

와전류탐상 T/R 프로브 제작을 위한 센서의 임피던스 특성해석

Impedance Characteristics Analysis of Eddy Current Testing Sensor for T/R Probe Design

김지호*, 이향범
(Ji-Ho Kim and Hyang-Beom Lee)

Abstract : 와전류탐상(ECT) Transmit-Receive 프로브를 이용한 ECT 방법은 센서코일의 유도기전력의 변화를 관찰하여 피검사체의 결함이나 특성의 변화를 탐지해내는 방법이다. ECT T/R 프로브는 여러 개의 Pancake 코일로 구성되어 있고, 각각의 코일은 Transmit 코일과 Receive 코일로 나뉜다. 본 논문은 실제 T/R 프로브 제작에 앞서 동일한 특성을 갖는 와전류센서를 설계 및 제작하여 그 특성을 파악하였다. 와전류센서에 인가되는 시험주파수와 Lift-off의 변화에 대한 특성을 파악하고 와전류센서의 임피던스값을 산출하여 정규화 임피던스도를 그려 와전류센서의 특성을 살펴보았다.

Keywords: Eddy Current Testing, Transmit-Receive coil, Impedance Characteristics Analysis, Sensor

I. 서론

현대사회에 들어서 산업시설들의 각종 설비와 구조물에 대한 안전성과 제품에 대한 신뢰성은 항상 요구되어 왔으며 이러한 안전성과 신뢰성은 그 상태를 진단하고 수명을 파악함으로써 평가된다. 여기서 안전성에 대한진단과 수명을 파악하는데 있어서 가장 효율적인 방법은 비파괴검사이다. 특히 금속과 같이 도전체로 된 제품이나 부품의 표면 상태의 조사에는 와전류 탐상방법(Eddy Currmt Test ; ECT)이 가장 효과적이다. 철강, 비철의 관이나 봉, 선 등에 대하여 고속으로 자동화하여 생산라인의 전수검사에 유용하다. 또한 발전소와 석유 플랜트의 열교환기의 전열관이나 항공기 부품의 정기 검사 등의 유지 보수에 용이하다. 이러한 와전류탐상을 위하여 사용되는 프로브는 보빈프로브, RPC 프로브, EC Array 프로브 등이 있는데 그 중 EC Array 프로브는 여러 개의 Pancake 코일로 구성되어 각각의 코일은 Transmit 코일과 Receive 코일로 나뉜다. Transmit 코일은 자장을 발생시켜 피검사체에 와전류를 유기시키는 역할을 하고, Receive 코일은 Transmit 코일에 의해서 발생된 자장을 검출하여 결함신호를 받아들이는 역할을 하게 된다. 이 EC Array Probe를 이용한 ECT 방법은 다수의 센서를 통하여 센서코일의 유도기전력의 변화를 관찰하여 피검사체의 결함이나 특성의 변화를 탐지해내는 방법이다.

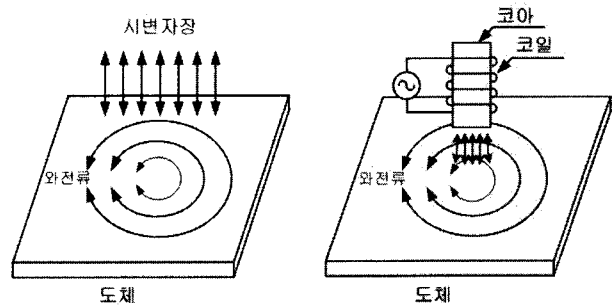
본 논문은 와전류탐상 검사에서 결함 검출에 우수한 검출 능력을 가지고 있는 EC Array probe 제작을 위하여 프로브에 사용되는 센서를 설계하고 제작하였다. 2X8 EC Array Probe 제작을 위하여 16개의 동일한 임피던스를 갖는 센서를 제작하였다. 이를 위하여 수치해석을 통해 선정된 센서를 대상으로 주파수와 Lift-off 변화에 따른 임피던스를 산출하였다. 산출된 임피던스값으로 정규화 임피던스도를 그려 와전류센서의

특성을 살펴보았다.

II. 본론

1. 와전류탐상의 원리

와전류탐상의 원리는 그림 1의 (a)와 같이 시간에 따라 변화하는 시변자장을 가하면 전자기유도현상에 의해 도체에 유기기전력이 발생하고 이 유기기전력은 시변자장을 방해하는 방향으로 유도전류가 발생하게 되는데 이 전류를 와전류라 한다.



(a) 와전류 발생원리 (b) 와전류탐상

그림 1. 와전류탐상 원리.

이 때 도체 안에 발생하는 와전류는 도체의 표면에 집중하여 흐르게 되는데 이것을 표피효과라고 한다. 또한 표피효과 정도를 나타내는 기준을 침투 깊이로 정의할 수 있으며 식 (1)과 같다.

$$\delta = \frac{1}{\pi f \mu \sigma} \quad (1)$$

여기서, f 는 주파수 [Hz], σ 는 도전율[S/m], μ 는 투자율 [H/m]이다. 침투깊이는 투자율, 도전율, 주파수에 관계된다. 와전류 탐상은 와전류 발생의 원리를 이용해 도체에 결함이나 불연속이 있을 경우 와전류의 변화가 생기고 입력 단에

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 8. 8., 채택확정 : 200x. x. xx.

김지호, 이향범 : 숭실대학교 전기공학부

(magnetic1@ssu.ac.kr, hyang@ssu.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 주관기관 기초전력연구원 과제번호 R-2005-7-073 연구비 지원으로 이루어졌음.

임피던스 변화가 일어나게 되어 결함의 유무, 크기, 종류 등을 파악할 수 있게 된다.

2. EC Array Probe

EC Array Probe는 Transmit 코일과 Receive 코일이 여러 개 배열된 형태로 구성되어 있다. 그림 2는 EC Array Probe이며, 축 방향 또는 원주 방향 모두 민감하게 반응하며, 방향성이 없는 결함 즉, 여러 방향으로 복잡하게 형성된 크랙성 결함도 식별이 가능하다.

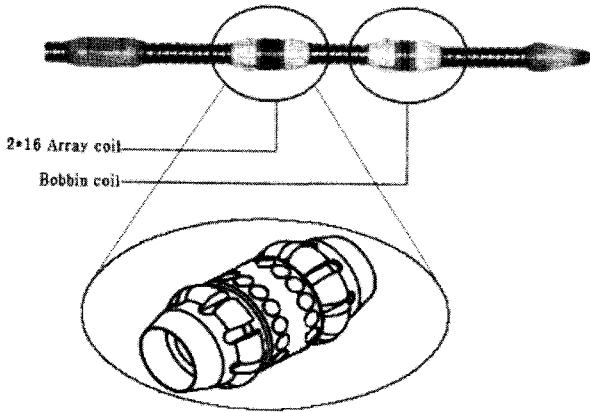


그림 2. EC Array Probe

아래의 그림 3은 상용화되고 있는 EC Array Probe의 구조 파악 및 센서의 배열 구조와 크기를 파악하기 위하여 방사능 투과법을 이용하여 촬영한 사진이다. 아래의 그림 3을 통하여 실제 사용되는 ECT Array Probe의 센서 배열 및 구조를 파악할 수 있었다.

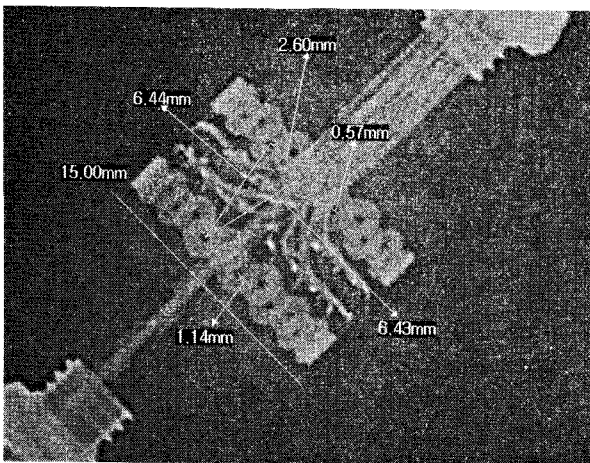


그림 3. EC Array Probe의 센서 배열 및 구조

3. 정규화 임피던스

와전류탐상은 시험품에 관한 정보를 코일의 임피던스 변화로 알 수 있다. 이것은 결함의 존재와 같은 검출해야 하는 요인에 따라 코일의 임피던스가 어떻게 변화하는지를 알아 두는 것이 중요하다. 즉 시험코일의 설계나 시험 조건 등을 설정할 때 임피던스 변화가 가능한 커지도록 하여야 한다. 실제 각각의 조건에 의해서 임피던스를 직접 나타내는 것은

문제점이 발생한다. 이것은 주파수가 다른 경우 비교 검토하는 것이 곤란할 수 있다. 이런 경우 정규화 된 임피던스 곡선을 사용한다.

정규화 임피던스도는 주파수에 변화에 따른 임피던스 변화나 결합도의 변화, 도체의 도전율의 변화, 도체와 시험코일 사이의 Lift-off 변화 등을 동일한 도면에 그릴 수 있다.

본 논문에서는 와전류센서가 해석대상이 없이 공기 중에 있을 때, 주파수를 변화시켜 리액턴스(wLo)를 측정하였고 와전류센서와 해석대상이 Lift-off의 거리를 가지고 있을 때, 주파수를 변화하여 저항(R) 및 리액턴스(wL)을 측정하여 정규화 임피던스도를 그려 와전류센서의 특성을 파악하였다.

III. 와전류센서 제작 및 실험

1. 와전류센서의 제작

와전류센서의 주파수 변화와 Lift-off 변화에 따른 특성 변화를 알아보기 위하여 와전류센서의 제작 및 실험을 수행하였다. 센서에 인가되는 주파수를 변화시키고 센서와 시험편 사이의 거리를 변화시켰다. 센서의 크기는 내경 1[mm], 외경 3[mm], 높이 1[mm]이며 주파수는 1[kHz]에서 500[kHz]까지 변화시켰다. 실험 대상과 와전류센서 사이의 Lift-off는 0[mm], 0.3[mm], 0.6[mm], 0.9[mm]로 하여 실험을 수행하였으며 그림 4는 해석대상과 와전류센서를 보여 주고 있다.

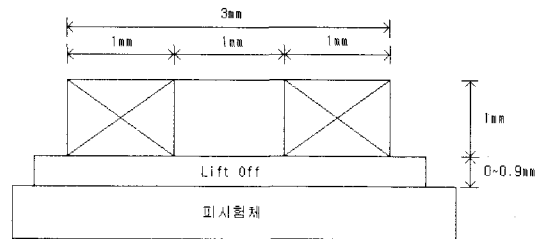


그림 4. 제작된 센서의 규격과 Lift-off

2. 와전류센서 감도 실험

실험은 와전류 센서가 해석대상이 없이 공기 중에 있을 때, 주파수를 변화시켜 리액턴스(wLo)값을 측정하고 와전류 센서와 해석대상이 Lift-off의 거리를 가지고 있을 때, 주파수를 변화하여 저항(R) 및 리액턴스(wL)값을 측정하였다. 표 1과 표 2는 Lift-off 별로 측정된 인덕턴스(L)와 저항(R), 리액턴스(X), 임피던스(Z)와 측정 위상 값을 나타낸 것이다.

표 1과 2를 비교해 보면 Lift-off 고려시 Lift-off가 증가하는 경우 센서의 저항 값은 감소하고 인덕턴스 값은 증가하는 모습을 살펴 볼 수 있다. 이는 Lift-off가 증가함에 따라 시험체에 유기되는 와전류의 세기가 감소하여 코일의 임피던스에 영향을 미치는 자기장이 감소함으로써 저항은 작아지고 인덕턴스는 증가하는 것이다.

또한 주파수가 증가할수록 Lift-off에 따른 임피던스 변화가 작게 나타나는데, 주파수 증가에 따라 시험체의 표면에 와전류의 세기를 증가시키고 이는 임피던스에 더 큰 영향을 미치게 된다.

표 1. 측정된 와전류 센서의 임피던스 값. (Lift-off: 0 [mm])

센서 구분	F [kHz]	L	R	X	Z	θ
S1	100	10.25	1.895	6.441	6.714	73.606
	200	9.936	2.538	12.488	12.743	78.512
	300	9.696	3.244	18.28	18.566	79.937
	400	9.514	3.969	23.916	24.243	80.577
	500	9.371	4.708	29.447	29.821	80.916
S2	100	9.686	1.927	6.088	6.386	72.436
	200	9.367	2.653	11.776	12.071	77.304
	300	9.113	3.412	17.186	17.521	78.771
	400	8.916	4.195	22.42	22.809	79.402
	500	8.76	4.989	27.534	27.982	79.73
S3	100	8.93	1.893	5.613	5.924	71.363
	200	8.662	2.484	10.889	11.169	77.15
	300	8.447	3.156	15.929	16.239	78.793
	400	8.238	3.862	20.813	21.168	79.488
	500	8.141	4.588	25.588	25.996	79.835

표 2. 측정된 와전류 센서의 임피던스 값. (Lift-off: 0.9 [mm])

센서 구분	F [kHz]	L	R	X	Z	θ
S1	100	9.692	1.737	6.09	6.333	74.081
	200	9.601	1.943	12.066	12.221	80.852
	300	9.543	2.19	17.992	18.125	83.060
	400	9.503	2.48	23.892	24.02	84.074
	500	9.473	2.812	29.768	29.901	84.604
S2	100	8.994	1.69	5.652	5.899	73.353
	200	8.918	1.873	11.208	11.363	80.513
	300	8.869	2.1	16.723	16.854	82.843
	400	8.835	2.371	22.211	22.337	83.907
	500	8.808	2.687	27.678	27.808	84.455
S3	100	10.751	1.811	6.754	6.993	74.99
	200	10.63	1.057	13.359	13.401	85.476
	300	10.556	2.339	19.899	20.036	83.296
	400	10.506	2.663	26.405	26.539	84.241
	500	10.468	3.033	32.887	33.027	84.731

그림 5는 Lift-off 변화에 따른 와전류 신호에 결과를 나타 낸 것이다. 즉 Lift-off의 변화에 따른 특성은 Lift-off가 작을수록 감도가 좋다. 따라서 와전류탐상 검사에 있어서 와전류 센서를 시험대상과 완전히 밀착하여 검사함으로써 잡음이나 진동에 의한 잘못된 신호를 배제할 수 있다. 시험대상의 도전율의 변화 또한 금속재료의 종류, 합금 성분, 열처리 상태, 경도 등 제품의 품질 관리에 이용될 수 있다.

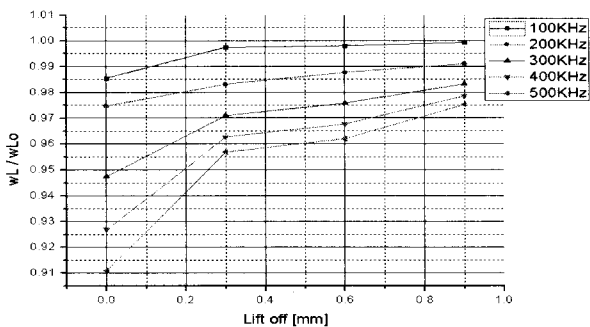
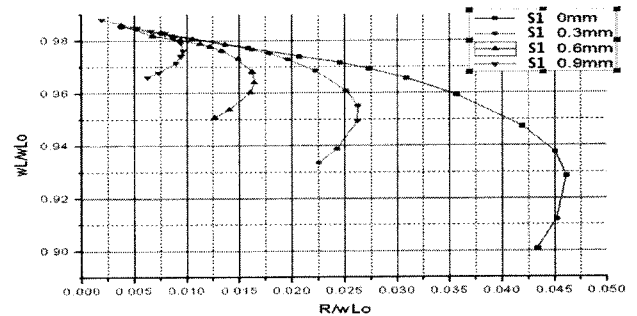


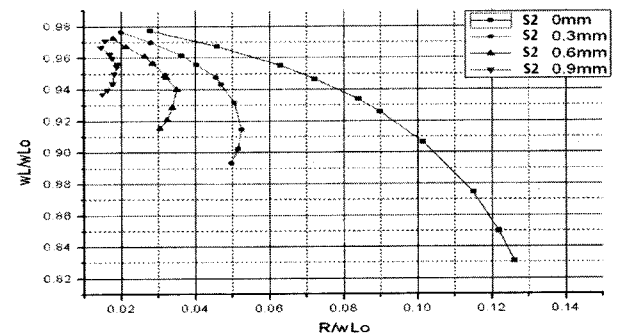
그림 5. Lift-off에 따른 와전류 신호비

측정된 임피던스 값으로 정규화 임피던스 도를 그려 와전류 센서의 특성을 파악하였다. 그림 6의 정규화 임피던스 도는 주파수의 변화에 따라 반원의 궤적을 그린다. 이는 주파수가 증가함에 따라 임피던스 궤적은 아래로 향하는 궤적을 그리고 있다. 주파수 선정은 두 가지 방법이 있다. 첫 번째는 정규화 임피던스 도에서 주파수를 변화시켰을 때 반원의 중간부분인 Knee position에서 주파수를 선정함으로써 와전류 센서의 임피던스 값의 변화가 크므로 감도가 좋은 센서를 설계할 수 있다. 두 번째는 경험적인 방법에 의해 산출된 식 (2)에 의해 선정할 수 있다. 또한 반원의 크기가 클수록 임피던스의 변화가 크므로 감도가 좋은 센서를 선정하는데 기준이 된다.

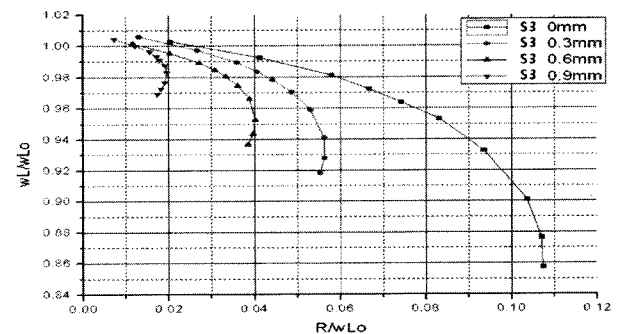
$$f = \frac{1.6\rho}{t^2} \tag{2}$$



(a) 와전류 센서 S1의 정규화 임피던스도



(b) 와전류센서 S2의 정규화 임피던스도



(c) 와전류센서 S3의 정규화 임피던스도

그림 5. Lift-off 변화에 따른 정규화 임피던스도

IV. 결론

본 논문은 EC Array Probe에 사용되는 와전류센서의 설계 및 특성을 고찰하였다. 수치해석을 통하여 파악된 와전류센서를 제작하여 실험을 통하여 그 결과를 검증하였다. 와전류센서의 특성을 파악하기 위하여 와전류센서의 주파수 특성 및 Lift-off에 대한 변화에 대하여 특성을 살펴보았다.

실험을 통하여 제작된 와전류센서의 임피던스를 측정하고 측정된 결과를 바탕으로 정규화 임피던스를 그려 와전류센서의 특성을 파악하였다. 수치해석과 상용화 모델을 통한 감도가 좋은 센서를 선정하였다.

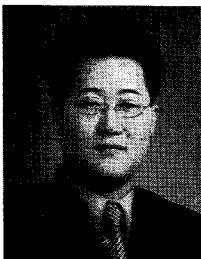
와전류센서의 크기 변화에 있어서 와전류센서의 높이를 크게 하는 것보다 외경을 크게 하는 것이 감도가 좋고 검출 능력이 뛰어났으며, 내경은 $P((외경-내경)^2)$ 의 길이와 유사할 때 감도와 결함검출능력이 좋았다. 실제 제작된 와전류센서는 이 결과에 타당한 센서라 사료된다.

또한 Lift-off와 주파수에 대한 변화의 특성은 Lift-off가 작을수록 감도가 좋다. 따라서 와전류센서를 시험대상과 완전히 밀착하여 검사함으로써 잡음이나 진동에 의한 잘못된 신호를 배제할 수 있다. 주파수 변화에 대한 와전류센서의 결함 검출 능력은 주파수가 높아짐에 따라 증가했다가 감소하는 특성을 보이고 있다. 즉 특정한 주파수에서 최고의 검출 능력을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

즉, 와전류센서의 결함에 대한 검출 능력을 증가시키기 위하여 여러가지 외부 상황을 고려해야 한다. 그 중 사용에 가장 적합한 주파수를 선정해야 하며 시험체와 와전류센서의 거리를 최소화하여 노이즈에 대한 잘못된 신호를 배제할 수 있도록 해야 한다.

참고문헌

- [1] 이의중 역, “와전류탐상시험”, 도서출판 골드, 1999.
- [2] Jack Blitz, “Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing, Adam Hilger, 1991
- [3] 이세경 외, “와전류 탐상용 탐촉자 개발”, 과학기술처, 1986
- [4] 최덕수 외, “수치해석을 이용한 와전류센서의 특성해석”, 대한전기학회, 2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2003
- [5] 최덕수 외, “강자성체의 결함검출을 위한 와전류센서 개발”, 비파괴검사학회, 2002년 비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, 2002
- [6] Daniel Ioan, Mihai Rehican, “Numerical Model for Eddy Current Testing of Ferromagnetic Steel Parts”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.38. No.2, March 2002
- [7] L. Obrutsky, B.Lepine, “Eddy Current Technology for Heat Exchanger and Steam Generator Tube Inspection”, WCNDT, Proceedings of the 16 the World Conference in Nondestructive, 2004



김지호

2004년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2006년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2006년 ~ 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 수료(박사과정). 관심분야는 전기기기, 비파괴검사, 전기철도, 전자기 센서 설계 및 개발



이향범

1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1995년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 기초전력공학공동연구소 선임연구원. 1998년 ~ 현재 숭실대학교 전기공학부 교수. 관심분야는 전기기기, 비파괴검사, 전자장 수치해석 및 설계, 전자기 센서 설계 및 개발