

## 극미세 교류 플라즈마 내에서의 홀 효과를 이용한 마이크로 자기센서

서영호\* · 한기호\* · 조영호\*  
(2002년 6월 14일 접수, 2003년 6월 13일 심사완료)

### A Magnetic Microsensor based on the Hall Effect in an AC Microplasma

Young Ho Seo, Ki-Ho Han and Young-Ho Cho

**Key Words:** Plasma Hall Effect(플라즈마 홀 효과), Magnetic Sensor(자기센서), AC Neon Plasma(교류 네온 플라즈마), Microsensor Packaging(미소센서 패키징)

#### Abstract

This paper presents a new class of magnetic microsensors based on the Hall effect in AC microplasma. In the theoretical study, we develop a simple model of the plasma Hall sensor and express the plasma Hall voltage as a function of magnetic field, plasma discharge field, pressure, and electrode geometry. On this basis, we have designed and fabricated magnetic microsensors using AC neon plasma. In the experiment, we have measured the Hall voltage output of the plasma microsensors for varying five different conditions, including the frequency and the magnitude of magnetic field, the frequency and the magnitude of plasma discharge voltage, and the neon pressure. The fabricated magnetic microsensors show a magnetic field sensitivity of  $8.87 \pm 0.18 \text{ mV/G}$  with 4.48% nonlinearity.

#### 1. 서론

현재 자기장 측정을 위한 센서<sup>(1)</sup>는 다양한 물리, 화학적 원리를 이용하고 있다. 이 중 1879년 E. H. Hall에 의해서 확립된 홀 효과는 가장 널리 사용되는 자기 검출법 중 하나이다. 홀 효과를 이용한 자기센서의 자기 민감도(magnetic field sensitivity)는 전자의 드리프트(drift) 속도에 비례하게 된다. 반도체 홀 센서의 경우, 가해진 DC 전압에 대해 반도체내의 전자의 속도는 결정격자내에서의 산란(scattering)때문에  $10^4 \text{ m/s}$  정도로 제한된다.

최근 (1993년) Y. Sugiyama<sup>(2)</sup> 등이 높은 자기 민감도를 얻기 위해 전자속도를 증가시키는 방법으로 진공에서 방출된 전자의 자기장에 의한 이동 변위를 이용한 자기 검출법을 제안하였으며,  $10^{-6} \text{ torr}$ 의 고진공속에서 머리빗(comb)모양의 텅스

텐 필드 에미터(emitter)로부터 전자를 방출시켜 전자의 속도를  $10^6 \text{ m/s}$ 까지 증가시켰다. 그러나, 필드 에미터를 이용한 이 경우는 높은 전기장으로 인한 텅스텐 에미터의 손상과 수명 단축 등의 문제점이 있다.

이에 본 논문에서는 필드 에미터를 이용한 방법에 비해 전자속도를 크게 희생하지 않으며, 전극의 손상을 줄일 수 있는 새로운 자기 검출법으로 플라즈마 전자의 홀 효과를 최초로 제안한다. 이러한 플라즈마 홀 센서는 플라즈마를 1~10torr 정도의 저압에서 형성하므로  $10^{-6} \text{ torr}$ 의 고진공을 요하는 필드 에미터에 비해 저압 환경 구현의 경제성과 용이성 측면에서 유리하며, 1~10torr의 저압 플라즈마에서  $10^5 \sim 10^7 \text{ m/s}$ <sup>(3)</sup> 정도의 플라즈마 전자 속도를 유지할 수 있어 자기민감도 측면에서도 유리하다. 반면 반도체 내의 전자에 비해 플라즈마 전자가 10~1000배 빠르므로, 본 논문에서 제안하는 플라즈마 홀 센서는 기존의 반도체 홀 센서에 비해 높은 자기 민감도를 얻을 수 있다.

본 논문의 2장에서는 홀 효과를 이용한 자기력 검출소자의 동작원리와 이론적인 수식을 포함한 이론적인 배경에 대해서 기술을 하고, 3장에서는

\* 한국과학기술원 디지털나노구조연구단

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 디지털나노구조연구단

E-mail : dnc@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-8691 FAX : (042)869-8690

마이크로 플라즈마 홀 센서의 설계와 제조공정을, 4장에서는 실험장치와 교류 네온 플라즈마를 이용한 홀 소자의 특성 규명을 위한 실험 조건에 대해서 서술을 할 것이다. 마지막으로 실험결과와 이론결과를 비교하고 결론을 서술하고자 한다.

## 2. 동작원리 및 이론

### 2.1 플라즈마 홀 효과 (plasma Hall effect)

Fig. 1은 한 쌍의 플라즈마 형성전극과 한 쌍의 감지전극으로 구성된 플라즈마 홀 센서(Fig.2)의 동작원리를 설명하고 있다. 플라즈마 홀 센서는 1~10torr의 저압 네온기체로 밀봉되어 있으며 플라즈마 형성 전극 양단에 강한 교류 전기장을 가해 교류 네온 플라즈마(AC neon plasma)를 형성하게 된다. 교류 플라즈마내의 전자와 이온은 가해지는 전기장에 의해 서로 다른 방향으로 움직이게 되며, 이온보다 약  $10^5$ 배정도 가벼운 전자가 약  $10^3$ 배정도 빠른 속도를 가지게 된다. 이때 외부 자기장이 가해지게 되면, 전자와 이온은 Lorentz 힘을 받게 되며, 전자가 이온보다 빠르기 때문에 전자가 받는 Lorentz 힘이 이온이 받는 Lorentz 힘보다 크게되어, 전자와 이온의 분리가 이루어지게 된다. 결국, 전자와 이온의 분리로 인해 감지전극 양단에 주어진 자기력과 비례하는 플라즈마 홀 전압이 유기 된다.

### 2.2 플라즈마 홀 전압

Fig. 1과 같은 플라즈마 홀 센서에 외부 자기력이 가해지게 되면, 플라즈마 내 전하를 띤 전자와 이온은 아래와 같은 Lorentz 힘을 받게 된다.

$$F = qv_e B \sin \theta = qv_e B \quad (1)$$

여기서  $q$ 는 전자의 전하를,  $v_e$ 는 전자의 속도를,  $B$ 는 외부 자기력의 자기력을, 그리고  $\theta = \pi/2$ 는 전자의 이동 방향과 자기력 벡터 사이의 각도를 각각 나타낸다.

플라즈마 구동 전극 양단의 높은 전기장에 의해 형성된 전자와 이온은 각각 양극과 음극 쪽으로 움직이게 되고, 플라즈마 홀 효과에 의해 유도된 전기장은 외부 자기력과 평형을 이루게 된다. 따라서, 전하의 움직임에 수직한 방향으로 외

부 자기력이 존재하게 되면, 플라즈마 홀 효과에 의해 유도되는 전기장,  $E_{PHE}$ ,은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$E_{PHE} = v_e B - v_i B \approx v_e B \quad (2)$$

여기서  $E_{PHE}$ 은 플라즈마 홀 효과에 의해 유도된 전압을,  $v_i$ 는 이온의 속도를 각각 나타낸다. 식 (2)에서 보듯이 플라즈마 홀 효과에 의해 유도되는 전기장은 전자와 이온의 움직임에 의해 발생하는 Lorentz힘의 차이에 의해서 나타나게 된다. 그런데, 이온의 속도는 전자의 속도에 비해 약  $10^3$ 배정도 느리기 때문에 식 (2)에서 우리는 이온의 속도를 무시할 수 있다. 그래서 식 (2)는 전자의 속도에 의해서만 유도되는 전기장을 나타내고 있다.

교류 전기장(AC electric field)에 의해 형성된 플라즈마 내에서 전자의 속도는 아래와 같이 나타낼 수가 있다.

$$v_e = \frac{q}{m_e \nu_m} \cdot E_d = \frac{q}{m_e C_m} \cdot \frac{E_d}{p} \quad (3)$$

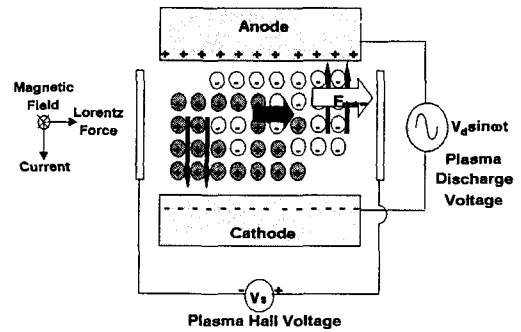


Fig. 1 Working principle of the plasma Hall sensor

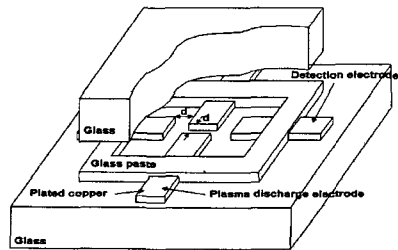


Fig. 2 Perspective view of the plasma Hall sensor

여기서  $m_e$ 는 전자의 질량,  $9.11 \times 10^{-31} \text{Kg}$ 을,  $v_m = C_m p$  [ $\text{sec}^{-1}$ ] 은 충돌 주파수를,  $C_m$ 은  $1.2 \times 10^9$  [ $\text{sec}^{-1} \text{torr}^{-1}$ ]<sup>(4)</sup>의 상수를,  $p$ 는 네온 기체의 압력을, 그리고  $E_d$ 는 플라즈마 구동 전기장을 각각 나타낸다.

수십 MHz대의 플라즈마에서는 전자와 이온의 속도가 플라즈마 구동 주파수의 함수로 나타나게 된다. 따라서, 13.56MHz로 구동되어 형성되는 RF 플라즈마에 있어서는 플라즈마의 속도는 식 (3)의 변형된 형태로 나타난다. 그러나, 낮은 교류 주파수 전기장에 의해 형성된 플라즈마의 경우 거의 DC 플라즈마와 유사한 거동을 보인다. 따라서 낮은 교류 주파수 전기장에 의해 형성된 플라즈마에 대해서 식 (3)으로부터 전자의 속도,  $v_e$ , 를 네온기체 압력,  $p$ ,와 플라즈마 구동 전기장,  $E_d$ ,에 의해서 조절할 수 있다.

플라즈마 홀 전압은 측정 전극간 거리,  $w$ ,를 곱함으로써 해서 구할 수가 있다. 측정 전극 양단에 유도되는 이론적인 플라즈마 홀 전압,  $V_{PHE}$ ,는 식 (2)와 식 (3)으로부터 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{PHE} = \frac{q}{m_e C_m} \cdot \frac{B w E_d}{p} \quad (4)$$

여기서  $q$ ,  $m_e$ ,  $C_m$ 은 플라즈마에 의해서 결정되는 상수이고,  $B$ 는 가해지는 외부 자기장의 크기,  $E_d$ 는 플라즈마 형성 전기장의 크기,  $p$ 는 네온기체의 압력을 그리고  $w$ 는 감지전극간의 거리를 나타낸다. 식 (4)로부터 플라즈마 홀 전압은 플라즈마 구동 전기장이 증가할수록, 네온 기체 압력이 감소할수록, 증가함을 알 수가 있다. 이는 네온 기체 압력이 감소할수록, 구동 전기장이 증가할수록 전자의 속도가 빨라지기 때문이다.

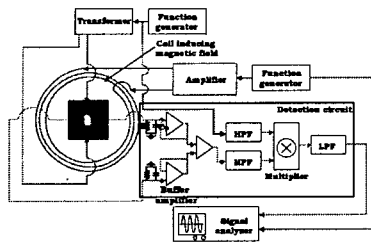


Fig. 3 Experimental apparatus and detection circuit for plasma hall sensor characterization

플라즈마 홀 센서의 출력 전압은 측정 회로의 기생 정전용량(parasitic capacitance)과 버퍼증폭기(buffer amplifier) 입력단의 저항에도 영향을 받는다. Fig. 4는 플라즈마 홀 센서의 물리적 모델(a)과 등가 회로 모델(b)를 나타내는 그림이다. 기생 정전용량과 버퍼증폭기 입력단의 저항을 고려하면 아래와 같은 플라즈마 홀 전압을 얻을 수 있다.

$$V_{buffer} = \left| \frac{C_s}{\frac{1}{j\omega R} + C_s + C_p} \right| \cdot V_{PHE} \quad (5)$$

여기서  $C_s$ 는 플라즈마 차폐효과(Debye shielding)<sup>(5)</sup>에 의해 생기는 sheath에 의한 플라즈마와 측정 전극사이의 정전용량을 나타내고,  $R$ 은 버퍼 앰프 입력단의 저항을,  $\omega$ 는 플라즈마 구동 전기장의 주파수를, 그리고  $C_p$ 는 측정회로의 기생 정전용량을 각각 나타낸다.

식 (4)를 식 (5)에 대입하고, 측정회로의 이득(gain)을 고려하면 아래와 같은 플라즈마 홀 전압을 유도할 수가 있다.

$$V_{out} = (Gain) \left| \frac{C_s}{\frac{1}{j\omega R} + C_s + C_p} \right| \cdot \frac{q B w}{m_e C_m} \cdot \frac{E_d}{p} \quad (6)$$

여기서  $V_{out}$ 은 Fig. 3에서 보듯이 고주파 필터, 콤파스기 그리고 저주파 필터를 거친 최종적인 센서 출력을 나타낸다. 식 (6)으로부터 자기력 민감도,  $V_{out}/B$ ,는 플라즈마 구동 전기력,  $E_d$ 와 네온 기체 압력,  $p$ ,에 의해서 조절될 수 있음을 알 수 있다. 식 (6)은 100kHz 미만의 낮은 주파수의 교류 전기장에 의해서 형성된 플라즈마에 한하여 성립되는 식이며, 본 연구에서도 100kHz 미만의 교류 플라즈마를 사용하여 실험을 수행하였다.

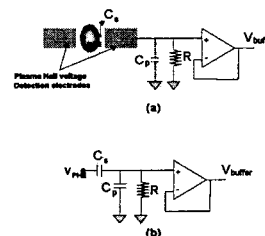


Fig. 4 Buffer amplifier circuit: (a) a physical model; (b) an equivalent circuit model

한편, 교류 플라즈마의 구동 주파수가 수십 MHz가 되는 RF 플라즈마에서는 플라즈마의 드리프트(drift)속도가 플라즈마 구동 주파수에 의존적이므로 식 (6)의 적용이 불가능해 짐에 유의하여야 한다.

### 3. 센서의 설계 및 제조공정

마이크로 플라즈마 홀 센서(Fig. 2)는 전기도금의 방법으로 플라즈마 구동 전극과 홀 효과 측정 전극을 제작하였고, 저압 네온 패키징 공정은 glass frit을 이용하였다. 그리고, 전극들간의 완전한 절연을 위해서 유리 기판을 사용하였다.

전극의 두께는 PR molding의 두께를 고려하여 35 $\mu$ m로 설계하였고, 구동전극과 측정전극의 폭은 1000 $\mu$ m으로 각각 설계하였다. 구동전극간 거리는 1~10torr에서 최소방전 전압을 나타내도록 Pashen's curve<sup>(6)</sup>를 이용하여 500 $\mu$ m로 설계를 하였다. 또한 구동전극에서 측정전극측으로의 방전을 막기 위하여 측정전극을 구동전극으로부터 500 $\mu$ m 떨어지게 설계를 하였다. 플라즈마 홀 센서 전체 크기는 패키징을 고려하여 8mm $\times$ 8mm로 설계하였다.

Fig. 5는 전기도금 및 저압 네온 패키징 공정을 이용한 플라즈마 홀 센서의 제조공정을 도시한다. 기판으로 누설전류가 생기는 것을 막기 위해 517 $\pm$ 17 $\mu$ m 두께의 Pyrex #7740 glass를 기판으로 사용하였다. Fig. 5(a)에서 보듯이 전기도금의 seed layer로 200 $\text{\AA}$ /2000 $\text{\AA}$  두께의 Ti/Cu층을 형성하고, Fig. 5(b)에서는 두꺼운 PR을 코팅한 후 사진작업을 통하여 고단면비의 전기도금 몰드(mold)를 형성하였다. 다음으로 구리를 전기도금한 후 seed layer인 Ti/Cu층을 식각하면 Fig. 5(c)와 같이 전극을 형성할 수가 있다.

네온 기체를 봉입하기 위해서 먼저, glass frit(DGF-5241)을 100 $\mu$ m두께의 폴리머 테이프를 이용하여 1000 $\mu$ m 폭을 가지는 사각 링으로 모양(Fig. 2)으로 채워 넣었다. 다음으로 폴리머 테이프를 제거한 후, 3 $\pm$ 1torr와 7 $\pm$ 1torr의 네온 기체 분위기 속에서 제작된 기판과 덮개유리를 각각 정렬하여 550 $^{\circ}$ C에서 30분간 소성을 하여 Fig. 5(d)와 같이 소자의 제작을 완료하였다. Fig. 6은 제작된 마이크로 플라즈마 홀 센서의 전극부분을 확대한 현미경 사진이다.

### 4. 측정장치 구성 및 실험방법

#### 4.1 실험장치 구성

제작된 플라즈마 홀 센서의 측정을 위해 Fig. 3과 같은 실험장치를 구성하였다. 플라즈마를 형성하기 위한 교류 전기장은 변압기를 통해서 구동 전극으로 공급이 되고, 외부 자기장은 코일에 전류를 흘려 형성하였으며, 상용 자기센서(SS94A1F, Honeywell co.)를 통해 입력 자기장을 측정, 조정하였다. 플라즈마 홀 효과에 의해 유도된 전압은 buffer amplifier(Fig. 4)를 거친 후, 고주파 필터, 컵샘기 그리고 저주파 필터를 거쳐 신호 분석기를 통해서 확인하게 된다. 컵샘기는 저주파의 자기장 신호를 신고 있는 고주파의 플라즈마 구동신호와 고주파의 플라즈마 구동신호 자체를 곱함으로써 저주파의 자기장 신호만을 분리해 내는데 사용된다. Fig. 4의 buffer amplifier에서 측정된 전기적 파라미터들은 Table 1에 정리된 바와 같다.

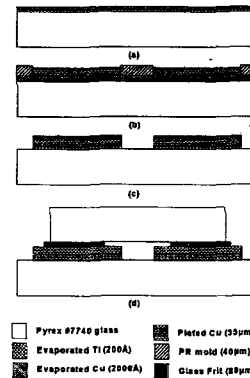


Fig. 5 Fabrication process of the plasma Hall sensor: (a) Ti/Cu seed layer evaporation; (b) Thick PR patterning and Cu plating; (c) PR removal and Ti/Cu seed layer etching; (d) Cover glass bonding in low-pressure environment using glass paste



Fig. 6 Top view of the fabricated plasma Hall sensor

## 4.2 실험방법

플라즈마 홀 센서의 특성을 측정하기 위해 5가지의 변수(자기력 크기와 주파수, 플라즈마 구동 전압 크기와 주파수, 네온 기체 압력)에 대하여 각각 기준조건과 변화범위를 Table 2와 같이 선정하였으며, 각 변수를 기준조건을 중심으로 하나의 변수씩 변화시키면서 그 결과를 측정함으로써, 각각의 변수가 플라즈마 홀 전압에 미치는 영향을 분석하였다. 본 논문에서는 플라즈마를 형성하는 방법 중 플라즈마 디스플레이(PDP)에서 주로 이용하는 교류 전기장을 이용한 방법을 이용하였으므로 그 구동 주파수, 기체 압력, 구동 전압 등이 PDP에서 사용되는 플라즈마 방전조건과 거의 일치하게 된다. 본 연구에서 사용된 플라즈마는 교류 방전(AC discharge)를 이용하여 형성된 것이므로 RF 플라즈마(13.56MHz)와는 그 성질에서 많은 차이를 보이고 있다.

플라즈마는 50kHz 정현파 형태의 교류전압에 의해서 형성하였으며, 외부 자기력은 0~4.7G까지 변화를 시켰다. 외부 자기력은 상용으로 사용되는 Honeywell SS94A1F 모델의 자기센서를 사용하여 측정하였다. SS94A1F의 자기력 민감도와 측정범위는 각각  $25.0 \pm 0.5 \text{ mV/G}$ 와  $\pm 100 \text{ G}$ 이다. Table 2의 플라즈마 구동 전계를 얻기 위해 328Vrms의 기준전압(reference voltage)을 인가하였으며, 328~342Vrms의 범위로 전압을 변화시켰다.

## 5. 실험결과 및 토의

### 5.1 이론적인 예상결과

이론적인 예상결과는 Table 1의 감지회로의 파라미터와 Table 2의 기준조건, 그리고 식 (6)으로부터 구할 수가 있다. 이론적인 자기력 민감도는 기준조건에서  $10.83 \pm 2.09 \text{ mV/G}$ 로 예측되었다.

또한 식 (6)으로부터 플라즈마 홀 전압이 플라즈마 구동 전압에 대해서는 선형적으로, 플라즈마 구동 주파수에 대해서는 일정하게, 그리고 네온 기체 압력에 대해서는 반비례하는 결과를 나타낼 것임을 예상할 수가 있다.

### 5.2 실험결과

Fig. 7은 5Hz 정현파형태의 자기장 입력에 대한 플라즈마 홀 센서의 동적응답을 나타낸다. Fig. 8, 9, 10은 각각 자기장, 자기장 주파수, 플라

**Table 1** Measured circuit parameters of the detection board

Circuit parameters	Measured values
Parasitic capacitance (Cp)	$6.18 \pm 0.8 \text{ pF}$
Buffer input resistance (R)	$22.3 \pm 0.1 \text{ M}\Omega$
Capacitance between the plasma and detection electrode (Cs)	$3.1 \pm 0.1 \text{ fF}$

**Table 2** Five experimental variables and their range for plasma Hall sensor characterization

	Reference condition	Varying range
Magnetic field flux density	$4.7 \pm 0.035 \text{ Gauss}$	0~4.7 Gauss
Magnetic field frequency	5 Hz	0~250 Hz
Plasma driving electric field	656 kV/m	656~684 kV/m
Plasma driving frequency	50 kHz	30~70 kHz
Pressure	$7 \pm 1 \text{ torr}$	$3 \pm 1 \text{ torr}$ , $7 \pm 1 \text{ torr}$

즈마 구동전압, 플라즈마 구동 주파수, 네온 압력 등의 변화에 따른 플라즈마 홀 센서 출력의 이론 예상결과와 측정결과를 비교한 그래프이다. 먼저 Fig. 8(a)는 자기력 크기 변화에 따른 플라즈마 홀 전압의 측정결과이다. 플라즈마 홀 센서는 기준조건(Table 2)에서  $8.87 \pm 0.18 \text{ mV/G}$ 의 자기력 민감도와 4.48%의 비선형성을 보였으며, 이론적인 결과에 비해 약 18%정도 작은 값을 나타내었다.

Fig. 8(b)는 자기력의 주파수 변화에 따른 플라즈마 홀 센서의 출력결과를 나타낸다. Aliasing 효과를 배제할 수 있는 이론적인 응답주파수(cut-off frequency)는 플라즈마 구동주파수, 50kHz, 의 1/4에 해당하는 12.5kHz가 된다. 그러나 LPF의 응답주파수가 480Hz인 감지회로를 사용하였기 때문에 실험에서는 자기력 주파수를 250Hz까지만 변화를 시켰다. Fig. 8(b)에서 보듯이 DC에서 250Hz까지 비교적 일정한 값을 출력하고 있음을 알 수 있으며, 자기장의 주파수는 플라즈마 홀 전압의 크기에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. Fig. 8(b)에서 관찰된 자기력과 플라즈마 홀 전압과의 위상차는 코일로 자기력을 유도하는 과정에서 생긴 시간지연으로 예상된다. 측정된 코일의 저항과 인덕턴스는 각각 65 $\Omega$ 과 25mH이었

다. 코일의 인덕턴스에 의한 이론적인 위상차는  $-90^\circ$ 로 수렴하는 값이지만, 측정된 값은  $-180^\circ$ 로 수렴하고 있다. 이 같은 차이는 고전압의 교류 전기장을 형성하기 위해 제작된 변압기의 코일 성분이 영향을 주었을 것으로 생각된다.

Fig. 9(a)는 플라즈마 구동전압의 변화에 따른 플라즈마 홀 전압을 나타낸다. 이론적인 값에 비해 좀 더 가파른 기울기를 보이고 있다. 이론적인 플라즈마 구동전압,  $V_d$ , 변화에 따른 플라즈마 홀 전압의 변화량은  $0.30 \pm 0.02 \text{ mV/V}_d$ 이지만, 실험을 통해 측정된 변화량은  $2.06 \pm 0.14 \text{ mV/V}_d$ 이다. 실험값이 이론적인 값보다 약 6.8배 큰 값을 보이고 있는데, 이러한 큰 오차는 이론적인 식을 전개할 때 네온 플라즈마 속의 전자가 구동 전압에 선형적으로 변화된다는 가정에서 기인하는 것으로 예상된다. Fig. 9(b)는 플라즈마 구동 주파수의 변화에 따른 플라즈마 홀 전압의 측정결과이다. 기준조건에서 플라즈마 구동 주파수 변화에 따른 실험에 의한 플라즈마 홀 전압은  $47.8 \pm 4.16 \text{ mV}$ 이며, 이론적인 값,  $50.06 \pm 9.85 \text{ mV}$ , 보다 6.1% 작은 값을 보이고 있다.

Fig. 9(b)에서 보듯이 주파수 변화에 따른 실험 결과의 경향은 이론적인 경향에 아주 잘 부합됨을 알 수 있다. 플라즈마의 구동 주파수 변화에 따른 실험은 플라즈마의 구동 주파수를 30kHz에서 70kHz까지 변화시키며 측정을 수행하였는데, 식 (6)에 의하면 회로의 기생 정전용량과 버퍼 입력단의 저항에 의해 플라즈마의 구동 주파수가 높아질수록 플라즈마 홀 전압의 크기가 증가하는 경향을 보일 것을 예상할 수 있지만, 플라즈마의 구동 주파수의 변화범위가 너무 작아서 그 영향이 실험결과에는 잘 나타나지 않았다. 그러나 수십 MHz로 구동되는 RF 플라즈마의 경우에는 플라즈마의 구동 주파수가 플라즈마 내의 이온과 전자의 드리프트(drift) 속도에 직접적으로 영향을 미치므로 본 실험과는 다른 경향을 보일 것으로 생각된다. 본 연구는 수십 kHz대의 교류 전기장에 의해 형성된 교류 플라즈마에 한하고 있으므로 수십 MHz대의 RF 플라즈마의 경우에 대해서는 고려하지 않았다.

마지막으로 Fig. 10은 네온기체 압력변화에 따른 플라즈마 홀 전압의 이론 및 측정결과이다. 정량적으로 그 값을 살펴보면, 기준조건에서 네온 기체 압력이  $7 \pm 1 \text{ torr}$ 일 때 측정된 플라즈마 홀

전압은  $41.7 \pm 2.0 \text{ mV}$ 이었고 이론적인 값,  $50.9 \pm 9.85 \text{ mV}$ , 보다 약 18% 작은 값을 나타낸다. 네온 기체 압력이  $3 \pm 1 \text{ torr}$ 일 때는 측정된 값이  $89.5 \pm 2.0 \text{ mV}$ 이었고, 이론적인 값,  $118.7 \pm 23.26 \text{ mV}$ , 보다 24.6% 작은 값을 나타냈다.  $3 \pm 1 \text{ torr}$ 와  $7 \pm 1 \text{ torr}$  두 압력에 대해서만 측정을 하여 압력 변화에 따른 홀 전압의 확실한 경향을 설명할 수는 없지만, 측정된 값은 이론적인 값에 잘 부합됨을 알 수 있다.

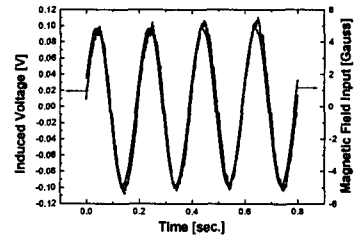


Fig. 7 Measured dynamic response of plasma Hall sensor

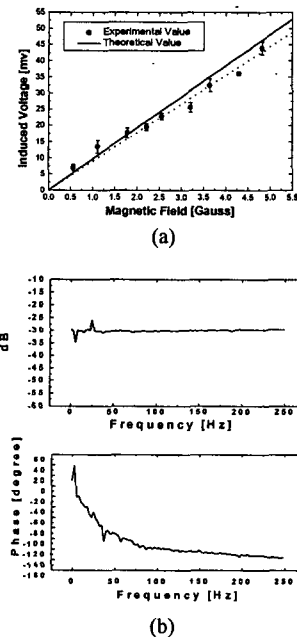


Fig. 8 Theoretical and experimental output of the plasma Hall sensor for magnetic field input for (a) varying magnetic field magnitude, (b) varying magnetic field frequency

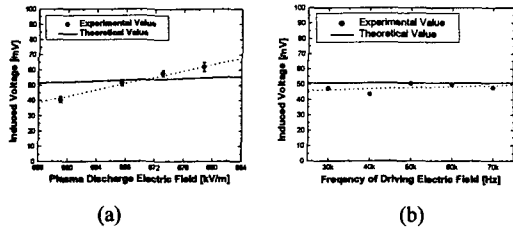


Fig. 9 Theoretical and experimental output of the plasma Hall sensor for (a) varying plasma driving voltage, (b) varying plasma driving frequency

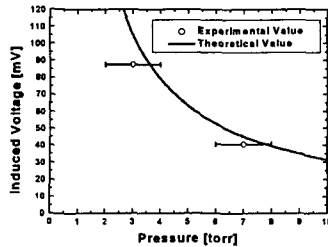


Fig. 10 Theoretical and experimental output of the plasma Hall sensor for varying neon pressure

또한 실험조건 불확실성이 자기력 민감도에 미치는 영향을 평가하기 위해서 불확실성 해석(uncertainty analysis)을 수행하였다. 자기력 민감도에 가장 주된 영향을 미칠 것으로 생각되는 요인은 네온 기체 압력, 기생 정전용량, 버퍼 앰프 입력단의 저항, 그리고 플라즈마와 측정 전극 사이의 정전용량의 불확실성 등이다.

네온 기체 압력, 기생 정전용량, 버퍼 앰프 입력단의 저항, 그리고 플라즈마와 측정 전극 사이의 정전용량 등의 측정 불확실성은 각각,  $\pm 1$ torr,  $\pm 0.8$ pF,  $\pm 0.1$ M $\Omega$  그리고,  $\pm 0.1$ fF이었다.

이들의 측정 불확실성에 의한 자기력 감지 민감도의 불확실성은 각각  $\pm 1.55$ mV/G,  $\pm 1.37$ mV/G,  $\pm 5.48 \times 10^{-4}$ mV/G 그리고  $\pm 0.35$ mV/G이다. 따라서 이러한 불확실성 해석을 바탕으로, 감지회로의 기생 정전용량의 측정 불확실성과 네온기체 압력의 불확실성이 전체 측정결과의 불확실성에 가장 큰 영향을 미침을 확인하였다.

## 6. 결론

본 논문에서는 플라즈마 홀 효과를 이용한 새로운 자기검출법을 최초로 제안하였으며, 이를 이용한 플라즈마 홀 센서를 해석, 설계, 제작하였고, 성능시험을 통하여 그 타당성과 실용성을 입증하였다. 실험에서는 자기력 세기와 주파수, 플라즈마 구동전압과 주파수, 그리고 네온 기체압력 등 총 5개의 주요 변수들에 대해 기준조건을 중심으로 하나의 변수씩 변화를 시킴으로서 플라즈마 홀 전압에 미치는 각 주요 변수의 영향을 분석하였다. 기준조건에서 플라즈마 홀 센서는 이론적인 값에 비해 약 18%정도 작은 값인  $8.87 \pm 0.18$ mV/G의 자기력 민감도를 얻었으며, 본 논문의 결과는 플라즈마 홀 효과를 이용한 타 마이크로 센서 연구로도 응용발전이 가능할 것이다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 일환인 “생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Lenz, J.E., 1990, "A Review of Magnetic Sensors," *Proc. of IEEE*, Vol. 78, No. 6, pp. 973 ~ 989.
- (2) Sugiyama, Y., Itoii, J. and Kanemaru, S., 1993, "Vacuum Magnetic Sensor with Comb- Shaped Field Emitter Arrays," *Tech. Digest of Transducers'93*, pp. 884 ~ 887.
- (3) Franklin, R.N., 1976, *Plasma Phenomena in Gas Discharge*, Oxford University Press.
- (4) Meek, J.M., Graggs, J.D., 1953, *Electrical Breakdown of Gases*, Clarendon Press, Oxford.
- (5) Lichtenberg, L.A. and Allan, J., *Principles of plasma discharges and materials processing*, Wiley, 1994.
- (6) Shim, D.S., 1998, *Discharge Mechanism in a Micro Capacitive Discharge Cell*, Master Thesis, KAIST.