

마이크로파 Reflectometry의 산란 신호 응답 특성

Response Characteristics of the Scattered Signal of a Microwave Reflectometry

방 성 근

Sungkeun Baang

요 약

시간 지연이나 위상 지연과 같은 레이더 기법을 기반으로 하는 마이크로파 reflectometry를 비균질 매질의 밀도 특성을 조사하기 위한 비파괴 검사 장치로 응용하기 위한 시스템 특성을 연구하였다. 특히 마이크로파 reflectometry를 플라즈마 연구 분야에 응용하기 시작한 것은 비교적 최근의 일로서 그 활용도가 점차 증가하고 있는데, 마이크로파 reflectometry로 비균질 매질을 조사하기 위해서는 대상에 따른 시스템의 하드웨어 구성이 최적화되어야 하며, 시스템에서의 신호 응답 특성이 이해되어야만 전체적인 시스템 해법을 제공하는 것이 된다. 마이크로파 reflectometry를 이용하여 진단하는 대상인 플라즈마의 특성에 따른 시스템의 구성을 설명하고, 파동수 및 밀도 섭동에 관한 시스템의 특성을 실험적으로 조사하기 위한 장치를 설명하였다. 마이크로파 reflectometry의 신호는 대부분의 전자기파 에너지가 반사되는 지역에서 기인하는 cutoff 신호와 교란 신호와의 상호 작용으로 발생하는 산란 신호로 구성된다. 이 논문에서는 마이크로파 reflectometry의 산란 신호 특성을 실험적 방법으로 조사한 결과를 제시하며, 1차원 파동방정식을 이용한 수치 해석적 결과와 비교 분석하였고, cutoff 신호 특성까지도 비교하였다.

Abstract

The characteristics of microwave reflectometry, which is based on the technologies of FM radar and is applied as a non-invasive method to examine the properties including density distribution of inhomogeneous media, is investigated. The microwave reflectometry system requires not only an optimized system hardware but as well as the understanding of system response from the media under test in order to provide the system solution describing the object under test quantitatively. The introduction of microwave reflectometry especially in the area of applied plasma physics has been relatively new and the number of usage is found to be increasing gradually. The experimental method to characterize the microwave system as a device to examine the properties of plasma is explained. The microwave reflectometry signals consist of the cutoff signals which originate from the region where most of the reflected power comes from and the scattered signals which result as an interaction of the microwave and the density perturbations. This paper describes the experimental results of the scattered signal from the microwave reflectometry, such as the wavenumber dependence and the sensitivity on density perturbation, and the comparison of the characteristics with those from the numerical simulations and those from the cutoff signals.

Key words : Microwave, reflectometry, Channel Characteristic, Nondestructive Test, Plasma

I. 서 론

전자파를 이용한 reflectometry는 1950년대에 시공

「이 논문은 2006년도 한림대학교 교비연구비(HRF-2006-031)에 의하여 연구되었음.」

한림대학교 정보전자공과대학 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Hallym University)

· 논문 번호 : 20080305-026

· 수정완료일자 : 2008년 4월 23일

간 레이더 원리를 적용한 고도계로서 이온층 연구에 처음으로 적용되었다^[1]. 학문적인 응용 분야로 응용 플라즈마 물리 분야에서 처음 연구되기 시작한 것은 1960년대 초기이며, 1980년대 이후에 플라즈마 연구의 성장과 함께 플라즈마 특성 연구를 위한 비접촉, 비파괴 특성 진단 장치로서 활발히 사용되고 있다. 비교적 최근에는 암 진단과 같은 의학 분야나 물질의 특성 변화를 측정하는 산업 분야 등에 새로이 개발 적용되고 있다. 이러한 이유에는 마이크로파 reflectometry 장치의 장치 구성상의 용이성과 대상 물질과의 비접촉, 비간섭성 등을 꼽을 수 있다.

마이크로파 reflectometry는 입사하는 평면 전자기파의 주파수가 비균질 매질의 밀도 변화에 따른 차단 주파수와 일치할 때 그룹 전달 속도가 0이 되면서 반사가 일어나며, 반사된 전자기파로부터 시간적인 지연량이나 위상의 변화량을 측정함으로써 밀도 분포나 국지적인 섭동량을 구할 수 있는 방법이다. 이러한 마이크로파 reflectometry는 단순한 구성의 시스템으로도 주파수를 변화시키면 넓은 범위의 플라즈마의 밀도를 분석할 수 있으며, 기존에 사용되고 있는 탐침형 플라즈마 측정 장치와는 달리 완전 비접촉식, 비파괴, 비간섭 측정이 가능하다는 장점을 갖는다.

1980년대 후반 이후로 플라즈마 응용 연구 분야에 적용되기 시작하면서 장치 특성에 대한 기초 연구가 시작되어 왔다. 선행 연구에서 나타난 바와 같이 반사되는 신호는 매우 높은 공간적 분해능을 가질 수 있다는 가능성을 보인다^[3]. 마이크로파 reflectometry를 응용 플라즈마 연구 분야에 적용한 경우, 반사되는 차단 주파수(cut-off frequency)는 자기장의 존재 여부에 따라서 식 (1)과 같이 정리할 수 있다^[4].

$$\omega_{O,P} = \left(\frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2}$$

$$\omega_{X,R/L} = \frac{1}{2} \left[(\omega_c^2 + 4\omega_p^2)^{1/2} \pm \omega_c \right] \quad (1)$$

여기서 $\omega_{O,P}$ 는 자기장의 영향이 없을 때의 차단 주파수로 플라즈마 자연 진동수와 같으며, $\omega_{X,R}$ 과 $\omega_{X,L}$ 은 자기장의 영향을 받을 때의 차단 주파수로서 각각 right-handed circularly polarized wave와 left-handed circularly polarized wave의 차단 주파수이다. 또

한, $\omega_c = eB/m_e$ 은 전자의 cyclotron 주파수로서, e 는 전자의 전하, m_e 는 전자의 질량, B 는 자속 밀도, ϵ_0 는 자유 공간의 유전율, n 은 국지 플라즈마 밀도이다.

위 식에서 보듯이, 응용 플라즈마 연구 분야에서는 플라즈마를 제어하기 위해서 자장이 사용되는 경우가 많으며, 마이크로파 reflectometry에 사용되는 주파수는 플라즈마 밀도 및 자장의 영향을 고려하여 결정된다.

하지만, 마이크로파 reflectometry를 이용하여 시험 객체를 정량적으로 기술하기 위해서는 시스템 신호의 밀도 섭동 파동수에 대한 반응 특성이나 밀도 변화에 대한 민감도 등에 대한 응답 특성 등이 알려져야 하는데, 기존에 적용하던 일차원적 근사법은 실험적 결과와 상이한 결과를 보인다^[5].

따라서 본 연구는 용이하게 제어할 수 있는 실험실 플라즈마에 마이크로파 reflectometry를 적용하여 reflectometry의 신호 특성을 정량적으로 파악하고자 한다. 마이크로파 reflectometry의 신호는 대부분의 에너지가 반사되는 지역에서 기인하는 cutoff 신호와 교란 신호와의 상호 작용으로 발생하는 산란 신호로 구성된다. 앞선 논문^[2]에서 cutoff 신호의 응답 특성을 기술하였다. 이번 논문에서는 마이크로파 reflectometry의 산란 신호의 특성을 실험적 방법으로 조사한 결과를 기술한다.

2장에서는 실험적인 연구 방법을 기술하고, 3장에서는 실험적인 마이크로파 reflectometry의 산란 신호 응답 특성을 기술하며, 결론에서는 수치 해석적 결과와의 비교 분석, cutoff 신호 특성과의 비교 분석 및 앞으로 수행되어야 할 과제를 제시한다.

II. 연구 방법

마이크로파 reflectometry를 응용 플라즈마 물리 분야에 적용할 경우, 요구되는 신호 응답 특성을 실험적으로 조사하기 위하여 저밀도의 실험실 플라즈마 발생 장치를 이용하였다.

그림 1에 보인 바와 같은 지름 60 cm, 길이 88 cm의 플라즈마 발생 장치는 플라즈마의 밀도 분포와 섭동량을 가변시킬 수 있으며, 변화 가능한 플라즈마 밀도와 이에 상응하는 마이크로파 주파수 범위 그리고 밀도 섭동 주파수 범위 등을 표 1에 기술하였다. 이 장치에서 발생하는 플라즈마의 밀도는

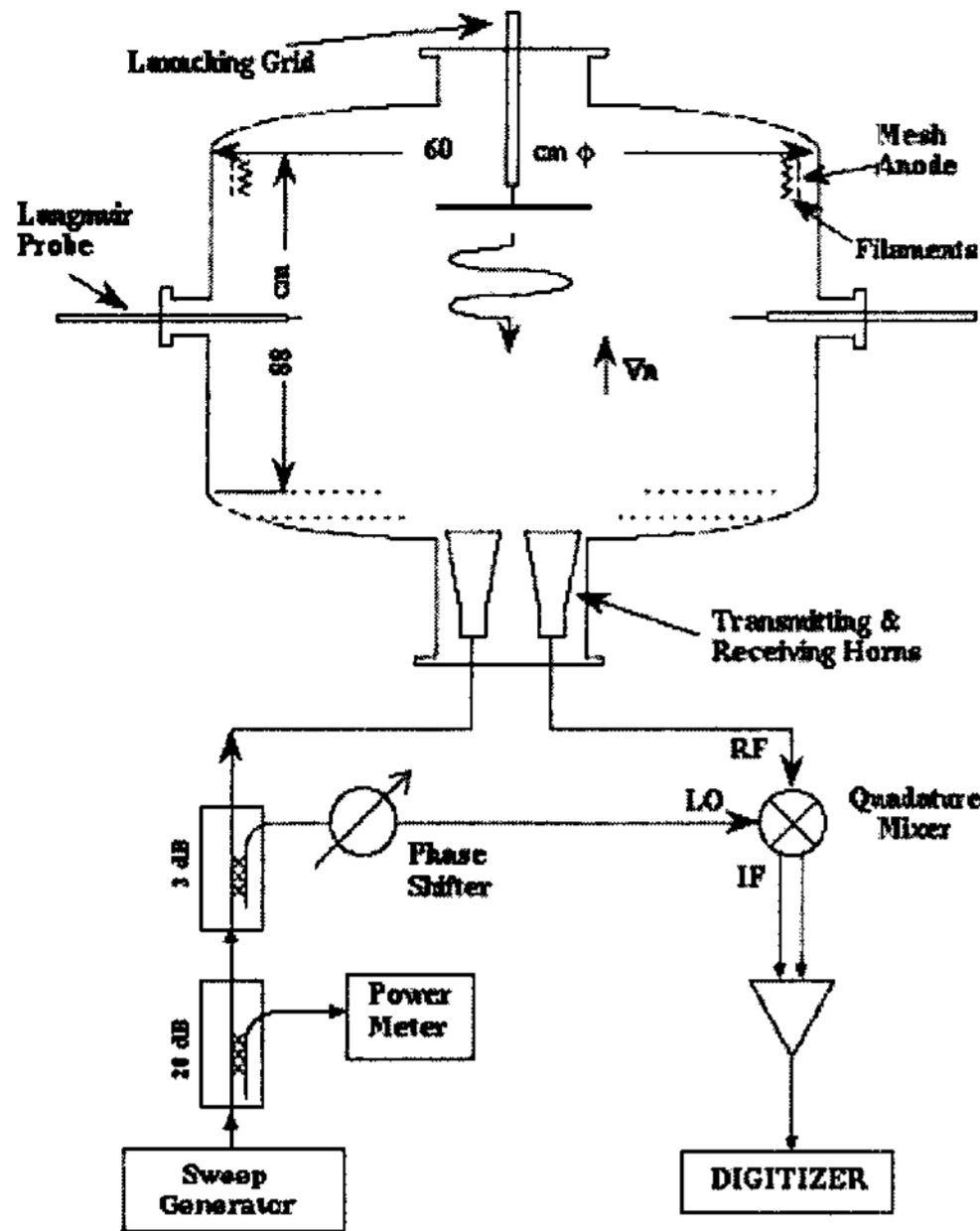


그림 1. 마이크로파 reflectometry의 산란 신호 특성 측정을 위한 실험실 연구 장치 구성

Fig. 1. Laboratory experimental arrangement for study of scattered signal from the microwave reflectometry.

$1 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 의 분포를 갖고, 식 (1)에 의하여 결정되는 마이크로파 reflectometry의 주파수는 플라즈마로부터 반사가 일어날 수 있는 3~6 GHz 영역의 주파수가 사용되었다. 플라즈마 밀도 섭동은 stainless steel mesh를 사용하여 ion acoustic wave를 발생시키는 방법을 사용하였는데, ion acoustic wave의 전파속도가 $\sim 2 \times 10^5 \text{ cm/s}$ 이므로, 이 장치에서 사용될 수 있는 섭동 주파수는 댐핑 특성 등을 고려하여 약 20~100 kHz의 영역을 갖는다. 특히 산란 신호의 특성 연구를 위하여 플라즈마 발생 장치를 수정하여, cutoff 신호의 연구 시와 비교할 때 마이크로파 reflectometry 시스템을 저밀도 영역으로 낮추어 설치하여 플라즈마와 마이크로파와의 상호 작용 영역을 약 300 % 확장하였다.

자기장의 영향을 받지 않은 O-mode 마이크로파 reflectometry 시스템을 적용하여 실험하였으며, monostatic system, bistatic system, quadrature system 등의 마이크로파 reflectometer 시스템을 적용하였다. 이때, 사용된 horn 안테나 변수를 표 2에 기술하였다.

실험적으로 얻은 결과를 수치 해석적인 결과와

표 1. 마이크로파 reflectometry의 실험적 연구를 위하여 사용된 플라즈마, 밀도 섭동, reflectometry 장치의 변수값들

Table 1. Parameters for the experimental study of microwave reflectometry.

Plasma parameters	
Plasma chamber	60 cm dia.×80 cm long
Pulse length	2.0 ~ 4.0 ms
Ion species	Argon, Xenon
Electron density n_0	$1 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
Electron temperature T_e	1~2 eV
Ion acoustic wave parameters	
Grid(longitudinal)	$8.5 \times 13 \text{ cm}$
Ion wave frequency	20~100 kHz ($\lambda = 2.5 \sim 12 \text{ cm}$)
Ion wave damping frequency	20~50 kHz
reflectometry microwave source	
Microwave frequency	3~6 GHz ($\lambda_0 = 5 \sim 10 \text{ cm}$)
Power	<50 mW

비교하기 위하여 마이크로파와 플라즈마의 상호 작용을 1차원 full wave 방정식으로 모델링 하였다^[5].

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + N^2 k_0^2 E = 0 \tag{2}$$

여기서 N 은 반사 지수로 $N(x) = (1 - f_{pe}^2 / f_{rf}^2)^{1/2}$ 이며, k_0 는 입사하는 마이크로파의 자유 공간에서의 파동수이다. f_{pe} 는 국지 플라즈마 주파수로서 플라즈마 밀도의 함수이며, f_{rf} 는 입사하는 마이크로파의 주파수이다. 밀도 분포와 섭동 주파수를 변화시키며 full wave 방정식으로부터 위상 변화를 계산하여 실험적인 측정치와 비교하였다.

III. 산란 신호 응답 특성

마이크로파 reflectometer의 신호는 반사된 RF신호와 reference 신호인 LO 신호가 mixer에서 결합되면서 국지적인 섭동 신호만 IF 신호로 남는다. 마이크로파 reflectometry의 IF 신호는 대부분의 에너지가 반사되는 지역에서 기인하는 cutoff 신호와 교란 신호와의 상호 작용으로 발생하는 산란 신호로 구성된다. 이번 논문에서는 밀도 섭동과 마이크로파와의

표 2. 마이크로파 reflectometry의 실험적 측정을 위하여 사용된 reflectometry 장치의 horn 안테나 변수값들

Table 2. Horn antenna parameters for the microware reflectometry system.

	Monostatic system horn	Bistatic system horn
Horn aperture ($a \times b$)	22×16 cm (8.6"×6.3")	10×8.2 cm (3.9"×3.2")
Horn length L_0	33 cm(13")	18 cm(7.1")
Gaussian beam parameter at 4 GHz		
3 dB beamwidth	12.2×12.6°	23.3×25.5°
Beam waist w_0	~6.8×6.4 cm	~3.2×2.7 cm
Beam waist location	~25 cm behind aperture	~6 cm behind aperture

상호 작용으로 발생하는 산란 신호의 특성을 정량적으로 조사하였다.

이러한 IF 산란 신호를 그림 2에 예시하였다. 이때, 밀도 교란 신호는 RF 신호의 cutoff 지역보다 높은 밀도 지역에서 보내지며, 교란 신호와 관측된 IF 신호와의 시간 지연은 교란 신호와 마이크로파와의 상호 작용 지역까지의 전파 시간을 의미한다. 그림에서 산란 신호의 위치는 실선으로 대략적으로 표시되었는데, 산란 신호의 시간 지연이 밀도 섭동 신호의 파수가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Bragg 산란 현상과 일치하는 것으로, cutoff 신호의 특성에서는 볼 수 없는 특성이다. 이러한 산란 신호는 cutoff 신호와 경쟁하며 상호 영향을 미치게 되는데, cutoff 신호와 잘 분리될 수 있는 조건을 충족할 때 관측할 수 있다.

이러한 조건의 변화를 그림 3에 예시하였다. 그림 3은 플라즈마 밀도 분포를 탐침법과 간섭계를 이용하여 얻은 결과로서, cutoff 신호의 특성 연구 시와 비교하여 반응 영역이 약 300 % 정도로 확대되었으며, 이로 인하여 두 신호가 분리되어 경쟁할 수 있는 시간 및 공간적 영역이 확보된 것을 알 수 있다.

마이크로파 reflectometry 시스템의 IF 신호는 quadrature 시스템인 경우, 식 (3)과 같이 sine/ cosine 함수로 표시할 수 있으며,

$$\begin{aligned} s_1(t) &= A(t) \sin(\phi(t)) \\ s_2(t) &= A(t) \cos(\phi(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

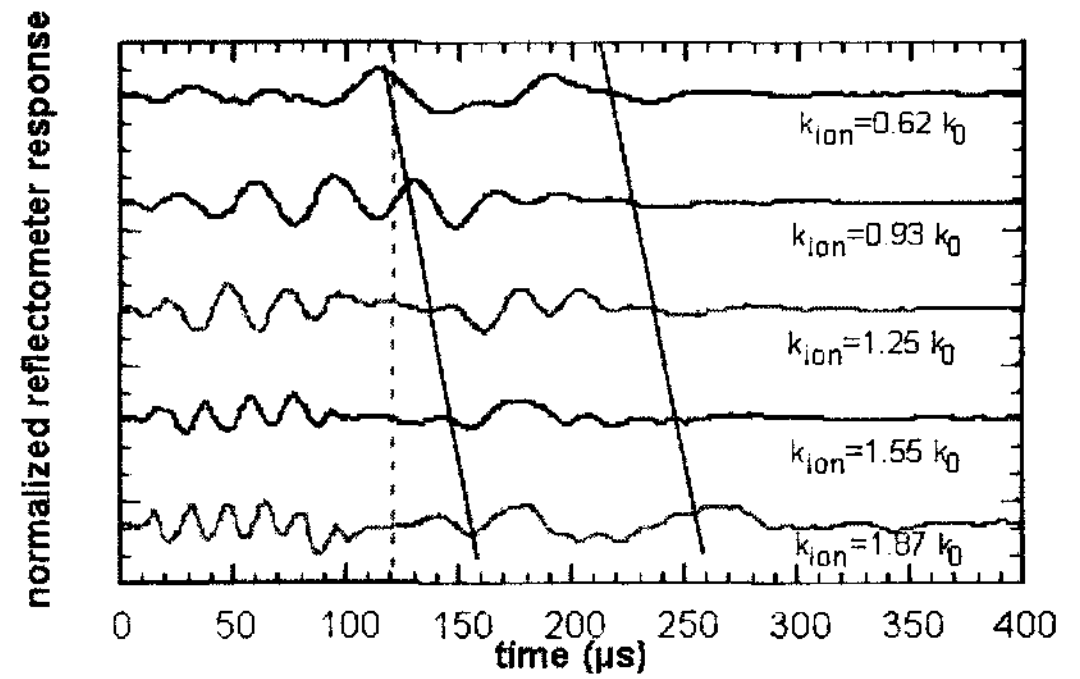
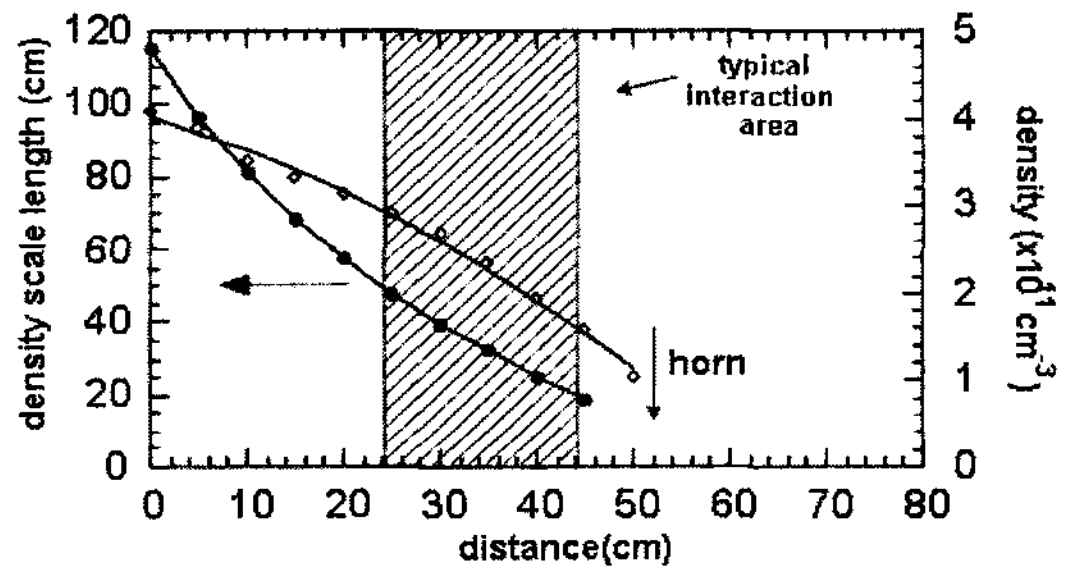
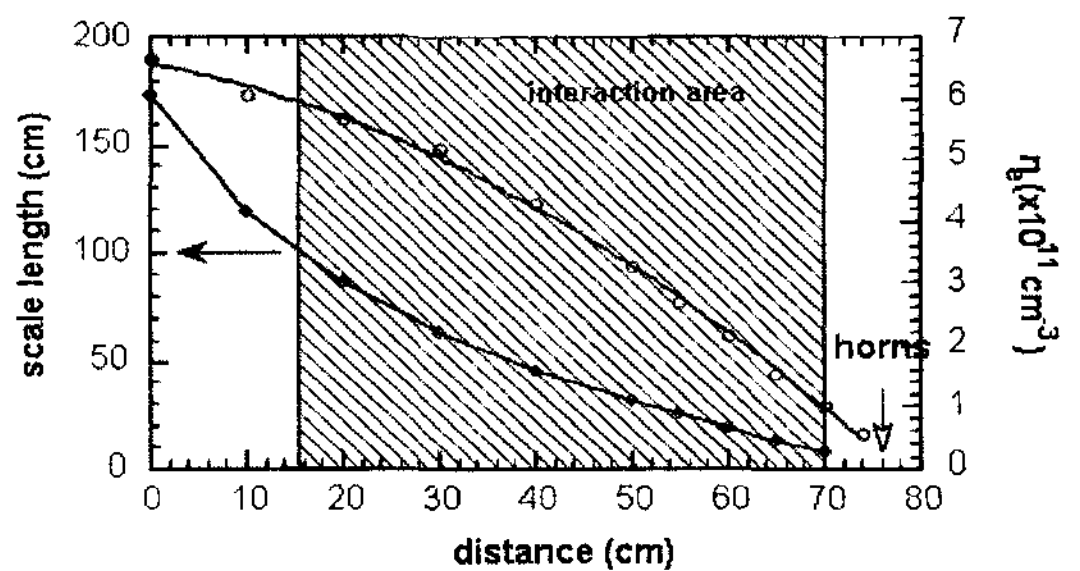


그림 2. 측정된 마이크로파 reflectometry의 산란 신호들

Fig. 2. Measured scattered signals from a microwave reflectometry system.



(a) cutoff 신호 연구시의 밀도 분포
(a) Previous cutoff signal investigation



(b) 산란 신호 연구를 위하여 시스템을 보정한 후의 밀도 분포
(b) After the modification for scattered signal investigation

그림 3. 실험실 플라즈마 밀도 분포 및 마이크로파와의 상호작용 영역의 비교

Fig. 3. Density profiles and scale length comparisons.

여기서 진폭 $A(t)$ 와 위상각 $\phi(t)$ 는 각각 아래와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} A(t) &= \sqrt{s_1(t)^2 + s_2(t)^2} \\ \phi(t) &= \arctan(s_1(t)/s_2(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)로 나타낼 수 있는 IF 신호의 진폭과 위상각의 밀도 섭동 수준 값에 대한 반응 특성을 실험적으로 얻은 결과가 그림 4이다. 마이크로파 reflectometry 시스템의 산란 신호의 진폭 변동이나 위상각의 변동의 크기는 이상적으로 밀도 섭동의 크기와 비례하여 커진다는 것을 확인할 수 있다.

마이크로파 reflectometry IF 신호의 진폭과 위상각의 밀도 섭동의 파동수에 대한 민감도를 실험적으로 얻은 결과가 그림 5이다. 여기서 섭동 신호의 파동수는 입사된 RF 신호의 자유 공간에서의 파동수로 정규화된 값이다. 이 결과는 파동수가 작은 경우, 같은 정도의 밀도 섭동 레벨로부터 기인하는 IF 신호의 크기가 파동수가 큰 경우의 IF 신호보다 크다는 것을 알 수 있으며, 섭동 파동수가 RF 신호의 파동수의 2배수에 접근하면 신호가 급격히 감소하는 현상을 보이고 있다. 반면, cutoff 신호의 경우는 섭동 파동수가 RF 신호 파동수의 2배수 이상에서도 신호의 진폭이 완만히 감쇄되는 특성을 보였다^[2].

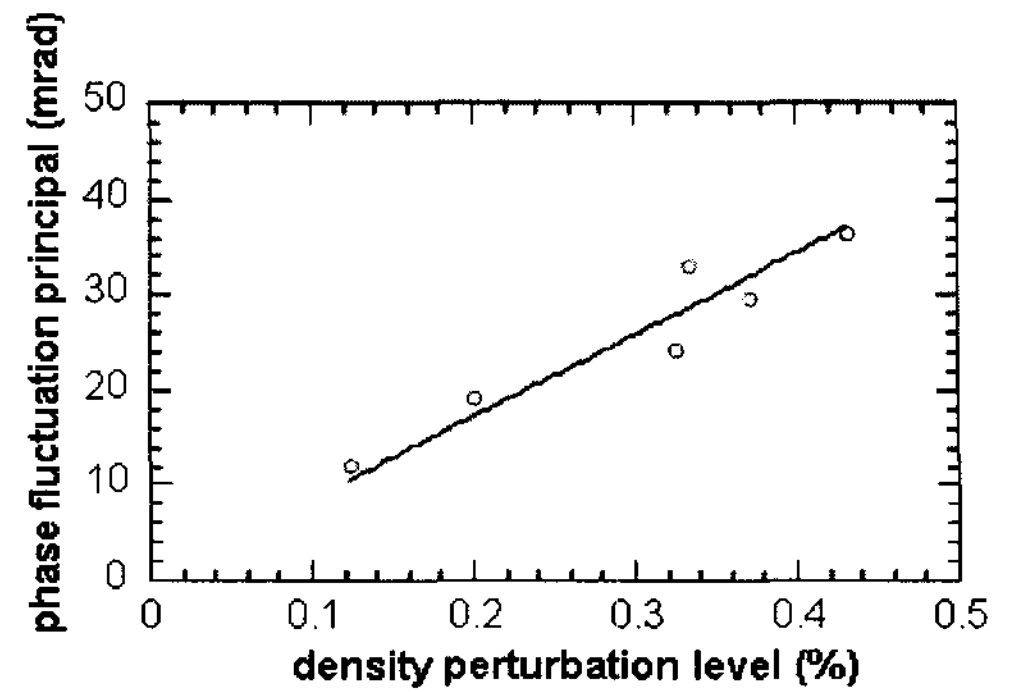
IV. 토의 및 결론

마이크로파 reflectometry는 전자기파의 전파 및 반사 특성을 이용하여 물질의 특성을 비접촉, 비간섭적으로 측정하는 기술로서, reflectometry를 사용하여 비균질 물질, 특히 플라즈마 상태의 물질의 밀도 특성을 정량적으로 해석하기 위해서 요구되는 시스템의 구성을 제안하고, 신호 특성을 결정하기 위한 연구 방법을 기술하였다. 마이크로파 reflectometry의 신호는 cutoff 신호와 산란 신호로 구성되며, 산란 신호와 cutoff 신호는 상호 영향을 주며, 산란 신호를 분리하여 특성을 연구하기 위하여 실험 장치의 조정이 이루어졌다.

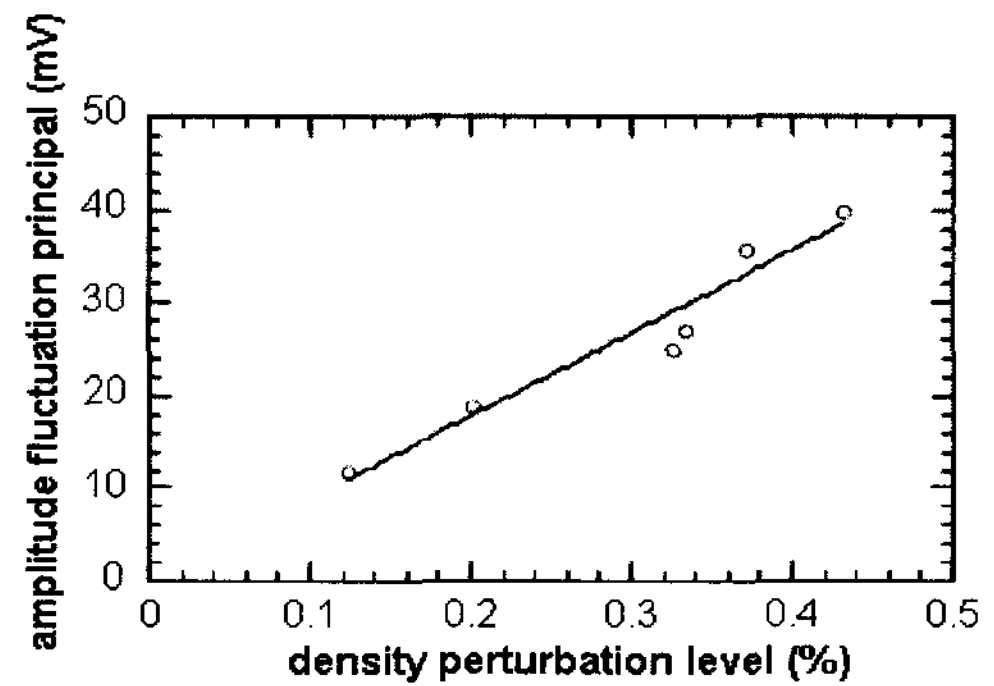
O-mode 마이크로파 reflectometry 시스템을 수치 해석적으로 모사할 경우, 위상각은 전자기파의 cutoff 위치의 변화량과 전자기파의 파동수의 곱으로 근사된다.

$$\phi_0 \approx 2k_0 \delta x \quad (5)$$

여기서 δx 는 밀도 섭동에 따른 cutoff 위치의 변화량이며, k_0 는 전자기파의 자유 공간에서의 파동수이다. 이러한 근사는 원거리장의 근사 결과이며, 근거



(a)



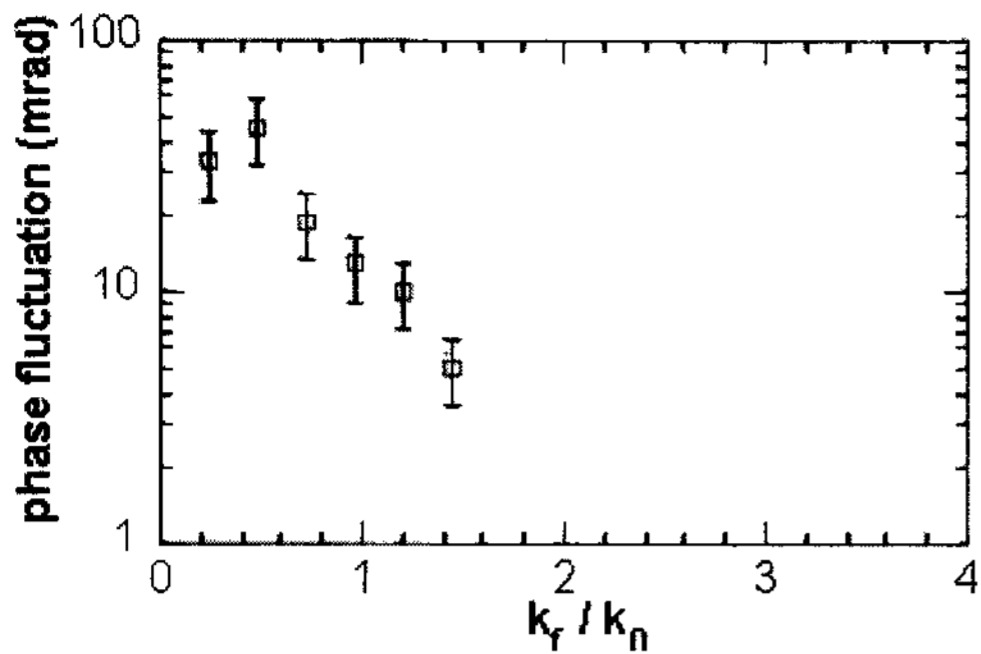
(b)

그림 4. 마이크로파 reflectometry의 산란 신호(위상각과 진폭 변동)와 밀도 섭동 수준과의 관계
Fig. 4. Sensitivity of the (a) phase, and (b) amplitude modulated portions of the scattered reflectometry response to density fluctuation level.

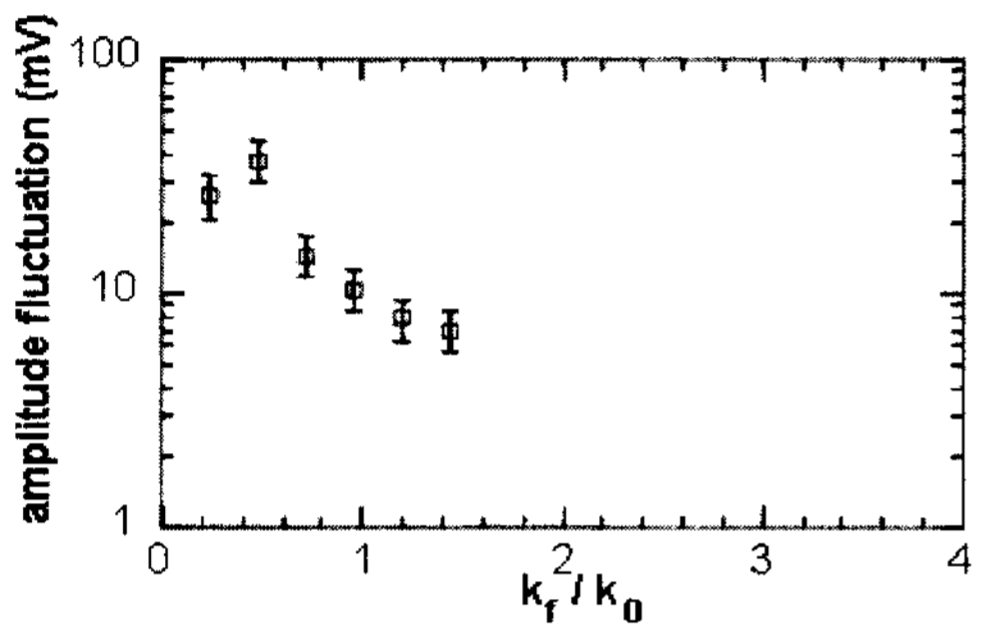
리장인 경우 파동수의 변화를 고려하여야 하므로 파동 방정식으로부터 그 값을 얻어야 한다.

그림 6은 이와 같이 구한 1-D 모사 결과로서(실선), 마이크로파 reflectometry IF 신호의 위상각의 섭동 파동수에 관한 반응 결과가 산란 신호의 파동수에 대한 결과(원)와 유사하며, cutoff 신호의 경우는 파동수가 커질수록 실험적 결과와 차이가 남을 보이고 있다. 즉, 산란 신호의 특성은 cutoff 신호보다는 1차원적 수치 해석 결과와 근사하지만, 마이크로파 및 섭동 신호의 전파 현상의 다차원적 특성으로 인하여 더 나은 해석 방법이 필요함을 나타낸다.

마이크로파 reflectometry의 응용은 국내에서는 최근에 소개되어 도입되기 시작한 단계이며, 국외에서도 플라즈마 연구 n 분야에의 응용 및 의료용 진단 장비 등으로 응용 범위를 찾아가는 과정으로 새로운 응용 분야를 개척하기 위하여 기초 연구가 더욱 필요하며, 또한 신호 처리 분야, 의료 분야, 생체 통



(a)



(b)

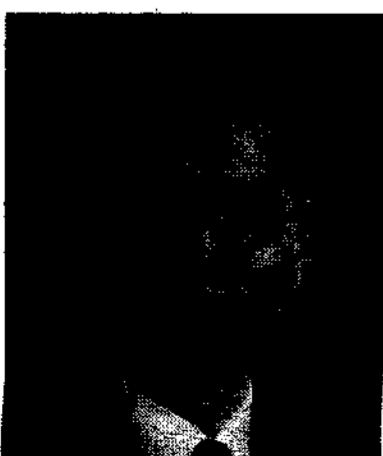
그림 5. 마이크로파 reflectometer 산란 신호(위상각과 진폭변동)의 밀도 섭동 파수에 따른 민감도
Fig. 5. Experimental results of microwave reflectometry sensitivity to the density perturbation wavenumber.

계 분야 등 관계되는 분야와의 협동 연구가 요구되고 있다.

참고 문헌

[1] H. P. Kalmus, et al., "Nonquantized frequency-modulated altimeter", *IRE Trans.*, ANE-1, vol. 15,

방 성 근



1996년 9월: UCLA Electrical Engineering (공학박사)
1994년 4월~1996년 8월: UCD / LLNL 연구원
1996년 10월~2002년 2월: 삼성종합기술원 연구원
2002년 3월~현재: 한림대학교 정

보통신공학부 교수

[주 관심분야] 전자파 전파, RF 소자 및 안테나 설계

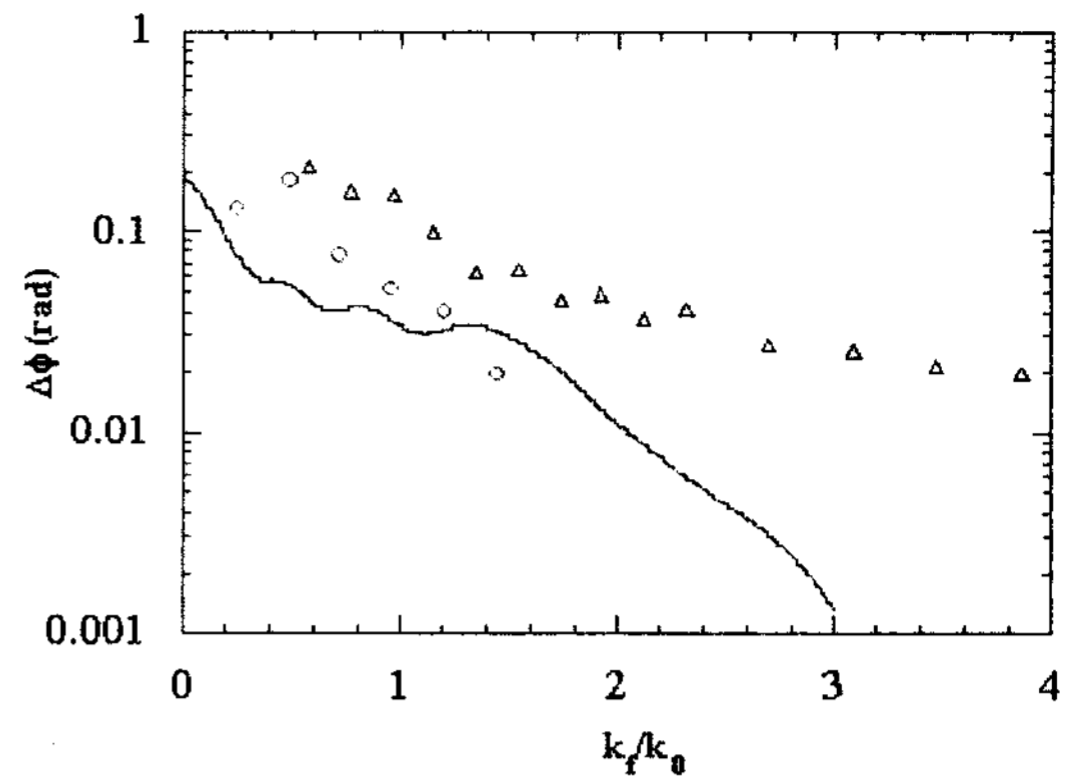


그림 6. 마이크로파 reflectometer 신호의 밀도 섭동 파동수에 따른 민감도 결과의 비교: 산란 신호 결과(원), cutoff 신호 결과(삼각형), 1-D 모사 결과(실선)

Fig. 6. Wavenumber sensitivity plot, showing experimental data from(triangle) cutoff, and(circle) scattered responses, together with(solid curve) 1-D simulation results.

1954.

[2] 방성근, "마이크로파 reflectometry의 소신호 응답 특성", *한국전자과학회논문지*, 14(7), pp. 699-704, 2003년 7월.
[3] S. Baang, et al., "Spatial resolution of microwave/millimeter-wave reflectometry", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 61, p. 3013, 1990.
[4] F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics*, Plenum Press, 1974.
[5] A. E. Chou, "Computational investigation of reflectometry as a density fluctuation diagnostic", M.S. Thesis, U.C.L.A., 1993.