

## 보빈코일 와전류신호를 이용한 증기발생기 세관 스케일 두께 측정

### Scale Thickness Measurement of Steam Generator Tubing Using Eddy Current Signal of Bobbin Coil

김창수\*<sup>†</sup>, 엄기수\*, 김재동\*

Chang-Soo Kim\*<sup>†</sup>, Ki-Soo Um\* and Jae-Dong Kim\*

**초 록** 원자력발전소 증기발생기 세관은 방사성물질이 외부로 누출되지 않도록 압력경계 역할을 하는 주요 부품이다. 설비 운전기간이 증가함에 따라 이차측에서 유입된 슬러지가 증기발생기 2차측 유체 흐름을 따라 상부로 이동하면서 유체비등과 난류에 의해 세관 외면에 스케일이 부착되어 세관열화, 유로홈 막힘 및 열전달을 감소시키는 과열링을 유발하는 원인으로 작용한다. 따라서, 원전 운영자는 세관 외면에 쌓인 스케일의 두께를 확인하여 일정시점이 되면 화학세정 등의 정비를 수행한다. 본 논문에서는 보빈코일 와전류신호를 이용하여 세관 외면에 부착된 스케일 두께를 정량적으로 평가하는 기술을 개발하고자 스케일 시험편을 제작하여 스케일 두께와 와전류신호 진폭 간의 상관관계를 분석하였고, 이를 바탕으로 스케일의 두께를 정량적으로 평가하는 기법과 대량의 와전류 데이터를 평가할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

**주요용어:** 스케일, 슬러지, 와전류신호, 증기발생기, 보빈코일

**Abstract** Steam generator is one of the major components of nuclear power plant and steam generator tubes are the pressure boundary between primary and secondary side, which makes them critical for nuclear safety. As the operating time of nuclear power plant increases, not only damage mechanisms but also scaled deposits on steam generator tubes are known to be problematic causing tube support flow hole blockage and heat fouling. The ability to assess the extent and location of scaled deposits on tubes became essential for management and maintenance of steam generator and eddy current bobbin data can be utilized to measure thickness of scale on tubes. In this paper, tube reference standards with various thickness of scaled deposit has been set up to provide information about the overall deposit condition of steam generator tubes, providing essential tool for steam generator management and maintenance to predict and prevent future damages. Also, methodology to automatically measure scale thickness on tubes has been developed and applied to field data to estimate overall scale amount.

**Keywords:** Scale, Sludge, Deposit Mapping, Eddy Current, Steam Generator, Bobbin Coil

#### 1. 서 론

원자력발전소 증기발생기는 터빈을 구동시키는 증기를 발생시키는 역할을 하며, 내부에 설치된 수천 개의 세관(tube)은 두께가 약 1 mm로서 방사성물질이 외부로 누출되지 않도록 압력경계를

이루는 주요 부품이다.

증기발생기 세관의 바깥쪽에는 이차계통에서 생성된 산화철이 유입되어 Fig. 1과 같이 관판(tube sheet) 상단에 슬러지(sludge)로 쌓이게 되며, 관지지판(tube support plate)에도 쌓이게 된다[1].

원전의 가동연수가 증가함에 따라 Fig. 2와 같이

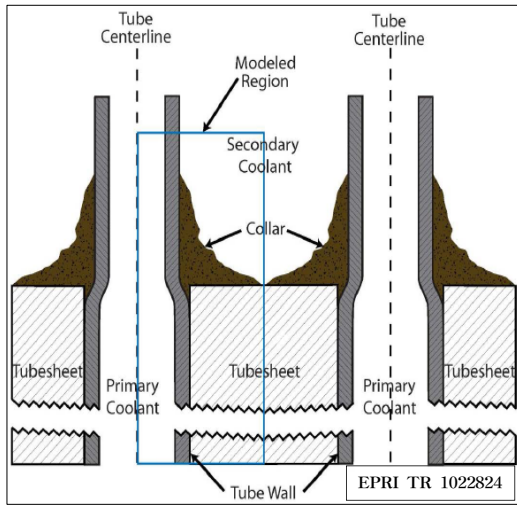


Fig. 1 Sludge model of top of tubesheet

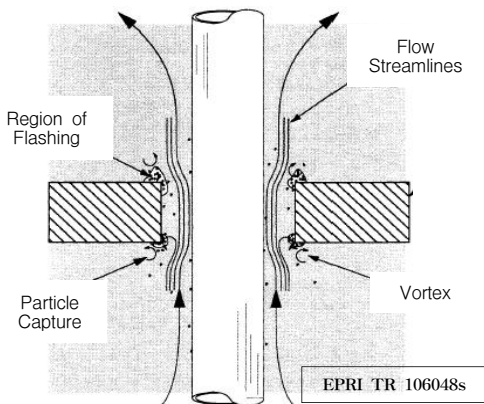


Fig. 2 Tube support plate fluid mechanics

증기발생기로 유입된 슬러지가 2차측의 유체흐름을 따라 상부로 이동하면서 유체비등과 난류에 의하여 세관 외면에 스케일 형태로 고착된다[1-4].

증기발생기의 슬러지와 스케일은 세관 내부의 열을 외부로 전달하지 못하게 방해하여 세관 외면의 온도를 증가시키고, 유해한 화학성분을 농축시켜 부식결함이 발생하기 쉬운 환경을 조성한다[5].

원전 운영자는 세관의 건전성을 확보하기 위하여 증기발생기로 산화물이 유입되지 않도록 예방하고, 생성된 스케일을 효과적으로 제거하기 위하여 화학세정 등의 정비작업을 수행한다. 따라서, 세관의 상태를 진단하여 화학세정 등의 정비 전략을 수립하기 위하여 세관 외면에 쌓인 스케일의 두께를 측정하는 것이 중요하다.

원전의 계획예방정비 기간에 증기발생기 세관

Table 1 Sludge composition

Plants	Magnetite composition of sludge	Comments
A	98%	Magnetite( $Fe_3O_4$ )
B	93.6%	
C	94.2%	
D	97.7%	
E	92%	

에 대한 와전류검사를 수행한다. 와전류검사는 보빈코일과 회전코일을 이용하며, 보빈코일의 저주파수 채널을 이용하여 스케일의 두께를 측정할 수 있다.

본 논문에서는 증기발생기 세관의 외면에 부착된 스케일을 두께별로 모사한 대비시험편을 제작하였고, 스케일의 두께를 정량적으로 측정하기 위한 와전류기술을 개발하였으며, 대량의 와전류 신호 데이터를 처리하기 위한 자동평가 프로그램을 개발하였다. 보빈코일을 이용한 스케일 두께 자동평가 기술은 증기발생기 세관의 상태진단 및 화학세정 등의 정비전략을 수립하는데 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 스케일 구성성분

증기발생기 세관에 부착된 스케일을 모사한 스케일 대비시험편을 제작하기 위하여 운영 중인 원전의 슬러지 성분을 분석하여 Table 1과 같이 90% 이상이 마그네타이트( $Fe_3O_4$ ) 성분인 것으로 확인하였다.

### 2.2. 시험편 설계 및 제작

일반적으로 증기발생기 세관에 대한 와전류검사는 보빈코일과 회전코일을 이용하여 검사한다. 기존에 수행된 보빈코일 데이터를 활용하여 스케일 두께를 측정하기 위해서 현장검사에서 적용되는 보빈코일과 검사기술을 이용하여 실험을 수행하였다. 와전류검사는 비파괴검사이므로 실제 시험대상체와 비교하여 평가하기 위한 대비시험편이 필요하다. Fig. 3은 스케일이 두께별로 모사된 대

비시험편을 제작하기 위한 설계도면이며 스케일은 마그네타이트( $Fe_3O_4$ ) 파우더를 이용하였다.

Fig 4는 스케일 대비시험편을 제작한 것으로, 세관 외면에 스케일을 약 0.5~5.0 mm 두께로 6개 구간으로 나누어 도포하였으며, Alloy 600TT 및 600HTMA 2종을 대상으로 제작하였다.

### 2.3. 와전류신호 위상 및 진폭 정규화

와전류신호는 기본적으로 수평성분과 수직성분의 조합으로 구성된다. Fig. 5의 long strip chart의 왼쪽은 와전류신호의 수직성분을 나타내며, 오른쪽은 수평성분을 보여주고 있다. 리샤주(lissajous)라 칭하는 X-Y plane은 확장 스트립차트(expanded strip chart)의 수평과 수직성분이 조합되어 생성된다.

본 실험에서는 Fig. 5와 같이 현장 검사데이터와의 호환을 위하여 현장의 신호평가 방법과 동일하도록 ECT신호를 정규화하였다. ASME 표준 시험편의 20% 평저공 결점신호를 20 kHz 절대채널에서 4 volts로 설정하였다[6,7].

진폭 설정은 전압값으로 표현되는 신호의 벡터 크기로서 상대적인 신호크기를 수립하는 것이다. 신호의 위상은 세관의 끝단신호를 수평이 되도록 조정하였다. Fig. 6은 스케일 대비시험편의 와전류신호로서, 리샤주 화면에서 스케일신호가 수직으로 나타나는 것을 알 수 있다.

### 3. 자동평가 프로그램

스케일 두께측정시 세관의 데이터 양이 천문학적으로 생성되기 때문에, 실제적으로 증기발생기 전체 세관의 스케일 두께를 측정하기 위해서는 자동평가 프로그램을 개발하는 것이 필요하다.

#### 3.1. 자동평가 알고리즘

스케일 두께를 자동으로 평가하기 위하여 C# 프로그램 인터페이스를 활용하여 자동평가 프로그램을 개발하였으며, Fig. 7은 자동평가 프로그램의 주요 알고리즘을 보여주고 있다. 자동평가 프로그램은 우선 데이터 그룹을 읽어서 신호 위상과 전압을 정규화한다. 다음에 구조물의 위치

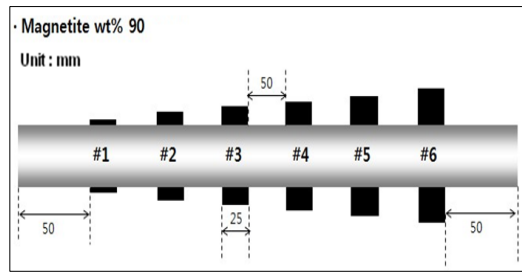


Fig. 3 Scale reference standards

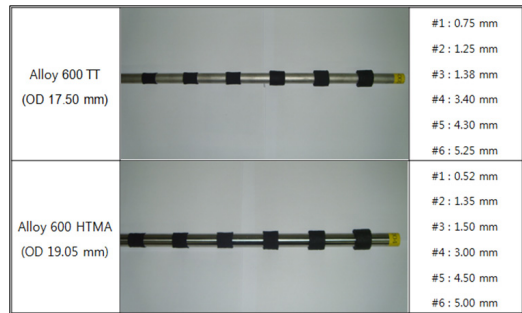


Fig. 4 Scale reference standards

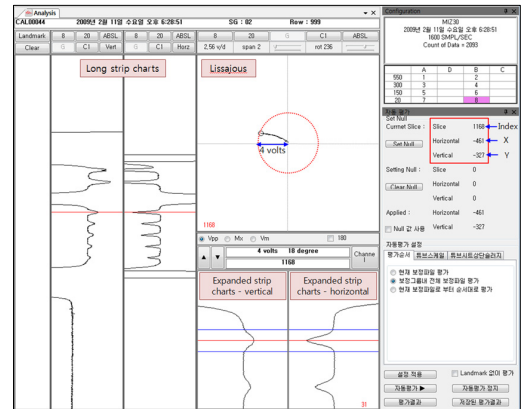


Fig. 5 Setting phase and voltage using ASME 20% flat bottom hole

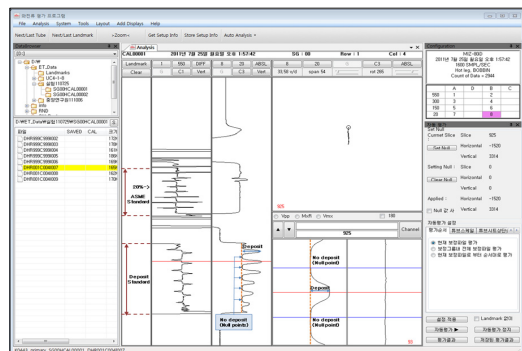


Fig. 6 Example of eddy current signal for scale reference standard

표정 작업을 수행하고 세관에서 스케일이 쌓이지 않은 null 지점을 찾는다. 이후 수직성분의 신호를 탐지하고 스케일 두께대비 신호진폭 곡선을 이용하여 스케일 두께를 계산한다. 이와 같이 한 개의 세관에 대한 평가가 완료되면 다음 세관으로 이동한다.

### 3.2. 구조물 위치 표정

세관을 지지하기 위해 설치된 지지물은 스케일 두께를 측정하는 기준점을 제공한다. 따라서, 자동평가 프로그램에서 세관을 지지하는 구조물을 정확히 탐지하여 색인하는 것은 매우 중요하며, 위치표정에 오류가 발생하면 수동으로 위치를 표시해야 하는 번거로움이 발생한다.

위치 표정 작업은 탐촉자 이송속도를 근거로 와전류신호에서 구조물신호 사이의 거리를 계산하여 수행된다. 신호평가자는 Fig. 8과 같이 세관 끝단, 관판 상단, 관지지판, 반진동봉의 패턴을 확인하여 입력한다. 데이터 그룹의 한 개 세관에 대하여 위치표정을 수행하면 나머지 세관은 자동으로 위치표정이 수행된다.

### 3.3. 스케일 신호 평가

20 kHz 절대형채널에서 와전류신호의 수직성분을 탐지하여 스케일의 진폭값을 0.1 mm 두께 단위로 보고하도록 하였다. 자동평가 프로그램은 스케일이 없는 null점을 찾는다. 이후 세관을 스캐닝하여 수직성분이 0.1 mm 이상이면 스케일로 인식하고 기록한다. Fig. 9는 스케일이 부착된 실제 세관의 와전류신호로서 long strip chart의 수직성분에서 타원형으로 표시한 부분이 스케일이 존재하고 있는 구역이며, 나머지 부분은 스케일이 없는 부분이다.

스케일이 존재한 부분에서는 와전류신호의 수직성분이 일정하지 않고 오른쪽으로 드리프트(drift)되는 특성을 보인다.

데이터의 원활한 처리를 위하여 구조물과 구조물 사이를 일정하게 나눈 지점을 측정하도록 하였다. Fig. 10은 한 개 세관의 구조물 사이를 5등분하여 측정한 진폭값과 스케일 두께를 보여주고 있다.

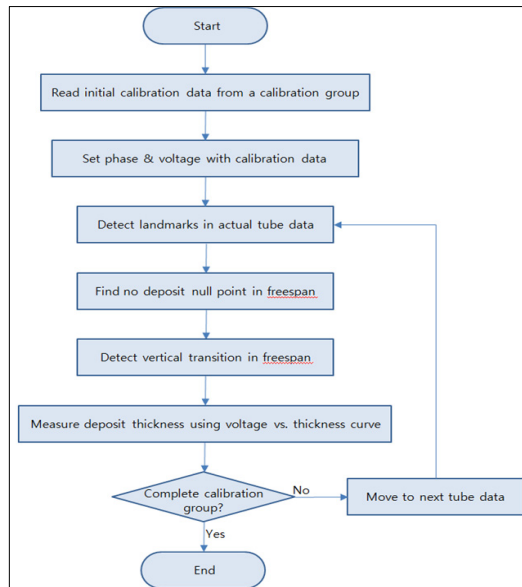


Fig. 7 Automated deposit detection and measurement algorithm

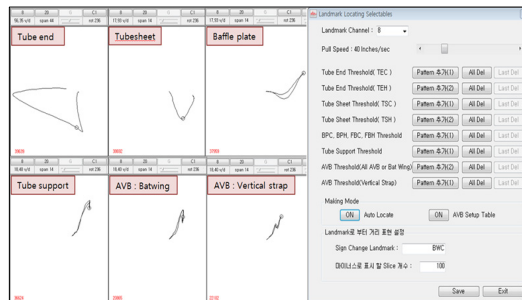


Fig. 8 Adding different types of support structures for landmark detection

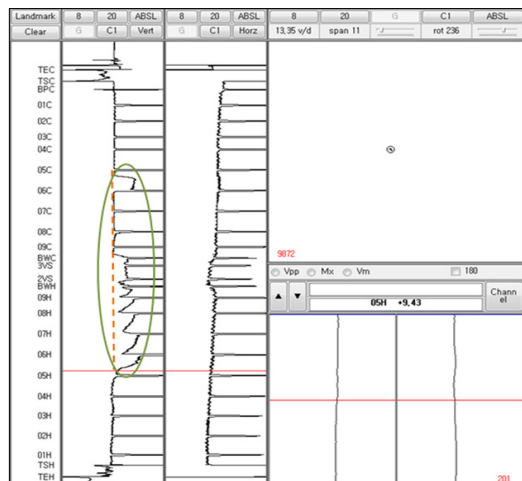


Fig. 9 Actual tube data with scaled deposit

4. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 세관 스케일의 두께와 보빈코일 20 kHz 절대형채널 신호진폭 간의 상관관계를 분석하였다. Table 2-a와 b는 스케일 시험편을 3회씩 측정된 와전류신호의 진폭값을 나타내고 있다. 같은 스케일 두께에 대해 Alloy 600 HTMA에서 얻은 진폭값이 Alloy 600 TT에서 얻은 것보다 더 큰 것으로 확인되었다.

실험결과, 리샤주 화면에서 세관 끝단의 와전류 신호를 수평이 되도록 위상을 조정하면 스케일 신호가 수직으로 향하는 것을 확인하였다. 또한, 평가창의 스트립차트에서 스케일이 존재하지 않는 부분의 와전류신호는 거의 일정하게 나타나지만, 스케일이 존재하는 구역에서는 와전류신호가 오른쪽으로 드리프트(drift)되는 것을 확인하였다.

Fig. 11은 스케일 두께별로 측정된 와전류신호 진폭값을 이용하여 진폭곡선을 생성하였다. 스케일의 두께가 증가할수록 와전류신호의 진폭도 증가하므로 이러한 특성을 이용하여 정량적인 두께 평가가 가능하였다.

5. 결론

본 논문은 보빈코일의 와전류신호를 이용하여 원자력발전소 증기발생기 세관의 외면에 부착된 스케일의 두께를 정량적으로 평가하기 위한 기법을 개발하는데 그 목적이 있다. 우선, 증기발생기의 슬러지 성분을 조사하여 스케일을 모사한 대비시험편을 제작하였고, 스케일 두께 대비 와전류신호진폭을 이용한 교정곡선을 생성하여 스케일 두께를 정량적으로 측정하였다. 또한 대량의 와전류신호 데이터를 처리하기 위하여 자동평가 프로그램을 개발하였다.

보빈코일을 이용하여 증기발생기 세관에 부착된 스케일의 두께를 평가하는 기술은 기존의 와전류검사 데이터를 이용할 수 있으며, 증기발생기 세관 진단 및 화학세정 등의 정비전략을 수립하는데 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] EPRI TR-106048s "Characterization of PWR steam generator deposits," pp. 2-81-2-84 (1996)

CHAN	Slice	SG	Flow	Col	Volts	Degrees	Type	Thick	Location	From	To	Extent
8	7220	02	55	53	0	236	SCL	0	03H	29.4	0	TEHTEC
8	7556	02	55	53	0	236	SCL	0	03H	37.8	0	TEHTEC
8	7901	02	55	53	0	236	SCL	0	04H	4.43	0	TEHTEC
8	8255	02	55	53	0	236	SCL	0	04H	13.28	0	TEHTEC
8	8610	02	55	53	0	236	SCL	0	04H	22.15	0	TEHTEC
8	8964	02	55	53	0	236	SCL	0	04H	31	0	TEHTEC
8	9318	02	55	53	1.03	236	SCL	0.04	04H	39.85	0	TEHTEC
8	9673	02	55	53	1.98	236	SCL	0.08	05H	4.45	0	TEHTEC
8	10029	02	55	53	3.08	236	SCL	0.13	05H	13.33	0	TEHTEC
8	10383	02	55	53	10.22	236	SCL	0.44	05H	22.2	0	TEHTEC
8	10738	02	55	53	12.63	236	SCL	0.54	05H	31.08	0	TEHTEC
8	11093	02	55	53	14.15	236	SCL	0.61	05H	39.95	0	TEHTEC
8	11448	02	55	53	6.05	236	SCL	0.26	06H	4.45	0	TEHTEC
8	11804	02	55	53	8.99	236	SCL	0.39	06H	13.35	0	TEHTEC
8	12159	02	55	53	11.55	236	SCL	0.49	06H	22.23	0	TEHTEC
8	12515	02	55	53	12.26	236	SCL	0.53	06H	31.13	0	TEHTEC
8	12870	02	55	53	13.67	236	SCL	0.59	06H	40	0	TEHTEC
8	13224	02	55	53	6.11	236	SCL	0.26	07H	4.43	0	TEHTEC
8	13577	02	55	53	6.84	236	SCL	0.29	07H	13.25	0	TEHTEC
8	13931	02	55	53	8.91	236	SCL	0.38	07H	22.1	0	TEHTEC
8	14284	02	55	53	10.25	236	SCL	0.44	07H	30.93	0	TEHTEC
8	14637	02	55	53	11.22	236	SCL	0.48	07H	39.75	0	TEHTEC
8	14990	02	55	53	3.31	236	SCL	0.14	08H	3.33	0	TEHTEC
8	15211	02	55	53	5.86	236	SCL	0.25	08H	9.95	0	TEHTEC
8	15477	02	55	53	8.23	236	SCL	0.35	08H	16.6	0	TEHTEC
8	15742	02	55	53	10.52	236	SCL	0.45	08H	23.23	0	TEHTEC
8	16008	02	55	53	11.3	236	SCL	0.48	08H	29.88	0	TEHTEC
8	16260	02	55	53	3.54	236	SCL	0.15	09H	2.48	0	TEHTEC
8	16496	02	55	53	7.59	236	SCL	0.33	09H	7.38	0	TEHTEC
8	16630	02	55	53	8.94	236	SCL	0.38	09H	12.3	0	TEHTEC
8	16829	02	55	53	9.71	236	SCL	0.42	09H	17.2	0	TEHTEC

Fig. 10 Thickness measurement result of deposited tubes

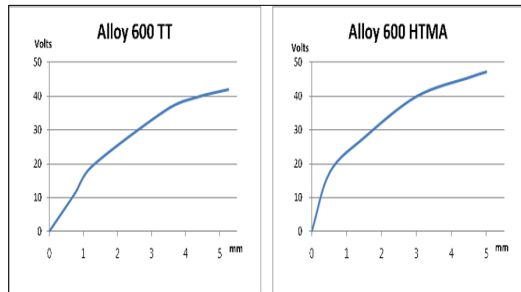


Fig. 11 Voltage vs. scale thickness curve

Table 2-a Amplitude value for scale thickness: Alloy 600 HTMA

		unit : volts					
Thickness (mm) \ Times	0.5	1.4	1.5	3.0	4.5	5.0	
	1	17.6	26.2	28.0	39.7	45.8	49.6
2	17.6	23.9	27.8	42.4	45.5	49.3	
3	17.3	25.4	27.3	37.6	45.2	48.9	
Average	17.5	25.2	27.7	39.9	45.5	47.3	

Table 2-b Amplitude value for scale thickness: Alloy 600 TT

		unit: volts					
Thickness (mm) \ Times	0.75	1.25	1.38	3.4	4.3	5.25	
	1	10.8	18.6	22.9	34.7	38.4	40.4
2	11.4	19.4	23.7	36.3	40.0	42.3	
3	11.5	19.7	23.6	36.2	40.3	43.2	
Average	11.2	19.2	23.4	35.7	39.6	41.9	

- 
- [2] C. S. Kim, W. B. Kim and Y. H. Lee, "Evaluation Techniques of SG TSP Flow Hole Blockage Rate," *Transactions of KPVP*, Vol. 3, No. 1, pp 36-41 (2007)
- [3] H. D. Kim, J. Y. Kim, A. S. Chung and T. R. Kim, "Evaluation of Tube Support Plate Blockage of Model F Steam Generator," *Transactions of KPVP*, Vol. 3, No. 2, pp 88-93 (2007)
- [4] EPRI TR 1022824 "Development of predictive models for deposit accumulation and corrosion on secondary side of steam generators-phase 2," pp. 6-2~6-5 (2011)
- [5] KHNP, "Steam Generator," pp. 140-141 (2005)
- [6] ASME, "Non-Destructive Examination Section V," pp. 170-174 (1995)
- [7] ASNT, "Nondestructive Testing Handbook, Eddy Current, Flux Leakage and Microwave Nondestructive Testing," pp. 252-264 (1986)