

퍼멀로이와 실리콘스틸의 적층 통한 전류센서의 선형성 및 포화도 개선

신정원 · 최봉석 · 하영호⁺

Improved Linearity and Saturation of Current Sensor by Laminating Silicon Steel and Fermalloy

Jung-Won Shin, Bong-Seok Choi, and Yeong-Ho Ha⁺

Abstract

The current sensor is used in industrial devices and power utilities. Core materials of these current sensors are divided into mainly two groups as silicon steel and fermalloy. Silicon steel has a wide saturation bandwidth but low sensitivity during low-current, whereas permalloy has a short saturation bandwidth but high sensitivity during low-current. In this paper, laminated silicon steel and permalloy by equal ratio is proposed to improve the linearity and saturation of current sensor. It is proved that the proposed core material has larger bandwidth than fermalloy as well as higher sensitivity than silicon steel. When comparing simulation results by FLUX 3D, the proposed method has also better performance than the previous core materials.

Keywords: Current sensor, Fermalloy, Silicon steel

1. 서 론

현재 전류센서 시장은 산업용 설비 장비의 컨트롤이나 전원부의 과전류 차단시스템에 안전성 확보를 목적으로 한 기기 및 시스템용 전류센서를 사용하는 것이 대부분이지만, 향후의 시장은 어느 한 분야에만 사용되는 응용부품이 아니라 모든 산업의 전력을 측정하는 분야에 활용할 수 있는 응용기기부품이다.

전류센서를 주로 사용하고 있는 분야를 본다면, 산업 설비 분야, 전력 시설 설비 분야, 차재용 전류센서분야로 나눌 수 있다. 산업 설비 분야에서 전류센서 적용 분야는 용접기, 전원공급장치, 무정전전원장치(UPS), 공작기계, 로봇, 전철 등에서 주로 사용되고 있다. 전력 설비 분야에는 에너지 생산을 목적 한 장비 및 시스템용이나, 대체 에너지 개발로 인한 세계적인 태양광, 풍력 발전 시스템의 전원 분배로 생산되어진 전력을 최대한 절약하면서 사용하고 관리할 수 있는 전력량계에 IT가 접목되면서 수치화된 전력량계의 형태로 발전 되어 가고 있다[1-3].

특히, 생산되어진 에너지를 예전에는 만드는 것에만 중점을 많이 두었지만 지금은 생산에서 효율, 관리까지 중요성은 높아지고 있으며 응용기기 도입은 사용하고 있는 전력뿐만 아니라 사용하고 있지 않는 전력의 중요성을 가지고도 수치화 하여 차단하는 시스템 및 제품을 개발하여 전력의 중요성을 알리고, 개인이 편리하게 관리하여 사용할 수 있도록 응용한 제품들이 출시되어 사용되고 있다[4]. 또한, 차재용 전류센서의 경우는 자동차에 탑재 되었을 경우, 용도에 따라 전류센서의 응용분야가 나뉘게 된다. 차재용 전류센서의 방식은 크게 아날로그 방식과 집적화된 IC를 사용한 방식으로 나뉜다. 아날로그 방식의 회로설계 구현은 어렵지 않으나, 제품 양산면에서 공정이나 단가가 올라가는 단점으로 집적화된 IC를 사용하고 있다[5].

일반적인 전류센서는 전류와 전압을 측정하는 응용부품으로 피측정 도선에 흐르는 전류를 관통하거나 PCB에 장착하여 흐르는 전류에 비례한 전압이 출력값으로 나타난다. 이러한 전류센서의 전류측정 방법은 크게 전자유도형과 전류자기효과형으로 나눌 수 있다.

전자유도형은 전자계의 유도 현상을 이용한 것으로 교류 전류 측정에는 유리하나, 비정형회형 및 직류 전류 파형의 측정에는 별도의 주변 회로를 추가해야 하고 주파수 대비 출력 신호의 비선형성(non-linearity)과 과전류 시에 나타나는 파괴 현상이 나타난다[6,7].

반면에, 전류자기효과형 전류 센서는 홀 효과(Hall effect) 구동원리 이론을 이용한 변환소자와 자성재료를 조합하는 전자회로가 일체화된 전류 센서로 과전류가 인가되었을 시 비파괴 특

경북대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)

1370 Sankyuk-dong, Buk-gu, Daegu, 702-701, Korea

⁺Corresponding author: yha@ee.knu.ac.kr

(Received: Mar.12, 2015, Revised: May.28, 2015, Accepted: June.2, 2015)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성을 보이며, 직류 전류 파형이나 비정형 교류 전류 파형의 모든 범위 측정이 가능한 것이 특징이다. 또한, 제품의 소형 경량화가 가능하고 균일한 온도특성을 유지하며, 측정 전류 전원도 완전히 절연체로 충전했을 경우 매우 안정되고, 0.5%~1%의 우수한 선형성을 보인다[8,9].

이러한 전류센서에서 자성체 재료의 이상적인 요구조건은 높은 투자율과 자속밀도, 포화특성을 요구하며 낮은 보자력과 온도변화특성을 유지하는 재료의 선별이 전류센서 성능과 직결되어 있다. 투자율이 높은 재료는 포화특성과 온도특성이 나쁘게 나타나며, 투자율이 낮은 재료는 포화특성과 온도특성이 양호한 반면, 보자력과 철손 등의 영향으로 고주파수에서 발열하는 불리한 특성을 나타낸다. 이에 따라, 전류측정 환경에 맞추어 적절한 자성체 선형성이 필요하다. 자성체의 경우 주파수대역 기준에서 이력 손실이 작고 포화 자속밀도가 큰 실리콘 스틸(silicon steel)이 자성체로 주로 사용되고 있다[9,10]. 기존에 사용하는 전류센서의 자성체 소재로 주로 실리콘 스틸과 퍼멀로이로 제작되어져 각각의 분야에 맞게끔 맞추어 개발되어져 사용하고 있다. 실리콘 스틸의 경우 저전류대의 감도는 떨어지지만, 높은 포화를 나타내고, 퍼멀로이는 저전류대의 감도는 좋아지는 반면, 포화도가 낮아서 측정 범위 영역이 낮은 단점을 가지고 있다.

본 논문은 전류센서 자성체의 저전류대 선형성과 높은 포화점을 가지는 자성체를 구성하기 위해 실리콘 스틸과 퍼멀로이 두 가지 소재를 적층시킨 구조의 자성체를 제안하였다. 선형성과 높은 포화점을 가지는 최적의 적층 비율을 구하기 위해 실리콘 스틸과 퍼멀로이 소재의 비율을 달리해가며 최적의 적층 비율을 구하였고, 적층 비율을 달리하면서 최적의 전류센서 자성체의 적층 구조를 구성하였다. 제안한 자성체의 구조에 대해 전류센서 출력값 변화율에 대한 실험을 수행하였다. 이에 대해 제안하는 자성체의 구조는 선형성, 정확성에서 기존의 자성체보다 우수한 출력특성을 보였다. 또한, 제안된 소재의 적층방법은 저전류 범위에서 감도에 대한 선형성을 유지하면서 포화영역은 기존의 자성체의 구조에서 중간 값의 범위를 찾을 수 있었다. 제안한 전류센서의 적층방법은 전자계 특성과 자장해석에서 기존의 전류센서보다 우수한 성능을 나타내었다[11,12].

2. 기존 전류센서의 특성

일반적으로 전류센서는 전류와 전압을 측정하는 응용부품으로 피측정 도선에 흐르는 전류를 관통하거나 PCB에 장착하여 흐르는 전류에 비례한 전압이 출력값으로 나타난다. 이러한 전류센서의 성능 평가에 있어 전류센서 자성체의 선형성과 포화도는 중요한 요소이다. 실리콘 스틸을 사용한 자성체의 전류센서 경우 주파수대역 기준에서 이력 손실이 작고 포화 자속밀도가 큰 것이 특징이다. 이에 반해, 퍼멀로이를 사용한 자성체의 전류센서의 경우 실리콘 스틸과 반대로 저전류대의 감도는 좋

아지나, 실리콘 스틸에 비해 낮은 포화도로 인해 측정 범위의 영역이 낮은 단점을 가지고 있다.

일반적인 실리콘 스틸과 퍼멀로이 자성체 전류센서의 특성을 분석하기 위해 일반적으로 사용하는 4 mm와 2 mm 공극의 실리콘 스틸과 퍼멀로이 소재의 자성체에 대해서 높이를 변화 시켜가며 전류센서 출력의 선형성, 포화도 및 온도특성을 살펴 보았다.

2.1 실리콘 스틸 자성체의 전류센서 특성

일반적으로 실리콘 스틸을 사용한 자성체의 전류센서 경우 주파수대역 기준에서 이력 손실이 작고 포화 자속밀도가 큰 것이 특징이다. 첫번째로, 자성체의 공극간격에 따른 출력 특성을 살펴보기 위해 4 mm와 2 mm공극의 실리콘 스틸의 출력 전압을 측정하였다. 이는 Table 1,2 와 Fig. 1과 같이 공극간격에 따른 출력 특성에 대해 선형성에선 거의 유사한 경향을 보였으며, 포화가 일어나기 전까지의 정격 2배에서는 1%안에 들어오는 값을 나타내었다. 정격 2배이상의 영역에서는 포화 되기 직전 전류 범위 영역의 차이만 보였다. 최대 포화 전압에서 4 mm 경우 900A, 공극 2 mm 경우 800 A에서 포화가 일어났고, 이는 2 mm 공극 실리콘 스틸의 자성체는 좀 더 낮은 전류값에서 포화를 보였다.

또한 자성체의 높이에 따른 출력 변화를 살펴 보기 위해 2 mm 공극의 실리콘 스틸 자성체의 5 mm, 6 mm, 10 mm 높이에 따

Table 1. Linearity and saturation of silicon steel of 4mm gap

Silicon steel with 4 mm gap			
Measured Range(A)	Output Voltage(V)	Calculation (V)	Linearity error(%)
0.00	0.000	0.000	
1.51	0.030	0.020	50.00
2.00	0.037	0.027	37.04
3.00	0.049	0.040	22.50
5.06	0.068	0.067	1.49
10.01	0.132	0.133	-0.75
15.05	0.199	0.201	-1.00
20.00	0.264	0.267	-1.12
30.02	0.397	0.400	-0.75
100	1.335	1.333	0.15
150	1.998	2.000	-0.10
200	2.672	2.667	0.19
300	4.000	4.000	0.00
400	5.344	5.333	0.21
500	6.689	6.667	0.33
600	8.003	8.000	0.04
700	9.345	9.333	0.13
800	10.643	10.667	-0.22
900.00	11.56	12.00	-3.67

Table 2. Linearity and saturation of silicon steel of 2 mm gap

Silicon steel with 2 mm gap			
Measured Range(A)	Output Voltage(V)	Calculation (V)	Linearity error(%)
0.000	0.003	0.000	
1.510	0.012	0.020	-55.000
2.000	0.019	0.027	-40.741
3.000	0.031	0.040	-30.000
5.060	0.067	0.067	-4.478
10.01	0.131	0.133	-3.759
15.05	0.196	0.201	-3.980
20.00	0.262	0.267	-2.996
30.02	0.394	0.400	-2.250
100	1.327	1.333	-0.675
150	1.992	2.000	-0.550
200	2.665	2.667	-0.187
300	4.005	4.000	0.050
400	5.363	5.333	0.506
500	6.701	6.667	0.465
600	8.060	8.000	0.713
700	9.360	9.333	0.257
800	10.360	10.667	-2.906
900.000	10.830	12.000	-9.775

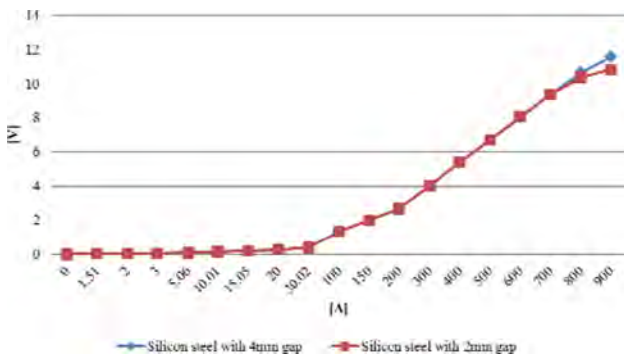


Fig. 2. Linearity and saturation characteristics of silicon steel of 2 mm gap with different heights.

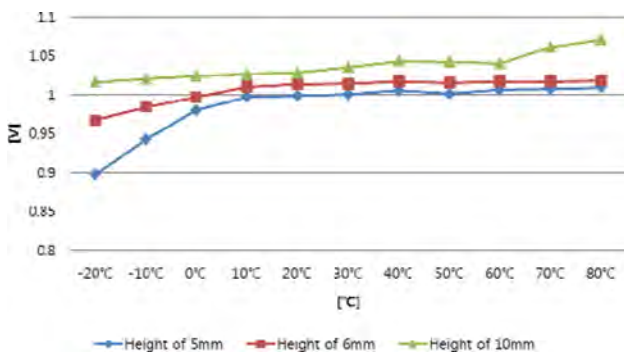


Fig. 3. Temperature characteristics with height of silicon steel.

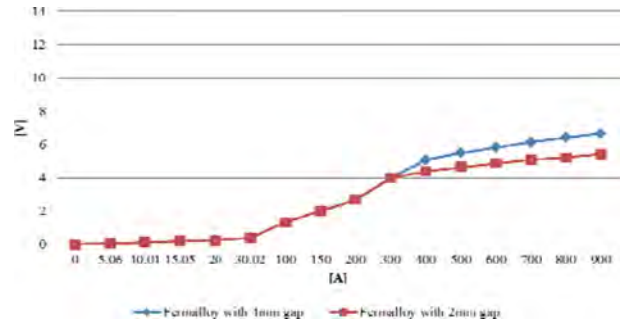


Fig. 4. Linearity and saturation characteristics with 4 mm and 2 mm gap of permalloy

른 자성체의 선형성과 최대 포화 전압을 측정하였다. 그림 2와 같이 실리콘 스틸의 높이 변화에 따른 직선성의 차이는 정격값 기준으로 차이가 없었지만 포화가 일어나기전의 값과 포화가 일어나는 시점에서 나오는 출력값의 변화율은 많은 차이를 나타내었다. 정격의 2배 전류값을 기준으로 두께 5 mm 경우 500A 포화가 일어났으며 직선성은 8%를 나타내었고, 두께 6 mm의 경우 포화는 500 A 일어났지만, 직선성 오차율은 4%를 나타내었다. 10 mm 높이는 정격값의 2배이상의 전류가 흘러도 포화가 일어나지 않았고 직선성도 1%안에 들어오는 좋은 값을 나타내었다.

실리콘 스틸 자성체의 구조에 따른 온도 특성을 비교하기 위해 온도에 따른 이득(gain)값을 비교하였다. 측정 온도 범위는 -20~80°C까지 10 간격으로 각 10분 동안 측정을 실시하였다. 전류센서의 입력 전원은 ±15 V DC이고, 실리콘 스틸의 높이를 5, 6, 10 mm에 대한 온도 특성은 Fig. 3과 같이 나타났고, 실리콘 스틸의 높이에 따라 5, 6 mm의 높이의 경우 저온에서 이득값의 변화가 크게 나타났고, 10 mm 높이의 경우 고온에서 이득값의 변화가 나타났다.

2.2 퍼멀로이 자성체의 전류센서 특성

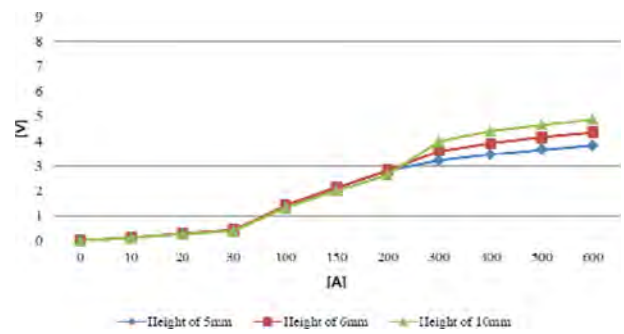
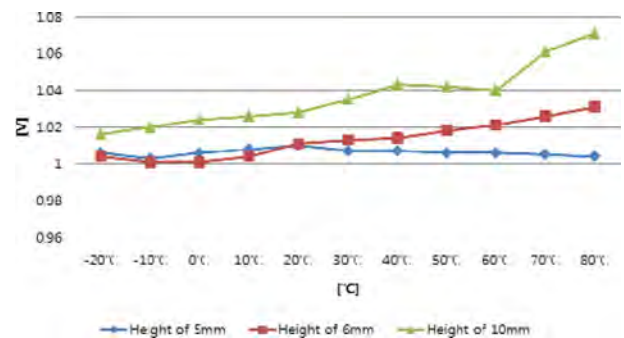
퍼멀로이를 사용한 자성체의 전류센서의 특성을 분석하기 위해 자성체의 공극 간격을 4 mm와 2 mm에서의 출력 전압을 비교 해보았다. Table 3,4와 Fig. 4와 같이 공극 2 mm, 4 mm의 퍼멀로이 자성체의 경우 2 mm 경우 300A에서 포화가 일어났고, 공극 4 mm 경우 400A로 나왔지만 큰 차이는 보이지 않았다. 선형성에 대해서 포화가 일어나기 전까지의 정격에서는 1%안에 들어오는 값을 나타내었다. 정격 2배이상의 영역에서는 공극 2 mm 에서는 37%이고 4 mm 에서는 27%의 직선성을 나타내었다. 퍼멀로이의 경우 정격을 벗어나는 시점에서 선형성의 값은 활용할 수 없는 값이다. 또한, 자성체의 높이에 따른 출력 변화를 살펴 보기 위해 2 mm 공극의 퍼멀로이 자성체의 5, 6, 10 mm 높이에 따른 자성체의 선형성과 최대 포화 전압을 측정, 비교하였다.

Table 3. Linearity and saturation of fermalloy of 4 mm gap

Fermalloy of 4 mm gap			
Measured Range(A)	Output voltage(V)	Estimated voltage(V)	Linearity error(%)
0.00	0.000	0.000	
1.51	0.021	0.020	5.00
2.00	0.028	0.027	3.70
3.00	0.041	0.040	2.50
5.06	0.067	0.067	0.00
10.01	0.133	0.133	0.00
15.05	0.200	0.201	-0.50
20.00	0.266	0.267	-0.37
30.02	0.399	0.400	-0.25
100	1.332	1.333	-0.08
150	1.998	2.000	-0.10
200	2.657	2.667	-0.37
300	4.000	4.000	0.00
400	5.073	5.333	-4.88
500	5.483	6.667	-17.76
600	5.846	8.000	-26.93
700	6.119	9.333	-34.44
800	6.304	10.667	-40.90
900	6.503	12.000	-45.81

Table 4. Linearity and saturation of fermalloy of 2 mm gap

Fermalloy of 2 mm gap			
Measured Range(A)	Output voltage(V)	Estimated voltage(V)	Linearity error(%)
0.00	0.000	0.000	
1.51	0.020	0.020	0.00
2.00	0.027	0.027	0.00
3.00	0.040	0.040	0.00
5.06	0.067	0.067	0.00
10.01	0.134	0.133	0.75
15.05	0.201	0.201	0.00
20.00	0.268	0.267	0.37
30.02	0.402	0.400	0.50
100	1.344	1.333	0.83
150	2.020	2.000	1.00
200	2.687	2.667	0.75
300	3.891	4.000	-2.73
400	4.599	5.333	-13.76
500	4.896	6.667	-26.56
600	5.082	8.000	-36.48
700	5.286	9.333	-43.36
800	5.445	10.667	-48.95
900	5.604	12.000	-53.30

**Fig. 5.** Linearity and saturation characteristics of fermalloy of 2mm gap with different heights.**Fig. 6.** Temperature characteristics with height of fermalloy.

이는 Fig. 5와 같이 나타났고, 퍼멀로이의 높이 변화에 따른 선형성의 차이는 정격값 기준으로 차이가 없었지만 포화가 일어나기전의 값과 포화가 일어나는 시점에서 나오는 출력값은 ± 1 V 정도의 변화율을 보였다. 정격의 2배 전류값을 기준으로 두께 5 mm 경우 200 A 포화가 일어났으며 직선성은 1.4%를 나타내었고, 두께 6 mm의 경우 포화는 300 A 일어났지만, 선형성 오차율은 16%를 나타내었다. 10 mm 높이는 400 A때 포화가 일어났으며, 직선성은 18%를 나타내었다. 온도특성에 대해 퍼멀로이의 5, 6, 10 mm 높이에 대해 -20C~80C 까지 측정을 실시하였다. 이는 Fig. 6 에서와 같이 평균 변화율 값은 5 mm에서 0.02%, 6 mm에서 0.26%, 10 mm에서 0.52%의 온도변화율의 차이가 났다.

3. 제안하는 전류센서 자성체의 구조

2절에와 같이 실리콘 스틸을 사용한 자성체의 전류센서 경우 주파수대역 기준에서 이력 손실이 작고 포화 자속밀도가 큰 특성을 가지고 있다. 이에 반해, 퍼멀로이를 사용한 자성체 전류센서의 경우 실리콘스틸과는 반대로 저전류대의 감도는 좋아지나, 낮은 포화도로 인해 측정 범위의 영역이 낮은 단점을 가지고 있다. 이에 대해 본 논문에서는 전류센서 자성체의 저전류대 선형성과 측정하고자 하는 영역의 포화점을 가지는 자성체를 구성하기 위해 실리콘 스틸과 퍼멀로이 두 가지 소

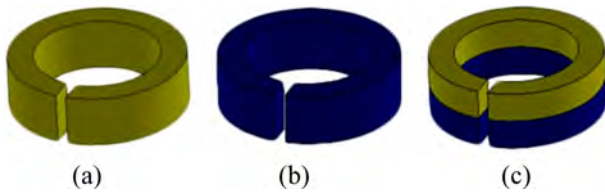


Fig. 7. The proposed laminated magnetic substance structures; (a) silicon steel, (b) fermalloy, and (c) the proposed laminated structure of silicon steel and fermalloy.

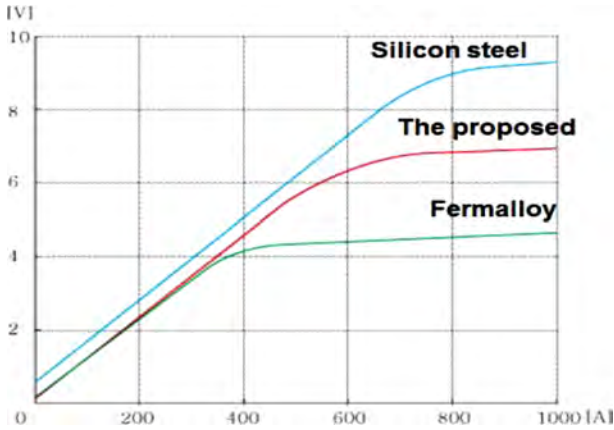


Fig. 8. Saturation and linearity characteristic curves of silicon steel, fermalloy, and the proposed laminated magnetic substance.

재를 Fig. 7과 같이 5 mm:5 mm로 적층시킨 구조의 자성체를 제안한다.

3.1 제안하는 적층 구조 자성체의 전류센서

기존 전류 센서의 자성체 코어 배열은 그 분야에 적합한 형태에 맞추어 한 소재로만 되어 있는 형태의 코어를 제작하여 사용하였다. 일반적인 전류센서의 소재인 실리콘 스틸, 퍼멀로이의 선형성과 포화도 특성은 Fig. 8과 같이, 퍼멀로이를 사용하는 영역에서 감도는 그대로 유지하면서 측정 하고자 하는 영역을 늘리고자 할 경우 선형성과 포화도의 두 가지의 보장이 어렵다. 이러한 특성으로 인해 선형성과 포화도 측정에 있어 두 개의 서로 다른 자성체 코어로 이루어진 전류센서를 사용하여 측정하는 영역을 나누어 사용하는 문제점이 있다.

이에 따라, 기존의 회로 보완이나 소자 부품을 바꾸어 설정하는 것이 아니라 자성체 부품의 물리적인 성질은 그대로 유지하고 전류센서 코어의 소재 비율을 달리하여 최적의 자성체 형태의 특성을 가지는 것이 필요하다. 따라서, 전류 센서 코어 소재에 있어 실리콘 스틸과 퍼멀로이 두 가지 소재를 적층함으로써 퍼멀로이 소재의 낮은 포화도와 실리콘 스틸의 저전류대의 비선형성을 보완한 전류센서의 자성체를 구성하였다.

최적의 자성체의 구조를 설정하기 위해 자성체의 공극간격, 높이 그리고 적층 구조에 대해 전류센서 성능을 비교 하였다.

Table 5. Linearity and saturation of laminated silicon steel (UP) and fermalloy (DOWN) of 2 mm gap

Silicon steel(UP) and Fermalloy(DOWN)			
Measured Range(A)	Output Voltage(V)	Estimatiad Voltage(V)	Linearity error(%)
0.00	0.014	0.000	
1.51	0.034	0.020	0.00
2.00	0.043	0.027	7.41
3.00	0.054	0.040	0.00
5.06	0.081	0.067	0.00
10.01	0.146	0.133	-0.75
15.05	0.212	0.201	-1.49
20.00	0.278	0.267	-1.12
30.02	0.41	0.400	-1.00
100	1.336	1.333	-0.83
150	2.004	2.000	-0.50
200	2.672	2.667	-0.34
300	4.006	4.000	-0.20
400	5.342	5.333	-0.09
500	6.667	6.667	-0.21
600	7.703	8.000	-3.89
700	8.225	9.333	-12.02
800	8.621	10.667	-19.31
900	8.959	12.000	-25.46

Table 6. Linearity and saturation of laminated silicon steel (DOWN) and fermalloy (UP) of 2mm gap

Silicon steel(DOWN) and Fermalloy(UP)			
Measured Range(A)	Output Voltage(V)	Estimatiad Voltage(V)	Linearity error(%)
0.00	0.008	0.000	
1.51	0.028	0.020	0.00
2.00	0.033	0.027	-7.41
3.00	0.048	0.040	0.00
5.06	0.076	0.067	1.49
10.01	0.143	0.133	1.50
15.05	0.213	0.201	1.99
20.00	0.278	0.267	1.12
30.02	0.413	0.400	1.25
100	1.353	1.333	0.90
150	2.022	2.000	0.70
200	2.691	2.667	0.60
300	4.003	4.000	-0.12
400	5.269	5.333	-1.35
500	6.421	6.667	-3.81
600	6.972	8.000	-12.95
700	7.286	9.333	-22.02
800	7.538	10.667	-29.41
900	7.742	12.000	-35.55

Table 7. Linearity and saturation with various current sensor

Silicon steel current sensor with 2mm gap			Fermalloy current sensor with 2mm gap			Proposed current sensor			
Measured Range(A)	Output Voltage(V)	Calculation(V)	Linearity error(%)	Output voltage(V)	Estimated voltage(V)	Linearity error(%)	Output voltage(V)	Estimated voltage(V)	Linearity error(%)
0.00	0.003	0.000		0.000	0.000	∞	0.014	0.000	
1.51	0.012	0.020	-55.00	0.020	0.020	0.00	0.034	0.020	0.00
2.00	0.019	0.027	-40.74	0.027	0.027	0.00	0.043	0.027	7.41
3.00	0.031	0.040	-30.00	0.040	0.040	0.00	0.054	0.040	0.00
5.06	0.067	0.067	-4.48	0.067	0.067	0.00	0.081	0.067	0.00
10.01	0.131	0.133	-3.76	0.134	0.133	0.75	0.146	0.133	-0.75
15.05	0.196	0.201	-3.98	0.201	0.201	0.00	0.212	0.201	-1.49
20.00	0.262	0.267	-3.00	0.268	0.267	0.37	0.278	0.267	-1.12
30.02	0.394	0.400	-2.25	0.402	0.400	0.50	0.41	0.400	-1.00
100	1.327	1.333	-0.68	1.344	1.333	0.83	1.336	1.333	-0.83
150	1.992	2.000	-0.55	2.020	2.000	1.00	2.004	2.000	-0.50
200	2.665	2.667	-0.19	2.687	2.667	0.75	2.672	2.667	-0.34
300	4.005	4.000	0.05	4.000	4.000	0.00	4.006	4.000	-0.20
400	5.363	5.333	0.51	4.599	5.333	-13.76	5.342	5.333	-0.09
500	6.701	6.667	0.46	4.896	6.667	-26.56	6.667	6.667	-0.21
600	8.06	8.000	0.71	5.082	8.000	-36.48	7.703	8.000	-3.89
700	9.36	9.333	0.26	5.286	9.333	-43.36	8.225	9.333	-12.02
800	10.36	10.667	-2.91	5.445	10.667	-48.95	8.621	10.667	-19.31
900	10.83	12.000	-9.78	5.604	12.000	-53.30	8.959	12.000	-25.46

우선 앞선 2절의 실험에서 자성체의 공극간격에 따른 감도 비교에서 실리콘 스틸의 높은 포화점과 퍼멀로이의 선형성이 우수하게 유지되는 2 mm의 공극간격으로 설정하였다. 또한 두께에 따른 포화도와 선형성의 차이에서 퍼멀로이는 두께에 따른 포화도와 감도의 차이가 거의 나지 않았으며, 실리콘 스틸은 두께에 따른 감도는 거의 없었지만 두께가 두꺼워 질수록 높은 출력 전압에서 포화되었다. 이에 감도는 유지하면서 제안된 두께 내에서 최대한의 포화도를 가지는 두 소재의 두께를 결정하였다. 제안하는 자성체 소재의 두께로서는 일반적으로 사용하고 있는 코어 소재 두께 10 mm로 설정하였다.

4. 실험 및 결론

제안한 자성체의 성능 평가를 위해 각 자성체별 온도 특성, 자성체의 자속밀도를 비교하였다.

전류센서의 구조에 따른 특성 실험에 있어 정격 전류값은 300 A 일때 출력값이 4 V 비율로 나오는 제품을 선택하였으며 출력값은 보정(calibration) 하지 않은 밀티미터 측정값이다. 홀 원리(Hall effect)를 이용하여 만들어진 시제품은 정전류 구동 방식회로를 활용하고, 연산증폭기(op-amp)를 통해 증폭 되어진 전압을 가변저항으로 정격값에 비례한 비례전압

값을 출력한다. 실험에 있어, 코어 소재는 규소강(silicon steel)과 니켈과 철의 합금인 퍼멀로이(fermalloy)를 사용하였으며, 규소강(Silico steel)코어의 경우 와인딩(winding)방법으로 작업 되어져 있으며, 퍼멀로이는 실리콘 스틸과 동일한 높이를 유지했다.

4.1 제안하는 적층 구조 자성체의 직선성 및 포화도 평가

제안하는 적층 구조의 자성체의 직선성과 포화도를 평가하기 위해 저전류대에서는 0~30 A까지는 측정하는 전류값의 단위를 변화를 주면서 출력값을 확인하고 100 A에서 200 A까지는 50 A의 차이를 두었으며, 200 A부터는 100A씩 전류값의 변화를 주어 2 mm의 공극간격을 가지는 자성체의 구조에 따른 직선성과 포화도를 실험하였다. 자성체의 적층구조에 따른 특성 실험을 하기 위해 실리콘 스틸과 퍼멀로이의 적층 상하 적층 구조를 변경시켜 두 가지 경우에 대해 실험을 실시하였다. 제안된 적층구조의 직선성과 포화도는 Table 7과 같이 나타났다. 실리콘 스틸과 퍼멀로이가 적층되어진 제안된 자성체 코어의 포화도 차이는 낮지만, 퍼멀로이 기준으로 본다면 300 A 일 때 직선성 1%안에 들어오는 선형적인 값을 나타내었고, 제안된 자성체 코어의 경우 포화도는 퍼멀로이 기준으로 2배 정도 차이가 남을 보였다.

4.2 제안하는 적층 구조 자성체의 온도 특성 평가

온도 특성평가를 위해 -20°C ~ 80°C 까지 10 간격으로 온도 범위를 설정하였고, 각 10분 동안 측정을 실시하였다. 전류센서의 입력 전원은 $\pm 15\text{ V DC}$ 이고, 제품 샘플은 실리콘 스틸의 높이를 5, 6, 10 mm로 변화시킨 구조와 퍼멀로이 5, 6, 10 mm의 높이는 가지는 퍼멀로이, 상하 적층의 구조가 상이한 두개의 전류센서를 가지고 실험을 하였다.

각 소재별 온도 특성은 Fig. 9에서와 같이 나타났다. Fig. 9에서 나타나는 것과 같이 5, 6, 10 mm 높이의 실리콘 스틸 소재

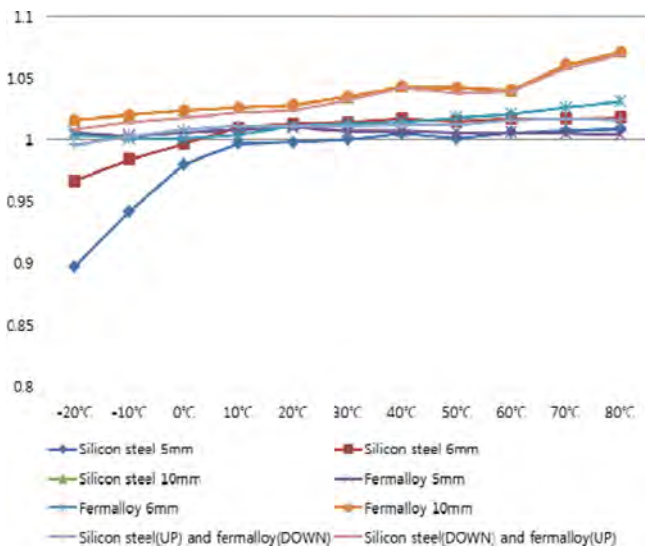


Fig. 9. Temperature characteristics of various samples.

에 대해 각 온도 별 일정하지 못한 경향을 보였다. 특히, 낮은 온도인 -20°C 에서 0°C 사이에 가장 큰 변화를 보였다. 또한 퍼멀로이의 온도 특성은 실리콘 스틸과 반대로 낮은 온도에서 일정한 전압을 유지하나 높은 온도의 환경인 60°C 에서 80°C 사이에서 일정 전압을 유지하지 못하고 증가함을 보였다. 또한, 적층 구조에 따른 온도 특성 결과에서 상단에 실리콘 스틸, 하단에 퍼멀로이를 적층한 구조와 반대로 상단에 퍼멀로이, 하단에 실리콘 스틸을 적층한 구조에 대해 앞서 한 개의 자성체만을 사용한 결과 보다 온도에 따른 출력전압의 변화가 거의 나타나지 않았으며, 제안하는 상단의 실리콘 스틸, 하단에 퍼멀로이를 적층한 구조의 자성체가 온도에 따른 전압의 변화없이 가장 우수한 결과를 보였다.

4.3 제안하는 적층 구조 자성체의 자장 해석

제안된 적층구조의 자성체의 자장 해석을 위해 자속밀도 (magnetic flux density), 자계강도가 고르게 흐르는 공극의 중심의 위치에서 자속 밀도를 산정하였다. 2 mm 공극 실리콘 스틸과 퍼멀로이와 제안한 실리콘 스틸과 퍼멀로이의 적층구조에 대해 공극의 위치에서 자속 밀도 측정 비교 해 보았다.

Fig. 10과 11의 2 mm 공극의 실리콘 스틸과 퍼멀로이의 경우에는 4 mm 공극의 경우와 거의 같은 자속 밀도를 보이며, 가장 낮은 전류 1.5 A를 흘렸을 시 4 mm 공극에서 보다 높은 자속 밀도를 보여 준다. 또한 2 mm 공극의 홀 소자의 최고점은 4 mm 공극에 비해 넓게 나타났다. 또한, 앞선 공극 위치 선정에 대해서 4 mm 공극의 자성체보다 자속 밀도의 차이가 낮게 나타났

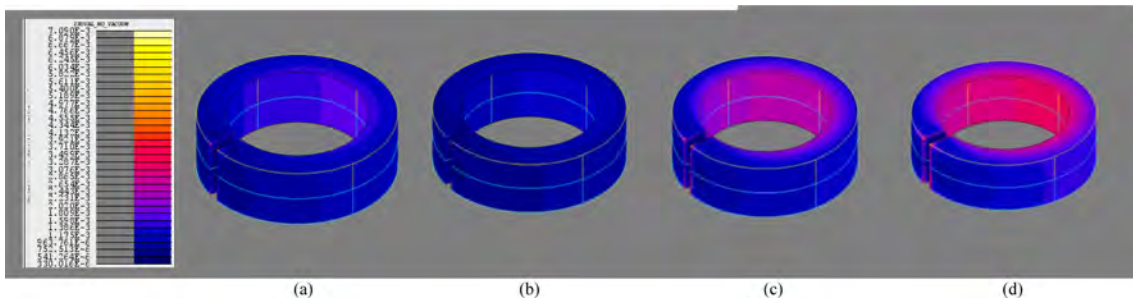


Fig. 10. Magnetic flux density of silicon steel of 2 mm air gap with various input current; (a) 1.51A, (b) 100A, (c) 500A and (d) 900A.

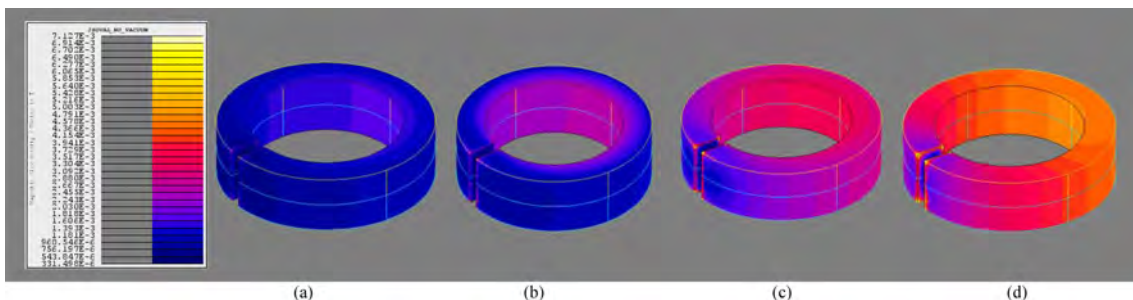


Fig. 11. Magnetic flux density of fermalloy of 2 mm air gap with various input current; (a) 1.51A, (b) 100A, (c) 500A and (d) 900A.

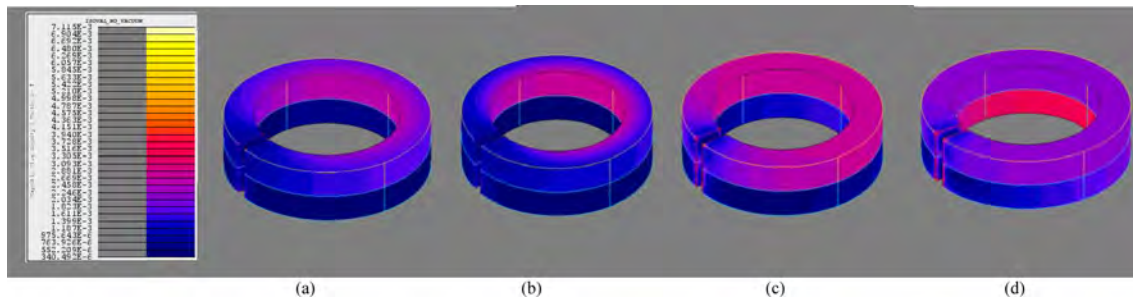


Fig. 12. Magnetic flux density of silicon steel of 2 mm air gap with various input current; (a) 1.51A, (b) 100A, (c) 500A and (d) 900A.

고, 감도 또한 높게 나타났다. 2 mm 공극의 실리콘 스틸과 퍼멀로이를 비교했을 경우, 저전류대 범위인 100 A에서의 자속밀도는 퍼멀로이가 우수한 성능을 보였다.

이에 제안한 방법인 Fig. 12의 경우는 앞선 실험의 결과를 기준으로 동일한 2 mm 공극으로 모델링한 코어 형상으로 자성체의 상단은 퍼멀로이, 하단은 실리콘 스틸로 코어 형상을 제작하여 자기장해석과 자장의 분포도와 세기에 대해 나타내었다. 각 입력 전류에 따라 실리콘 스틸의 높은 포화도를 유지하면서 퍼멀로이의 저전류대의 높은 감도를 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 소재의 특성으로 저전류 영역에서의 자속밀도가 높고 실리콘 스틸의 높은 포화 영역을 모두 만족하는 또 다른 영역의 신호를 감지하는 전류센서의 특성을 보이고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 저전류대의 선형성과 측정하고자 하는 영역의 포화점을 가지는 자성체를 구성하기 위해 실리콘 스틸과 퍼멀로이 두 가지 소재를 적층시킨 구조의 자성체를 제안하였다. 선형성과 측정하고자 하는 영역의 포화점을 가지는 최적의 적층 비율을 구하기 위해 실리콘 스틸과 퍼멀로이 소재의 비율 5 mm:5 mm으로 자성체를 구성하였고, 구성된 자성체의 구조에 대해 전류센서 출력값의 변화율에 대한 실험을 수행한 결과, 기존의 실리콘 스틸과 퍼멀로이와의 밀도, 선형성 및 포화도의 비교에서 우수한 성능을 보였다. 또한, Flux3D를 통해 자장의 분포도와 세기를 비교하여 제안된 자성체의 구조가 우수함을 확인 하였다.

REFERENCES

- [1] 이상범, 신찬훈, “전자부품산업 경쟁력 강화 방안 모색”, 과학기술정책, 155호, 2005.
- [2] 이희성 “A study on the magnetic filed analysis and core optimal design of automobile DC current using hall effect”, 공주대학교 대학원기계공학과, 2009.
- [3] 김석근, 양승호, 이영섭, 최용성, “차세대 전자식 전력량계 부가서비스 기술개발 추세 및 국내 적용 전망”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 7호, 2009.
- [4] 야노경제연구소, “전류센서 시장의 최신 동향과 장래 전망”, 일본 시장 조사보고서, 5호, 2012.
- [5] 김정민, 정형식, “Zr-Fe-Cu 신합금의 제조 공정에 따른 부식 및 기계적 특성에 관한 연구”, 대한금속재료학회, Vol. 37, No. 9, pp. 411-412, 2006
- [6] 김근우, “전류와 전류센서”, 계장기술, 9호, 2001.
- [7] 임현찬, 이해경, 조명현, 황의천, 이상돈, 김영채, “전기자기학”, 2007.
- [8] 김보연, “Let’s Apply the sensor”, pp. 411-412, 2006.
- [9] 한국산업기술센터, “자기 센서의 회로 설계”, 계장기술, 4호, 2004.
- [10] 박중호, “Open Loop 방식의 홀 효과를 이용한 차량용 전류센서에 관한 연구”, 인천대학교 정보기술대학원, 2013.
- [11] 김장수, “3 Core- 4 Winding 방식의 Closed loop 전류센서에 관한 연구”, 금오공과대학교 산업대학원, 2008.
- [12] 장희중, “Hall - IC를 이용한 전류 측정 장치”, 한양대학교 공학대학원, 2009.