

# 플라즈마 컷오프 프로브 소개

<https://doi.org/10.5757/vacmac.4.2.10>

유신재 | 충남대학교

## Introduction to cutoff probe

ShinJae You

In this paper, I present the introduction of cutoff probe in plasma diagnostics. This paper shows the whole progress for the cutoff probe including how to start to develop the cutoff probe in the initial period, what idea has been included during the development, how to evolve the probe during ten years.

## 서론

최근들어 플라즈마 응용의 범위가 확대되고 다양화되면서 플라즈마 변수의 측정은 플라즈마 응용에 없어서는 안 될 핵심이 되고 있다. 플라즈마 변수(전자밀도, 전자온도 등)를 측정하는 탐침으로는 Langmuir 탐침이 가장 일반적으로 사용되며, 그만큼 좋은 특징들을 가지고 있다. 한번에 많은 플라즈마 변수를 측정할 수 있고, scanning을 통한 공간적인 분포도 알 수 있다. 하지만 Langmuir 탐침은 공정 플라즈마에서 사용할 수 없고, Langmuir 탐침에 걸어주는 높은 전위가 플라즈마를 변화시킬 수 있다는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 쉽게 극복할 수 있는 방법은 광학적인 방법들인데, 이러한 방법들은 대개 플라즈마의 공간적 분포를 알 수가 없을 뿐만 아니라, 대부분의 경우 측정되는

값이 절대값이 아닌 상대값을 가진다는 단점이 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 양쪽의 특성을 적절히 사용한, 마이크로파를 이용한 탐침들이 많이 있다. 대표적인 예로 hairpin 탐침, absorption 탐침, 컷오프 탐침 등이 있다. 여기서는 이 중 가장 간단하고 실용성이 있는 컷오프 탐침을 소개하려 한다.

## 플라즈마 내에서의 분산 관계식

컷오프 탐침의 이론적인 근거의 핵심은 바로 플라즈마의 분산 관계식 (dispersion relation)이다. 플라즈마내에 생길 수 있는 약간의 전자장 섭동(E1, B1, perturbation)을 생각하면 Maxwell 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla \times \vec{E}_1 = -\frac{\partial \vec{B}_1}{\partial t} \Rightarrow \nabla \times (\nabla \times \vec{E}_1) = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}_1) - \nabla^2 \vec{E}_1 = -\nabla \times \frac{\partial \vec{B}_1}{\partial t}$$

$$c^2 \nabla \times \vec{B}_1 = \frac{\vec{j}_1}{\epsilon_0} + \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial t} \Rightarrow c^2 \nabla \times \frac{\partial \vec{B}_1}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial \vec{j}_1}{\partial t} + \frac{\partial^2 \vec{E}_1}{\partial t^2}$$

여기에 진행하는 평면파를 대입한 후, 횡파의 결과만 정리해 보면 아래와 같은 식을 도출할 수 있다.

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2 \quad \left( \omega_p = \frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m} \right)$$



### <저자 약력>

유신재 교수는 2005년 카이스트에서 학위를 받고, 카이스트와 포항공대 포스닥, 한국표준과학연구원 선임연구원(우대연구원)을 거쳐 2014년부터 충남대학교 물리학과 조교수로 재직중이다. (sjyou@cnu.ac.kr)

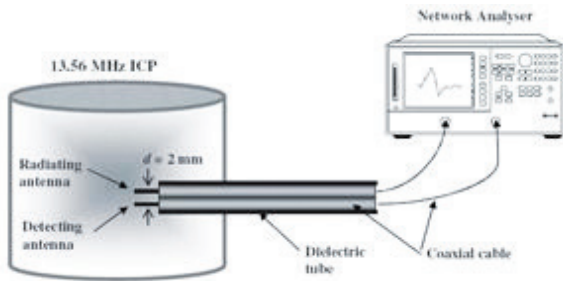
위 식에서 볼 수 있듯이,  $\omega \leq \omega_p$ ,  $\omega > \omega_p$  각각의 컨디션에 따라, 식의 k값이 허수, 실수값을 가지게 된다. 즉,  $\exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)]$  의 파동이  $\omega$ 에 바뀌는 k값에 의해 감쇠파 또는 진행파가 됨을 알 수 있다. 이러한 현상을 플라즈마 컷오프현상이라고 하면 이 원리가 플라즈마 컷오프 프로브의 핵심이라고 할 수 있다.

**컷오프 탐침의 구성**

컷오프 탐침은 위와 같은 파동의 분산 관계식을 이용한 측정 장치이다. 위에서 살펴본 것처럼, 플라즈마 주파수에 비해 낮은 주파수의 파동은 플라즈마를 통과하지 못하고 감쇠되며, 높은 주파수의 파동은 플라즈마에서 잘 진행할 수 있게 된다. 컷오프 탐침은 이름 그대로 플라즈마 주파수보다 낮은 주파수에서 파동이 컷오프 되는 현상을 이용한 탐침이다.

컷오프 탐침을 만드는 데에 있어 가장 핵심적인 장비는 Network analyzer이다. Network analyzer는 주파수를 스캔 하면서 각 주파수에 따른 투과계수, 혹은 반사계수를 알려주는 장비로, 주파수 스캔 기능과 스펙트로미터의 기능을 합쳐놓았다고 볼 수 있다. 이러한 기능을 통해 matching을 하는데 사용하기도 한다.

그림1은 컷오프 탐침의 개략도이다. 탐침은 한쪽 끝이 노출된 동축케이블 두 개로 이루어져 있고, 이 두 개의 동축케이블은 스테인리스 튜브나 세라믹 튜브로 보호되어 진공을 잡고, 플라즈마로의 노출을 막는다. 동축케이블들은 network analyzer의 두 포트에 연결된다. Network analyzer의 포트1에서는 주파수를 변화시키면서 sine 파동이 나와 탐침의 노출된 끝부분(방사안테나)에 전달되고, 이 파동은 플라즈마를 지나 다른 쪽의 노출된 끝부분(탐지안테나)에 도달해서 동축케이블을 통해 network analyzer의 포트2에 전달된다. Network analyzer는 포트2에 도달한



[Fig. 1] Schematics of Cutoff probe

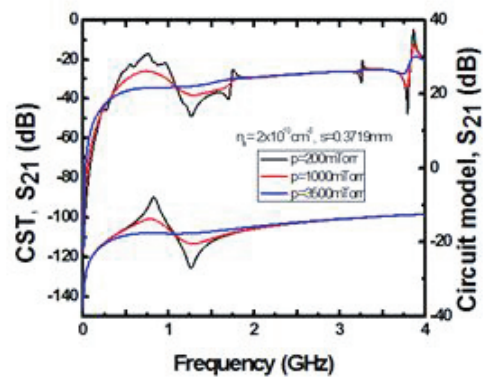
$$n_0 = \frac{\epsilon_0 m}{e^2} \omega_p^2 = 1.24 \times \left( \frac{\omega_p}{2\pi} \right)^2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

파동을 분석해 플라즈마의 투과 계수를 정한다.

투과스펙트럼의 한 예를 그림2에 나타내었다. 빨간색 그래프는 실험을 통해 얻어진 투과스펙트럼이고, 검은색 그래프는 동일한 조건에서 시뮬레이션을 통해 얻어진 그래프이다. 실험과 시뮬레이션에서 동일한 컷오프 주파수를 얻었으며, 컷오프 주파수에서는 파동이 거의 통과하지 못한다. 실험을 통해 구해진 컷오프 주파수는 2.82 GHz 이고, 이에 해당되는 전자밀도는 약  $9.9 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 이다.

**투과스펙트럼의 특성**

그림 2에서 볼 수 있는 것처럼 전자기 시뮬레이션을 통해 실험과 동일한 결과를 얻었고, 컷오프 탐침을 사용하여 전자기학적인 분석을 통해 플라즈마를 진단할 수 있다. 투과스펙트럼은 플라즈마 주파수를 중심으로 플라즈마 주파수보다 낮은 주파수 영역(이하 컷오프존)과 플라즈마 주파수보다 높은 주파수 영역(진행파존)으로 나뉜다. 우선 컷오프존의 경우에는 방사안테나에서 플라즈마 주파수보다 높은 주파수의 파동이 나가게 되며, 이 파동은 분산 관계식에서 언급했듯이 플라즈마를 잘 투과하는 성질을 가진다. 하지만 그림에서 보듯이 일정한 파동이 플라즈마를 통과하여 투과스펙트럼을 보인다. 이것은 처음에 스위스를 통해 전달되는 주파수 투과스펙트럼으로 해석되었으나 (전현수 해석), 훗날 면밀한 검토를 통해 스위스를 통과한 파동이 아닌 evanescent wave효과로 해석되었으며, circuit 모델링을 통해 물리적인 의미도 정확히



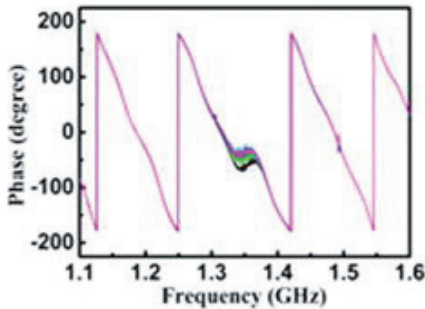
[Fig. 2] Transmission spectrum of Cutoff Probe (experiments(upper) and simulations (lower) for various gas pressure)

해석되었다 (김대웅 해석). 최근해석에 의하면 컷오프탐침 측정의 불확도는 저압에서 이론적으로 1%이하임으로 밝혀졌다. 기존에 많이 사용하는 랑뮤어 탐침의 불확도가 저압에서 30% 정도임(전문가의 경우)을 볼 때, 이는 획기적인 방법이라 아니할 수 없다.

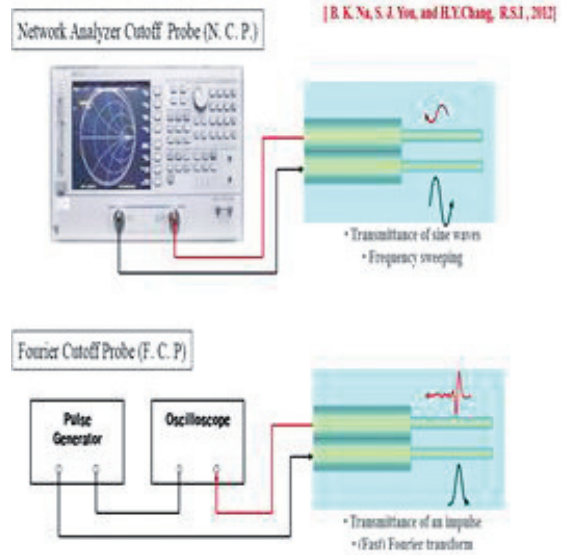
다양한 컷오프탐침 소개

연구가 거듭되면서 다양한 형태의 컷오프탐침이 개발되었다. 개발된 탐침은 보통의 경우 모양은 기존의 것을 유지하되, 구동되는 알고리즘을 바꿔가면서 개발된 것이 특징이면 몇몇의 경우 구조적인 변화를 통해 개발되기도 하였다. 일단 첫 번째로 알고리즘 개선을 통해 개발된 탐침이 phase resolved cutoff probe (그림 3)이다. 이 탐침은 컷오프 현상에서 생기는 갑작스런 유전상수의 변화와 이의 저주파변조를 활용하여 측정하는 원리이다. 이 장치의 특징은 기존에 투과스펙트럼만 사용하여 컷오프 주파수를 찾을 때 생기는 애로사항을 모두 해결했다는 장점이 있으며, 단점으로 값이 상대적으로 비싼 네트워크분석기(벡터형 네트워크분석기)를 사용한다는 것이다.

그 다음 소개할 컷오프 탐침은 매우 빠르게 측정이 가능한 탐침이다. 기존의 일반적인 컷오프 탐침은 측정함에 있어 수초의 시간 분해능을 가진다. 이는 기존의 랑뮤어 탐침과 비슷한 수준이며, 최근 진행하는 빠른 공정의 진단을 위해서는 1,000배 이상 측정 속도를 증가시킬 필요가 있다. 이제 소개할 프리에 컷오프 프로브는 기존의 측정정확도는 유지하면서 측정시간을 10만 배 빠르게 할 수 있는 장치이다. 이렇게 빠른 측정이 가능한 이유는 기존의 네트워크를 활용하여 주파수를 스캔하던 방식대신, 나노펄스를 쏘아주어 주파수 스캔을 하지 않기 때문이다 (그림 4). 이렇게 주파수를 스캔하는데 걸리는 시간이 없



[Fig. 3] Phase Spectrum of Cutoff Probe

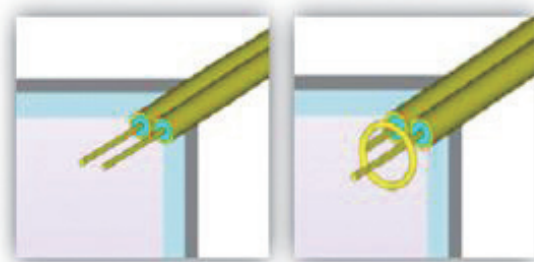


[Fig. 4] Principle of Fourier Cutoff Probe

기에 매우 빠른 속도로 측정이 가능하다. 그리고 측정에 필요한 장치는 이제 네트워크분석기가 아닌 나노펄스출력장치와 스펙트로미터가 된다.

그 밖에 알고리즘 개발을 통해 개발된 컷오프탐침은 reactance cutoff probe, two resonance probe, high pressure cutoff probe, high density cutoff probe, magnetized cutoff probe 등이 있다.

알고리즘 개선/개발이 아닌 하드웨어 개선/개발을 통해 개발된 컷오프 탐침도 역시 존재한다. 대표적으로는 Ring-type Cutoff Probe, Ceramic Shielded Cutoff Probe등이 존재한다. Ring-type 컷오프 탐침은 그림 5에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 Ring-type 컷오프 탐침은 시그널을 받는 탐침이 원형의 Ring으로 되어 있어, 마이크로 웨이브의 수신율을 매우 높이고 공진에 대한 감수성을 높인 특징을 가진다.

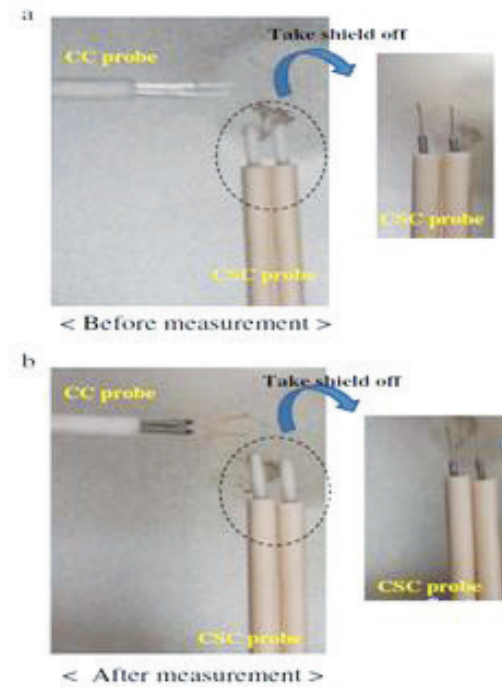


[Fig. 5] Ring type Cutoff Probe(right) and conventional cutoff probe (left, Bar-type)

다음에 소개할 컷오프탐침은 상대적으로 고온 고열에서 측정이 가능한 탐침으로 이름은 Ceramic Shielded Cutoff (CSC) 탐침으로 하였다. CSC 탐침은 기존의 Conventional Cutoff (CC)탐침에 비해 세라믹이 애워싸고 있는 것이 특징이며, 이세라믹에 의해 플라즈마로부터 오는 고엔탈피를 막아주는 것이 핵심이라 하겠다. 그림 7은 제작된 CC탐침과 CSC탐침을 비교한 그림이다. 그림은 측정전후의 탐침 상태를 보여주며, 그림에서 보듯이 CC는 플라즈마에 의해 damage를 많이 받아 보이지만, CSC는 그렇지 않다는 것을 알 수 있다.

**컷오프 탐침의 장단점**

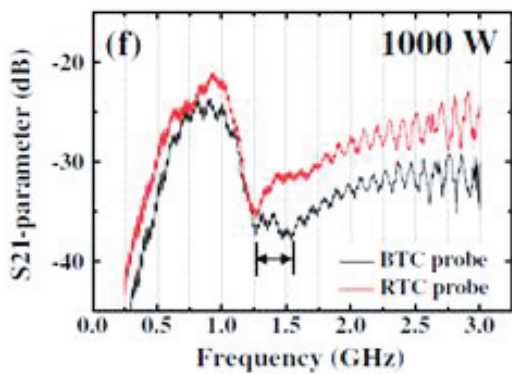
컷오프 탐침을 통한 측정은 Langmuir 탐침의 측정결과와 비교했을 때, 절대값이 거의 정확하게 일치하며, 측정결과와 신뢰도는 랑뮤어탐침에 비해 상당히 높다고 할 수 있다. Langmuir 탐침의 경우에는 공정 플라즈마에서는 사용할 수 없지만, 컷오프 탐침의 경우에는 탐침 끝에 증착이 일어나도 상관없으므로, 공정 플라즈마에서도 사용할 수 있다. 그림 8은 프로브팁에 폴리머 증착이 일어나서 유효면적이 바뀌는 상황에서 측정한 컷오프탐침과 랑뮤어탐침의 결과이다. 그림에서 보듯이 시간에 따라 랑뮤어 프로브의 결과는 감소가 일어나는 것을 알 수있다. 이는 플라즈마는 변화하지 않았지만, 폴리머의 팁증착에 의해 프로브 면적이 감소되어서 나타난 오류적인 결과이다. 하지만 컷오프탐침의 경우 시간에 따라 변화하지 않는 결과를 보여준다. 이는 컷오프 탐침이 DC전류대신 고주파 AC전류를 측정에 활용하기 때문에 생기는 장점이라



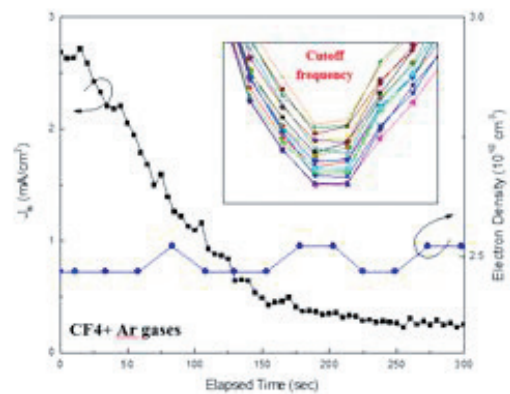
[Fig. 7] Pictures of Conventional Cutoff Probe (CC Probe) and Ceramic Shielded Cutoff Probe(CSC Probe)

고 할 수 있다. 비슷한 이유로 Langmuir 탐침의 경우엔 cleaning이 필요해 번거롭기도 하며 실험시간을 길게 만드는 반면, 컷오프 탐침의 경우엔 cleaning이 필요 없으며 측정이 무척 빠르다. 그리고 컷오프 탐침은 밀리와트 (mW) 수준의 파워를 사용하기 때문에 Langmuir 탐침처럼 플라즈마에 변화를 주지 않는다.

하지만, Langmuir 탐침처럼 많은 플라즈마 변수들을 측정할 수 없다는 단점이 있다. 또한 오메가 존에서 생기



[Fig. 6] Transmission spectrums of two cutoff probes (RTC: ring-type cutoff probe, BTC: bar-type conventional cutoff probe)



[Fig. 8] Measurement result of Cutoff probe (blue) and Langmuir probe (black) in the CF4 mixture gas plasma

는 여러 가지 공명패턴 때문에 컷오프 주파수의 결정이 애매한 경우가 생길 수도 있다. 그리고 탐침 근처 가까운 곳에 금속 구조물이 있거나 챔버가 아주 작은 경우에 이러한 문제는 극대화 된다. 따라서 여러 가지 시스템에 적용하기는 어렵다.

컷오프 탐침은 개발된 지 얼마 되지 않아서 지금도 측정방법의 개발 및 개선이 한창 진행 중이다. 우선 컷오프 탐침을 이용해서 전자밀도 및 전자온도를 측정하는 방법이 개발되었고, 지금도 많은 개선이 이루어지고 있다.

#### | References |

- [1] R.L. Stenzel, Rev. Sci. Instrum. 47, 603 (1976)
- [2] R.B. Piejak, V. A. Godyak, R. Garner, B. M. Alexandrovich and N. Sternberg. J. Appl. Phys. 95, 3785 (2004)
- [3] K. Nakamura, M. Ohata, and H. Sugai. J. Vac. Sci. Technol. A 21. 325 (2003)
- [4] J. H. Kim, D. J. Seong, J. Y. Lim, and K. H. Chung, Appl. Phys. Lett. 83, 23, pp.4725 (2003).
- [5] Francis. F. Chen, *플라즈마/physics and controlled fusion*, Plenum Press, NewYorkandLondon,(1983).
- [6] J. H. Kim, S. C. Choi, Y. H. Shin, K. H. Chung. Rev. Sci. Instrum. 75, 8, pp.2706 (2004).
- [7] H. S. Jeon, B. K. Na, H. Y. Chang, and J. H. Kim, Phys. Of. 플라즈마. 14, 093506 (2007).
- [8] J. H. Kim, Y. H. Shin, K. H. Chung, and Y. S. Yoo. Appl. Phys. Lett. 85, 11, pp.1922 (2004).
- [9] J. H. Kim, S. J. You, D. J. Seong, and Y. H. Shin. Appl. Phys. Lett **91**, 201502 (2007).