

유한요소법을 이용한 자기센서용 자속집속기의 해석

신광호*

경성대학교 정보통신공학과, 부산시 남구 대연동 110-1, 608-736

(2013년 3월 25일 받음, 2013년 4월 22일 최종수정본 받음, 2013년 4월 23일 게재확정)

본 연구에서는 홀센서의 감도를 높이기 위해 사용되는 자속집속기의 두께, 홀소자와의 상대적 위치, 모서리 형상에 따르는 발생 자계를 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 자속집속기의 두께가 얇을수록 발생 자계가 커지는 것을 알 수 있었고, 이 경향은 반자계를 고려한 길보기 상대투자율의 두께 의존성과 유사하다는 것을 알 수 있었다. 홀소자와의 상대적 위치에 따라 최대의 자계를 발생시키는 자속집속기의 최적의 두께가 변화하는 것을 알 수 있었다. 자속집속기와 홀소자의 간격이 가까울 경우, 자속집속기의 모서리 형상에 경사가 없는 것이 유리하지만, 자속집속기와 홀소자의 간격이 멀어질수록 자속집속기의 모서리를 경사지게 하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있었다.

주제어 : 자속집속기, 홀센서, 유한요소법

I. 서 론

최근 보급이 폭발적으로 증가하고 있는 스마트폰에는 동작을 인식하기 위한 가속도센서 및 자이로센서 등의 관성센서와 함께 방향을 검출하기 위한 전자나침반이 기본적으로 채용되고 있다. 스마트폰에 채용되는 전자나침반 시장은 2008년 8천7백만개 정도였으나 2013년에는 5억4천만개 정도로 예측되고 있다[1]. 스마트폰용 전자나침반은 현재 홀효과를 이용한 자기센서(이하 홀센서), 자기저항센서, 거대자기저항센서, 자기임피던스센서 등이 사용되고 있으나, 이 중에서 홀센서가 가장 큰 시장 점유율을 나타내고 있다[2].

스마트폰용 전자나침반을 구성하기 위해서 지자기(earth's magnetic field)에 대하여 10비트 정도의 분해능을 가지는 자기센서가 현재 채용되고 있으며[3], 스마트폰에서 증강현실[4-6]과 관련한 서비스가 다양하게 이루어지기 시작함에 따라, 앞으로 자계 분해능 향상에 대한 요구는 계속해서 높아질 것으로 예상된다.

일반적으로 홀센서는 반도체의 전자나 정공의 움직임에 미치는 자속의 영향, 즉 로렌츠력(Lorentz force)를 이용하여 외부의 자속밀도(자계)를 측정하는 것이므로, 자계를 측정하기 위한 감도는 전자이동도(electron mobility)나 정공이동도(hole mobility)에 직접 비례한다. 다양한 종류의 반도체 중에서 실리콘의 경우, InSb나 InAs 등과 같은 화합물반도체에

비해서 전자이동도가 낮은 편($\approx 1,450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)이지만, 센서소자를 센서신호처리회로를 동일한 기판에 일체화시키기에 용이하기 때문에 소형화, 제작공정, 가격 등의 면에서 매력적인 장점이 있다. 그러나, 실리콘을 주재료로 한 홀센서를 이용하여 지자기센서를 구성하고자 할 때에는 낮은 감도가 문제가 되어 왔다.

실리콘을 이용한 홀센서를 스마트폰에 사용할 때 발생하는 상대적으로 낮은 감도의 문제는 자속집속기(magnetic concentrator)를 함께 설치함으로써 외부자계가 집중된 자속을 센서표면에 인가할 수 있게 되면서 해결되었다[7-11]. 또한 자기센서를 스마트폰에 사용하기 위해서는 3축의 공간자계를 측정할 수 있도록 하기 위해서 3축의 자기센서를 구성할 필요가 있다. 또한, 일반적인 경우, 반도체공정을 이용하여 제작한 홀센서는 면방향의 자계에 대해서 출력을 발생시키기 때문에 면과 평행한 방향의 자계를 측정하기가 용이하지 않다는 단점이 있다. 그러나, 자속집속기의 이용하면 면과 평행한 방향의 자속의 일부가 자속집속기에 의해서 면방향으로 발생하게 되므로, 평면으로 구성된 홀센서를 이용하여서 면방향과 면에 대해서 평행한 방향을 동시에 측정할 수 있게 된다[9].

자속집속기의 역할은 연자성체를 이용하여서 외부자속을 집중하는 것이기 때문에 연자성체의 특성과 형상 및 크기, 홀센서와의 상대적 위치가 성능을 결정하는 중요한 변수가 된다[8, 9]. 본 연구에서는 현재 스마트폰에 채용되고 있는 홀센서의 자속집속기의 평면형상(원형)을 유지하여 두께 및 모서리 형상(edge shape)이 홀센서에 인가되는 자속의 크기에 미치는 영향에 대해서 조사하였다.

II. 해석방법

본 연구에서는 자속집속기를 설치함으로써 면과 평행한 방향(x방향)으로 인가된 자계가 자속집속기에서 집중되어서 홀센서의 면방향(수직방향, z방향)으로 발생하는 자속의 크기를 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 자속집속기의 형상은 원형으로 하였으며 직경 360 μm가 되도록 하였다. Fig. 1은 본 해석에 사용한 구조의 평면도(a)와 측면도(b)를 나타낸 것이다.

해석을 위해서, 자속집속기의 두께 t 는 1~100 μm의 범위에서 변화시켰고, 자속집속기와 홀소자와의 간격 d 는 1~20 μm의 범위에서 변화시켰다. 또한 자속집속기의 모서리형상변화에 따르는 효과를 조사하기 위해서 모서리의 각도 ϕ 는 -45~45°의 범위에서 변화시키면서 홀소자 면에 발생하는 자속을 측정하였다. 자속집속기의 3차원 형상의 변화에 따르는 자속의 변화를 해석하기 위해서, 본 연구에서는 상용 해석프로그램인 COMSOL[12]과 AC/DC모듈을 사용하였다.

Fig. 2는 해석을 위해서 제작한 기하학적 모델을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 나타낸 구조는 3면이 각각 1 mm인 정육면체 내에 위치하고 있다. 해석을 위해서, 1 Oe(≈ 79.58 A/m)의 균일한 외부 자계가 x방향으로 인가되는 것으로 설정하였다. Fig. 2에서 정육면체의 A면에 스칼라 자위(scalar magnetic potential) V_m 이 인가되도록 하고 B면은 영자위(zero magnetic potential)로 설정하여서, 자속집속기 전체에 균일한 자계가 인가될 수 있도록 설정하였다. 해석하고자 하는 공간 내에 전

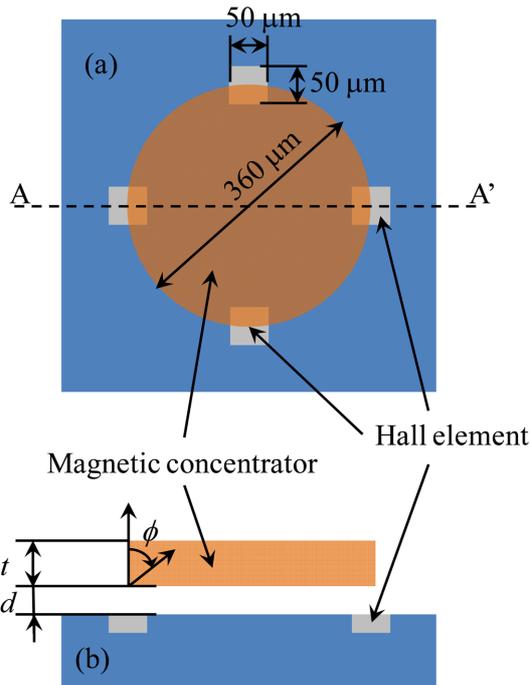


Fig. 1. (Color online) Plan view(a) and side view(b) of magnetic concentrator with Hall elements on silicon substrate.

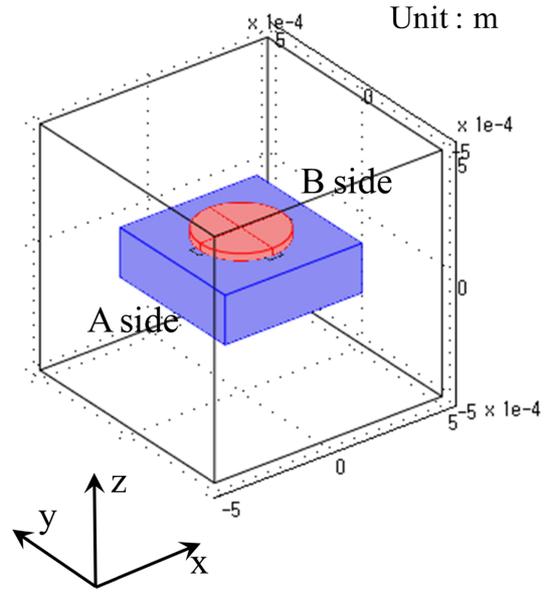


Fig. 2. (Color online) Geometrical model for FEM analysis.

류가 존재하지 않는다고 가정할 때, 즉 $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0$ 이라고 한다면, 스칼라 자위를 V_m 을 정의할 수 있다. 이 때, 벡터자계 \vec{H} 와 V_m 은 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$\vec{H} = \nabla V_m \quad (1)$$

자속 밀도와 자계와의 관계와 자속밀도의 발산을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

위의 식(1)을 (2)에 대입하고, 또 식(2)를 식 (3)에 대입하면 다음과 같이 스칼라 자위에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$-\nabla \cdot \mu_0 \mu_r \nabla V_m = 0 \quad (4)$$

또한, 자속집속기의 외부 경계에서 자속은 법선방향으로 연속이기 때문에 다음과 같은 경계 조건을 얻을 수 있다.

$$\hat{n} \cdot \vec{B} = \hat{n} \cdot \mu_0 \mu_r \nabla V_m = 0 \quad (5)$$

강자성체로 구성되는 자속집속기에 외부자계가 인가될 때, 자계와 자속의 관계는 당연히 비선형적이다. 본 연구에서는 사용되는 자속집속기의 재료가 연자성이 매우 우수할 것으로 가정하여 자성체의 히스테리시스는 무시하고 계산을 수행하였다. 실제로 자속집속기가 동작할 때 자성체의 히스테리시스에 의한 잔류자화(잔류자속)이 문제가 될 수 있으나, 본 논문에서는 자속집속기의 형상에 따르는 자속의 변화를 조사하는 것이 목적이기 때문에, 잔류자화에 의한 영향은 향후 연구로 설

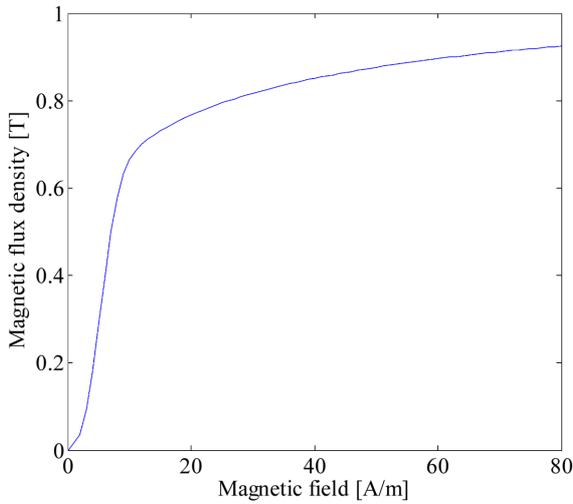


Fig. 3. (Color online) BH curve of magnetic material used for FEM analysis.

정하였다. 자성체의 비선형특성을 나타내기 위해서, 참고문헌 [13]에서 제시하고 있는 퍼말로이의 자기적 특성을 이용하기로 하였다. 자속집속기의 자기적 특성을 본 연구에서 사용한 유한 요소틀에 적용하기 위해서, 참고문헌[14, 15]에서 제시하고 있는 자기적 특성을 묘사하는 함수를 다음과 같이 만들었다. 자성체의 자화는 외부 자계에 대해서 가역적 성분과 비가역적 성분으로 분리 할 수 있고, 본 연구에서와 같이 히스테리시스를 무시한다면 가역적인 성분(anhyseretic magnetization; M_{an})을 다음과 같이 Langevin함수를 이용하여서 나타낼 수 있다[14, 15].

$$M_{an} = M_s \left(\coth \frac{H + \alpha M_{an}}{A} - \frac{A}{H + \alpha M_{an}} \right) \quad (6)$$

여기서, M_s , α , A 는 각각 포화자화, 자계변수(field parameter), 형상변수(shape parameter)를 나타내고 있으며, 각각 8.6×10^5 , 20, 8×10^{-5} 의 값을 이용하여서 계산하였다. Fig. 3은 상기 파라미터들과 식(6)을 이용하여서 계산된 BH곡선을 나타내고 있다. 참고문헌 [13]에서 측정된 BH곡선과 거의 동일하도록 변수들(M_s , α , A)을 결정하여 계산하였다.

Fig. 3에서 나타낸 BH곡선은 해석틀(COMSOL)에서 외부 자계에 대한 자속밀도를, 즉 $\vec{B} = f(\vec{H})$ 를 계산하기 위해서 사용되었다.

III. 해석결과

Fig. 4는 자속집속기의 두께의 변화에 따르는 z방향의 발생 자계와 겉보기상대투자율(apparent relative permeability)를 함께 도시한 것이다. 자계는 자속집속기의 끝부분(홀소자의 평

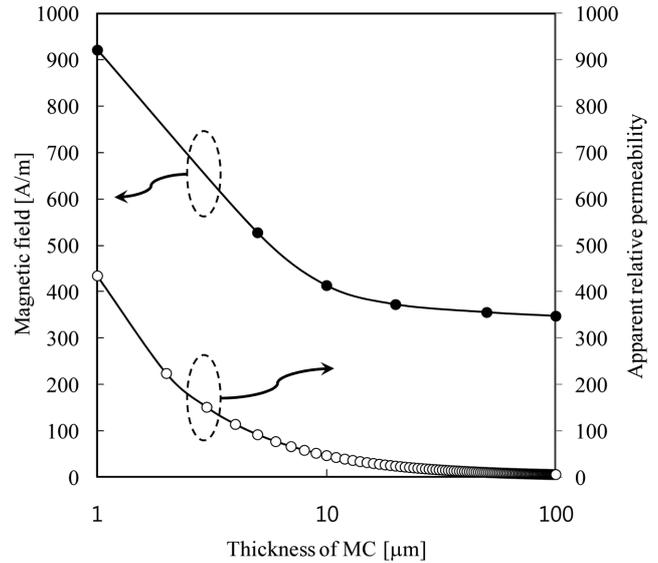


Fig. 4. Thickness dependence of magnetic field in z direction measured at 0.1 μm under magnetic concentrator and apparent relative permeability calculated with equation 7 and 8.

면도상 중앙)에서 z방향으로 0.1 μm 아래에서 측정된 것이다. Fig. 4에서 자속집속기의 두께가 두꺼워질수록 발생하는 자계(z방향)은 작아지는 것을 알 수 있고, 이 경향은 겉보기상대투자율(apparent relative permeability) μ_r 와 유사하다는 것을 알 수 있다.

겉보기상대투자율은 참고문헌[15]에서 발췌한 반자계계수 N 를 고려하여 계산한 것이다.

$$N = \frac{1}{m^2 - 1} \left[\frac{m}{\sqrt{m^2 - 1}} \log \left(m + \sqrt{m^2 - 1} \right) - 1 \right] \quad (7)$$

여기서, $m = \text{thickness/diameter}$ 를 나타낸다. 겉보기상대투자율 μ_r 은 아래의 식을 이용하여서 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\mu_r'} = \frac{1}{\mu_r} + N \quad (8)$$

식(7)에서 나타낸 반자계계수는 타원체(ellipsoid)에 대한 것이므로, 엄밀히 말하면 본 연구에서 해석한 자속집속기의 형상과는 차이가 있다. 하지만, 타원체가 매우 얇아지는 경우에는 본 연구에서의 자속집속기의 형태(원판)와 유사할 것으로 가정하였다.

Fig. 5는 자속집속기의 끝부분(홀소자의 평면도상 중앙)에서 측정된 z방향 자계의 자속집속기 두께에 따르는 변화를 나타낸 것으로, 자계는 자속집속기의 1~20 μm 아래에서 측정되었다.

자속집속기의 1 μm 아래에서 측정된 경우, 자속집속기의 두께가 얇을수록 높은 자계가 발생한다는 것을 알 수 있다. 그러나, 자속집속기로부터 멀어질수록 발생 자계의 크기는 자속

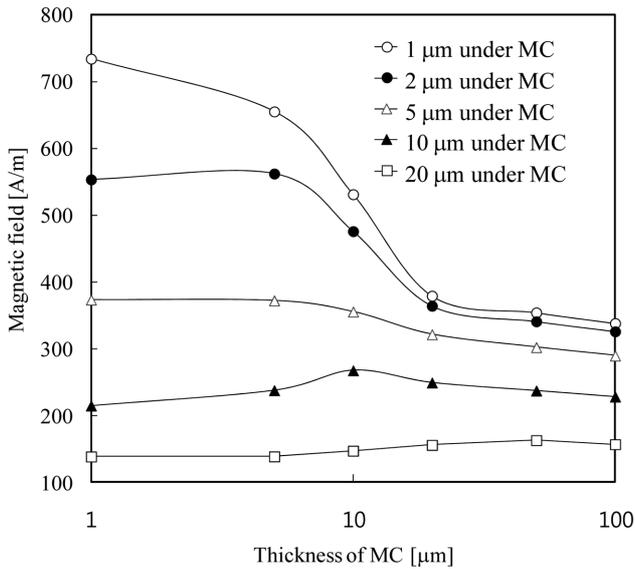


Fig. 5. Thickness dependence of magnetic field in z direction measured at 1~20 μm under magnetic concentrator.

집속기의 두께에 변화에 따라 변화하는 폭이 작아지며, 자속 집속기로부터 10 μm 아래에서 자계를 측정하는 경우에는 자속 집속기의 두께가 10 μm 일 때 가장 큰 자계가 발생하는 것을 알 수 있다. 실제로 도전성을 가지는 자속 집속기를 장착한 홀센서를 제작하는 경우를 가정하여 보면 자속 집속기와 홀소자의 사이에 절연체를 설치하는 것이 반드시 필요하다. 또한 반도체공정을 이용하여 홀소자를 제작하는 경우, 일반적으로 홀소자의 전극을 평면으로 설치하게 되며, 홀소자의 표면이 아니라 임의의 깊이(z방향)까지 자속이 홀소자의 동작에 영향을 미치게 된다. 따라서, 실제로 자속 집속기를 설치한 홀

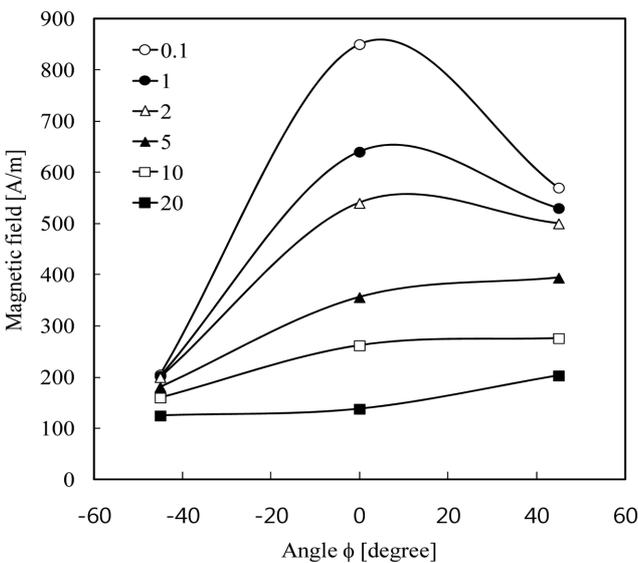


Fig. 6. Edge shape dependence of magnetic field in z direction measured at 1~20 μm under magnetic concentrator.

센서를 제작하는 경우에는 홀소자와 자속 집속기의 상대적 위치에 따라 자속 집속기의 두께를 최적화할 필요가 있다는 것을 Fig. 5의 결과로부터 알 수 있다.

Fig. 6은 자속 집속기의 모서리 형상(edge shape)에 따른 발생 자계를 도시한 것으로, 자계는 자속 집속기의 0.1~20 μm 아래에서 측정되었다. 자속 집속기의 두께는 10 μm 이고, 각도 ϕ 는 Fig. 1에서의 정의를 참조하라.

자속 집속기의 근처(0.1~2 μm 아래)에서 자계를 측정한 경우, ϕ 가 0일 때 가장 큰 자계가 발생한다. 그러나, 자속 집속기로부터 5 μm 에서 자계를 측정하는 경우에는 ϕ 가 45°일 때 가장 큰 자계가 발생한다. 이는 자속 집속기와 홀소자의 상대적인 위치에 따라서 자속 집속기의 모서리 형상을 최적화할 필요가 있다는 것을 의미한다. 일반적으로 Liftoff나 습식 에칭 등을 이용하면 금속성 막의 모서리 형상을 조정하는 것은 충분히 가능한 일이기 때문에 Fig. 6에서의 결과는 충분히 현실적으로 이용 가능하다고 말할 수 있다.

IV. 결 론

고감도 홀센서를 제작하기 위해서 사용되는 자속 집속기의 두께, 홀소자와의 상대적 위치, 모서리 형상에 따르는 발생 자계를 유한요소법을 이용하여서 계산하였다. 그 결과 자속 집속기의 두께가 얇아 질수록 발생 자계가 커지는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 자속 집속기의 두께가 증가함에 따라 반자계의 발생이 증가하기 때문인 것으로 파악되었으며, 이 경향은 반자계를 고려한 결보기 상대투자율의 두께 의존성과 유사하다는 것을 알 수 있었다. 자속 집속기의 두께에 따르는 면 방향 발생 자계를 분석한 결과, 홀소자와의 상대적 위치에 따라서 최대의 자계를 발생시키는 자속 집속기의 최적의 두께가 변화하는 것을 알 수 있었다. 자속 집속기의 모서리 형상에 따르는 발생 자계를 분석한 결과, 홀소자와의 간격이 가까울 경우, 자속 집속기의 모서리 형상에 경사가 없는 것이 유리하지만, 자속 집속기와 홀소자의 간격이 멀어질수록 자속 집속기의 모서리를 경사지게 하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] Willie D. Jones, A Compass in Every Smartphone, IEEE Spectrum, Semiconductors (2010).
 [2] <http://www.electroiq.com/articles/sst/2012/08>.

- [3] <http://www.asahi-kasei.co.jp/akm/en/product/ak8975b/ak8975b.html>.
- [4] R. Azuma, *Teleoperators and Virtual Environments* **6**, 355 (1997).
- [5] G. Schall, E. Mendez, E. Kruijff, E. Veas, S. Junghanns, B. Reitinger, and D. Schmalstieg, *Personal and Ubiquitous Computing* **13**, 281 (2008).
- [6] F. Doil, W. Schreber, T. Alt, and C. Patron, *Proceedings of the Workshop on Virtual Environments* 71 (2003).
- [7] 대한민국특허 10-1057249.
- [8] P. M. Drljaca, F. Vincent, P.-A. Besse, and R. S. Popovic, *Sensors and Actuators A* **97-98**, 10 (2002).
- [9] H. Blanchard, F. De Montmollin, J. Hubin, and R. S. Popovic, *Sensors and Actuators* **82**, 144 (2000).
- [10] Zoran B. Randjelovic, Maher Kayal, Radevoje Popovic, and Hubert Blanchard, *IEEE Journal of Solid-state Circuits* **37**, 151 (2002).
- [11] Paul Leroy, Christophe Coillot, Alain F. Roux, and Gérard M. Chanteur, *IEEE Sensors Journal* **6**, 707 (2006).
- [12] <http://www.comsol.com>.
- [13] G. W. Elmen and H. D. Arnold, *Bell System Tech. J. (USA: American Tel. & Tel.)* **2**, 101 (1923).
- [14] D. C. Jiles and D. L. Atherton, *IEEE Trans. Magn.* **24**, 3120 (1988).
- [15] A. Ramesh, D. C. Jiles, and J. M. Roderick, *IEEE Trans. Magn.* **32**, 4234 (1996).
- [16] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*, D. Van Nostrand Company, INC, 845 (1951).

Analysis of Magnetic Concentrator of Magnetic Sensor by Using Finite Element Method

Kwang-Ho Shin*

Department of Information & Communication Engineering, Kyungsoong University, Pusan 608-736, Korea

(Received 25 March 2013, Received in final form 22 April 2013, Accepted 23 April 2013)

In this study, magnetic concentrators which could be used to enhance sensitivity of Hall effect sensor were analyzed by using FEM. The parameters for FEM analysis were the thickness and edge shape of magnetic concentrator and relative position of magnetic concentrator against Hall element. Magnetic field in z direction decreased with increasing of the thickness of magnetic concentrator, of which tendency was similar to apparent relative permeability calculated with demagnetizing factor of magnetic concentrator. There were optimal thickness and edge shape of magnetic concentrator according to the relative position of magnetic concentrator against Hall element.

Keywords : magnetic concentrator, Hall sensor, finite element method