수치해석을 이용한 와전류센서의 특성해석

최 덕 수, 이 향 범, 나 은 진
숭실대학교 전기공학과

Characteristics Analysis Eddy Current Sensor Using by Numerical Analysis

Duck-su Choi, Hyang-beom Lee, and Eun-jin Na
Department of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - The characteristics of eddy current sensor has been analyzed by using numerical analysis which is performed by modeling eddy current sensor and analytic object into three-dimension axis-symmetry in this paper. The eddy current sensor is modeled as cylindrical shape with variation of inside and outside diameter and frequency range between 1[kHz] and 1[MHz] for numerical analysis. The value of impendence on eddy current sensor depending on frequency variation was calculated through numerical analysis. The characteristics of eddy current sensor can be studied by normalized impendence which is gained from the calculated impendence. Therefore, sensitivity of eddy current sensor depending on frequency, inside and outside diameter can be known by investigating diameter of half circle impendence and its locus.

1. 서 론

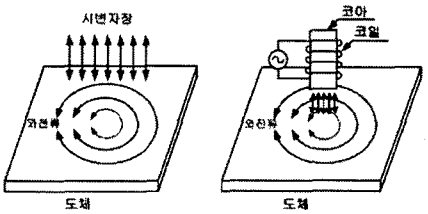
각종 설비와 구조물에 대한 안전성과 제품에 대한 신뢰성은 항상 요구되어 왔으며 이러한 안전성과 신뢰성은 그 상태를 진단하고 수명을 파악함으로써 평가된다. 여기서 안정성에 대한 진단과 수명을 파악하는데 있어서 가장 효율적인 방법은 비파괴 검사이다. 비파괴 검사는 검사 대상에 손상을 가하거나 파괴하지 않고 대상의 내부와 외부에 존재하는 불연속 혹은 결함을 탐지하거나 검사 대상의 물성을 판단하는 기술이다. 특히 금속과 같이 도전체로 된 제품이나 부품의 표면 상태를 조사하는데 와전류 탐상 방법이 가장 효과적이다. 철강, 비철의 관이나 봉, 선 등에 대하여 고속으로 자동화 하여 생산라인의 전수검사에 유용하다. 또 발전소와 석유 플랜트의 열교환기의 전열관이나 항공기 부품의 정기검사 등의 보수, 보전에 용이하다. 이러한 많은 장점을 가지고 있는 와전류 탐상법은 탐상기와 신호 검출용 센서로 수행되는데 신호 검출용 센서는 시험체에 관한 정보를 검출하기 때문에 시험체의 형상과 검출해야 하는 결함의 크기, 탐상 목적에 따라 와전류 센서의 형태, 종류 특성도 매우 다양하다. 따라서 사용되는 장소나 목적에 따라 적절한 와전류 센서를 적용해야 하므로 그 수요는 상당히 많을 것으로 예상된다. 와전류 탐상방법에 사용되는 와전류 센서는 시간의 변화에 따라 변화하는 자속을 도체에 가하면 전자기유도현상에 의해 유기기전력이 발생하고 이 유기기전력은 렌쯔의 법칙에 따라 시간에 따라 변화하는 자장을 방해하는 방향으로 와전류가 흐르게 된다. 도체안에 발생하는 와전류는 도체의 표면에 집중하여 흐르게 되는데 이것을 표피효과라고 하며 표피효과의 정도를 나타내는 기준을 침투깊이로 정의할 수 있다. 침투깊이는 도체의 투자율, 도전율, 주파수에 관계되고 투자율과 도전율은 검사대상이 정해지면 그 값이 결정되어 버린다. 따라서 침투깊이에 영향을 줄 수 있는 것은 주파수라고 할 수 있다.

본 논문에서는 주파수 및 와전류센서의 크기 변화에 따른 특성을 살펴 보기 위해 수치해석을 수행하였다. 와전류센서와 해석대상인 도전체을 3차원 축대칭으로 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 와전류센서는 원통형으로 모델링하고 직경과 폭을 변화시켰다. 주파수는 1[kHz]에서 1[MHz]까지 변화시켜 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 주파수 및 직경과 폭 변화에 따른 와전류센서의 임피던스값을 산출하였다. 산출된 임피던스값으로 정규화 임피던스도를 그려 와전류센서의 특성을 살펴 보았다.

2. 본 론

2.1 와전류 탐상원리

와전류 탐상원리는 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 와전류라고 한다.



(a)와전류 발생원리 (b)와전류탐상
그림 1. 와전류탐상 원리

이때 도체안에 발생하는 와전류는 도체의 표면에 집중하여 흐르게 되는데 이것을 표피효과라고 한다. 또한 표피효과의 정도를 나타내는 기준을 침투깊이로 정의할 수 있으며 식 (1)과 같다. 침투깊이는 투자율, 도전율, 주파수에 관계된다. 와전류 탐상은 와전류 발생의 원리를 이용해 도체에 결함이 있을 경우 와전류의 변화가 생기고 입력단에 임피던스의 변화가 일어나게 되어 결함의 유무, 크기, 종류 등을 파악할 수 있게 된다.

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

여기서, f 는 주파수[Hz], σ 는 도전율[S/m], μ는 투자율[H/m]이다.

2.2 유한요소 해석

와전류탐상에 적용되는 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \qquad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \qquad (4)$$

여기서, $\vec{E}$ 는 전계의 세기[V/m], $\vec{H}$ 는 자계의 세기 [A/m], $\vec{B}$ 는 자속밀도[Wb/m^2], $\vec{J}_s$ 는 전원전류밀도 [A/m^2] $\vec{J}_e$ 는 와전류밀도 [A/m^2] 이다. 자속밀도와 자계의 세기, 와전류밀도와 전계의 세기 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \qquad (5)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \qquad (6)$$

정현적인 입력만을 취급한다면 식 (1)은 다음과 같다

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \qquad (7)$$

자장문제를 풀기 위해서 자기벡터포텐셜($\vec{A}$)를 구하면 다음과 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_s - j\omega\sigma\vec{A} \qquad (8)$$

Helmholtz의 유일성 이론에 따라, 식 (8)에서 유일한 해를 얻기 위하여 다음과 같은 Coulomb's Gauge 조건을 사용한다.

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \qquad (9)$$

식 (9)의 게이지조건과 식 (10)의 벡터 항등식을 이용하면 식 (11)와 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \qquad (10)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} - \sigma j\omega \vec{A} + \vec{J}_s = 0 \qquad (11)$$

위의 식 (11)는 와전류탐상의 지배방정식으로, 해석하고자 하는 문제에 이 수식을 적용하고, 경계조건을 대입하여 풀면 된다. 축대칭 문제는 2차원 (r, z) 평면에서 해석이 가능하므로, 자기벡터포텐셜과 전류밀도는 θ 방향의 성분만 존재한다고 볼 수 있다. 따라서 지배방정식 (11)는 축대칭 문제 해석시 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} \right) = -J_s + j\omega\sigma A \qquad (12)$$

2.2 해석사례

그림 2와 같이 해석대상에 대한 와전류센서의 특성을 해석하기 위해 그림 3과 같이 3차원 축대칭으로 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 와전류센서는 직경 및 폭을 변화시켜 해석하였다. 그림 4와 같이 와전류센서의 외경과 내경을 변화시키고, 그림 5와 같이 센서의 폭을 변화시켰다. 해석대상은 도전율이 1.39×10^6[S/m]인 스테인리스강을 사용했다. 와전류센서와 해석대상과의 lift-off는 0.5[mm]로 하였다. 수치해석은 와전류센서가 해석대상이 없이 공기중에 있을 때 수행하여 리액턴스 값을 산출하였으며 리액턴스 값은 표1에서와 같이 wL_0로 나타내었다. 와전류센서와 해석대상이 lift-off의 거리를 가지고 있을 때, 주파수를 변화하여 저항 및 리액턴스 값을 산출하고 표 1과 같이 와전류센서가 공기중에 있을 때의 리액턴스 값에 대한 시험대상이 있을 때의 저항 및 리액턴스의 비를 나타내어 그림 6과 같이 정규화 임피던스도를 그려 와전류센서의 특성을 파악하였다.

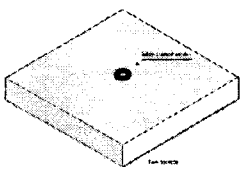


그림 2. 와전류센서와 해석대상

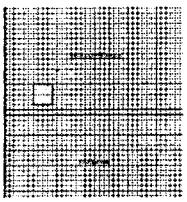
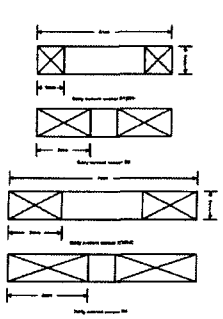


그림 3. 요소망



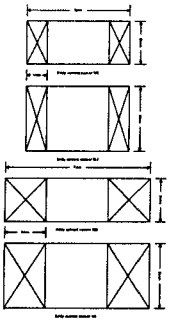


그림 4.와전류센서 직경변화 그림 5. 와전류센서 폭변화

수치해석 결과 그림 6과 같이 와전류센서는 주파수의 증가에 따라 임피던스 궤적은 아래로 향하는 궤적을 그리고 있으며, 직경의 변화에 있어서 외경의 길이 긴 D3과 D4가 D1 및 D2보다 반원의 궤적이 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한 내경 길이가 커짐에 따라 반원 궤적의 크기는 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 와전류센서의 폭 변화에 따른 특성은 폭이 가장 작은 와전류센서 W4가 가장 큰 궤적을 그리고 있으며, 폭의 길이가 커짐에 따라 반원의 궤적이 작아 진다는 것을 알 수 있다. 따라서, 와전류센서의 특성은 폭 길이를 길게 하는 것보다 외경의 길이를 더 길게 하는 것이 더 좋은 특성을 나타내며, knee position 부근에서 주파수를 선정함으로써 감도가 좋은 센서를 설계할 수 있다.

표 1. 와전류센서의 주파수 및 지름 변화에 따른 임피던스값

Eddy Current Sensor D1(W1)				Eddy Current Sensor D2			
f	wL_s	R/wL_s	wL/wL_s	f	wL_s	R/wL_s	wL/wL_s
1kHz	0.25162	0.003392	0.999439	1kHz	0.11919	0.00299	0.99962
2kHz	0.50324	0.006233	0.998598	2kHz	0.23837	0.00551	0.99881
5kHz	1.25810	0.013168	0.996593	5kHz	0.59594	0.01172	0.99623
10kHz	2.51619	0.021929	0.99022	10kHz	1.19187	0.01958	0.99158
20kHz	5.03239	0.053697	0.979843	20kHz	2.38374	0.05059	0.98248
50kHz	12.58097	0.251777	0.954479	50kHz	5.95938	0.04809	0.95274
100kHz	25.16195	0.0627	0.925651	100kHz	11.91872	0.05957	0.93307
200kHz	50.32387	0.067067	0.891746	200kHz	23.83744	0.06835	0.90059
500kHz	125.80968	0.082046	0.843166	500kHz	59.59361	0.08219	0.85716
1MHz	251.61937	0.053454	0.820881	1MHz	119.18722	0.05433	0.82921
Eddy Current Sensor D3(W4)				Eddy Current Sensor D4			
f	wL_s	R/wL_s	wL/wL_s	f	wL_s	R/wL_s	wL/wL_s
1kHz	0.28556	0.006952	0.999739	1kHz	0.16137	0.006226	0.999842
2kHz	0.56713	0.012049	0.999387	2kHz	0.32274	0.011305	0.999137
5kHz	1.41781	0.024722	0.998455	5kHz	0.80585	0.023311	0.997191
10kHz	2.83563	0.039622	0.979414	10kHz	1.61369	0.037564	0.98092
20kHz	5.67126	0.058356	0.953224	20kHz	3.22739	0.055754	0.961978
50kHz	14.17814	0.092411	0.91425	50kHz	8.06846	0.079668	0.919136
100kHz	28.35628	0.092518	0.869573	100kHz	16.13682	0.090828	0.874862
200kHz	56.71256	0.09192	0.820626	200kHz	32.27355	0.091351	0.82729
500kHz	141.78141	0.078707	0.764964	500kHz	80.69462	0.079078	0.771273
1MHz	283.56282	0.065142	0.732337	1MHz	161.38924	0.06573	0.738202

표 2. 와전류센서의 주파수 및 지름 변화에 따른 임피던스값

Eddy Current Sensor W2				Eddy Current Sensor W3			
f	wL_s	R/wL_s	wL/wL_s	f	wL_s	R/wL_s	wL/wL_s
1kHz	0.19671	0.005203	0.999567	1kHz	0.16101	0.005041	0.999310
2kHz	0.39342	0.005774	0.998465	2kHz	0.32262	0.005388	0.998371
5kHz	0.98355	0.011799	0.995406	5kHz	0.80505	0.010673	0.995325
10kHz	1.96711	0.018914	0.990246	10kHz	1.61009	0.01564	0.990453
20kHz	3.93421	0.028088	0.980257	20kHz	3.22018	0.023635	0.981958
50kHz	9.83553	0.043601	0.953596	50kHz	8.05048	0.035277	0.953878
100kHz	19.67105	0.047416	0.937103	100kHz	16.10052	0.037519	0.945742
200kHz	39.34210	0.049869	0.912034	200kHz	32.20184	0.037825	0.926276
500kHz	98.35527	0.043925	0.881191	500kHz	80.50460	0.033092	0.903506
1MHz	196.71054	0.037122	0.862578	1MHz	161.00919	0.02773	0.889245
Eddy Current Sensor W5				Eddy Current Sensor W6			
f	wL_s	R/wL_s	wL/wL_s	f	wL_s	R/wL_s	wL/wL_s
1kHz	0.23438	0.006148	0.99955	1kHz	0.19890	0.005752	0.99958
2kHz	0.46871	0.010836	0.99076	2kHz	0.39780	0.010082	0.99067
5kHz	1.17178	0.021731	0.98056	5kHz	0.99450	0.019428	0.98062
10kHz	2.34356	0.035782	0.96852	10kHz	1.98901	0.029407	0.96121
20kHz	4.68712	0.048054	0.95287	20kHz	3.97802	0.040831	0.95262
50kHz	11.71780	0.064702	0.62595	50kHz	9.94504	0.052993	0.89475
100kHz	23.43561	0.070534	0.89052	100kHz	19.89009	0.055861	0.90649
200kHz	46.87121	0.069131	0.95490	200kHz	39.78018	0.053115	0.97864
500kHz	117.17804	0.057023	0.81868	500kHz	99.45045	0.043744	0.84788
1MHz	234.35609	0.046561	0.79145	1MHz	198.90090	0.035525	0.83084

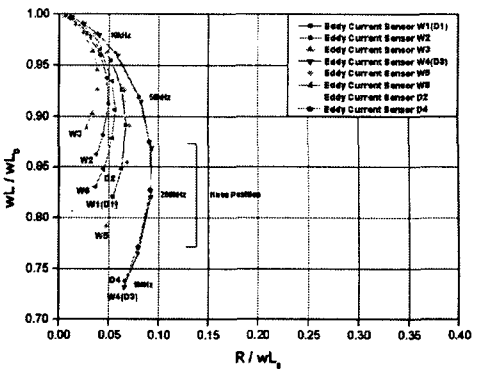


그림 6. 와전류센서의 직경 및 폭 변화에 따른 정규화 임피던스도

3. 결 론

본 논문에서는 수치해석을 이용하여 와전류센서의 특성을 해석하였다. 와전류센서와 해석대상인 도전체을 3차원 축대칭으로 모델링하여 수치해석을 수행하였다.와전류센서는 원통형으로 모델링하고 직경과 폭을 변화시켜 수치해석을 수행하였다. 주파수는 1[kHz]에서 1[MHz]까지 변화시켰다. 수치해석을 통해 주파수 변화에 따른 와전류센서의 임피던스값을 산출하였다. 산출된 임피던스값으로 정규화 임피던스도를 그려 와전류센서의 특성을 살펴 보았다. 주파수의 증가에 따라 임피던스 궤적은 아래로 향하는 궤적을 그리고 있으며, 와전류센서의 직경의 변화에 있어서 외경의 길이가 커짐에 따라 반원의 궤적이 커지지만 내경 길이가 커짐에 따라 반원 궤적의 크기는 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 와전류센서의 폭변화에 따른 특성은 폭의 길이가 커짐에 따라 반원의 궤적이 작아 진다는 것을 알 수 있다. 따라서, 반원의 궤적이 커짐에 따라 센서의 감도가 좋아짐으로 와전류센서의 설계에 있어서 주파수는 knee position 부근에서 주파수를 선정하고 센서의 폭 변화보다는 외경의 길이를 길게 함으로써 감도가 좋은 와전류센서를 설계할 수 있다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여
기초전력공학공동연구소의 주관으로 수행된 과제임
(전력기술기초연구 R-2003-13-107)

[참 고 문 헌]

[1] Daniel Ioan, Mihai Rebican, "Numerical Model for Eddy-Current Testing of Ferromagnetic Steel Parts", IEEE Transactions on Magnetics, VOL.38, NO.2, March 2002.

[2] Kofi D. Anim-Amppiah, Sedki M. Riad, "Analysis and Design of Ferrite Cores for Eddy-Current-Killed Oscillator Inductive Porximity Sensors", IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 33, NO. 3, May 1997.

[3] Jozsef Pavo, Kenzo Miya, "Optimal Design of Eddy Current Testing Probe Using Fluxset Magnetic Field Sensors", IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 32, NO. 3, May 1996.

[4] Young-Kil Shin, "Design of Encircling Remote Field Eddy-Current Probe", IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 38, NO. 2, March 2002.