

마이크로 플럭스 게이트 자기센서



최 상 언
(삼성종합기술원 전문연구원)



안 성 진
(삼성종합기술원 연구원)

1. 서 론

플럭스 게이트 센서는 상온에서 사용할 수 있는 자기센서로서는 가장 고감도 및 고분해능의 특성을 가지고 있다. 또한, $10^{11} \sim 10^4$ T의 측정영역에 있어서, 직류 및 저주파 교류 자계의 크기 및 방향을 검출할 수 있으며, 전류의 흐름 및 자성체 재료에 의해 발생하는 자장의 변화량을 검출하는 소자이다. 플럭스 게이트 센서의 검출소자의 기본구성은 고투자율 재료로부터 형성된 연자성 코어에 감겨져 있는 여자코일과 검출코일로 형성되어 있다. 기본 검출원리는 연자성 코어의 비선형 특성 즉 포화특성을 이용한다. 여자코일에 충분히 큰 교류전류를 공급하여 자계를 발생시키면, 코어 내부의 자속 밀도는 주기적으로 포화한다. 이때 외부 측정자계가 주어지면 코어 내부의 자속 밀도를 변화시키며, 검출 코일은 이 자속의 변화량을 측정하므로써 외부 측정자계의 세기를 알 수 있다. 표 1에는 종래의 손감기 방법에 의해 제작된 플럭스 게이트 센서의 최고 성능 및 표준 성능 지표를 요약하여 나타내었다. [1]

플럭스 게이트 센서의 연구는 1930년대에 최초의 보고가 있으며, 1935년 Thomas에 의해 처음으로 특허등록이 이루어졌다. [2-4] 또한, 원리 및 소자 구성은 Primdahl 및 Ripka에 의해서 종합 보고 되었다. [5-9] 2차 세계대전 중에 잠수함 감지에 이용하였으며, 우주에 있어서의 자장계측에

응용된 것을 계기로 하여 한때 집중적으로 연구가 진행되었다. 산업의 발달과 더불어 항공기, 선박 및 차량의 위치인식 시스템, 교통량을 검출하는 소자로서 이용되고 있으며, 가상 현실 공간에서의 움직임 감지, HDTV의 지자기 보상 및 색변짐 보상, 의료용으로 심자도 측정 및 환자 재활용, 휴대용 위치 인식용 소자, ITS 등 최근 다양한 응용을 모색하고 있다. 이러한 응용 범위의 확대에 있어서 소형, 경량 및 저가격화는 플럭스 게이트 센서에 있어서 필수적인 요건이다.

실리콘 집적회로 기술의 진보는 집적회로의 대규모화, 고성능화 뿐만 아니라, 센서의 고성능화, 고기능화에 대해서도 큰 역할을 담당하고 있다. 특히, 집적회로 기술을 기초로 해서 이것에 입체적인 기계적 구조의 실현까지 가능하게 한 마이크로 머신 기술에 의해서 소형 및 경량화가 가능하게 되었으며, 양산성 및 고신뢰성에도 우수한 고성능 센서가 다수 구현되어 왔다. 이러한 센서는 집적회로의 기판인 실리콘 웨이퍼를 이용하여 구현되기 때문에 집적회로와 센서를 동일 칩 위에 구현할 수 있다는 장점이 있다. 실제로 여러 종류의 센서가 개발되어, 이미 실용화하고 있다.

그러나, 실리콘을 검출재료로 이용하는 자기센서는 감도가 낮기 때문에 통상 큰 자계를 발생하는 영구자석등과 결합하여 이용되고 있고, 그 용도가 제한되어있다. 또한 InSb등의 화합물 반도체 등을 이용한 Hall 소자, 강자성체 MR(자기저항효과)

표 1. 플럭스 게이트 센서의 성능 지표.(1)

Fluxgate sensor parameters	Top parameter	Standard
Range	10 mT	200 μ T
Linearity error	10 ppm	100 ppm
Temperature coeff. Of sensitivity	10 ppm/ $^{\circ}$ C	50 ppm/ $^{\circ}$ C
Offset temperature coefficient	< 0.05 nT/ $^{\circ}$ C	0.2 nT/ $^{\circ}$ C
Perming	< 1nT offset change after 10 mT shock	< 5 nT
Noise	5 pT rms (0.05 ~ 10 Hz)	100 pT rms
Long-term stability of the offset	2 nT/year	5 nT/8 hours
Bandwidth	10 kHz	20 Hz
Operating teaperture range	-60 ~ +200 $^{\circ}$ C	-20 ~ +70 $^{\circ}$ C
Power consumption	1 mW	100 mW
Size	2 mm	30 mm
Crossfield error	< 1 nT for 50 μ T field	5 nT

소자는, 비교적 고감도이기 때문에 널리 이용되고는 있지만, 감도가 충분하다고 할 수 없기 때문에, 미약자계 검출에 응용 가능한 마이크로 자기센서의 구현이 요구되어져 왔다.[10-16]

최근, 실리콘 마이크로머신 기술의 진보로, 상당히 높은 분해능을 가진 플럭스 게이트 센서에 착안한 마이크로 플럭스 게이트 센서가 보고되어 주목을 받고 있다. 1990년대 초에 'Seitz'에 의해서 자성 박막 코어와 검출코일을 실리콘에 집적하여 미약자계 검출에 이용한 센서가 최초로 보고되었으며, 플럭스 게이트 센서의 구성요소 모두를 집적한 마이크로 자기 센서가 'Kawahito'에 의해 보고된 것을 계기로 신호처리 회로까지 동일 칩 위에 집적시킨 연구가 보고되는 등 상당한 진전이 이루어졌다.[17-27]

본 고에서는 플럭스 게이트 센서의 동작원리, 구조에 관하여 기술한 후, 마이크로 자기센서에서의 구조, 최적화 설계, 상용화를 위한 문제점 및 해결 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 플럭스게이트 센서의 기본동작 원리

플럭스 게이트 센서의 기본구조는, 그림 1에 나타난 것처럼 여자코일과 검출코일에 감겨져 있는 고투자율 재료로부터 이루어진 검출소자 및 Sensor Interface로 형성되어 있다. Sensor Interface로서는, 여자코일에 의해서 코어 내부 자속을 주기적으로 포화시키기 위한 코어 여자용 회로부 및 검출코일에 나타나는 출력 전압으로부터 외부 자계에 비례하는 신호성분만을 검출하는 신호처리 회로부로 구성된다. 이하에서는 이와 같은 플럭스 게이트 자기검출소자의 기본 동작원리, 검출방식 및 고감도화를 위한 요인에 관하여 설명한다.

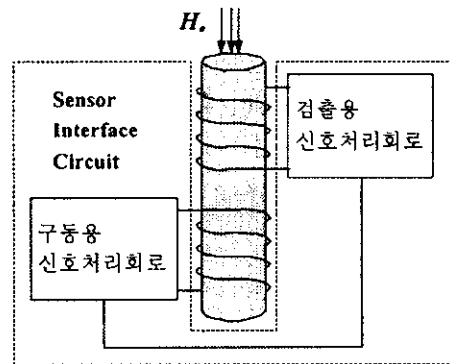


그림 1. 플럭스 게이트 자기센서 기본 구조.

플럭스 게이트 센서의 자기 검출부에 있어서, 여자코일에 교류전류를 공급하여 코어 내부 자계가 충분히 포화하는 크기의 자계 $H_{ext}(t)$ 로 코어를 자화시킨다. 여기에 측정 자계인 장자계, 또는, 저주파 교류자계 $H_o(t)$ 가 코어의 축에 대해서 평행한 방향으로 공급되었을 때, 검출코일의 양단에는, 전자유도 법칙에 의해 다음과 같은 식이 유도된다.

$$V_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -NA\mu_0 \frac{d[\mu_{eff}(t)H_o(t)]}{dt} \quad (1)$$

여기에서, Φ 는 코어 내부 자속, N은 검출코일의 권선수, A는 코어의 단면적, μ_0 는 진공중의 코어의 투자율, $\mu_{eff}(t)$ 는 시간적으로 변화하는 코어의 실효투자율을 나타낸다. 전자유도 법칙에 따르는 유도형 센서의 일반식은, 식 (1)로부터 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_{ind} &= -NA\mu_0\mu_{eff} \frac{dH_0(t)}{dt} \\
 &= -NA\mu_0 H_0 \frac{dA(t)}{dt} \quad (2) \\
 &= -NA\mu_0 H_0 \frac{d\mu_{eff}(t)}{dt}
 \end{aligned}$$

제1항은 기본적인 전자유도에 관한 식이고, 외부자계가 교류 자계로 있는 경우에 전압이 유도되지만, 직류 자계 성분의 검출은 불가능하게 된다. 플럭스 게이트 센서로서 정자계 또는 저주파 자계 성분을 함께 검출하기 위해서는 제2항 및 제3항을 따르는 방식이 필요하다. 제2항은 외부자계에 대한 코어의 실효단면적을 시간적으로 변화시키는 것에 따라, 측정자계를 검출하는 회전형 코일센서에 이용되는 식이다. 제3항은 여자코일에 의해 코어의 투자율을 시간적으로 변화시켜, 검출코일로부터 외부 측정 자계를 검출하는 플럭스 게이트 원리에 기초한 식인 것이다. 이것은 코어의 B-H 곡선의 비선형성을 이용하고 있다. 따라서, 비선형성을 이용하는 플럭스 게이트 센서의 경우 식(2)는 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

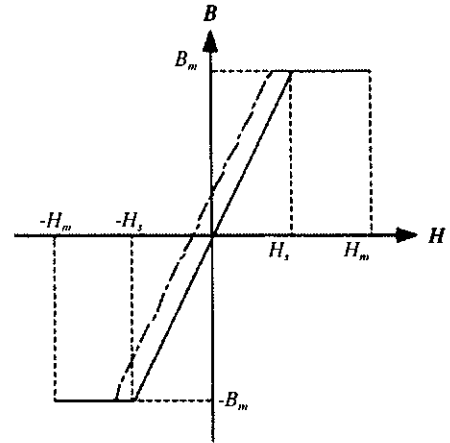
$$V_{ind} = -NA\mu_0 H_0 \frac{d\mu_{eff}(t)}{dt} \quad (3)$$

즉, 여자코일에서 코어의 투자율을 주기적으로 변화시키는 것에 따라, 측정자계가 정자계일지라도 전자유도 법칙에 의해 검출코일에는 외부자계에 비례한 신호 전압성분이 유도된다.

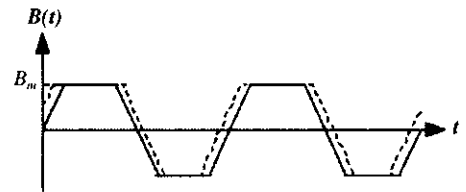
식 (3)에 나타난 것처럼, 플럭스 게이트 자기센서는 코어의 투자율의 시간적 변화를 검출에 이용하는 것이다. 코어 내부 자속 밀도는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$B = \mu_0\mu_{eff}H \quad (4)$$

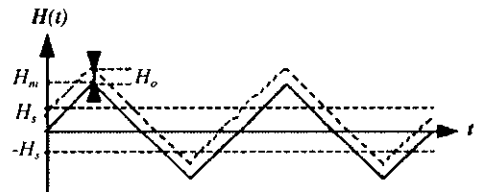
여기에서, H는 코어가 놓여있는 곳의 자계인 것이다. 지금, 해석을 간단히 하기 위해서, 코어의 자기특성(B-H 특성)은 그림 2(a)에 나타난 것처럼 히스테리시스가 없는 특성 및 비선형성을 갖는다고 가정한다. 여자코일에 의해 코어 내부의 자속 밀도를 주기적으로 충분히 포화시킬 수 있는 진폭을 갖는 그림 2(c)와 같은 삼각파 자계로 여자한다. 즉, 여자자계의 시간적인 변화에 대해서 코어의 실효투자율을 시간적으로 변화시킨다. 이것을 자속 밀도에서 생각하면, 여자자계에 의한 코어 내부 자속 밀도는, 코어의 포화특성에 따라 그림 2(b)처럼 변화하고, 검출코일의 양단에는 그림 2(d)에 나타내는 것과 같은 펄스전압이 유도된다.



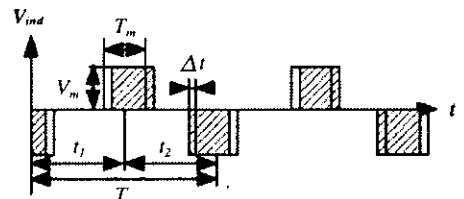
(a) 코어의 B-H 특성



(b) 코어 내부의 자속밀도



(c) 여자 자계



(d) 유도전압

그림 2. 플럭스 게이트 센서의 기본 동작.

고정해둔 플럭스 게이트 센서에 있어서, 코어는 여자코일에 의해서 발생하는 코어 내부 자계 $H_{ext}(t)$ 에서 교류적으로 자화되고 있고, 여기에 직류 외부자계(측정자계) H_0 가 코어 축에 평행한 방향으로 인가되어 있다고 가정한다. 이때, 검출코일에 유기되는 전압은, 식(3)으로부터 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
V_{ind} &= -\frac{d\Phi}{dt} \\
&= -NA\mu_0 \frac{d[H_{ext}(t) + H_0(t)]\mu_{eff}}{dt} \\
&\quad - NA\mu_0 \frac{dH_{ext}(t)}{dt} \mu_{eff}(t) \\
&\quad - NA\mu_0 [H_{ext}(t) + H_0] \frac{d\mu_{eff}(t)}{dt}
\end{aligned} \tag{5}$$

따라서, 직류 외부자계가 없는 경우에는, 코어 자속 밀도 및 유도전압은 그림 2에 나타난 실선과 같이 된다. 여기에, 직류 외부자계가 인가되면 점선과 같이 변화하여 외부자계에 비례한 성분이 펄스의 위상변화 Δt 로 나타난다(그림 2(d)의 사선의 펄스). 이때, 검출코일에 유도되는 펄스 전압 출력의 최대 진폭 V_m , 및 펄스 폭 T_m 은 다음 식으로 나타난다.

$$V_m = 4NA\mu_0\mu_{eff}H_m f_{ext} \tag{6}$$

$$T_m = \frac{H}{2H_m f_{ext}} \tag{7}$$

여기에서, f_{ext} 는 여자주파수, H_m 은 최대여자자계, H_s 는 코어 내부 자속 밀도가 포화를 시작하는 점의 자계이고, 다음 식으로 나타난다.

$$H_s = \frac{B_s}{\mu_0\mu_{eff}} \tag{8}$$

또한, 직류 외부자계에 의한 펄스 출력전압의 위상 변화량은 다음 식과 같이 나타나고, 외부자계 크기에 비례한 변화량이 얻어진다.

$$\theta_0 = 2\pi f_{ext} T_0 = \frac{\pi H_0}{2H_m} \tag{9}$$

2.2 제2고조파검출방식

위에서 언급한 위상 변화량으로부터 외부 측정자계를 검출하는 플럭스 게이트 센서의 검출방식에는 제2고조파 검출방식, 위상지연 검출방식, 영자계 검출방식, 공진 방식 등 여러 종류가 있다. 본 고에서는 가장 일반적인 검출 방식이며 마이크로 플럭스 게이트 센서에 적합한 여자신호의 2배의 주파수를 검출코일로부터 추출하는 제2고조파 검출방식만을 설명한다. 제2고조파 검출방식이란, 코어를 여자코일에 의해서 여자주파수 f_{ext} 로 여자했을 때, 검출코일에서 $2f_{ext}$ 주파수 성분의 유도전압을 검출하므로써 외부자계를 검출하는 방법인 것이다. 외부자계 H_0 가 0인 경우, 검출코일에 유도된 펄스전압의

파형은 그림 2(d)의 실선 파형처럼 기하학적으로 대칭성이 있다. 이 때문에, 푸리에 변환에 의한 주파수 해석에서는 기수차 고조파 밖에 나타나지 않는다. 그러나, 외부자계 H_0 가 인가되면, 검출된 펄스전압은 그림 2(d)의 사선 파형처럼 기하학적인 대칭성을 잃기 때문에 기수차 고조파 성분에 더하여 우수차 고조파 성분이 나타나게 된다. 이 우수차(제 n 차($n=2, 4, 6, \dots$))의 고조파 성분의 파고치 V_n 은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
V_n &= \frac{4V_m}{n\pi} \sin n\pi f_{ext} T_m \sin n\theta_0 \\
&= \frac{16NA\mu_0\mu_{eff}H_m f_{ext}}{n\pi} \sin \frac{n\pi H_s}{2H_m} \sin \frac{n\pi H_0}{2H_m}
\end{aligned} \tag{10}$$

또한, 외부자계 H_0 가 인가되지 않은 경우, 식 (10)으로부터 알 수 있는 바와 같이 우수차 고조파 V_n 은 0이 되며, 이것을 검출하면 원리적으로는 오프셋 전압이 없는 검출이 가능하다. 여기에서 외부 측정자계가 작은 경우($H_0 \ll H_m$), 검출코일의 펄스 전압 파형의 제2고조파 성분 V_2 는 식 (10)으로부터 다음 식과 같이 근사할 수 있고, 외부자계 V_0 에 비례한 전압을 검출할 수 있다.

$$\begin{aligned}
V_2 &= \frac{8NA\mu_0\mu_{eff}H_m f_{ext}}{\pi} \sin \frac{\pi H_s}{H_m} \sin \frac{\pi H_0}{H_m} \\
&\cong 8NA\mu_0\mu_{eff}H_m f_{ext} \sin \frac{\pi H_s}{H_m} H_0
\end{aligned} \tag{11}$$

제2고조파 검출방식에 의한 센서의 자기 감도는 식 (11)에 의해서 다음 식으로 유도된다.

$$S_B = \frac{|V_2|}{B_0} = 8NA\mu_0\mu_{eff} f_{ext} \sin \frac{\pi H_s}{H_m} H_0 \tag{12}$$

코어의 최적 여자조건은, 식 (12)로부터 $H_m = 2H_s$ 이다. 즉, 플럭스 게이트 센서는 포화자계의 2배의 자계로 여자할 때 최고의 성능을 나타낸다는 것이다. 여자자계의 최대치는 최소한 코어 내부의 자속 밀도를 포화시킬 정도로 크게 할 필요가 있으며, 보자력이 크면 필연적으로 여자자계의 최대치도 크게 되기 때문에, 고감도화를 위해서는, 실효투자율이 높아야 할 뿐만 아니라 보자력이 작은 연자성 재료를 이용할 필요가 있다.

2.3 마이크로 플럭스 게이트 자기 센서

2.3.1 마이크로 플럭스 게이트 검출소자의 특징

실리콘의 집적회로 기술을 응용하여 제작되는 마이크로 플럭스 게이트 센서는 구조, 실제의 치수 등은 종래의 손잡기에 의해 제작된 플럭스 게이트 센서와 비교하여 크게 다르며, 특

성도 상당히 다르게 나타나는 소자를 예상할 수 있다. 마이크로 플럭스 게이트 센서에 있어서, 종래의 플럭스 게이트 검출 소자에 필적하는 고감도를 얻기 위해서는, 식 (12)에서 나타난 것처럼, 검출코일의 권선수 N , 코어의 단면적 A , 코어의 실효투자율 μ_{eff} , 여자주파수 f_{ext} 를 크게 할 필요가 있다. 마이크로 플럭스 게이트 자기검출소자는 미세 구조이기 때문에, 검출 단면적이 감소한다는 점에 있어서는 불리한 것이다. 그러나, 여자코일에서 기생하는 유도성분 및 용량성분을 작게 제작할 수 있기 때문에, 종래의 플럭스 게이트 자기 검출소자보다 훨씬 높은 여자주파수에서 구동이 가능하다. 종래의 플럭스 게이트 센서에서는 코일의 유도성분 및 용량성분이 크기 때문에, 여자주파수 f_{ext} 는 수10kHz정도에서 사용되고 있지만, 마이크로 플럭스 게이트 센서에 있어서는, 자성박막의 주파수 특성에 의해서 결정된다. 최근, 수MHz대까지 여자가 가능하며, 센서 인터페이스 회로와 집적화된 센서가 보고되고 있다. [18-25] 또한 자성박막을 다층화하여, 고주파에서 손실을 감소시키면, 수MHz ~ 수100MHz대까지의 여자도 가능하다. 센서 감도는 여자주파수에 비례하기 때문에, 극소형임에도 불구하고 상당히 높은 감도를 가질 가능성을 가지고 있다. 또한 광대역 특성을 실현할 수 있으므로, 종래의 센서에서는 응용할 수 없었던 분야에 까지 응용을 기대할 수 있다. 코어에 이용되는 자성재료는, 높은 주파수 대역까지 고투자율과 저보자력을 갖는 것이 요구된다. 마이크로 플럭스 게이트 자기검출소자의 특징으로부터, 여자주파수를 높이는 것이 가능하지만, 고주파 여자로 인하여 실효투자율 μ_{eff} 의 저하 및 보자력 H_c 의 증가가 예상된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 마이크로 플럭스 게이트 자기검출 소자에서는, 여자축을 콘관축 방향으로 제어하여 자화회전을 이용함으로써 고주파 여자를 가능하게 하는 방법을 이용한다. 이 방법은, 플럭스 게이트 센서의 노이즈 레벨을 지배하는 '바크 하우젠 노이즈' 등의 영향도 현저히 저감할 수 있다. 또한, 단자구 구조 및 다층막을 응용함으로써, 더욱 더 저잡음화를 기대할 수 있다. 이처럼 박막 특유의 특성을 이용할 수 있는 것도 마이크로 플럭스 게이트 자기검출 소자의 특징 중에 하나인 것이다.

2.3.2 마이크로 플럭스 게이트 자기검출 소자의 기본구조

마이크로 플럭스 게이트 자기검출 소자의 기본구조는 그림 3에 나타나 있다. 실리콘 산화막을 성장한 웨이퍼를 기판으로 이용해서 그 위에 하층 금속 배선과 상층 금속 배선을 나선상으로 접속하여 솔레노이드 형상의 코일을 형성한다. 그 코일 속에 연자성 박막 코어가 끼워져 있다. 실제의 소자에서는 여자용 코일과 검출용 코일이 동일 코어로 결합된 구조를 하고 있다. 또한 실리콘 웨이퍼 상에서 스파이럴 형상의 배선을 이용한 코일과 자성박막 코어를 적층하여 소자를 형성할 수 있다.

마이크로 플럭스 게이트 자기검출 소자의 기본구조로서, 어

떤 형상을 가진 구조가 최적 인가에 대해서는 향후 검토할 필요가 있지만, 현재까지 보고되고 있는 2가지 예에 관하여 비교해 본다.

표 2는 솔레노이드 구조와 평면 스파이럴 구조에 의한 센서의 기본 구조에 관하여 기본적 성능을 결정하는 요인을 비교한 것이다. 센서의 감도가 실효포화 단면적 AD^2 (A : 코어 단면적, D : 반자계 계수)으로 결정된다는 것을 고려하면, 이들을 나타내는 양쪽식은 상당히 다르게 나타나지만, 단순히 성능을 비교하기는 쉽지 않다. 단, 단위 점유면적을 가지고 비교하면 양쪽의 차이는 명확하다. 즉, 코어의 직경과 길이의 비를 크게 잡으면, 솔레노이드쪽이 훨씬 유리하다. 한편, 마이크로 플럭스 게이트 자기검출 소자는, 실리콘 기판 위에 형성할 수 있고, 필요한 신호처리 회로를 동일 기판 위에 집적화하는 것이 가능하다. 이와 같은 신호처리 회로의 집적화에 대해서 생각해 보았을 때, 자기검출 소자도 회로와 동일 칩 위에 집적화가 용이한 구조를 가지는 것이 바람직하다.

그러므로, 센서 인터페이스 회로와의 집적화에 주목한 경우, 층을 쌓아가기만 하면 구현할 수 있는 스파이럴 구조는, 솔레노이드 구조와 비교해서 제작공정이 간단하기 때문에 유리하다고 할 수 있다. 또한 공정 개발의 진전과 더불어 솔레노이드 형상의 소자도 센서 인터페이스 회로와 집적화가 가능할 것으로 예상된다.

실제, 플럭스 게이트 자기검출 소자의 설계 및 제작에 있어서, 그림 4에 나타난 기본구조처럼 차동 여자형 플럭스 게이트 자기 검출소자를 이용한다. 이 구조의 특징은, 차동 여자에 의해 각각 코어를 역여자하고, 검출코일로 역여자된 신호성분의 합을 취하므로써, 여자신호의 직결성분을 제거할 수 있다는 장점이 있다.

그림 5는 외부 직류자계 H_0 가 코어 축 방향에 평행하게 인가될 때, 단축 여자형과 차동 여자형의 코어 내부의 자속 변화의 구조에 관하여 나타낸다. 우선, 외부자계가 없는 경우, 여자자계 H_{ext} 에 따르는 코어 내부의 자속 밀도 B 는, 그림 5(a)

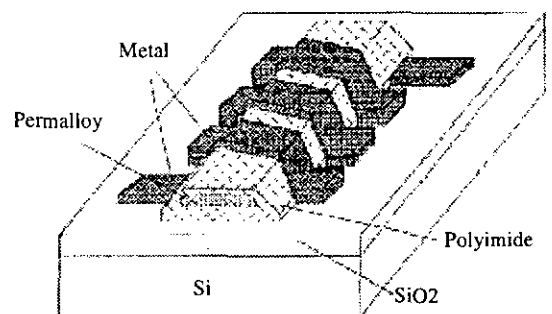
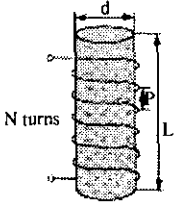
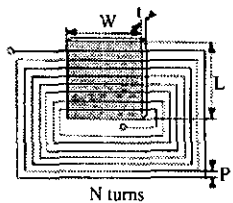


그림 3. 마이크로 플럭스 게이트 자기검출 소자의 기본구조. [19]

표 2. 솔레노이드 구조와 스파이럴 구조의 비교.

	Solenoid & Rod core	Planar spiral coil & Thin-film core
Structure		
Demagnetizing factor (D)	$\frac{d^2 (\ln(2d/L) - 1)}{L^2} \quad (L \gg d)$	$\frac{t}{2L} \quad (L \gg t, L \approx W)$
Core cross-sectional area (A)	$\frac{\pi d^2}{4}$	Wt
Effective capture area (AD ²)	$\frac{\pi L^2}{4 \ln(2d/L) - 1} \quad (L \gg d)$	$2WL$
Occupied area by core (S)	Ld	WL
AD ² /S	$\frac{L}{d} \frac{4}{\pi} \frac{1}{\ln(2d/L) - 1}$	2
Occupied area by coil (S _c)	$\approx NPd$	$2NP(W + 2NP)$
Coil wire length (L _c)	$\approx N\sqrt{\{P^2 + (\pi d)^2\}}$	$\approx N(W + 2NP)$
NS _c	$\frac{1}{Pd}$	$\frac{1}{P(W + 2NP)}$

에 나타난 것과 같이 B-H곡선 위의 코어 자화 상태를 나타내는 P점이라는 것을 가정하자. 차동 여자형 코어가 그림 5(c)와 같이 역여자되면, 각 코어의 자화상태는 여자자계로부터 크기가 같고 방향이 반대인 P점과 -P점으로 된다. 외부자계 H₀가 코어 축에 대해서 평행하게 주어졌다고 하면, 이것에 의한 코어 내부자계는 반자계의 영향을 고려하면 ΔH로 감소한다. 그림 5(b)의 단축 여자형에 있어서, 여자신호의 직결성분은 검출코일에 나타나지만, 그림 5(c)의 차동 여자형에서는 두개의 코어를 역여자하여, 검출코일에서 합을 취하면 여자에 따르는 직결성분을 제거할 수 있으므로 외부자계에 비례한 신호성분만이 나타난다. 차동 여자형은 단축 여자형에 비해서 코어의 면적이 2배로 되기 때문에, 검출소자의 자기 감도 또한 2배로 된다. 즉, 제2고조파 방식을 이용하면, 식 (12)에 단순히 2의 계수를 곱한 값이 된다. 또한 차동 여자형 검출소자는, 여자신호의 직결성분을 제거할 수 있으므로, 신호처리를

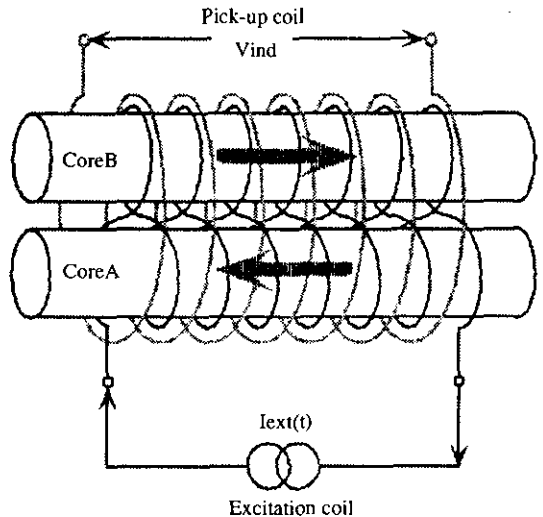
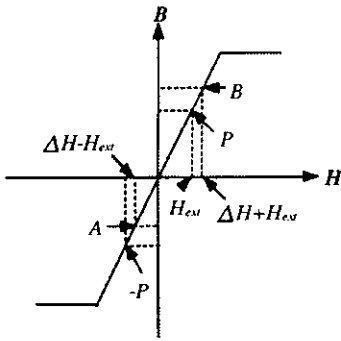
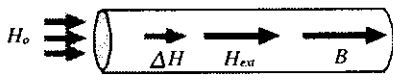


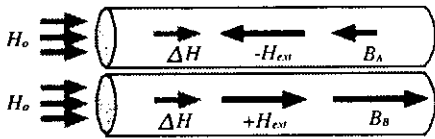
그림 4. 차동 여자형 플럭스 게이트 자기 검출 소자 구조.



(a) B-H곡선

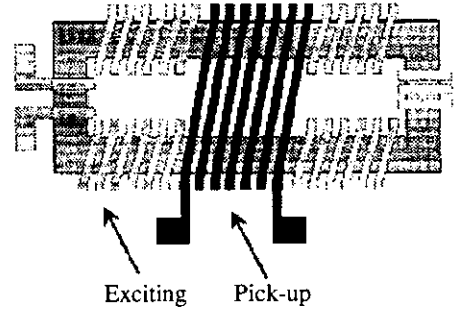


(b) 단층 여자형 코어의 자화 상태

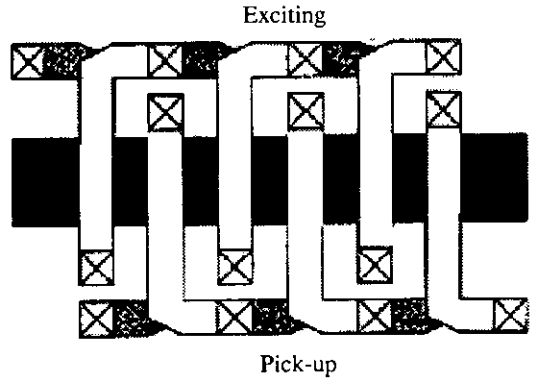


(c) 차동 여자형 코어의 자화 상태

그림 5. 코어 내부의 자속 변화 기구.



(a) 집중감기 권선구조(27)



(b) 밀결합 감기 권선 구조(20-21)

그림 6. 마이크로 플럭스 게이트 자기검출 소자의 권선 구조.

보다 쉽게 할 수 있다. 그리고 자속의 누설을 방지할 수 있는 폐자로 구조로 구현이 가능하므로 고감도화를 이룩할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2.3.3 여자코일과 검출코일의 권선 구조

지금까지 보고된 마이크로 플럭스 게이트 자기검출 소자의 권선 구조를 그림 6에 나타낸다. 두 종류로 크게 나눌 수 있는데, 그림 6(a)에 나타내는 것처럼 중심부에 검출코일을 집중하여 감고, 양단에 여자코일을 감은 집중감기 권선구조 및 그림 6(b)에 나타내는 것처럼 여자코일과 검출코일을 1턴씩 번갈아 감은 밀결합 감기 방식이 있다. 이하에서 논하는 자계 분석을 통하여 마이크로 구조에 있어서의 유리한 권선 구조를 명확히 하고자 한다.

그림 7은 1턴 코일에 의해서 여자된 박막 코어에 있어서, 코어 축 방향의 자계 분포를 나타낸다. 여기서 실험 투자율 $\mu_r = 750$, 박막 코어 두께 $t = 2 \mu\text{m}$, 코일의 갭 $g = 6 \mu\text{m}$, 코일 폭 $a = 20 \mu\text{m}$, 특성장 $\lambda = \sqrt{gt\mu_r}/2$ 이다. 또한, 공급 전류는 75 mA이고, 박막 코어는 무한히 길다고 가정한다. 코일 아래 및 코일이 없는 부분의 코어 축 방향의 자계는, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$H(x) = \frac{I}{a} \left(1 - e^{-\frac{a}{2\lambda} \cosh \frac{x}{\lambda}} \right) \quad \left(|x| < \frac{a}{2} \right) \quad (13)$$

$$H(x) = \frac{I}{a} \sinh \left(\frac{a}{2\lambda} \right) e^{-\frac{|x|}{\lambda}} \quad \left(|x| \geq \frac{a}{2} \right) \quad (14)$$

이처럼, 박막 코어의 경우에는 누설 자속이 크게 되는데, 여자 코일로부터 멀어지는 것에 따라, 급격하게 자계 강도가 감소하게 되는 것을 볼 수 있다. 따라서, 여자코일을 짧은 간격으로 주기적으로 배치하고, 그 사이에 검출 코일을 감은 구조로 한 밀결합 감기 방식이 좋은 여자효율을 이룩할 수 있다.

또한, 그림 7과 동일한 조건으로 여자 코일의 턴 수만을 변화시킨 코어 축 방향 자계 분포를 그림 2.8에 나타낸다. 여기서 알 수 있듯이 여자 코일의 턴 수가 20턴 이상일 때 자계가 포화하는 영역을 가지는 것을 볼 수 있다. 따라서 마이크로 플럭스 게이트 센서에 있어서, 검출코일이 감겨져 있는 코어 전체 영역에 균일하고 충분한 자계를 공급하기 위해서는 자계 분포 해석을 통하여 최적의 구조로 설계하는 것이 중요하다.

3. 결론

본 고에서는 상온에서 사용할 수 있는 자기센서로서는 가장 고감도 및 고분해능의 특성을 가지고 있는 플럭스 게이트 센서의 연구동향 및 응용분야에 관하여 설명하였고, 동작원리 및 신호검출 방법, 마이크로 구조에 관하여 기술하였다. 또한 종래의 손감기에 의한 플럭스 게이트 센서와 실리콘 마이크로 머신 기술 및 자성박막 기술을 접목한 마이크로 플럭스 게이트 센서의 비교를 통하여 향후의 연구방향을 제시했다. 특히 마이크로 구조가 가지고 있는 특징을 최대한 이용하고 권선구조를 최적화 하므로써 종래의 센서에 필적하는 성능을 이룩할 수 있는 가능성을 나타내었고, 광대역 특성을 실현할 수 있으므로, 종래의 센서에서는 응용할 수 없었던 분야에 까지 응용을 기대할 수 있다.

실리콘 기술을 이용한 마이크로 플럭스 게이트 센서는 지자계와 같은 미약자계의 검출에 최적의 센서로서 극소형 및 경량화가 가능하기 때문에 휴대용 위치인식 시스템, 가상현실 시스템, ITS, 홈로봇 및 각종 게임기 등 다양한 응용분야에 있어서 필요로 하는 소자가 될 것으로 확신한다. 따라서, 휴대용 시스템에 필수적인 저전력화를 위한 지속적인 노력이 요망된다.

참고 문헌

- [1] P. Ripka, G. Vertesy, "Sensor based on soft magnetic materials Panel discussion", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216, 795-799, 2000
- [2] H. P. Thomas, "Direction responsive system", US Patent No. 2016977, 1935
- [3] H. Aschenbrenner, G. Goubau, "Eine Anordnung zur Registrierung rascher magnetischer Störungen", *Hochfrequenztech Elektroakust.*, 47, 177-181, 1936
- [4] W. A. Geyger, "Magnetic Amplifier Circuits", McGraw-Hill, New York, 2nd edn., Ch.17, p271, 1957
- [5] F. Primdahl, "Bibliography of Fluxgate Magnetometers", *Publications of the Earth Physics Branch*, Vol. 41, No.1, 1970
- [6] F. Primdahl, "The fluxgate magnetometer", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol.12, Printed in Great Britain, 1979
- [7] F. Primdahl, R. L. Coles, "A Bibliography of Magnetometers", Appendix 1, *Proc. Int. Workshop on Magnetic Observatory Instruments*, Ottawa, Canada, July 30 - Aug. 9, 1986

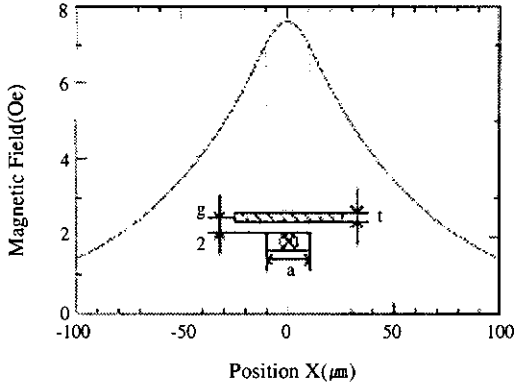


그림 7. 1턴 코일에 의해 여자된 자계 분포.(22)

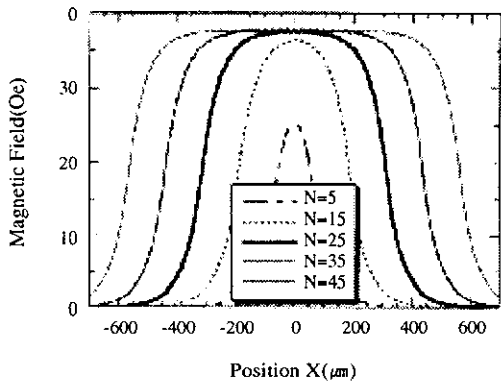


그림 8. N턴 코일에 의해 여자된 자계 분포.(22)

또한 코일구조에 있어서 이상적인 경우, 코일 표면 가까이 발생하는 자계는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$H_m = \frac{I_{ext}}{P} \quad (15)$$

여기서 I_{ext} 는 여자 전류이고, P는 코일 배선의 피치를 나타낸다. 식으로부터 동일한 여자 전류가 공급되었을 때, 코일 피치가 작으면 작을수록 큰 자계를 발생시킬 수 있다. 즉 저전력화가 가능하다는 것을 의미한다. 그러나 동일한 코일 두께에 있어서, 코일 피치가 작아지면 코일 저항이 증가하므로 저전력화에 어려움이 있다. 이것을 해결하는 한가지 방법은 마이크로머신 기술을 이용하여 고단면비를 갖는 코일을 제작하는 것이다. 따라서 마이크로 플럭스 게이트 자기검출 소자는 성능을 극대화 할 수 있는 구조 설계와 제작공정이 무엇보다 중요하다 할 수 있다.

- [8] P. Ripka, "Review of fluxgate sensors", Sensors and Actuators, A, 33, 129-141, 1992
- [9] N. Mathieu, A. Chovet, "New GaAs Magnetic Field Sensors with High Sensitivity", Sensors and Actuators, A25-A27, 741-745, 1991
- [10] N. Mathieu, A. Chovet, "New GaAs Magnetic Field Sensors with High Sensitivity", Sensors and Actuators, A25-A27, 741-745, 1991
- [11] Y. Sugiyama, H. Soga, M. Tacano, H. P. Baltes, "Highly Sensitive Split-Contact Magnetoresistor with AlAs/GaAs Superlattice Structure", IEEE Trans. Electron Devices, ED-36, 1639-1643, 1989
- [12] K. Maenaka, H. Okada, T. Nakamura, "Universal Magneto-operational Amplifier(MOP)", Sensors and Actuators, A21-A23, 807-811, 1990
- [13] K. Maenaka, M. Tsukahara, T. Nakamura, "Monolithic Silicon Magnetic Compass", Sensors and Actuators, A21-A23, 747-750, 1990
- [14] U. Dibbern, "Sensors Based on the Magnetoresistive Effect", Sensors and Actuators, 4, 221-227, 1983
- [15] J. S. Y. Feng, L. T. Romankiw, D. A. Thompson, "Magnetic Self-Bias in the Barber Pole MR Structure", IEEE Trans. Magn., MAG-13, 1466-1468, 1977
- [16] U. Dinnern, "Magnetic Field Sensors Using the Magnetoresistive Effect", Sensors and Actuators, 10, 127-140, 1986
- [17] T. Seitz, "Fluxgate Sensor in Planar Microtechnology", Sensors and Actuators, A21-A23, 799-802, 1990
- [18] S. Kawahito, Y. Sasaki, M. Ashiki, T. Nakamura, "Micromachined Solenoids for Highly Sensitive Magnetic Sensor", The 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, 1077-1080, 1991
- [19] S. Kawahito, Y. Sasaki, H. Sato, S. O. Choi, T. Nakamura, Y. Tadokoro, "Miniature Fluxgate Sensing Element for High-Performance Integrated Silicon Magnetic Sensors", Sensors and Materials, 5, 5, 241-251, 1994
- [20] S. Kawahito, H. Sato, M. Sutoh, Y. Tadokoro, "High-resolution micro fluxgate sensing elements using closely coupled coil structures", Sensors and Actuators, A 54, 612-617, 1996
- [21] S. O. Choi, S. Kawahito, Y. Matsumoto, M. Ishida, Y. Tadokoro, "An Integrated micro fluxgate sensor", Sensors and Actuators, A55, 121-126, 1996
- [22] S. O. Choi, S. Kawahito, K. Takahashi, Y. Matsumoto, M. Ishida, Y. Tadokoro, "A Planar Fluxgate Magnetic Sensor for On-Chip Integration", Sensors and Materials, Vol. 9, No. 4, 241-252, 1997
- [23] S. Kawahito, S. O. Choi, "A Delta-Sigma Sensor Interface Technique with Third-Order Noise Shaping and Its Application to Flux-gate System" Transducers'99, 2p7.4, 824-827, 1999
- [24] P. Ripka, S.O.Choi, S. Kawahito, A. Tipek, M. Ishida, "Micro-fluxgate sensor with double-sided core", EMSA 2000 (Third European Conference on Magnetic Sensors and Actuators), Dresden, pp. 167-168, 2000
- [25] P. Ripka, S.O.Choi, A. Tipek, S. Kawahito, M. Ishida, "Symmetrical core improves micro-fluxgate sensors", Eurosensors 2000, Copenhagen, Book of Abstracts, pp. 499-500, Proc. pp. 899-903, 2000
- [26] R. Gottfried-Gottfried, W. Budde, R. Jahne, H. Kuck, B. Sauer, S. Ulbricht, U. Wende, "A Miniaturized Magnetic Field Sensor System Consisting of a Planar Fluxgate Sensor and a CMOS Readout Circuitry", Transducers'95, Eurosensor IX, 229-232, 1995
- [27] T. M. Liakopoulos, C. H. Ahn, "A micro-fluxgate magnetic sensor using micromachined planar solenoid coils", Sensors and Actuators, 77, 66-72, 1999

자 자 약 력

성명 : 최 상 언

❖ 학 력

1984년-1991년 영남대 전자공학과
 1992년-1997년 일본 토요하시기술과학대
 (석사(전기/전자)/박사(시스템정보))

❖ 경 력

1997년-현재 삼성종합기술원 전문연구원

성명 : 안 성 진

❖ 약 력

1992년-2000년 한양대학교 재료공학과
 (학사/석사(자성재료))
 2000년-현재 삼성종합기술원 연구원