

## 13.56 MHz 유도 결합 플라즈마에서의 강자성체 페라이트 코어의 효과

이원기 · 이경호 · 정진욱\*

한양대학교 전기공학과

### The Effect of Ferrite Cores on the Inductively Coupled Plasma Driven at 13.56 MHz

WonKi Lee, KyeongHyo Lee and ChinWook Chung\*

Dept. of Electrical Engineering, HanYang University, Seoul, Korea

#### ABSTRACT

Due to high permeability of the ferrite cores, the characteristics of the inductively coupled plasma(ICP) are expected to be greatly improved. We investigated the effect of the ferrite cores on conventional inductively coupled plasma. It was observed that the current and voltage in the ICP antenna are slightly decreased and the power transfer efficiency is increased. However, due to eddy current and hysteresis loss, plasma density in the ICP with the ferrite cores is not increased. It seems that the ICP with the ferrite cores at low frequency (~100 kHz) will be greatly improved since the losses at the low frequency can be negligible.

**Key Words :** Inductively coupled plasma, ferrite core, plasma source, power transfer efficiency

#### 1. 서 론

랑뮤어(Langmuir)와 그의 동료들은 1920년 고전류 진공관을 개발하는 동안 플라즈마의 여러 현상들을 처음으로 연구하였으며, 이온화되어 있는 기체를 최초로 플라즈마라고 명명하였다[1].

플라즈마는 집단행동(collective behavior)으로 특징지어지는 중성입자와 전하를 띤 입자로 구성된 준중성(quasi-neutral) 기체로 정의될 수 있는데, 우주를 이루고 있는 물질의 99% 이상이 플라즈마 상태로 존재한다고 알려져 있다. 항성의 내부와 대기, 가스 성운, 성간 물질 등이 모두 플라즈마이며 주변에서 쉽게 볼 수 있는 백열등이나 네온사인 외에도 번개, 오로라, 로켓 추진체 등도 모두 플라즈마이다[2].

플라즈마를 사용하는 공정 기술은 마이크로 전자 소자, 집적 소자 제조의 핵심적인 부분이며, VLSI(very large scale integration) 제조에서 플라즈마를 이용한 박막 증착과 식각이 없다면 현재나 다음 세대의 소자들

을 만들기는 어려울 것이다[1].

일반적인 RF(radio frequency) ICP(Inductive coupled plasma)의 경우 챔버 옆이나 위에 안테나를 설치하고, 안테나 전류에 의한 유도 전기장을 챔버 내부에 생성시켜 플라즈마를 발생시킨다. 기존 ICP의 경우 안테나에 수 kV의 전압이 인가되어 축전 결합에 의한 스퍼터링이 발생하고, 유전체 창에 손상이 가해지게 되어 플라즈마가 오염되는 원인을 제공한다. 또한 안테나 전류가 수 A에서 수십 A로 높아 안테나에서 큰 전력이 소모된다.

플라즈마 발생을 원활히 하고 이러한 문제들을 개선하기 위해 다각도로 연구가 진행되고 있으며, 다양한 형태의 ICP들이 제작되고 있다[2]. 그 중 한 방법이 일반적인 ICP에 페라이트를 사용한 페라이트 ICP이다[3].

#### 2. 실험 방법

##### 2.1. 페라이트

페라이트는 강자성체로 패러데이 유도법칙에 의해 다음과 같은 전기장이 유도된다.

\*E-mail : joykang@hanyang.ac.kr

$$\nabla \times \mathbf{E} = \partial \mathbf{B} / \partial t = -\mu \partial \mathbf{H} / \partial t$$

$$E \propto \omega \mu I_a$$

E: 전기장의 세기, B: 자속 밀도, H: 자기장의 세기,  
 $\omega$ : 주파수,  $\mu$ : 투자율,  $I_a$ : 전류

위 식에서와 같이 유도되는 전기장은 구동주파수와 페라이트의 상대 투자율 그리고 안테나 전류에 비례하는 것을 알 수 있다.

그러나 페라이트의 상대 투자율이 구동주파수와 관계되기 때문에, 상대 투자율이 큰 페라이트에 높은 주파수의 신호를 인가한다고 해서 아주 강력한 전기장이 유도된다고는 볼 수 없다. 페라이트의 상대투자율은 크게 두 종류로 구분할 수 있는데, 낮은 주파수에서 아주 큰 상대투자율을 갖지만 MHz 대역에서 상대투자율이 1% 이하로 급격히 떨어지는 종이 있고, 넓은 주파수 대역에서 일정한 상대투자율을 나타내는 종이 있다.

이러한 페라이트의 특성은 전력원의 구동주파수를 선택하는데 제한으로 작용한다.

### 2.2. 페라이트 ICP 구성

페라이트 ICP는 페라이트의 높은 상대 투자율에 의해 유도되는 전기장을 이용하기 위해 기존 ICP 시스템에 페라이트를 응용한 ICP이다.

페라이트에 코일을 감는 방식에 따라 유도되는 전기장과 자기장의 방향이 바뀌는데, 이는 그림 1에 나타나 있다. 그림 1. (a)는 페라이트에 안테나 코일을 감은 형태이고, (b)는 페라이트와 동심원 형태의 안테나 코일 위에 페라이트를 올려놓은 형태이다. (a)의 경우 유도되는 전기장은 페라이트 내부원을 통과하는 방향이고, (b)의 경우 페라이트와 동심원 형태로 전기장이 유도된다.

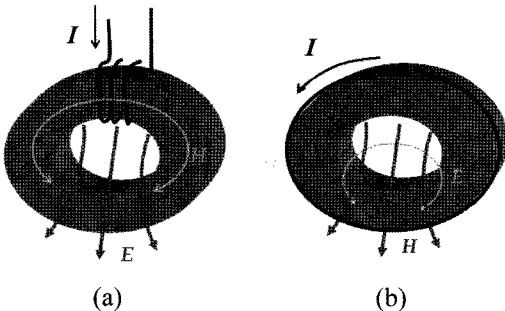


Fig. 1. The configuration of the electric field and magnetic field around the antenna.

### 2.3. 실험장치

그림 2에 실험장치의 개략적인 모습을 나타내었다. 챔버는 지름 200 mm, 높이 150 mm의 파이렉스로 제작

되었다. 챔버 아래 부분을 통하여 가스의 주입과 배기가 이루어진다. Rotary oil pump로 먼지 배기하고 turbo molecular pump로 고진공 상태를 유지한다. 가스는 아르곤을 사용하였고, mass flow controller(MFC)를 이용하여 압력을 조절한다. 13.56 MHz의 RF generator를 사용하여 전력을 공급하고 진공가변축전기를 이용한 임피던스 정합회로를 통해 전력을 안테나로 전달한다.

### 2.4. 안테나

페라이트에 의한 영향을 측정하기 위해 그림 2와 같이 안테나를 설치하였다. 그림 1(b) 안테나 형태보다 그림 1(a)의 안테나 형태가 페라이트의 영향을 크게 보여 준다. 그러나 이번 실험은 구동 주파수 13.56 MHz에서 페라이트의 영향을 보기 위한 것으로, 페라이트의 유무를 제외한 다른 모든 조건을 동일하게 하기 위해 1(b) 형태로 안테나를 제작하였다.

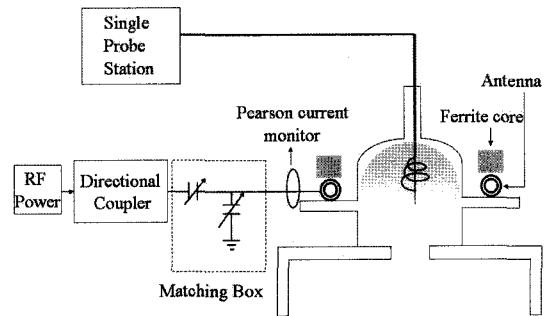


Fig. 2. The schematics of the experimental setup.

안테나는 직경 5 mm의 은도금된 구리관을 사용하였고, 내부로 물을 흘려 냉각시켰다. 페라이트와 안테나가 접촉되는 것을 막기위해 안테나에 테프론 튜브를 씌웠다. 전력을 인가하면 안테나를 따라 전류가 흐르고, 페라이트 주위를 감싸는 형태로 자기장이 유도된다. 이 자기장에 의해  $\theta$  방향으로 유도 전기장이 생기고, 이것은 전자를 가속시켜 방전을 일으키게 된다.

페라이트는 도넛 형태로 외경 242 mm, 내경 175 mm, 높이 20 mm이다. 상대투자율은 넓은 주파수 영역에서 일정한 값을 나타내는 종을 사용했는데, 수백 kHz ~ 수십 MHz에 걸쳐 5.4내외의 일정한 값을 나타내었다.

### 2.5. 전력전달 효율 측정

안테나에 흐르는 전류는 pearson current probe로 측정하였다. 측정된 전류를 통해 전력 전달 효율을 계산하였다.

$$P_{in, no plasma} = I_a^2 R_c \rightarrow R_c = P_{in, no plasma} / I_a^2 \quad (1)$$

$$P_{in, plasma} = I_a^2 R_t \rightarrow R_t = P_{in, plasma} / I_a^2 \quad (2)$$

$$P_p = I_a^2 R_t - I_a^2 R_c \quad (3)$$

$$\eta = \frac{R_t - R_c}{R_t} \times 100 \quad (4)$$

식 (1)의  $I_a$ 는 플라즈마가 없을 때의 안테나 전류고, 식 (2)의  $I_a$ 는 플라즈마가 있을 때의 안테나 전류이다.  $R_c$ 는 입력 전력과 안테나 전류와의 관계에서 구한 저항 값으로, 여기에는 전송선로, 임피던스 정합 회로, 안테나 등 모든 저항 성분이 포함된 값이라 할 수 있다.  $R_t$ 는  $R_c$ 에 플라즈마 저항  $R_p$ 가 더해진 것으로 생각할 수 있다. 따라서 전체 공급 전력과 플라즈마에서 소모되는 전력  $P_p$ 로 전력 전송 효율을 구할 수 있다. 전력과 저항은 비례하므로 저항 비로도 효율을 나타낼 수 있다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

아르곤 가스를 사용하여 압력 1 mTorr에서 실험하였다.

그림 3에서 페라이트가 추가되었을 때 안테나 전류가 감소하는 것을 볼 수 있다. 전류의 감소는 안테나 및 전력 전송 시스템에서 발생하는 전력의 소모를 줄여 전체적인 효율 향상에 기여하게 된다. 실제 전류 감

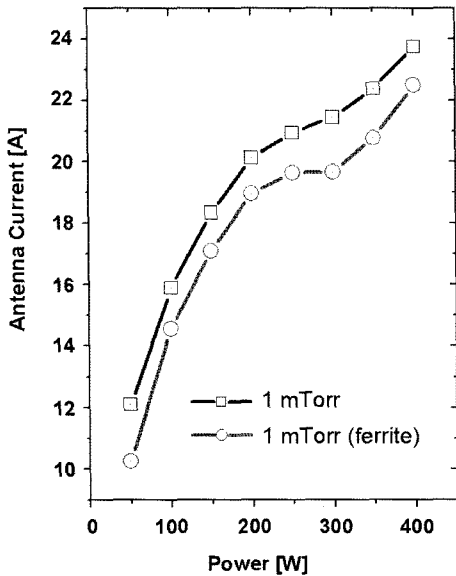


Fig. 3. The antenna current as a function of power at 1 mTorr.

소량은 1~2A 정도로 크지 않았으며, 이는 페라이트 손실이 고주파로 인해 컷고, 상대 투자율 값 자체가 너무 작아 강한 유도 전기장이 생성되지 못했기 때문으로 보인다.

그림 4는 입력 전력 대비 전력 전송 효율을 나타낸 것이다. 낮은 전력에서 페라이트를 사용한 쪽이 효율이

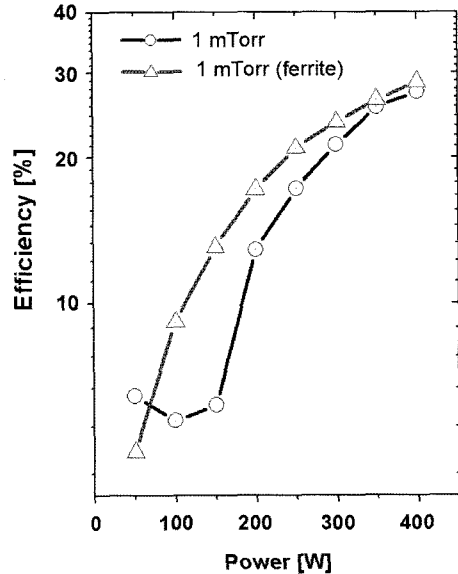


Fig. 4. Power transfer efficiency as a function of power at 1 mTorr.

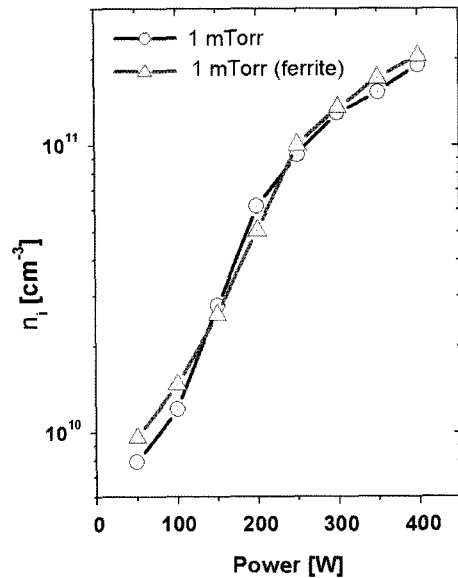


Fig. 5. Plasma density as a function of power at 1 mTorr.

좋지만 전력이 높아질수록 페라이트를 사용하지 않은 쪽과 효율이 비슷해지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 플라즈마 밀도가 높을수록 ICP의 발생 효율이 증가하는데, 파워가 높아지면서 발생 효율이 상승해, 그림 4와 같은 결과가 나왔다고 생각할 수 있다.

그림 5는 파워에 따른 플라즈마 밀도의 변화를 나타낸 것이다. 페라이트를 사용했을 때와 그렇지 않았을 때 거의 차이를 보이지 않았다.

#### 4. 결 론

페라이트 ICP는 기존 ICP에 비해 안테나 전류가 감소하고, 전력 전달 효율이 증가하는 결과를 보였지만, 플라즈마 밀도는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 페라이트에서 발생하는 전력 소모 즉, 와류손과 히스테리시스손에 의한 것이 개선된 전력 전송 효율을 상쇄시킨다는 것을 의미한다. 결국 페라이트를 사용하였을 때 플라즈마 발생 효율은 좋아지지만 그 효과는 크지 않은 것을 볼 수 있다.

그림 1(a)와 같은 안테나 모양을 이용할 수 있도록 챔버를 구성하고, 낮은 주파수에서 1000이 넘는 상대

투자율 값을 가지는 페라이트를 사용할 수 있도록 수백 kHz 대역의 전력원을 사용한다면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각한다. 또한 시스템 구축의 편리성이나 비용적인 측면에서도 낮은 주파수를 이용한 방안이 유리할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

페라이트 ICP에 대한 동기를 준 Dr. V. A. Godyak과 페라이트 구매와 기술적인 도움을 준 뉴파워 플라즈마 여러분들께 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 정진욱, 공정 플라즈마 기초와 응용, 청문각, 2002.
2. Hopwood, J., "Review of inductively coupled plasmas for plasma processing", *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol. 1, pp. 109-116, 1992.
3. Meziani, T., Colpo, P. and Rossi, F., "Design of a magnetic-pole enhanced inductively coupled plasma source", *Plasma Sources Sci. Technol.* Vol. 10, pp. 276-283, 2001.