

渦電流探傷法에 의한 Sludge Pile속의 缺陷檢出

安秉完* · 任彰宰* · 具吉謨*

The Detection of the Steam Generator Tubing Defects in the Sludge Piles by the Eddy Current Testing

Byeong Wan Ahn, Chang Jae Yim and Kil Mo Koo

Abstract: In the in-service inspections for the steam generator tubing of the nuclear power plants by the Eddy Current Testing, the ECT signals are evaluated by their phase. If oxidized copper sludge is piled up in the secondary side, however, big sludge signals occur in large quantities which originate from copper layers forming in the sludge piles due to the pitting mechanism of the steam generator tubing by Cu^{2+} , and modulate the defect signals, causing the difficulty in the defect detection. In this research, sludge specimens were prepared considering the formations of the sludge signal sources and multi-frequency ECT mixing experiments by different choices of the mixing standards were performed. The results were found to be 5 to 30% of the tube wall thickness over-estimated. Experiments using the ring-type mixing standards showed the least errors of all, while those with the mixing standards nearing the sludge conditions brought larger errors as a result of the influence of the interference between the defect and the copper layers.

1. 서 론

원자력발전소의 증기발생기 전열관에 대한 가동중검사 방법으로 널리 사용되고 있는 와전류탐상법(Eddy Current Testing)은 각종 전열관과 같이 가늘고 긴 검사체에 대해 고속자동으로 검사를 수행, 관의 결함을 검출하고 그 깊이를 평가할 수 있는 매우 유효한 비파괴검사 방법이다. 그러나 와전류탐상법에 의한 원자력발전소의 가동중검사 시 증기발생기의 전열관 결함 이외에 전열관지대, Denting, Pilgaring Noise, Sludge, Probe 진동 등에 의한 방해신호가 발생하여 결함신호를 변조시킴으로써 검사의 제한 요소가 되고 있다¹⁻⁴⁾. 특히 고리원자력 1 호기에서 다량으로 발견되는 Sludge 신호는 매우 큰 신호가 집중적으로 나타남으로서 종래의 와전류탐상 방법으로는 Sludge 부위에서의 결함 검출이 불가능

하였는데, 최근에 최신 기술인 다중주파수 와전류법이 도입됨으로서 이 문제를 해결하기 위한 시도가 가능하게 되었다.^{5,6)}

H. L. Libby에 의해 처음 개념 및 이론이 제시되었던⁷⁾ 다중주파수법은 서로 다른 검사주파수에서 얻은 와전류신호들을 적절히 혼합(Mixing)하여 방해신호 성분을 소거할 수 있도록 되어 있으며, 70년대 중반에 처음 실용화된 이후⁸⁾ 주로 검사체 접촉 구조물 잡음 및 Dent 신호 등에 관한 기술 개발이 이루어져 왔는데 Sludge 신호에 관해서는 신호 원인이 모호하여 단순한 Copper 부착물을 가정한 방해신호의 소거가 시도 되어 왔다.^{9,10)}

Sludge 신호는 Cu 산화물이 전열관 외벽 쪽에 쌓이는 것과 관련이 있는 것으로 추정하여 왔는데¹¹⁾ 미국의 Indian Point 3 등 원자력발전소에서 전열관을 직접 분리, 수거하여 검사한 결과가

*韓國에너지研究所 非破壞試驗研究室
 接受: 1987年 12月 26日

밝혀짐으로서^{14,15)} 그 원인이 보다 확실히 알려지게 되었다. 즉 해수의 유입 등으로 인해 Cu 산화물로부터 Cu Ion이 발생되고 이는 다시 전열관 구성 성분인 Ni, Fe 등과의 Ion화 경향의 차이로 인해 Cu로 석출되면서 Sludge Pile내에 여러 겹의 Cu도금층을 형성하게 되며 동시에 전열관 외벽에 Pitting 결함을 성장시킨다는 것이다. 이렇게 형성된 Cu 층은 전열관 재료인 Inconel 600보다 전기전도도가 매우 높기 때문에 큰 방해신호를 발생시키게 되며 그 부위에 존재하는 결함의 검출을 방해하게 된다.

본 연구에서는 이와같은 다층 구조 Sludge 신호의 원인을 고려하여 Sludge 시편을 제작하고 여러가지 형상의 Mixing 표준시험편을 준비, 각각의 경우에 대한 다중주파수 실험을 통하여 결함 검출 능력을 비교 평가하였다.

2. 이 론

2.1 다중주파수 와전류탐상의 원리

검사체 내의 와전류 밀도 분포는 Maxwell 방정식으로부터

$$J_x = J_0 \cdot \exp[-(\pi f \mu \sigma)^{1/2} x] \exp[-j(\pi f \mu \sigma)^{1/2} x] \dots \dots \dots (1)$$

으로 표시되며¹⁾, 여기서

- J_x : 와전류 밀도 분포 [Amp/m²]
- J₀ : 검사체 표면에서의 와전류밀도 [Amp/m²]
- f : 검사 주파수 [Hz]
- μ : 검사체의 투자율 [Henry/m]
- σ : 검사체의 전기전도도 [mho/m]
- x : 검사체 표면으로부터의 깊이 [m]

이다. 따라서 와전류 밀도 크기가 표면 와전류 밀도의 e⁻¹=0.37 배 되는 깊이인 표준침투깊이 (Standard Depth of Penetration)는

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma} \dots \dots \dots (2)$$

로 표시되며, 검사체의 깊이에 따른 와전류 밀도 분포는 Fig.1 과 같이 된다. 그리고 깊이에 따른 와전류의 위상 지연은

$$\theta = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \cdot x \dots \dots \dots (3)$$

이다.

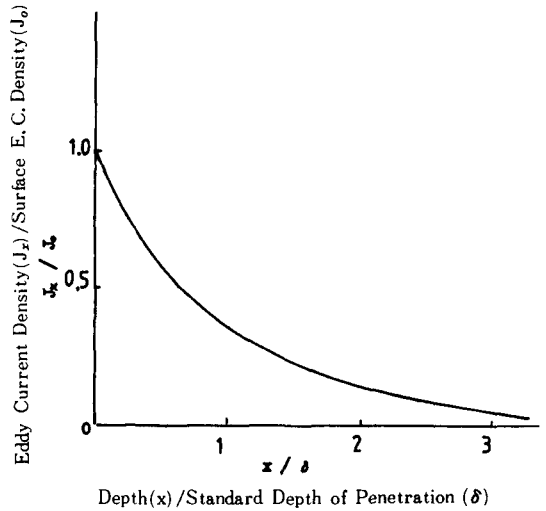


Fig. 1. Distribution of the eddy current density in the test object.

모든 와전류신호는 신호 원인별로 검사주파수에 따라 특징적인 신호 위상 및 진폭의 변화를 나타낸다.¹⁴⁾ 다중주파수 와전류법은 이를 이용하여, 서로 다른 검사주파수에서 얻은 신호들에 대해 상호 Vector 적인 감법을 수행함으로써 증첩되어 존재하는 신호 원인들에 의한 복합신호로부터 원하는 신호에 관한 개선된 Signal-to-noise 비를 얻을 수 있다.

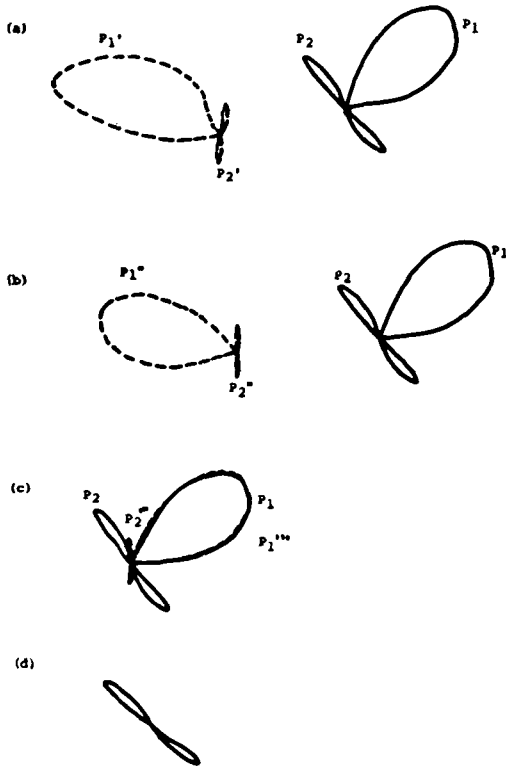
Fig.2에서 어느 복합신호의 방해신호 성분을 P₁, 결함신호 성분을 P₂라 하고 이들의 다른 검사주파수에서 얻은 신호 성분들을 각각 P₁', P₂'라 하면 다중주파수 와전류법은

- 1) P₁'를 P₁과 크기와 모양이 비슷하게 되도록 조정하여 P₁''를 얻기
- 2) P₂'를 P₁과 겹쳐지도록 위상을 조정하여 P₂''를 얻기
- 3) P₁~P₂''의 Vector 감법을 수행

의 과정을 따라서 이루어지며 이와 같은 과정을 다중주파수 Mixing이라 한다.^{14,15)} 이 때에 결함신호 성분 P₂'는 그림에서 P₂'를 거쳐 P₂''로 조정되며 P₂-P₂''의 Vector 감산의 결과가 최종 결함신호로 얻어진다. 한편 P₁'에서 P₁'' 및 P₂''에로의 조정의 변수는 방해신호의 원인을 고려하여 준비한 Mixing 표준시험편에 의한 신호로부터 구해지고 보통 Computer Software에 의해

전 과정이 수행되게 된다.

여기서 P_1 과 P_2' 의 모양이나 크기의 차이로 인해 Mixing의 결과에 방해신호의 일부가 반드시 남게 되는데 이를 Residual이라 한다. 다중 주파수 Mixing 결과의 질은 결합신호 진폭 대 Residual의 진폭인 Signal-to-noise 비로 나타낼 수 있고 이를 좋게 하기 위해 Mixing표준시험편의 적절한 선택이 필요하다.¹⁶⁾



- P_1 : Extraneous signal component at the primary frequency
- P_1' : Extraneous signal component at the secondary frequency
- P_2 : Flaw signal component at the primary frequency
- P_2' : Flaw signal component at the secondary frequency
- P_1'', P_2'' : First modification results of P_1' and P_2'
- P_1''', P_2''' : Second modification results of P_1' and P_2'

Fig. 2. Schematic view of the multi-frequency eddy current mixing process.

2.2 중첩된 신호 원인의 간섭

다중주파수 와전류법은 모든 복합신호가 이를 구성하는 각 성분신호의 Vector적인 합으로 표시됨(중첩의 원리)을 전제로 복합신호로부터 방해신호 성분을 소거하는 방법이나, 두 개 이상의 신호 원인이 접근해 있을 때 중첩의 원리가 반드시 성립하지는 않는다. 중첩의 원리가 성립되기 위해서는 두 신호 원인이 존재하는 검사체에 대하여

J_0 : 신호원인이 없는 경우의 와전류밀도 분포 [Amp/m²]

J_1 : 제 1 신호 원인만의 존재로 인해 발생하는 와전류 섭동 (Perturbation) 분포 [Amp/m²]

J_2 : 제 2 신호 원인만의 존재로 인해 발생하는 와전류 섭동 분포

J : 두 신호 원인의 공동 존재 시에 형성되는 와전류밀도 분포

라 할 때,

$$J = J_0 + J_1 + J_2 \dots \dots \dots (4)$$

이어야 하나 서로 접근해 있는 두 신호 원인에 대해 이의 불성립을 증명할 수 있다.¹⁷⁾

따라서 일반적으로

$$J = J_0 + J_1 + J_2 + J_{12} \dots \dots \dots (5)$$

며, 여기서 J_{12} 는 접근해 있는 두 신호 원인의 상호 간섭에 의한 와전류 섭동을 나타낸다. 그러므로 다중주파수 Mixing 결과의 Residual은 Mixing 과정에서의 방해신호의 정확한 소거에 관계되는 인자와 신호 원인들 간의 상호간섭에 기인하는 인자가 함께 작용하여 나타나게 되며, 후자는 본질적으로 방해신호 자체의 소거로서는 해결할 수 없는 요소이다.

3. Sludge 신호

Table 1은 고리원자력 1호기의 제6차 가동중 검사⁵⁾에서 얻은 실제 Sludge 신호들을 분석한 Data를 신호 위상을 기준으로 한 6개 유형으로 분류 정리한 것이다. 여기서 진폭비는 검사주파수 600KHz 일 때의 신호진폭을 기준으로 잡은 상대적 진폭 크기를 나타낸 것이다. 세 기본 유형의 검사주파수 별 위상 영역은 Fig. 3과 같고 각 유형 별 도수분포는 Fig. 4와 같은 정상분포

에 가까운 모양을 보였다. Fig. 5는 실제 Sludge 신호 모양의 예를 보인 것이다.

Table 1. Ranges of the phases, the amplitudes, and the amplitude ratios of the real sludge signals.

신호 유형		600kHz	400kHz	200kHz	분포비 (%)
극저 위상	위상(°)	59-76	12-28	309-335	7.7
	진폭(V)	(1.3-2.5)	(6.3-11.5)	(24.3-44.3)	
	진폭비	/1.0/	/4.6-5.0/	/14.5-20.9/	
저 위상	위상(°)	77-79	32-35	333-337	7.7
	진폭(V)	(2.0-3.3)	(9.7-16.2)	(35.9-61.6)	
	진폭비	/1.0/	/4.7-5.3/	/17.4-20.9/	
저-중 위상	위상(°)	63-87	32-41	333-348	11.5
	진폭(V)	(1.9-5.7)	(9.1-28.3)	(38.4-105.1)	
	진폭비	/1.0/	/4.7-5.5/	/18.5-22.3/	
중 위상	위상(°)	85-90	38-42	338-345	21.2
	진폭(V)	(1.1-4.5)	(9.0-23.6)	(24.7-95.3)	
	진폭비	/1.0/	/5.0-5.6/	/19.4-24.1/	
중-고 위상	위상(°)	83-104	43-51	341-2	26.9
	진폭(V)	(1.3-4.3)	(6.7-22.5)	(28.9-99.9)	
	진폭비	/1.0/	/4.9-6.2/	/20.6-28.3/	
고 위상	위상(°)	95-100	51-54	351-2	15.4
	진폭(V)	(2.1-3.4)	(11.9-19.4)	(59.5-97.9)	
	진폭비	/1.0/	/5.3-6.1/	/25.3-29.2/	
극고 위상	위상(°)	104-132	58-69	357-11	9.6
	진폭(V)	(0.6-2.2)	(3.4-12.7)	(16.5-60.8)	
	진폭비	/1.0/	/3.4-6.2/	/16.4-33.6/	

Fig. 6은 Sludge 신호들의 진폭의 평균을 ASME Calibration 용 40% OD 인공결함에 의한 신호 크기와 비교한 것으로서 모든 검사주파수에서 Sludge 신호가 매우 큰 것을 알 수 있다.

4. 실험

시험편은 외경 0.875 inch, 벽 두께 0.050 inch 인 Inconel 600 판에 Fig. 7과 같이 Flat Bottomed Hole로 인공결함을 Drill 가공하고 다시 Cu Plate 층을 여러 겹으로 부착 결합하여 제작하였고¹⁰⁻¹²⁾, 가공 규격은 Table 2와 같다.

다중주파수 Mixing을 위한 표준시험편은 Table 3과 같이 6 종류를 준비하였다.

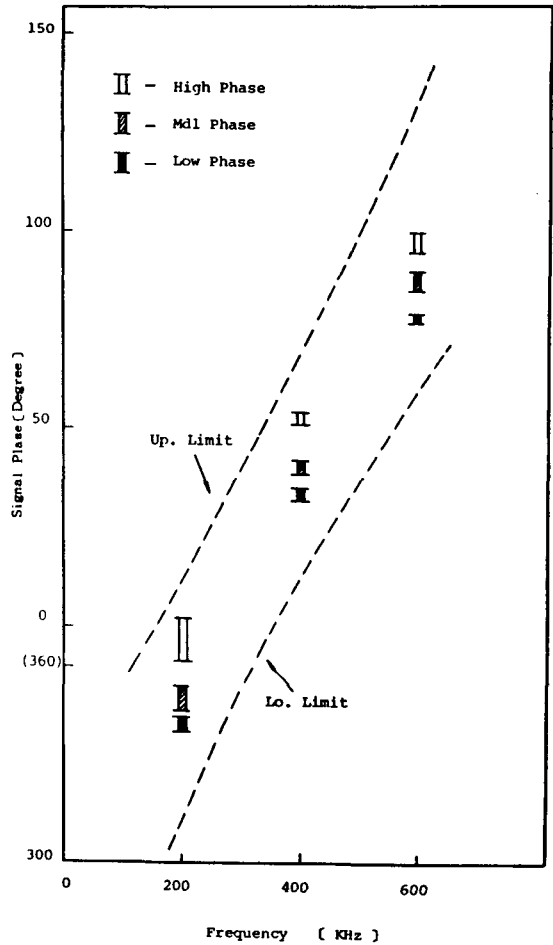


Fig. 3. Phase ranges for the basic sludge signal types.

실험장비는 미국 Zetec사제인 MIZ-18 Digital Data Acquisition System 및 DDA-4 Digital Data Analysis System을 사용하였으며 모든 신호를 Digital화하여 자체 Computer Program에 의해 다중주파수 Mixing 및 결함 평가를 처리 수행하도록 되어 있다. 탐촉자는 자기비교형 Inner Probe로서 Coil의 외경 0.72 inch, 폭 0.06 inch, 두 Coil의 간격 0.12 inch였고 Probe Fill Factor는 약 0.86이었다.

검사주파수는 200, 400, 600 kHz 를 사용하여 신호를 얻고 600 / 200 kHz Mixing을 수행하였다. 한편 결함 평가를 위한 Calibration은 ASME100, 60, 40% 인공 결함을 이용하여 Mixing Channel

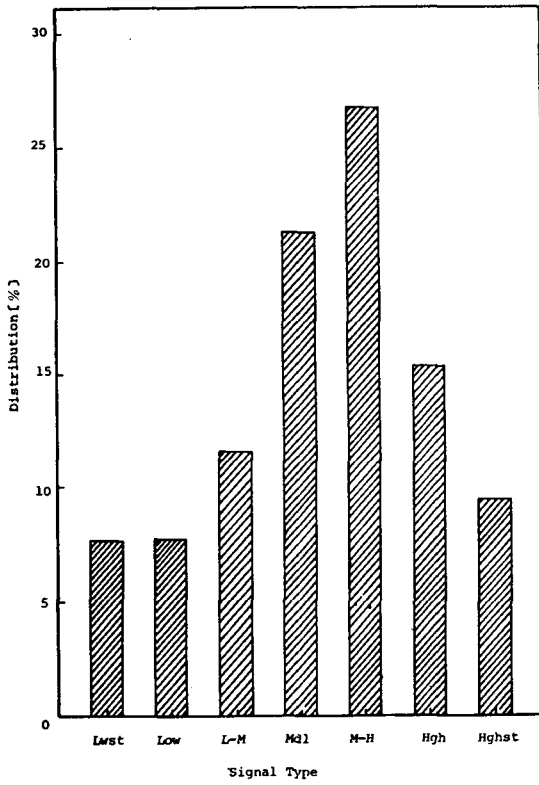


Fig. 4. Incidence distribution versus sludge signal phase types.

에서 Calibration Curve 를 구하였고 모든 실험은 각 주파수에서 100% 인공결함에 의한 신호를 위상 40 degree, 진폭 8.0 Volt로 맞추어 수행하였다.

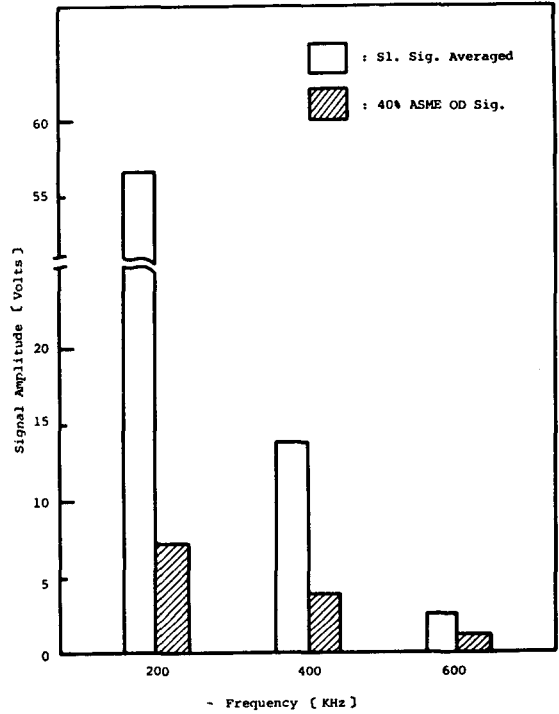


Fig. 6. Comparison of the amplitudes between sludge and flaw signals.

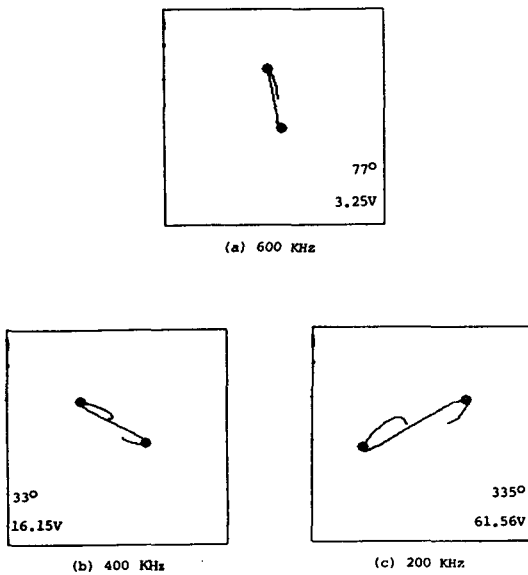
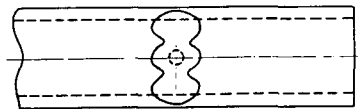
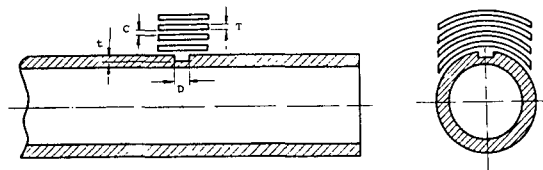


Fig. 5. Examples of the real sludge signals.



T : Tube thickness
 D : Flaw diameter
 t : Cu layer thickness
 d : Distance between Cu layers

Fig. 7. Configuration of the sludge specimen.

Table 2. Dimensions of the sludge specimens.

試片番號	缺陷 깊 이	缺陷直徑	Cu 層 規格
S-0	0% of wall thick.	-	두께 : 0.025mm×7
S-1	48% of wall thick.	2.1mm	幅 : ≤10mm
S-2	38% of wall thick.	4.8mm	길이 : ≤1/2·S* 接觸距離 : 0.05mm

*S : 管 둘레

Table 3. Dimensions and configurations of the mixing standards.

試驗片番號	Cu 層 두께	깊 이	幅	모 양
M-1	0.025mm×4	1·S*	10mm	Quadruply wound plate
M-2	0.1mm	1/2·S	10mm	Single plate
M-3	1.58mm Dia.	1/2·S	-	Half ring
M-4	0.025mm×4	1/2·S	10mm	Layers with isolators inbetween
M-5	0.025mm×7	1/2·S	10mm	Layers with isolators inbetween
M-6	0.025mm×7	1/2·S	≤10mm	0% Sludge Specimen

*S : 管 둘레

5. 실험 결과 및 고찰

S-0 Sludge 시편 및 각 Mixing 표준시험편 신호의 위상 및 진폭 Data는 각각 Table 4 및 Table 5와 같고 Fig.8 및 Fig.9는 Sludge 시편 신호의 위상 및 진폭비를 실제 Sludge 신호의 위상 및 진폭비 범위와 비교하였다. S-0 Sludge 시편 상호 모양은 Fig.10과 같이 되었고 Fig.11은 S-1 및 S-2 시편의 결합과 결합된 Sludge 신호의 모양을 보인 것이다.

다중주파수 Mixing 방법은 서로 다른 Mixing 주파수에서의 Mixing 표준시험편 신호의 변화로부터 Mixing 대상 신호의 Mixing 수행 변수를 취하게 되며 Mixing 변수는 위상 변화, 진폭변화 및 모양 변화를 의미하므로¹⁸⁾ Mixing 표준시험편에 대해서도 이 세 가지 요소가 중요하다. 각 Mixing 표준시험편 신호의 두 Mixing 주파수(200 및 600 kHz)에서의 진폭 및 위상 변화는 각각 Fig.

12 및 Fig.13과 같이 되었다.

Table 4. Signal phases of the sludge specimens and the mixing standards.

(單位 : Degree)

試驗片番號	200 kHz	400 kHz	600 kHz	P ₆₀₀ -P ₂₀₀
M-1	342	36	84	102
M-2	332	29	72	100
M-3	336	35	100	124
M-4	349	44	92	103
M-5	353	51	105	112
M-6(S-0)	2	59	108	106

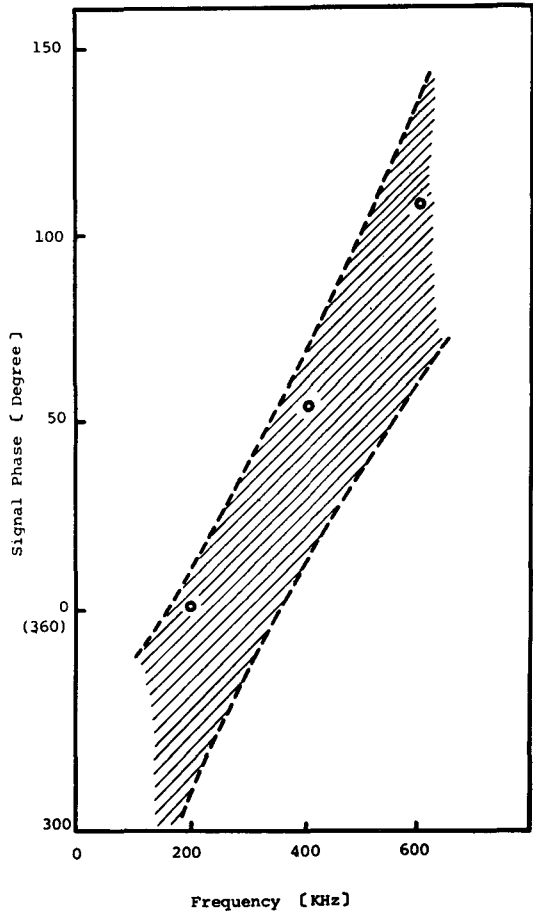


Fig. 8. Comparison of the specimen signal phases with the real sludge signal phase ranges.

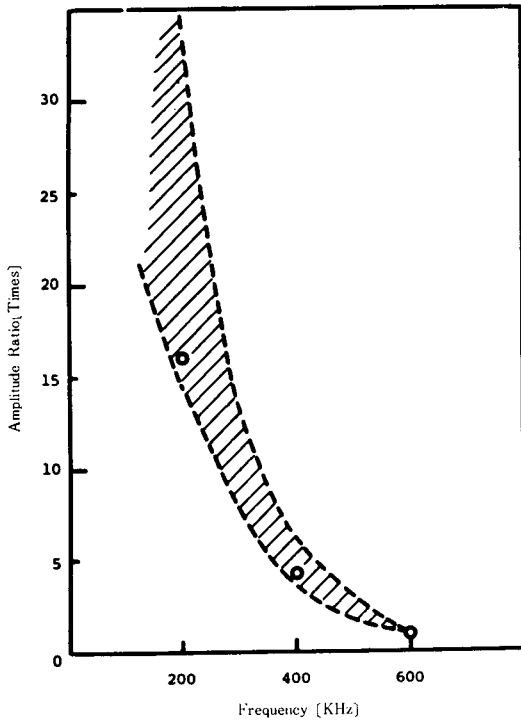


Fig. 9. Comparison of the specimen signal amplitude ratios with the real sludge signal amplitude ratio ranges.

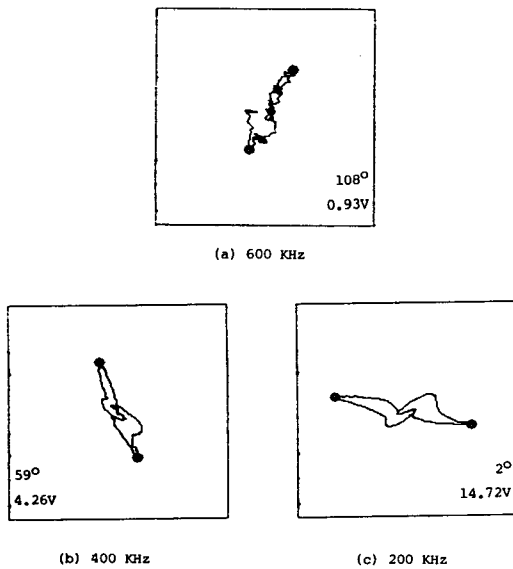
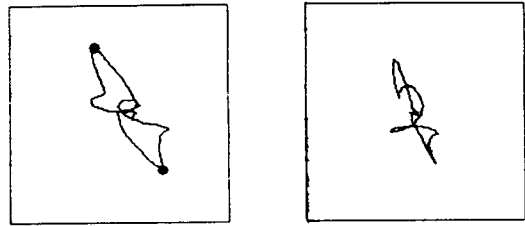


Fig. 10. Signal shapes of the S-0 sludge specimen.



(a) S-1, 400KHz

(b) S-2, 400KHz

Fig. 11. Signal shapes of the sludge specimens combined with the flaw.

Table 5. Signal amplitudes of the sludge specimens and the mixing standards. (單位 Volt)

試驗片番號	200 kHz	400 kHz	600 kHz	A_{200}/A_{600}
M-1	144.0	52.88	13.73	10.48
M-2	34.08	13.50	3.62	9.42
M-3	1.76	0.65	0.15	11.73
M-4	21.49	7.03	1.74	12.35
M-5	13.12	3.82	0.91	14.42
M-6 (S-0)	14.72	4.26	0.93	15.83

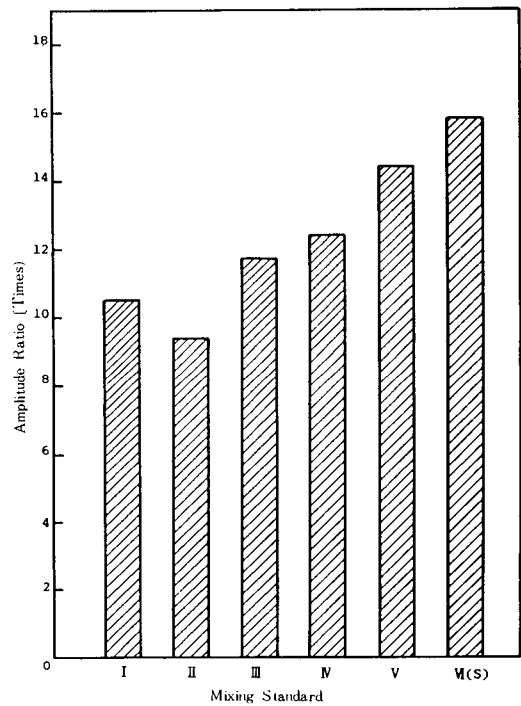


Fig. 12. 200/600 kHz signal amplitude ratios versus the mixing standards.

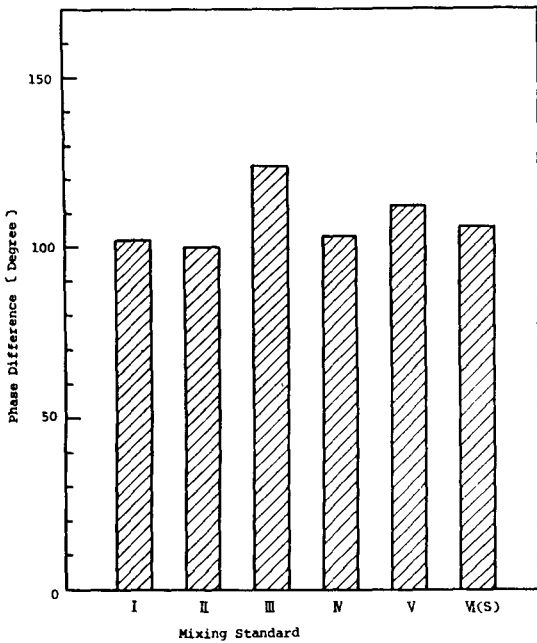


Fig. 13. 200/600 kHz signal phase differences versus the mixing standards.

Sludge에 관한 와전류 Impedance 궤적은 단일 재료의 층 두께 변화에 관한 Impedance 궤적 및 2층 구조 두께 변화에 관한 Impedance 궤적으로 부터^{1,19)} Fig. 14의 곡선 TL이 된다. 와전류의 포피효과를 고려, 전열관 두께보다 깊은 곳의 와전류를 무시하면 Cu층과 전열관의 거리의 증가는 전열관 두께의 증가로 단순화시켜 생각해 볼 수 있고 이는 그림의 L 및 T점이 동시에 I점을 향해 이동하는 것을 의미하므로 시편의 Cu층 수가 증가할수록 신호 위상이 전반적으로 증가하나 두 Mixing 주파수에서의 위상 변화는 Ring Type의 Mixing Standard 일때를 제외하고는 비슷한 크기로 나타나고 있다. 그리고 신호 진폭비는 두 주파수에서의 Cu층에 유도되는 와전류의 크기의 비에 관계되므로 Cu층 수가 많을수록 증가하게 된다.

Sludge 시편에 대한 Mixing 수행 결과는 Table 6 및 Table 7과 같고 Mixing 표준시험편 별 결함평가 결과를 Fig. 15로 실제 결함 크기와 함께 비교하였는데 Ring Type의 Mixing 표준시험편을 사용할 때 가장 평가 결과가 좋은 것을 알 수

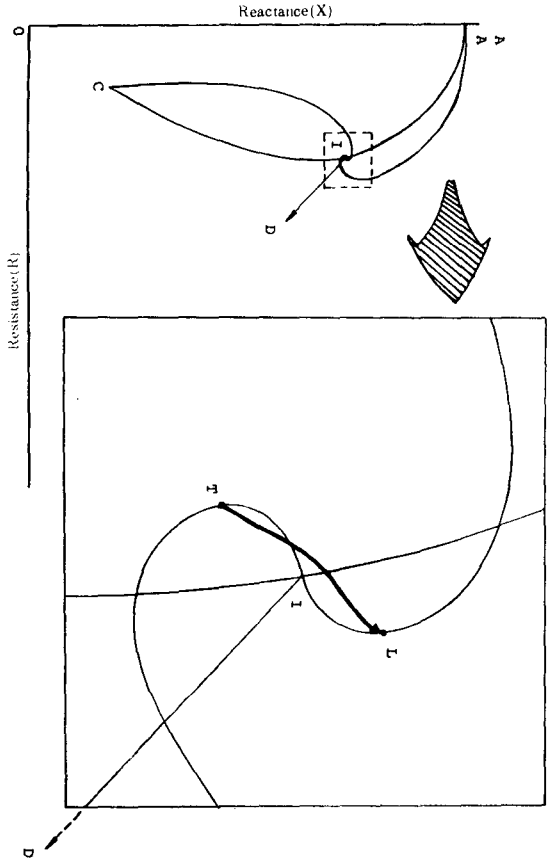


Fig. 14. Eddy current impedance locus for the sludge case.

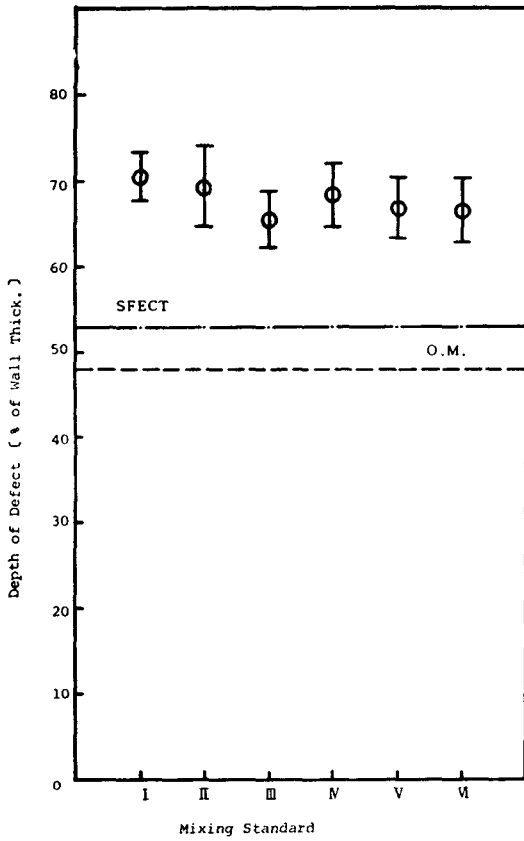
있다. Fig. 16은 Mixing 결과 신호의 예를 보인 것이다.

S-0 시편에 대한 Mixing 결과 신호의 Residual 크기는 Fig. 17과 같이 Mixing 표준시험편이 Sludge 신호 원인과 비슷한 조건일 수록 작아짐으로써 결함평가결과와 그 경향성이 일치되지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 결함이 존재하는

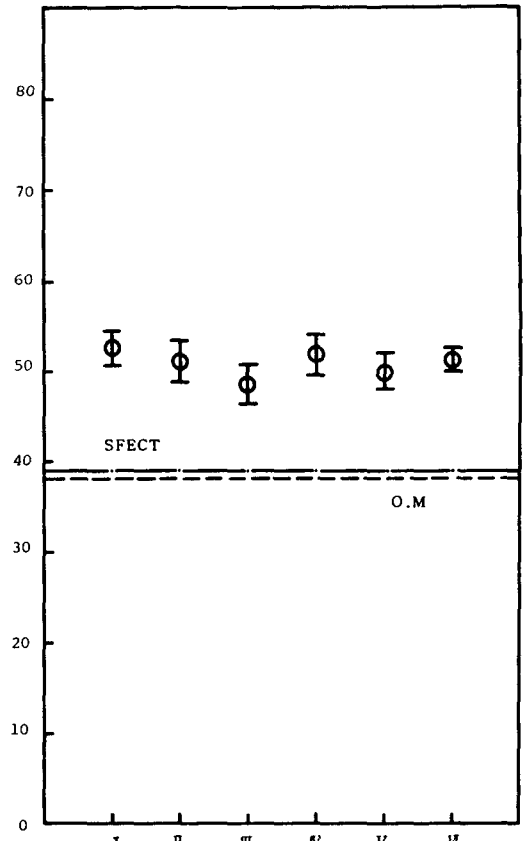
Table 6. Amplitudes of the mixing residuals.

(단위 : Volt)

Mixing 標準 試驗 片	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
Residual 크기	0.37	0.40	0.37	0.35	0.26	0.15



(a) For the S-1 sludge specimen



(b) For the S-2 sludge specimen

Fig. 15. Evaluation results versus the mixing standards.

(SFECT:Depth by the single frequency

E. C. method free from Cu layers

O. M. :Depth by the optical microscope)

경우에 일어나는 결함과 Cu층과의 간섭¹⁵⁾ 때문이다. 즉 S-1 및 S-2 시편에 대해서는 1) Mixing 과정에서 Sludge 신호의 불완전한 소거에 의해 생기는 Residual 성분과 2) 결함과 Cu층의 상호 간섭에 기인하는 Residual 성분이 동시에 평가 결과에 영향을 미치게 되고, Mixing 표준 시험편이 Sludge 신호 원인과 비슷한 경우에는 전자의 Residual 성분은 작아지는 반면, 후자의 Residual 성분이 주로 나타나게 된다. 그리고 Ring Type의 Mixing 표준시험편을 사용하는

경우에는 위의 두 Residual 성분이 함께 나타나게 되는데, 이 때 평가결과가 좋은 것은 두 Residual 성분이 합성 과정에서 서로 상쇄적으로 작용하기 때문인 것으로 풀이된다.

한편 S-0 시편 신호의 Residual 크기 및 결함신호의 진폭으로부터 구한 Mixing 결과의 Signal-to-noise 비는 S-1 시편에 대해서 1-4, S-2 시편에 대해서 3-8 범위 이었는데 Signal-to-noise 비가 보다 큰 경우에는 평가 결과가 더 좋아질 것이 예상된다.^{16, 20)}

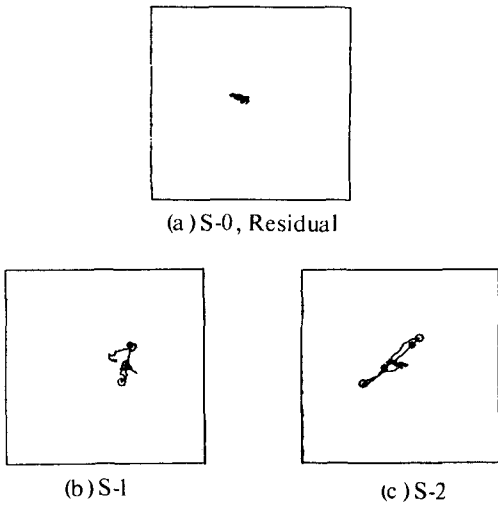


Fig. 16. Examples of the mixing result signals.

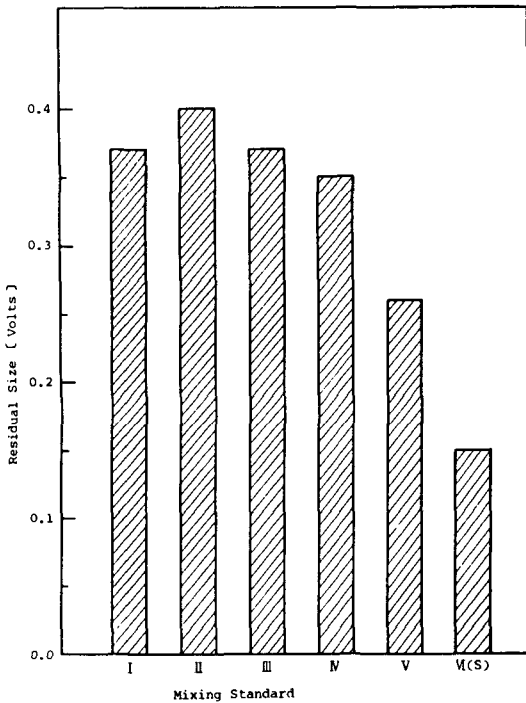


Fig. 17. Amplitudes of the mixing residuals versus the mixing standards.

6. 결 론

1) 전열관 두께 대비 40~50% 결함깊이를 갖는 Sludge 시편에 대한 다중주파수 Mixing 실험

Table 7. Results of the flaw depth evaluations.

(a) S-1 試片 (단위 : % of wall thickness)

Scan 速度	Mixing 標準 試驗 片						平均	標準 偏差
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6		
1 Vo*	69	72	65	70	66	66	68.0	2.76
2 Vo	71	72	66	67	68	68	68.7	2.34
3 Vo	73	73	70	72	72	71	71.8	1.17
4 Vo	72	70	69	71	69	71	70.3	1.21
5 Vo	74	72	67	68	67	67	69.2	3.06
6 Vo	71	71	65	72	69	67	69.2	2.71
7 3/4 · Vo	67	64	63	64	63	62	63.8	1.72
8 1/2 · Vo	66	60	60	62	61	61	61.7	2.25
平均 標準偏差	70.4	69.3	65.6	68.3	66.9	66.6		
	2.83	4.68	3.20	3.73	3.52	3.66		

(b) S-2 Sludge 試片 (단위 : % of wall thickness)

Scan 速度	Mixing 標準 試驗 片						平均	標準 偏差
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6		
1 Vo*	53	50	51	53	50	52	51.5	1.38
2 Vo	54	53	49	52	52	53	52.2	1.72
3 Vo	55	54	51	53	51	51	52.5	1.61
4 Vo	50	50	49	53	50	50	50.3	1.37
5 Vo	53	52	48	53	51	51	51.3	1.86
6 Vo	54	53	49	53	51	52	52.0	1.76
7 3/4 · Vo	50	47	45	47	47	49	47.5	1.76
8 1/2 · Vo	52	50	46	50	47	52	49.5	2.50
平均 標準偏差	52.6	51.1	48.5	51.8	49.9	51.3		
	1.85	2.30	2.14	2.19	1.89	1.20		

* Vo : 12 in/sec.

결과는 Mixing 시험편의 선택에 따라 Mixing 결과 신호의 Signal-to-noise 비가 3-8인 경우에 약 5~20%, Signal-to-noise 비가 1-4인 경우에 약 10~30% 과대평가가 되는 경향을 보였다.

2) Mixing 표준시험편이 Sludge 조건과 접근할수록 Sludge 신호 자체의 소거에는 유리하나, Sludge가 결함과 함께 존재할 때는 간섭의 영향으로 평가 결과는 좋지 않았다. Ring Type의 Mixing 표준시험편을 사용할 때 결함 평가 결과가 가장 좋게 나타났다.

참 고 문 헌

1. H. L. Libby, "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Method", John Wiley and Sons, Inc., N. Y. (1971)
2. G. V. Drunen and V. S. Cecco, "Recognizing Limitations in Eddy Current Testing", NDT International V.17 (1) (1984)
3. T. J. Davis, "Increased Sensitivity and Signal to Noise Ratios in Eddy Current Tasting", Materials Evaluation V.35 (6) (1977).
4. C. J. Denton, "Eddy Current Inspection Systems for Steam Generator Tubing in Nuclear Power Plants", Nondestructive Evaluation in Nuclear Industry, American Society for Metals (1978).
5. 박대영 외, 원자력1호기 제6차 가동중검사 (증기발생기 와전류탐상) 최종보고서, 한국에너지연구소 (1985).
6. Eddy Current Examination Results of A and B Steam Generators at Kori Nuclear Plant, Unit 1, Southwest Research Institute (1981).
7. H. L. Libby, "Multiparameter Eddy Current Concepts", Research Techniques in NDT, Am Academic Press (1970).
8. L. de la Pintier, "Think Multifrequency", Intercontrole, Inc. (1980).
9. Advanced Eddy Current Data Analysis Techniques for Steam Generator Tubing, EPRI NDE Center (1986).
10. S. D. Brown, "Multifrequency/Multiparameter Eddy Current Steam Generator NDE", Quantitative NDE in the Nuclear Industry, American Society for Metals (1983).
11. 양경린 외, "원전 2차계 부식생성물의 함량 분포에 관한 연구", KAERI/RR-470 / 85. (1985).
12. A. K. Agrawal, et al., "Evaluation of Steam Generator Tube R 12 c 16 from Indian Point No.3", EPRI NP-3029 (1983).
13. Workshop Proceedings : Pitting in Steam Generator Tubing, EPRI NP-3574-SR (1984).
14. R. Saglio, "Multifrequency Eddy Current Examination of Steam Generator Tubes", Nondestructive Evaluation in the Nuclear Industry, American Society for Metals (1978).
15. R. Saglio, et al., "Concepts of Multifrequency Eddy Current Testing", Nondestructive Testing Handbook, Vol.4, ASNT (1986).
16. D. D. Dodge, "Eddy Current Applications - Data Analysis Guidelines", Nondestructive Testing Handbook, Vol. 4, ASNT (1986).
17. A. Sagar, "Multifrequency Eddy Current Method and the Separation of Test Specimen Variables", ASTM Special Technical Publication 722 (1981).
18. Takashi Endo, et al., "Improvement of ISI Techniques by Multifrequency Eddy Current Testing for Steam Generator Tube in PWR Plants", Quantitative NDE in the Nuclear Industry, American Society for Metals (1983).
19. D. J. Hagemaiier, "Eddy Current Impedance Plane Analysis", Materials Evaluation Vol. 41 (2) (1984).
20. E. Sandona, et al., "Eddy Current Examination of Bznam Stram Generator Tubing", Nuclear Energy Maturity (1975).