

# 유도 결합형 열 플라즈마의 특성 연구

신 흥민, 최 경철, 김 원규, 황 기웅  
서울대학교 전기공학과

## A Study on the Characteristics of the Inductively Coupled thermal Plasma

H.M.Sin, K.C.Choi, W.K.Kim, K.W.Whang  
SNU, Dept. of Electrical Eng.

### Abstract

A mathematical model was developed to predict the temperature, the density, and the velocity distribution of an inductively coupled thermal plasma. It was for an atmospheric pressure argon thermal plasma generated by a 4 MHz radio frequency power. It has been shown that the hottest region can be moved toward central region by applying an external magnetic field. Based on the results of the simulation, an ICP ( Inductively Coupled thermal Plasma ) system was constructed and thermal plasma was generated.

### 1. 서론

ICP ( Inductively Coupled thermal Plasma, 유도 결합형 열 플라즈마 : 이하 ICP 라 칭함 )란 플라즈마 변수 특성상 고밀도 (  $10^{13} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ), 고온 (  $4000 \text{ K} \sim 15000 \text{ K}$  ) 상태에 있고, 전기적 특성상 고주파 ( 수백 kHz ~ 수십 MHz ), 대전력 ( 수 ~ 수십 kW ) 이 필요하며 중심부위에서 LTE ( Local Thermodynamic Equilibrium ) 상태에 있고 고휘도의 광특성을 지닌 플라즈마로 정의된다. [1]

1961년 T.B.Reed[2]가 ICP 의 접화 방식으로 교류 아크를 이용한 발생 방식과 유도 코일 내부로 흑연봉을 넣어 가열시켜 발생을 돕는 방식의 2 가지 안을 내놓은 이래로 많은 연구가 행해져 왔으나 발생 장치의 근본적인 구조는 일관되어 왔다. 고주파 열 플라즈마라고도 하는 ICP 는 전원과 플라즈마의 결합 특성상 전극이 없이 시변 자기장에 의해 방전이 유지되므로 H-방전 영역에 속한다. ICP 를 이용한 장치는 가스를 고온으로 가열하는데 널리 쓰이고 있으며 결정성장, 물질의 구형화, 플라즈마 스프레이 코팅 등에 열원으로 사용되기도 하고, 화학 반응을 이용한 물질의 합성, 광화학적 원소 분석에도 이용된다. 특히 전극에 의한 오염의 걱정이 없으므로 순수 물질의 합성에 많이 쓰이고 있다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 이러한 ICP 장치의 설계에 기본이 되는 플라즈마 물성을 예측하였고, 또한 외부 자기장을

인가하는 모델해석을 병행함으로써 기존의 ICP 의 특성과 다른 새로운 온도 특성을 예측하였으며 수치해석에 의해 설계, 제작 된 ICP 장치 및 ICP 의 점화실험결과가 보고될 예정이다.

### 2. ICP 의 수치해석 모델

ICP 의 계산은 그림 1 에 나타난 것과 같이 축대칭을 가정하여 "A" 영역에 대해 10x30 grid 로 나누어 수행되었다.

플라즈마의 수치해석은 운동론적 기술과 유체론적 기술의 두 가지 방식으로 나눌 수 있는데 운동론적 기술에서는 플라즈마 운동 방정식 ( Vlasov 혹은 Fokker-Planck 식 ) 을 풀거나, 입자의 개개의 상호작용을 고려한 입자 모의실험을 통해 해석하며, 유체론적 기술에서는 근사적인 수송계수를 가정하고 MHD 식을 computer 로 푸는 방법이다. 운동론적 기술에서는 입자 상호간의 명확한 상호작용을 계산하기 어려워 역학적 불확실성이 따르며, 유체론적 기술에서는 근사적인 수송계수를 도입함으로써 불성적 불확실성이 따른다. 본 연구에서는 유체론적 기술을 이용하기 위하여 플라즈마 계산은 정상 상태의 MHD ( Magneto Hydro Dynamic ) 식과 2차원의 Maxwell 식을 결합하여 풀었고, sheath 가스는 보통 유체식을 계산함으로써 전체적으로 Two-fluid 모델을 적용하여 해석하였다.

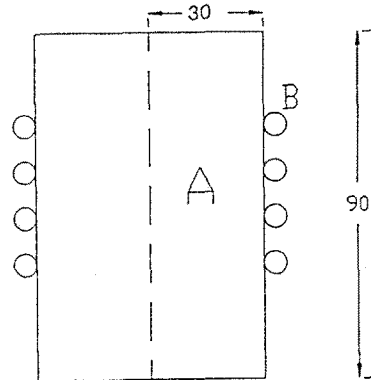


그림 1. ICP 의 계산 영역 모델  
A : plasma 발생 영역 B : R.F. coil

정상상태에서 플라즈마를 지배하는 식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (n\vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{c} \vec{J} \times \vec{B} - \nabla P - \nabla \cdot \vec{\Pi}_p + R_{an} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{n}{\gamma - 1} (\vec{V} \cdot \nabla T) + nT\nabla \cdot \vec{V} = \eta J^2 + \nabla \cdot (\kappa \cdot \nabla T) + \nu \left[ \frac{4}{3} (\nabla \cdot \vec{V})^2 + (\nabla \times \vec{V})^2 \right] - U_{rad} - Q_{an} \quad (3)$$

$$\sigma \vec{E} + \frac{\sigma}{c} \vec{V} \times \vec{B} = \vec{J} \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\omega}{c} \vec{B} \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{J} \quad (6)$$

$$P = nT \quad (7)$$

식 (1)은 연속 방정식, 식 (2)는 운동 방정식, 식 (3)은 에너지 방정식을 나타낸다. 식 (4) ~ (6)은 Maxwell 식을 나타내며, 식 (7)은 상태 방정식을 나타내는 것이다. ICP 는 높은 열을 가지고 있으므로 이것과 관벽과의 작용으로 인하여 관을 파괴하는 경우가 있다. 이의 방지와 함께 플라즈마의 안정화를 위해 관벽 주위로 cold-gas 를 흘려주게 된다. 이 cold-gas 를 나타내는 중성 유체식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (n_n \vec{V}_n) = 0 \quad (8)$$

$$- \nabla P_n - \nabla \cdot \vec{\Pi}_n - R_{an} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{n_n}{\gamma - 1} (\vec{V}_n \cdot \nabla T_n) + n_n T_n \nabla \cdot \vec{V}_n = \nabla \cdot (\kappa_n \cdot \nabla T_n) + \nu \left[ \frac{4}{3} (\nabla \cdot \vec{V}_n)^2 + (\nabla \times \vec{V}_n)^2 \right] + Q_{an} \quad (10)$$

$$P_n = n_n T_n \quad (11)$$

식 (8)은 연속 방정식, 식 (9)는 운동 방정식, 식 (11)은 에너지 방정식 그리고 식 (12)는 상태 방정식을 나타낸다.

앞의 플라즈마와 cold-gas 를 연결시키는 충돌식인  $R_{an}$  과  $Q_{an}$  은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{an} = - n n_n m_n (\vec{V} - \vec{V}_n) \frac{4}{3} Q_{an} \left( \frac{8T}{\pi m_n} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$Q_{an} = 3n \frac{m_n}{m_p} (T - T_n) \nu_{an} \quad (13)$$

위와 같이 모델링한 식을 FDM ( Finite Difference Method ) 의 수치 해석 기법으로 computer code 화하였다.

이 때 유도 코일에 가하는 전원의 주파수는 4 MHz 였고, 3 kW, 대기압에서 계산되었다. Radiation 값은 M.I.Boulos [3] 의 실험 값을 사용하였고, 중성 가스 주입부의 크기는 0.3 cm, 가스는 vortex flow 가 되게 하였다.

### 3. 수치 해석의 결과

앞의 모델을 적용하여 수치 해석한 결과가 그림 2 에서 그림 4 까지 나타나 있다.

그림 2 는 온도 분포를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 축을 벗어난 위치에서 최대 온도를 나타내고 있다. 이러한 결과는 근본적으로 고주파 field 가 skin 효과에 의해 플라즈마 중심부까지 침투해 들어가지 못하여 관벽 주위에 치우쳐서 가열이 일어나기 때문이며 중심부와 관벽 주위에서의 열전도의 조화 및 방전관 벽면 근처에서의 급속한 냉각효과가 합쳐져서 나타나기 때문이다.

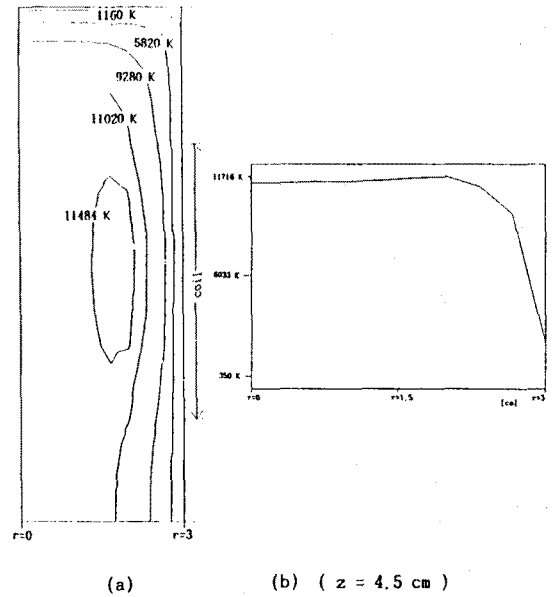


그림 2. ICP 의 온도 분포

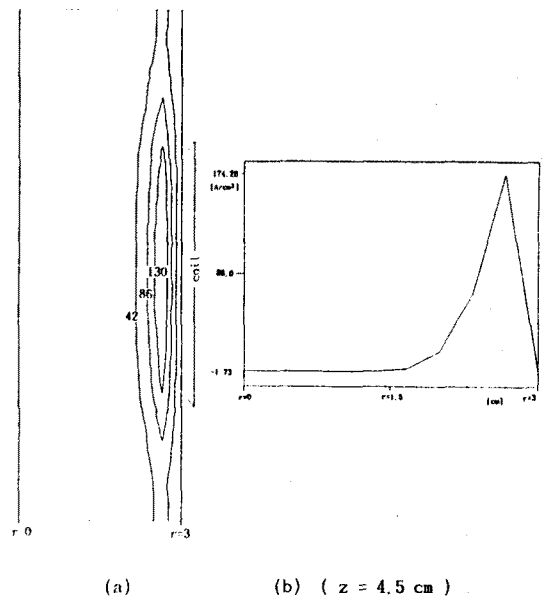


그림 3. ICP 의 유도 전류 분포

그림 3 은 유도 전류 분포를 나타내고 있다. 그림 3 (a) 는 단면도이고 그림 3 (b) 는 중심에서 반경 방향으로 나타낸 모습이다. 그림에서 보듯이 skin 효과에 의해 관벽에 가까운 곳에서 최대값을 가지는 것을 볼 수 있으며 계산된 skin depth 0.5243 cm 와 비교할 수 있다.

4. 소비전력 변화에 따른 온도 변화

소비 전력에 따른 온도 변화의 형태를 그림 4에 나타내었다. 그림 4. (a) 는 6 kW, (b)는 9.7 kW 일 때 온도 분포를 나타낸 것으로 그림 3 ( 3 kW ) 과 같이 비교해 보면 전력이 증가함에 따라 상대적으로 고온부가 넓게 퍼지는 경향을 볼 수 있으며 최대 온도도 조금씩 증가함을 알 수 있다.

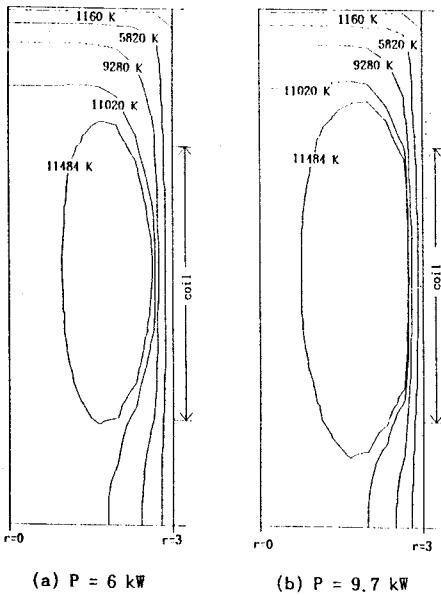


그림 4. 소비전력 변화에 따른 ICP 온도 변화

5. 직류 자기장에 의한 온도 변화

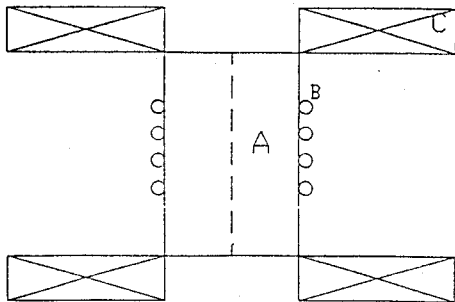


그림 5. 외부 자장 가한 경우 ICP 계산 영역 모델  
A : plasma 발생 영역 B : R.F. coil C : DC magnet

그림 5 와 같이 유도 코일의 윗쪽 및 아랫쪽으로 DC Magnet 을 설치하여 mirror 형태의 자기장을 가할 경우에 자기장이 ICP 의 온도 특성에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과가 그

림 6 에 나타나 있다. 그림 6의 (a)는 중심부에서 자장의 세기가 200 Gauss 일 때, (b)는 500 Gauss 일 때, (c)는 1000 Gauss 일 때 나타나는 온도 분포이다. 외부 자장을 가해 주지 않은 경우인 그림 3 과 비교해 볼 때 최대 온도가 나타나는 부분이 축상으로 이동하였고, 아울러 인가해 주는 외부 자장의 세기가 증가함에 따라 보다 고온의 플라즈마가 얻어짐을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 자기장이 가해지면 자기장의 수직 방향으로 이온의 열전도가 증가하여 생긴 것이다. 수직 방향의 열전도는 직류 자기장의 증가로 인하여 gyration 운동에 의한 충돌의 증가로 증가하게 된다. 이와 같은 온도 분포는 관벽으로의 열의 확산을 방지하여 더욱 효과적인 ICP 를 얻을 수 있음을 의미한다.

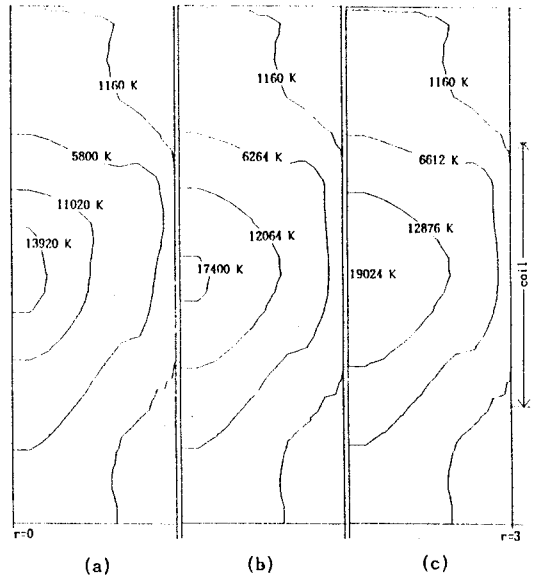


그림 6. 외부 자장 변화에 따른 ICP 온도 변화  
(a) 토치 중심에서 200 G 되도록 인가한 경우  
(b) 토치 중심에서 500 G 되도록 인가한 경우  
(c) 토치 중심에서 1000 G 되도록 인가한 경우

6. 실험 장치

그림 7 에서 보는 것처럼 ICP 토치에서는 코일이 전형적인 금속의 유도 가열에서와 같이 수냉 혹은 공냉의 고온점을 지닌 관을 둘러싸고 있으며 이 관을 통해 플라즈마 형성 기체가 불어 넣어지게 된다. 코일에 고주파 전류가 가해지면 코일 내부에 생기는 자기장에 의해 생성되는 전기장에 의해 방전이 일어나 플라즈마가 형성된다. 관은 가열에 의한 파손을 방지하기 위하여 이중 수냉 석영관으로 제작하였다. 토치 외 반응조, 외부 자장 인가 장치, 진공 펌프, R.F. ( Radio Frequency ) 전원 등을 포함한 실험 장치 전체의 개략도를 그림 8에 나타내었다. R.F. 전원, 토치, 반응조 등의 원활한 냉각을 위해 냉각수를 돌려 수냉시켰다.

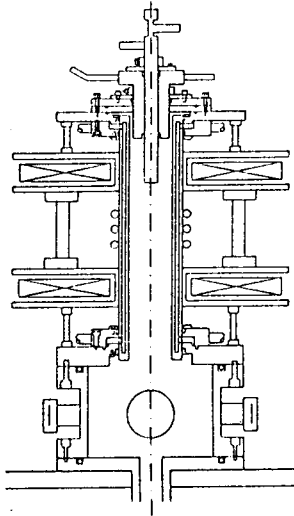


그림 7. ICP 토치 구조도

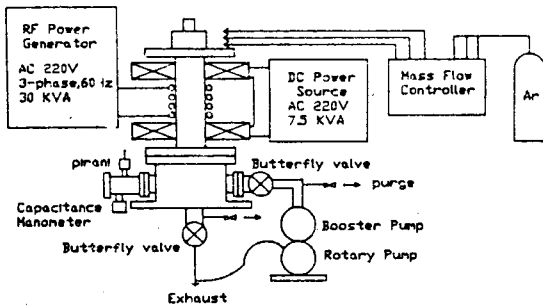


그림 8. ICP 발생 장치의 전체 개략도

7. 실험

ICP 를 점화하는 데는 3가지 방법이 널리 쓰이고 있다. 첫번째 방법은 탄소봉과 같은 도체를 유도 코일 내부로 집어 넣어 가열하여 거기서 나오는 열전자 방출에 의해 점화시키는 방법이다. 두번째는 고주파 전원과 별도로 작류 혹은 교류 고전압 발생원에 의해 감쇄 불꽃 방전으로 점화시키는 방법이다. 세번째 방법은 저압에서 글로우 방전을 이용하여 점화시켜 점차 압력을 상승시켜 열 플라즈마를 형성하는 것으로 본 연구에서는 세번째 방법을 채택하였다. 실험 결과 plate 전압 0.5 [kV], plate 전류 0.2 [A] 에서 글로우 방전 점화가 되었고 ring 방전 형태를 유지하였다. 사진 1 은 plate 전압 3 [kV], plate 전류 2 [A], 압력 5 Torr 에서의 플라즈마 상태를 보여주고 있다.

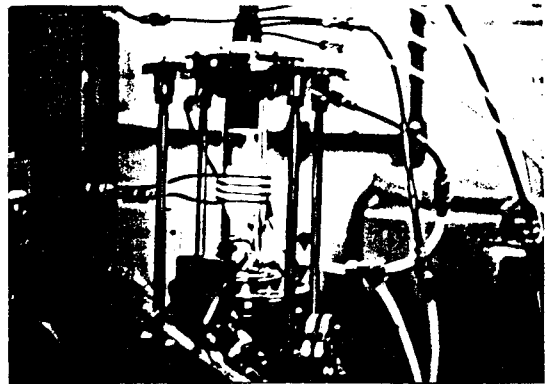


사진 1.  $V_p = 3$  [kV],  $I_p = 2$  [A] 에서 플라즈마 상태

8. 맺음말

본 연구는 ICP 의 모델링과 수치 해석을 통해 ICP 의 기본 물성을 예측했으며, 외부 자장 인가에 의해 원래 ICP 의 기본 특성의 하나인 off-axis 에서 최대온도가 생기는 현상을 자장의 인가에 의해 축상에서 최대온도가 되는 안정화 효과와 함께 보다 높은 효율의 열 플라즈마를 얻을 수 있음을 보였다. 이러한 연구 결과에 따라 설계된 실험 장치가 제작되어 열 플라즈마가 생성되었다.

\* 참고 문헌

- (1) E. Pfender, Gaseous Electronics, Academic Press, Edited by Merle N. Hirsh and H. J. Oskam, 1978, pp. 291~398
- (2) Thomas B. Reed, J. Appl. Phys., Vol. 32, No. 5, 821, 1961
- (3) private communication letter
- (4) J. Szekeley, D. Apelian, Plasma Processing and Synthesis of Materials, North-Holland, New York, 1984
- (5) M. I. Boulos, Pure and Appl. Chem., Vol. 57, No. 9, pp. 1321 ~ 1352, 1985
- (6) R. M. Barnes, N. Kovacic, et. al., Spectrochimica Acta., Vol. 40B, No. 7, pp. 907 ~ 918, 1985
- (7) M. I. Boulos, IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. PS-6, No. 2, pp. 93, June 1978