

## 전송선로를 이용한 플라즈마 전력 전달 연구

박인용 · 이장재 · 김시준 · 이바다 · 김광기 · 염희중 · 유신재<sup>†</sup>

<sup>†</sup>충남대학교 물리학과

### Research on Transmission Line Design for Efficient RF Power Delivery to Plasma

In Yong Park, Jang Jae Lee, Ba Da Lee, Kwang Ki Kim, Hee Jung Yeom and Shin Jae You<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of Physics, Chungnam national university

#### ABSTRACT

In RF plasma processing, when the plasma is generated, there is the difference of impedance between RF generator and plasma source. Its difference is normally reduced by using the matcher and the RF power is transferred efficiently from the power generator to the plasma source. The generated plasma has source impedance that it can be changed during processing by pressure, frequency, density and so on. If the range of source impedance exceeds the matching range of the matcher, it cannot match all value of the impedance. In this research, we studied the elevation mechanism of the RF power delivery efficiency between RF generator to the plasma source by using the transmission line and impedance tuning of the plasma source. We focus on two plasma sources (capacitive coupled plasma (CCP), inductive coupled plasma (ICP)) which is most widely used in industry recently.

**Key Words** : transmission line, plasma source impedance, matching

#### 1. 서 론

현재 반도체 공정에 쓰이는 저온 플라즈마는 공정 조건과 용도에 맞게 다양한 플라즈마 원이 활용되며, 대표적인 플라즈마 원으로는 DC, RF, 마이크로파를 이용한 플라즈마 원이 있다[1-4]. DC 플라즈마는 유전체 공정에 사용하기엔 방전에 어려움이 있고 마이크로파 플라즈마는 시스템을 만들기 위한 제작이 까다롭다. 이러한 단점들을 갖고 있는 다른 플라즈마와는 달리, RF 플라즈마는 유전체 공정에도 사용할 수 있고 시스템을 만들기 위한 제작도 마이크로파보다는 비교적 쉽기에 대부분의 공정에서는 RF 플라즈마가 상대적으로 많이 사용된다[2-4].

그러나 RF 플라즈마를 사용함에 있어서도 한가지 고려해야 할 사항이 있다. 기본적으로 플라즈마 발생기와 플라즈마 원 사이에는 임피던스 차이가 존재하며

이로 인해 파워의 반사파가 생기고, 전력 전달효율이 감소한다. 이 전력전달 효율을 높여주기 위해 산업에서는 통상 플라즈마 발생기와 플라즈마 원 사이에 매처(matcher)를 장착하게 되며, 이를 통해 임피던스 차이를 줄여주고 반사파를 소멸시킨다. 하지만, 플라즈마가 발생되기 전과 후의 임피던스 차이는 다른 값을 갖게 되고 플라즈마가 발생되었을 때 기준값과 달리 다르게 측정되는 소스 임피던스(source impedance)를 가지게 되는데, 이는 가스압력, 주파수, 전력, 밀도 등에 의해 바뀌게 되어 어떤 범위를 가지고 있다고 보게 된다. 이러한 특성은 전기적인 특성을 측정한 기존의 논문 결과를 통해 잘 확인할 수 있다 [6-7]. 이렇게 퍼져 있는 소스 임피던스는 매처가 매칭해줄 수 있는 범위를 넘 어설 수도 있기 때문에 매처를 사용하는 RF 플라즈마 사용에 다소 제한점이 존재하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 RF 전달 시스템의 형태나 방법에 따른 플라즈마의 전력전달 효율을 분석하거나[8,9], 챔버의 임피던스를 정밀하게 측정하여 정합부분을 개선하거나

<sup>†</sup>E-mail : sjyou@cnu.ac.kr

[10], 또는 다른 부속장치를 사용[11-13]하여 소스 임피던스의 변화를 줄이는 등 여러 방법들이 시도되고 있다. 하지만 이러한 연구결과가 제시한 방법들은 시스템 자체를 알고 방법들이 복잡하기 때문에 사용자의 입장에서 소스 임피던스를 원하는 값으로 조절하는 데 다소 어려움이 있다.

이번 연구에서는 매치와 플라즈마 원 사이에 전송선로(transmission line)로 연결하여, 매치에서 바라보는 소스 임피던스의 범위를 줄여주며 매칭을 원활하게 하고 이를 통해 효과적인 전력전송을 할 수 있는 연구를 시도해 본다. 연구는 여러가지 플라즈마 원 중에서 산업체에서 가장 많이 사용하는 두 가지 플라즈마 원(축전 결합 플라즈마(capacitively coupled plasma(CCP)), 유도 결합 플라즈마(inductively coupled plasma(ICP)))에 대해 수행하였으며, 전송선로의 길이에 따른 ‘입력 임피던스 범위의 감소’와 ‘매칭 가능 범위의 이동’이라는 두 가지 목적(조건)을 가지고 진행하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 전송선로(transmission line)

전송선로라 함은 Fig. 1(a)와 같이 신호(signal)선과 접지(ground)선이 가깝게 놓여 있는 것으로서 이 선로는  $\Delta z$  만큼 아주 짧은 선으로 보았을 때 Fig. 1(b)와 같이 직병렬로 코일, 저항, 축전기가 연결되어 있는 것처럼 볼 수 있다[5]. 여기서 각각의 저항(resistance,  $R$ ), 인덕턴스(inductance,  $L$ ), 캐패시턴스(capacitance,  $C$ ), 컨덕턴스(conductance,  $G$ )로 놓으며, 키르히호프 법칙

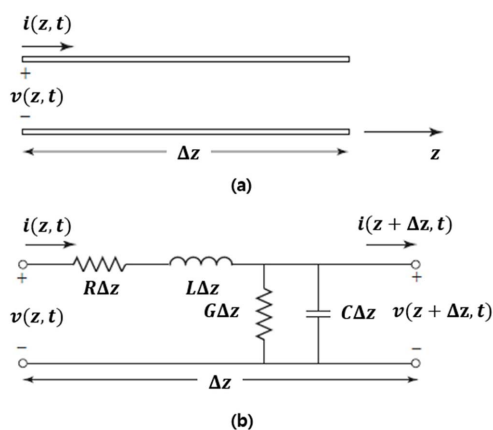


Fig. 1. (a) Schematic diagram of normal transmission line, (b) Lumped-element equivalent circuit modeling for an incremental length of transmission line.

을 이용하여 이 회로의 특성 임피던스(characteristic impedance)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (1)$$

$\omega = 2\pi f$  ( $f$ 는 인가해주는 주파수)이며 선로의 어느 곳에서든지 특성 임피던스를 가지게 된다.

매치와 플라즈마 원을 이 전송선로를 활용하여 연결했다고 가정했을 때, 매치에서는 플라즈마

원과 선로의 임피던스 모두 고려한 입력 임피던스로 보게 된다. 이 입력 임피던스( $Z_{in}$ )는 선로와 장비 사이에서 일어나는 전압과 전류의 투과파와 반사파를 이용해 다음과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$Z_{in}(l) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)} \quad (2)$$

$l$ 은 선로의 길이,  $\beta$ 는  $\omega\sqrt{LC}$ 의 함수이며,  $Z_L$ 은 플라즈마 소스 임피던스이다. 식 (2)를 이용하면 플라즈마 소스 임피던스와 전송선로의 길이, 주파수, 디자인에 따라 입력 임피던스가 바뀔 수 있음을 알 수 있다. 이러한 특성을 활용하여 매치에서 보는 플라즈마 소스 임피던스를 변화시킬 수 있으며, 매치가 매칭이 가능한 영역으로 임피던스를 변환할 수 있다.

### 2.2. 스미스 차트(Smith chart)

스미스 차트는 부하의 임피던스가 아무리 커져도 한 눈에 쉽게 보기 위해 고안된 차트이며 (Fig. 2), 이는 식 (3)에 나타낸 반사계수(reflection coefficient)와 임피던스의 관계식에 의해 그려진 것이다.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3)$$

일반 복소수 좌표계에서는 임피던스 변화 전후의 차이가 클 경우 그 차이를 한 눈에 보기 어려운 점이 있지만, Fig. 2(a)에서 보듯이, 스미스차트는 이를 극좌표로 나타냄으로써 차이가 큰 두 임피던스도 한 눈에 쉽게 볼 수 있게 된다. 만약 어떤 플라즈마 소스 임피던스가 스미스 차트 상에 Fig. 2(b)의 파란색 점처럼 나타나게 되고 이곳에 전송선로를 연결해 입력 임피던스를 보게 되면 반사계수는 일정하게 유지되면서 분홍색 선을 따라 임피던스의 범위를 바꿀 수도 있게 된다.

## 3. 결과 및 논의

이번 연구에서는 아래 두 가지 조건을 모두 만족시

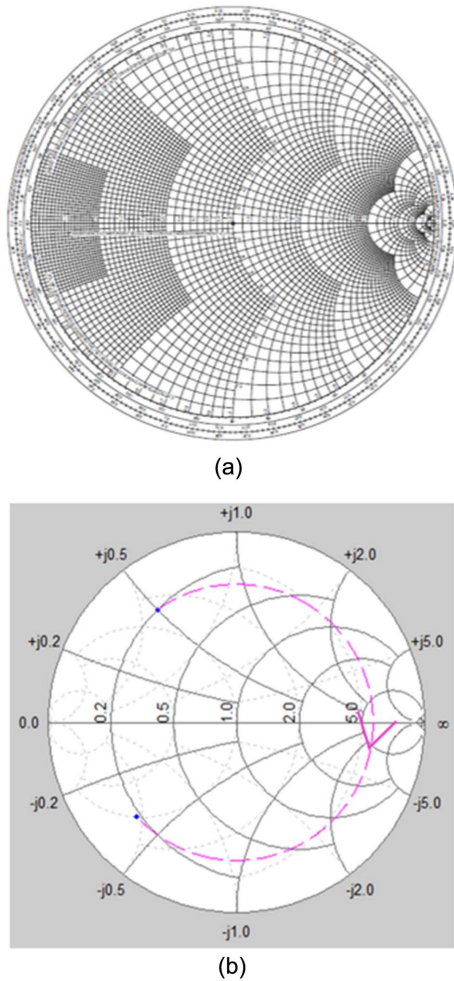


Fig. 2. (a) The Smith chart, (b) Moving of source impedance in Smith chart via the addition of transmission line.

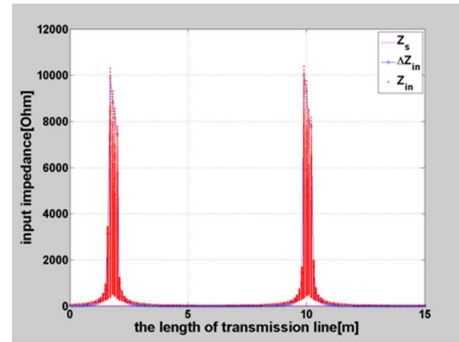
키는 전송선로의 디자인(전송선로의 길이)이라는 목표를 가지고 진행하였다.

- **조건 1** : 전송선로를 연결한 입력 임피던스 범위가 원래의 플라즈마 소스 임피던스 범위보다 줄어드는 조건
- **조건 2** : 입력 임피던스가 매치의 매칭 범위에 포함되는 조건

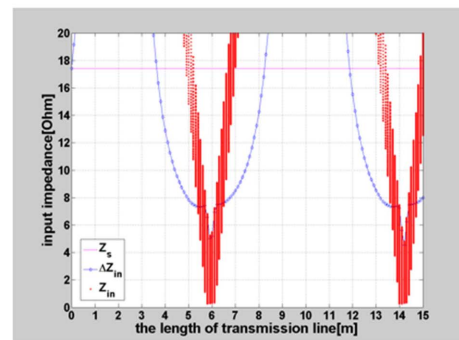
이 두 조건들을 모두 만족시키는 전송선로의 디자인(길이)을 두 플라즈마 원(ICP, CCP)에 대해 연구하였다.

### 3.1. Inductively coupled plasma(ICP)의 경우

ICP 장치의 전기적인 특성 측정으로부터 플라즈마



(a)



(b)

Fig. 3. (a) The input impedance of the ICP source with various lengths of the transmission line, (b) The magnified view of the dotted area in the Fig. 3(a).

소스 임피던스를 구할 수 있으며, 이러한 정보는 실험을 통하지 않고 문헌[6]으로부터 얻을 수 있으며 복수 직교좌표로 표현된 식은 아래와 같다.

$$0.63 + j52.466 \leq Z_s \leq 7.618 + j69.736 \quad (4)$$

식 (4)의 임피던스를 식 (2)에 대입해주고  $f = 13.56$  MHz,  $\beta = 0.3814$  ( $\beta = \omega\sqrt{LC} = \omega Z_0 C$ ,  $Z_0 = 50 \Omega$ : 전송선로의 특성 임피던스,  $C = 89.5$  pF/m : 케이블의 전기용량)의 조건에서, 선로의 길이를 바꿔가면서 입력 임피던스의 범위의 변화를 살펴보면 Fig. 3과 같이 나타난다. Fig. 3에서 보듯이 ICP 플라즈마 소스 임피던스의 범위가 전송선로의 특정 길이 범위 내에서 플라즈마 소스 임피던스 범위보다 작아지는 구간이 존재함을 알 수 있다. 즉, 조건1을 만족시키는 전송선로의 길이는 3.7 ~ 8.2 m임을 확인하였다.

Fig. 4는 다양한 전송선로의 길이에 따른 ICP 플라즈마 소스의 임피던스 범위 (식 (4), 파란색 면적구간)와

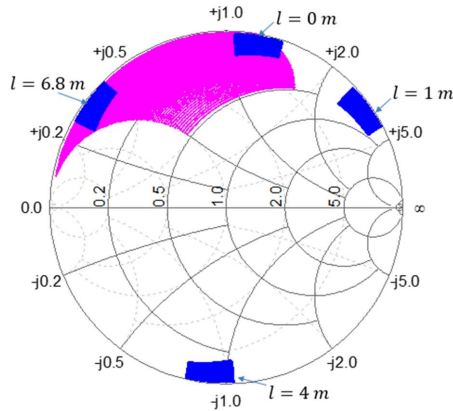


Fig. 4. The input impedance of the ICP source with various lengths of the transmission line in the Smith chart..

두 개의 가변 축전기로 구성되어 있는 ( $C_1 = 0.25 \sim 1.25 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 0.15 \sim 0.55 \text{ nF}$ ) L-type ICP 매치의 매칭 가능한 범위(분홍색 면적구간)를 스미스 차트에 나타낸 그림이다. 즉 파란색 구간이 분홍색으로 표시된 부분 안으로 들어오게 되면 이 매치를 활용하여 매칭을 할 수 있게 된다. 그림에서 보듯이 전송선로의 길이에 따라 입력 임피던스가 변화하는 것을 알 수 있으며, 조건이 맞을 경우 매치의 매칭 가능한 영역에 잘 들어옴을 알 수 있다 (Fig. 3). 매칭 가능한 영역에 해당되는 전송선로 길이는  $0 \sim 0.5 \text{ m}$ 와  $6.8 \sim 8.5 \text{ m}$ 이며 이는 조건 2를 만족시킨다고 할 수 있다. 따라서 조건 1과 2를 동시에 만족시키는 전송선로의 길이는  $6.8 \sim 8.2 \text{ m}$ 임을 도출하였다.

### 3.2. Capacitively coupled plasma (CCP)의 경우

ICP와 마찬가지로 CCP 장치의 전기적인 특성측정으로부터 플라즈마 소스 임피던스를 구할 수 있으며, 이러한 정보는 실험을 통하지 않고 문헌[7]으로부터 얻을 수 있다. 복소 직교좌표로 표현된 식은 아래와 같다.

$$41.56 - j698.846 \leq Z_s \leq 1784.56 + j10.106 \quad (5)$$

ICP에서의 경우와 같이  $f = 13.56 \text{ MHz}$ ,  $\beta = 0.3814$ 를 입력 임피던스 공식(2)에 대입해 전송선로의 길이에 따른 조건 1과 조건 2를 만족하는 선로의 길이를 찾아 보았다. 먼저 Fig. 5에서 보듯이  $0.1 \sim 7.3 \text{ m}$ 까지 입력 임피던스의 범위가 줄어든 것을 볼 수 있으며, 이것은 조건 1을 만족하는 조건이다. Fig. 6은 식 (5)의 소스 임피던스의 범위(파란색)와 실험에서 사용한 매치의

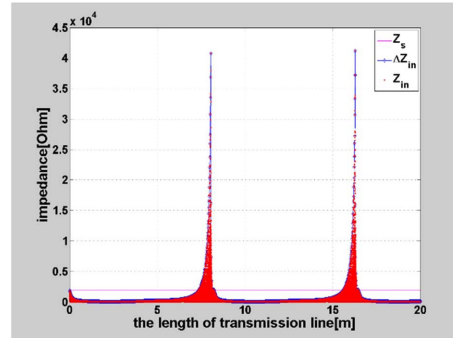


Fig. 5. The input impedance of the CCP source with various lengths of the transmission line.

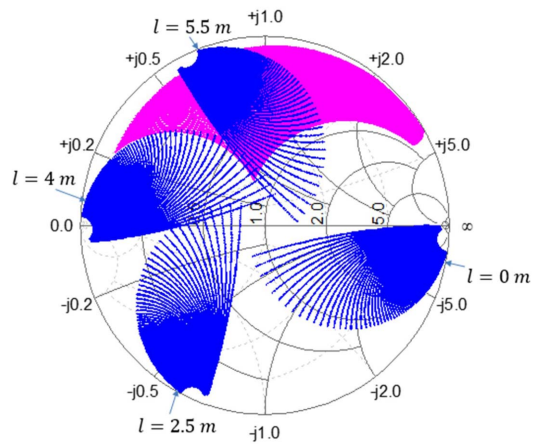


Fig. 6. The input impedance of the CCP source with various lengths of the transmission line in the Smith chart.

매칭 가능한 범위(분홍색)를 나타내는 그림이다. 그림에서 보듯이 CCP의 입력 임피던스에 대해 모두 매칭하는 것은 불가능하다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 CCP의 운용조건이 ICP보다 매우 넓고 이로 인해 매우 다양하고 폭넓은 임피던스를 가지고 있기 때문에 나타나는 현상이다. 하지만 Fig. 6을 살펴보면 전송선로의 길이가  $2.0 \sim 7.5 \text{ m}$  일 때 일부 부분을 제외한 대다수의 조건에서 매칭이 가능한 것을 알 수 있다. 따라서, 두 조건을 만족하는 전송선로의 길이가  $2.0 \sim 7.3 \text{ m}$ 라는 것을 알 수 있다. 앞서 언급했듯이, 소스 임피던스의 범위가 너무 크기 때문에, 모든 경우를 다 매칭할 수 있는 조건은 존재하지 않지만, 그 중에서도 가장 많이 매칭이 가능한 전송선로의 길이는  $5.0 \sim 5.5 \text{ m}$ 임을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전송선로를 이용하여 플라즈마의 전력을 효율적으로 전달될 수 있는 방법에 대해 연구해 보았다. 가장 일반적인 축전 결합 플라즈마(CCP)와 유도 결합 플라즈마(ICP) 두 가지 경우에 대해 전송선로의 길이에 따라 플라즈마 소스 임피던스가 어떻게 변하는지에 대해 알아보았고, 플라즈마 소스 임피던스 범위가 매치의 매칭 가능한 범위를 벗어났을 때, 전송선로를 이용하여 소스 임피던스의 범위를 줄여서 매칭시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. ICP의 경우 전송선로의 길이가 6.8~8.2 m 일 때 이고, CCP의 경우 완벽한 매칭은 불가능하였지만, 5.0 ~ 5.5 m 일 때 가장 많이 매칭이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

적절한 길이의 전송선로를 사용한다면 플라즈마의 전력 전달에 대한 효율을 높일 수 있으리라 여겨진다.

#### 감사의 글

본 연구는 2015년도 충남대학교 교내연구비 지원을 받아 수행하였습니다.

#### 참고문헌

1. Alfred T.H.Chuang, Bojan O. Boskovic, John Robertson, "Freestanding Carbon Nanowalls by Microwave Plasma-enhanced Chemical Vapour Deposition", *Diamond & Related Materials*, Vol. 15, pp. 1103-1106, (2006).
2. Dong Sun Kim, "Characterization and deposition of ZnO thin films by Reactive Magnetron Sputtering using Inductively-Coupled Plasma", *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 10, No.2, pp.89-89 (2011)
3. J. Hopwood, "Review of Inductively coupled Plasmas for Plasma Processing", *Plasma Sources Sci. Technol.* Vol. 1, pp. 109-116, (1992).
4. E. F. Jaeger, L. A. Berry, J. S. Tolliver, and D. B. Batchelor, "Power Deposition in High-Density Inductively Coupled Plasma Tools for Semiconductor Processing", *Phys. Plasmas*, Vol. 2, pp. 2597-2604 (1995)
5. David M. Pozar, *Microwave engineering*, 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons., Inc., pp. 56-67, (2012).
6. V. A. Godyak, R. B. Piejak and B. M. Alexandrovich, "Electrical characteristics and electron heating mechanism of an inductively coupled argon discharge", *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol. 3, pp. 169-176, (1994).
7. V. A. Godyak, R. B. Piejak and B. M. Alexandrovich, "Electrical characteristics of parallel-plate RF discharges in argon", *Plasma Sci. IEEE Trans.*, Vol. 19, pp. 660-676, (1991).
8. V. Brouk and R. Heckman, "Stabilizing RF Generator and Plasma Interactions", 2004 SVC, Proc. of 47<sup>th</sup> Ann. Tech. Conf., pp. 49-54 (2004).
9. Z. F. Ding, G. Y. Yuan, W. Gao and J. C. Sun, "Effects of impedance matching Network on the Discharge Mode Transitions in a Radio-Frequency Inductively Coupled Plasma", *Phys. Plasmas*, Vol. 15, 063506 (2008)
10. Sul Yong Tai, Lee Eui Yong, and Park Sung Jin, "Measurement Technology of Chamber Impedance for RF Matching", *Journal of the Korean Society of Semiconductor Equipment Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 13-17, (2003)
11. Marwan H.Khater and Lawrence J. Overzet, "Stabilizing inductively coupled plasma source impedance and plasma uniformity using a Faraday shield", *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol. 19, pp. 785-792 (2001)
12. Z. Chen, "Impedance Matching for One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma(OAUGDP) Reactors", *Plasma Sci. IEEE Trans.*, Vol. 30, No. 5, pp. 1922-1930, (2002).
13. Yaoxi Wu and M.A.Lieberman, "A Traveling Wave-driven, Inductively Coupled Large Area Plasma Source.", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, pp. 777-779 (1998).

접수일: 2016년 5월 12일, 심사일: 2016년 5월 27일,  
게재확정일: 2016년 6월 10일