fin 높이가 다른 Fin Tube의 와전류탐상에 관한 연구

이 동 진*

A Study of Eddy Current Test for Fin Tube in Different Fin Height

Dong-Jin Lee

주요용어 : 와전류탐상(Eddy Current Test), 핀튜브(Finned Tube), 동관(Bare Tube),
방전가공(Electro Discharge Machining), 내삽코일(Bobbin coil)

요 약

응축기, 증발기, 전열관에 사용되는 Fin Tube는 열전달효율 향상을 위하여 Fin의 높이를 증가시키고, Tube의 최소두께를 얇게 가공하는 경향으로 발전하고 있다. 따라서, Fin Tube의 와전류탐상(ECT; Eddy Current Testing)에 의한 결함검출에 더욱 어려움이 예상된다.

본 연구에서는 Fin Tube의 Fin 높이를 3단계로 변화시켜 Tube를 제작하고, Tube에 축방향결함, 원주방향결함, 원형결함을 각각 Fin Tube의 안쪽에 최소두께의 20%, 40%, 60%의 동일결합율을 갖는 인공결함 시험편을 제작하였다.

제작한 원형결함시험편에 와전류탐상을 수행하여 Fin 높이에 따른 최적주파수의 변화를 연구하였다.

Fin높이가 다른 원형결함 시험편에 1~20kHz 주파수를 적용한 결과 최적주파수는 12kHz로 Fin높이에 크게 영향을 받지 않음을 밝혔다. 또한 Fin높이에 따른 최적주파수변화는 크지 않으나 Fin 높이가 높을수록 100%관통결함의 위상각(40°)에 근접하여 나타났다.

축방향결함, 원주방향결함, 원형결함을 갖는 시험편에 와전류탐상을 수행한 결과 원형결함을 갖는 시험편의 신호 감도가 축방향결함, 원주방향결함보다 좋게 나타났다.

1. 서 론

비파괴검사(NDT, Nondestructive Testing) 방법 중 와전류탐상(ECT, Eddy Current Testing)은 피검사체와 탐촉자의 직접적인 접촉이 없이도 검사가 가능하다.

또한 전기적인 입출력 신호를 갖기 때문에 검사속도가 매우 빠르다는 강점이 있어 원자력 발전설비, 열교환기 등 각종 도체 구조물의 결함 검사에 폭 넓게 사용되고 있다.

한편, 열교환기용 튜브는 여러 비철금속 중 열전도성이 우수하고 전연성 및 기계적 성질이 양호한 동(銅)합금 재료를 많이 이용하고 있다.

*이동진, 한국산업기술대학교 기계공학과(skyski@kinst.ac.kr)
주소 : 429-793 경기도 시흥시 정왕동 2121-2

그리고, 열교환기용 튜브는 열전달 효율 및 전열면적을 넓히기 위하여 동파이프의 내·외면을 여러 가지 모양으로 가공하는 공정을 거치게 된다. 이러한 열교환기용 튜브 중 평관에 연속적인 나선을 만들어 제작하는 핀튜브(FIN TUBE)는 표면적이 넓어 에어컨과 냉장고의 응축기, 증발기, 전열관에 주로 사용된다. 이 핀튜브는 전열면적을 넓히기 위하여 핀(FIN)의 높이를 증가시키는 방향으로 발전하면서 LOW FINNED TUBE 와 HIGH FINNED TUBE로 나뉘어져 있고, 점차 HIGH FINNED TUBE의 수요가 증가하는 추세에 있다. 따라서 핀 튜브의 형상은 동일하지만 핀의 높이가 변화됨으로써 동일결합율에 대한 와전류탐상신호의 특성도 달라지는 것을 예상할 수 있어 그 신호특성 변화에 관한 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 동일한 형상의 핀 튜브를 대상으로 핀 높이를 3단계로 변화시켜 3개의 튜브를 제작하고, 각각의 튜브에 축방향결합, 원주방향결합, 원형결합을 최소두께의 20%, 40%, 60% 깊이로 방전가공(EDM; Electro Discharge Machining)하여 시험편을 제작, 시험함으로써 LOW FINNED TUBE에서 HIGH FINNED TUBE로의 수요변화에 따라 와전류탐상의 신호 특성을 예측하고자 하였다.

또, 핀 높이의 변화에 따른 최적주파수 변화를 파악하고자 하였다. 시험에 사용되는 탐촉자는 내삽형(Bobbin Coil)으로 제작하여 시험하였으며, 본 연구를 통하여 핀 튜브의 핀높이 변화에 따른 최적주파수 변화를 파악하고, 결합의 형태 및 결합율에 따른 와전류탐상신호의 특성을 제시하고자 한다.

2. 와전류탐상장치의 구성과 신호처리

와전류를 이용한 시험·검사분야의 응용은 탐상시험에 이용될 뿐만 아니라, 형상치수 시험, 막두께 측정, 비자성체의 도전을 측정 등 여러 분야에 적용한다. 이것은 와전류가 시험체 내 결합의 영향뿐만 아니라 시험체의 형상

치수, 전자기적 특성, 시험체와 시험코일과의 상대적인 위치에 대해서도 영향을 받기 때문이다. 이러한 영향인자에서 잡음이 발생함으로써 결합검출에 어려움이 따른다. 따라서 잡음을 억제하여 신호 대 잡음비(S/N비)를 향상시킴으로써 세밀한 결합까지 검출할 수 있는 신호처리가 필요하다.

Fig. 1.에는 와전류탐상기의 기본구성과 신호의 흐름을 나타냈다.

발전기에서 발전된 기준신호는 브리지(Bridge)회로와 이상기로 구분된다. 브리지회로는 시험코일과 가변저항기로 구성되며, 이 가변저항기를 조정함으로써 시험체의 건전부에서는 출력이 나오지 않게 된다. 또한 이 상태를 감시하는 것이 밸런스미터이다. 그리고 시험체의 결합부분이 시험코일에 들어갈 경우 브리지의 밸런스가 흐트러져 결합에 의한 코일의 임피던스 변화에 따른 전압이 출력되게 된다. 이 출력전압은 미소하여 다음 증폭기에 의해 증폭되며, 증폭기에는 감도 조절기가 부착되어 있어서 감도의 조절이 가능하다.

한편, 이상기에 입력된 기준신호는 이상회로를 사용하여 주파수는 동일하게 하며 기준신호에 대해 임의의 위상을 갖는 신호로 출력되게 된다.

동기검파(위상검파)기는 증폭기의 출력과 이상기의 출력을 비교하고, 반송 노이즈(Noise) 등 불필요한 신호를 제거함으로써 결합신호의 검출을 용이하게 하는 회로이다. 동기검파된 출력신호는 결합신호 외에 기준신호 성분이나 동기

검파를 완전히 제거하지 않아 잡음이 포함되며, 필터를 이용하여 신호중에 결합신호보다 고주파수나 저주파수 성분을 제거한다.

이 필터는 통상 저역필터(Low Pass Filter)와 고역필터(High Pass Filter)의 조합으로 대역필터(Band Pass Filter)를 사용한다. 필터를 통과한 신호 중 제거되지 않은 낮은 레벨의 잡음을 없애는 리젝션(Rejection)회로도 이용된다.

리제션회로를 통과한 결합신호와 비교해서 마킹 및 선별장치를 동작시키는 진폭변별기가 사용된다.

CRT는 동기검파의 출력신호를 벡터로 표시하고, 브리지의 밸런스상태 외에 결합신호나 노이즈의 진폭 및 위상을 관측한다.[1]

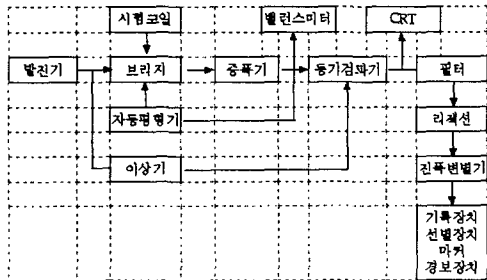


Fig. 1. Internal Function of the Eddy Current Test.

실험튜브의 이송장치와 탐촉자 지지대를 이용하였다. 탐촉자는 내삽형코일을 제작, 사용하였으며, 코일직경은 $\phi 0.16\text{mm}$ 크기로서 차동형으로 구성되도록 제작하였다.



Fig. 2. 3D Non-contact Measuring Machine.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 비접촉 3차원 측정기와 와전류 탐상장치이다. Fig. 2. 비접촉 3차원 측정기는 정밀도 $(2.5+L/150)\mu\text{m}$, 측정범위 $400 \times 200 \times 200\text{mm}$, 배율 $\times 30 \sim \times 300$ 까지 가능한 독일의 Werth사에서 제작한 측정기로 Finned tube의 형상치수를 정밀하게 측정할 수 있었다.

Fig. 3.의 와전류 탐상장치는 주파수 대역이 $100\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ 인 Zetec MIZ-30-4의 Multi Frequency를 갖는 탐상시스템을 사용하였으며, 와전류 탐상의 신호수집 및 분석에 사용된 소프트웨어는 Zetec-eddynet 프로그램이다. 특히 MIZ-30은 1 Frequency당 6,400개의 데이터를 디지털로 수집할 수 있다.[2]

또한 와전류 탐상에 큰 영향을 미치는 탐촉자와 실험 튜브간의 리프트오프(Lift-off)의 변화에 대한 오차를 최소화 하고, 실험 튜브의 균일한 이송과 탐촉자 제어를 위하여

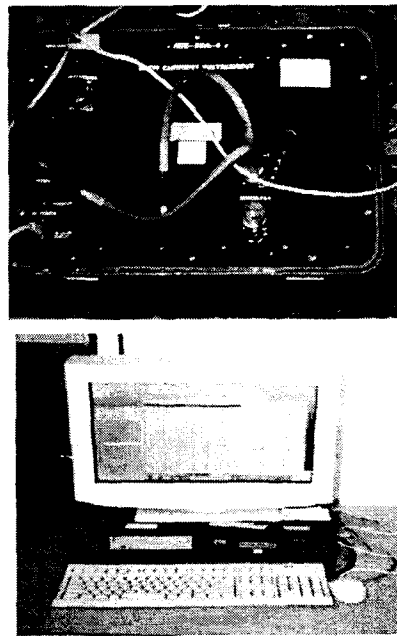


Fig. 3. Eddy Current Testing System.

3.2 실험방법

서로 다른 Fin height를 갖는 Fin Tube의 형상 정도를 확인하기 위하여 제작된 튜브의 단면을 비접촉 3차원 측정기를 이용하여 외경, 내경, 관벽 두께, 핀 높이, 핀 피치를 측정하였다.

핀높이가 다른 3개의 Fin Tube에 대한 각각의 최적 시험주파수를 찾기 위하여 Fin Tube에 최소두께의 20%, 40%, 60%의 결함을 방전가공하고 기준이 되는 100%관통 원형결함을 방전가공한 시험편을 제작하였다. 시험에 있어서는 1kHz~20kHz까지 주파수를 변화시키면서 신호를 수집하여 시험주파수별로 결함신호의 크기 및 위상각을 분석하였다.

결함신호의 크기 및 위상각 분석을 통하여 핀높이가 다른 3개의 튜브 각각에 대한 최적 주파수를 확인하였다. 확인한 최적주파수를 적용하여 각각의 시험편의 결함신호를 수집하고 비교함으로써 동일결함에 대한 신호의 변화를 확인하였다.

3.3 시험코일의 제작

본 실험에 사용하는 시험코일은 내삽형 코일으로써 차동형 회로방식을 적용하였다. 차동형 코일에서 코일간의 거리와 결함신호와의 관계는 두 코일이 매우 밀접한 상태가 아니면 결함신호의 파형에는 큰 영향을 주지 않는다. 두 코일이 서로 붙어있는 상태에서 점차 거리가 커질수록 두 코일사이의 간섭이 줄어들어 깨끗하고 예리한 파형의 신호를 얻게 된다. 그러나, 일정거리를 유지할 경우 더 이상의 파형 차이는 없게된다. 탐촉자의 길이가 증가할 수록 시험편 에지(edge)부의 검사가 곤란하므로 두 코일간의 간섭이 거의 없는 최소거리를 유지하도록 탐촉자의 제작이 필요하다.[3]

본 연구에서는 차동형 회로를 구성하는 두 코일의 간격을 1.5mm하여 이러한 점을 고려하였다.

제작된 시험코일의 특성은 공진 주파수, 위상각 변화, 저항 등의 전기적 특성을 측정하기

위해서 100Hz~40MHz인 HP-4194A 임피던스 분석기를 사용하여 data를 얻었다. Table 1은 제작한 내삽코일의 특성이고, Fig. 4는 내삽코일의 사진이다.

Table 1 Bobbin Coil Characteristics.

제작지수	Head dia[mm]	가공깊이×높이[mm]
	외경 14	1.5×1.5
Coil 턴수 및 직경	85×0.16	
공진주파수	Coil A	499kHz
	Coil B	499kHz
코일 간격	1.5mm	
코일 폭	1.5mm	
코일 외경	14mm	



Fig. 4. Bobbin Coil.

3.4 시험편 제작

본 연구에 사용된 시험편의 재료는 KS-D-5301 C 1220 T-OL인 이음매 없는 인탈산 동관으로 그 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Material Characteristics of the Tube Specimen

파악성분	기계적성질				치수(mm)			
	원소	Cu	P	인장강도(N/mm ²)	연신율(%)	바깥지름	안지름	두께
종명	Bare Tube	99.941	0.0256	248.1	51%	19.0±0.06	16.3±0.05	1.3±0.09

열교환기용 튜브에 가장 많이 사용하는 인탈산 동관을 Rollet을 이용한 Fin Tube의 전조공정을 통하여 핀 높이를 다르게 가공하였다.

핀 높이가 다르게 가공된 3개의 튜브형상의 단면도는 Fig. 5에 나타냈으며, 형상과 치수는 Table 3, 사진은 Fig 6에 나타냈다.

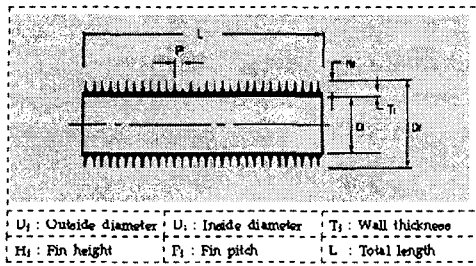


Fig. 5. Sectional Diagram of Fin Tube

Table 3 The Dimensions of Fin Tubes.

구분	(단위 : mm)				
	D_o	D_i	T_w	H_f	P_f
Tube-I (Low)	18.31±0.02	14.67±0.02	0.97±0.01	0.85±0.01	0.97±0.01
Tube-II (Middle)	18.82±0.02	14.74±0.02	0.72±0.01	1.32±0.01	1.03±0.01
Tube-III (High)	19.31±0.02	14.87±0.02	0.49±0.01	1.73±0.01	1.04±0.01

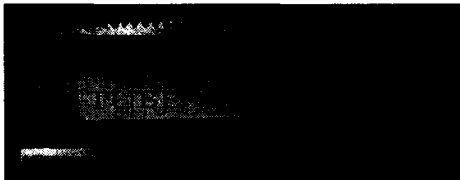


Fig. 6. Section of Fin Tubes.

결함의 종류는 Fig. 7.과 같이 축방향결함, 원주방향결함, 원형결함의 3종류이며, 결함의 깊이는 각각의 핀튜브 최소두께의 20%, 40%, 60%, 및 100% 관통 원형결함이다. 결함의 재원은 Table 4와 같고 제작도면은 Fig. 8.에 나타냈다.

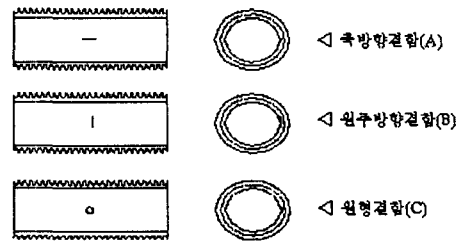


Fig. 7. The Fin Tube Specimens with Artificial Flaws.

Table 4 Artificial Defect Dimension on Fin Tube.

구분	(단위 : mm)									
	축방향결함			원주방향결함			원형결함			
결함길이	5mm			5mm			φ2mm		φ0.4	
	0.75mm			0.75mm			-		-	
깊이	%									
	20%	40%	60%	20%	40%	60%	20%	40%	60%	100%
Tube-I (Low)	0.19	0.38	0.57	0.19	0.38	0.57	0.19	0.38	0.57	0.97
Tube-II (Middle)	0.14	0.28	0.42	0.14	0.28	0.42	0.14	0.28	0.42	0.72
Tube-III (High)	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.50

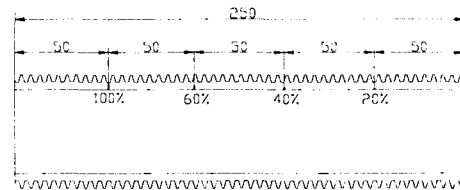


Fig. 8. Artificial Defect Diagram on Fin Tube.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 최적주파수

핀높이에 따른 최적주파수의 변화를 파악하기 위하여 3가지의 인공결함 시험편 중 원형결함을 갖는 시험편에 대한 와전류탐상신호를 분석하여 최적주파수를 찾고자 하였다. 그리고 신호의 비교를 위하여 100% 관통결함을 위상각 40° 로 기준을 정하여 20%, 40%, 60% 결함의 위상각을 분석하였다.

Fig. 9.는 원형결합 시험편중 편높이가 가장 낮은 시험편(C-L)의 주파수변화에 따른 와전류탐상신호의 위상각변화를 나타낸 것이다.

Fig. 10.은 원형결합 시험편중 편높이가 중간인 시험편(C-M)의 주파수변화에 따른 와전류탐상신호의 위상각변화를 나타낸 것이다.

Fig. 11.은 원형결합 시험편중 편높이가 가장 높은 시험편(C-H)의 주파수변화에 따른 와전류탐상신호의 위상각변화를 나타낸 것이다. 여기서 최적주파수는 기준이되는 100%관통결합의 위상각인 40°와 구분이 잘 되면서 결함율에 따른 위상각의 변화가 일정한격으로 변화하는 선형성을 나타내는 주파수로 시험편 C-L에서는 기울기가 크고 선형성이 좋은 12kHz에서 나타났다. 그러나 시험편 C-M에서는 8kHz, 10kHz, 12kHz가 큰 차이를 보이지는 않았다. 그리고 시험편 C-H에서는 기준각도와 차이를 보이며 선형성이 좋은 12kHz에서 비교적 안정적인 신호를 나타냈다.

실험을 통하여 Fin Tube의 편높이 변화에 따른 최적주파수는 동일결함율에 대하여 크게 변화하지 않음을 알 수 있다.

그러나 그래프를 세밀히 관찰해 보면 편높이가 높아질 수록 동일결함율을 갖는 인공결함에 대한 와전류 탐상신호의 위상각이 100% 관통결합의 위상각과 근접해 감을 알 수 있었다. 이것은 점점 High Finned Tube로의 발전이 진행될 수록 결함의 검출 즉, 결함신호의 해석이 난해함을 알 수 있었다.

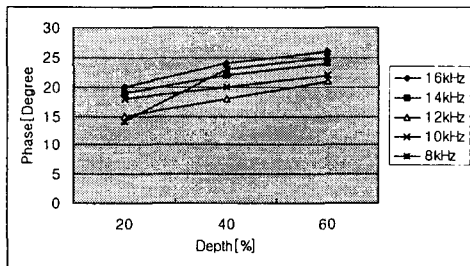


Fig. 9. Depth versus phase angle on Fin Tube(C-L) in different frequency.

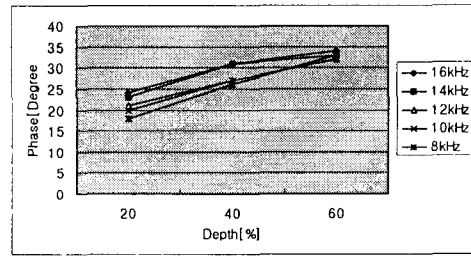


Fig. 10. Depth versus phase angle on Fin Tube(C-M) in different frequency.

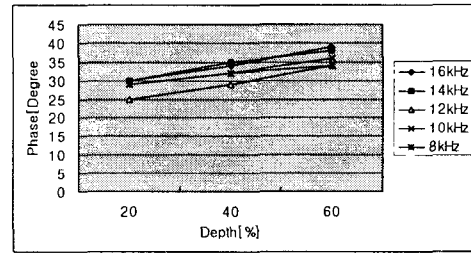


Fig. 11. Depth versus phase angle on Fin Tube(C-H) in different frequency.

4.2 3종류의 결함에 따른 신호분석

원형결합 시험편의 시험결과에서 얻은 최적주파수(12kHz)를 적용하여 축방향결함과 원주방향결함 시험편에 대하여 와전류탐상을 수행하였다. 원형결합시험에서와 동일하게 100% 관통결함을 위상각 40°로 기준을 정하고, 축방향결함과 원주방향결함 시험편에서의 20%, 40%, 60% 결함의 위상각을 분석하였다.

Fig. 12.는 편높이가 가장 낮은 시험편(Low)의 결함종류에 따른 와전류탐상신호의 위상각변화를 나타낸 것이다.

Fig. 13.은 편높이가 중간인 시험편(Middle)의 결함종류에 따른 와전류탐상신호의 위상각변화를 나타낸 것이다.

Fig. 14.는 편높이가 가장 높은 시험편(High)의 결함종류에 따른 와전류탐상신호의 위상각변화를 나타낸 것이다.

여기서 원형결함 시험편의 와전류탐상신호는 결함의 깊이에 따라 위상각 차이가 크고 일정하게 나타났다. 그러나 축방향결함과 원주방향결함 시험편의 신호는 불규칙하게 나타났다. 이 실험을 통하여 원형결함에 대한 와전류신호의 감도가 축방향결함이나 원주방향결함에 대한 감도보다 좋다는 것을 알 수 있었다. 또한 와전류탐상신호는 결함의 종류에 따라 다르게 나타남을 알 수 있었다.

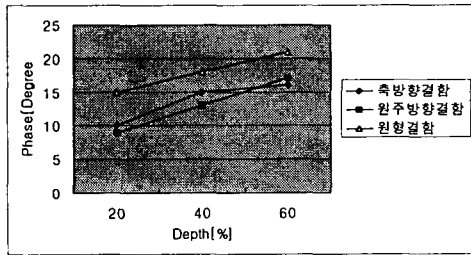


Fig. 12. Depth versus phase angle on Fin Tube(Low) in different Defects.

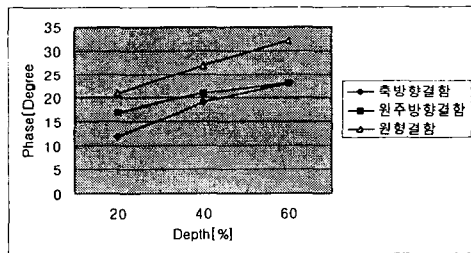


Fig. 13. Depth versus phase angle on Fin Tube(Middle) in different Defects.

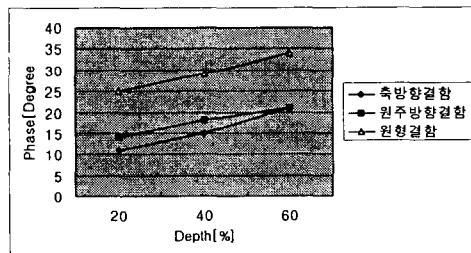


Fig. 14. Depth versus phase angle on Fin Tube(High) in different Defects.

5. 결론

본 연구에서는 Fin Tube의 Fin 높이를 3단계로 변화시켜 Tube를 제작하고, 3단계의 Tube에 3가지 종류의 결함(축방향결함, 원주방향결함, 원형결함)을 각각 Fin Tube의 안쪽에 최소두께의 20%, 40%, 60%의 동일결함율로 방전가공(EDM; Electro Discharge Machining)으로 인공결함 시험편을 제작하였다. 제작한 시험편을 와전류탐상을 수행함으로써 Fin 높이에 따른 최적주파수의 변화와 신호의 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 핀높이가 서로 다른 3개의 원형결함 시험편을 1kHz~20kHz까지의 시험주파수를 적용하여 시험한 결과 핀높이에 관계없이 12kHz대에서 신호의 진폭 및 위상각이 잘 나타나는 것으로 보아 최적주파수는 핀의 높이에 그다지 큰 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다.

둘째, 핀높이에 따른 최적주파수의 변화는 크지 않았으나, 핀높이가 높아지면서 신호의 위상각이 기준이 되는 100% 관통결함의 위상각(40°)에 가깝게 나타남을 알 수 있었다.

셋째, 축방향결함, 원주방향결함, 원형결함 3종류의 결함신호를 분석한 결과 원형결함을 갖는 시험편의 신호 감도가 가장 좋게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 이의중, "와전류탐상시험", 골드, pp. 103~108, 2000.
2. Miz-30-4, Eddy Current Testing Instructment, Zetec, 1994.
3. 김영주, 이세경, 안봉영, 정민화, "Fin 튜브의 와전류탐상을 위한 최적탐촉자의 설계", 비파괴검사학회, Vol.17, No. 3, 1997.