

마이크로파 Reflectometry의 소신호 응답 특성

Small Signal Response Characteristics of Microwave Reflectometry

방 성 근

Sung-Keun Baang

요 약

레이다가법을 이용한 마이크로파 Reflectometry를 비균질 매질의 밀도 특성을 조사하기 위한 비파괴검사 장치로 응용하기 위한 시스템 특성을 연구하였다. 마이크로파 Reflectometry로 비균질 매질을 조사하기 위해서는 대상에 따른 시스템의 하드웨어 구성이 최적화되어야 하며, 각 시스템에서의 소신호 반응특성이 이해되어야만 전체적인 시스템 해법을 제공하는 것이 된다. 그 중에서 플라즈마 연구분야에 응용하기 시작한 것은 비교적 최근의 일로서 그 활용도가 점차 증가하고 있는 경향이다. 조사하는 대상의 특성에 따른 시스템의 구성을 이해하고, 파동수 및 밀도 섭동에 관한 시스템의 특성을 조사하기 위한 장치를 제안하며, 실험적 방법의 결과와 1차원 파동방정식을 이용한 수치해석적 결과를 비교 검증하였다.

Abstract

The characteristics of microwave reflectometry as a non-invasive device to examine the density distribution of inhomogeneous media using the technology of FM radar is presented. The microwave reflectometry system requires an optimized system hardware and the understanding of system response from the density distribution in order to provide the system solution to describe the object under test quantitatively. Among the applications, the use of microwave reflectometry in the area of applied plasma physics has been newly proposed and the number of usage is found to be increasing gradually. The microwave reflectometry systems that depend on the nature of the object under test are described. The experimental method to characterize the system is explained and the experimental results on the wavenumber dependence and the sensitivity on density perturbation are presented as well as the comparison to the results from the one dimensional numerical simulations.

Key Word : Microwave, Reflectometry, Signal Characteristics, NDT, Plasma

I. 서 론

마이크로파를 이용한 비파괴 분석 장치는 FM 레이다 기술이 적용되는 고도계가 1950년대 제안된 이래로^[1], 압진단과 같은 의학분야나 물질의 특성변화를 측정하는 산업분야 등에 새로이 개발 적용되고 있다. 이러한 이유에는 마이크로파 장치의 장치 구성상의 용이성과 대상 물질과의 비접촉, 비간섭성

등을 꼽을 수 있다.

학문적인 응용분야로 응용 플라즈마 물리 분야에 이미 사용되고 있는 마이크로파 분석 장치로는 마이크로파가 투과하며 발생하는 위상변화를 측정하는 Interferometer가 있다. 마이크로파 Reflectometry는 그림 1에서와 같이 입사하는 평면 전자기파의 주파수가 비균질 플라즈마의 밀도변화에 따른 차단주파수와 일치할 때 그룹 전달 속도가 0이 되면서

「이 논문은 2002년도 한림대학교 교비연구비에 의하여 연구되었음.」

한림대학교 정보통신공학부(Division of Information Engineering and Telecommunications, Hallym University)

· 논문 번호 : 20030304-038

· 수정완료일자 : 2003년 5월 2일

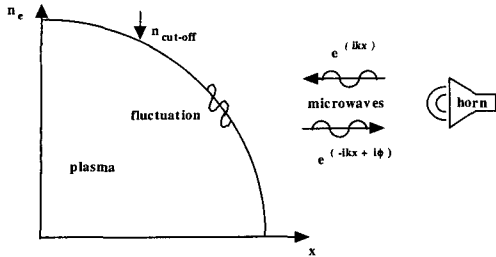


그림 1. 마이크로파 Reflectometry 장치의 개념도
Fig. 1. Conceptual diagram for microwave reflectometry.

사가 일어나며, 반사된 전자기파로부터 시간적인 지연량이나 위상의 변화량을 측정함으로써 밀도 분포나 국지적인 섭동량을 구할 수 있는 방법으로 1980년대 후반 이후로 기초 연구가 시작되어 왔다.

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. 또한, 선행연구에서 나타난 바와 같이 반사되는 신호는 매우 높은 공간적 분해능을 가질 수 있다는 가능성을 보인 바 있다^[2].

하지만, 마이크로파 Reflectometry를 이용하여 시험객체를 정량적으로 기술하기 위해서는 시스템 신호의 밀도 섭동 파동수에 대한 반응특성, 밀도변화에 대한 민감도 등에 대한 응답특성 등이 알려져야 하는데, 기존에 적용하던 일차원적 근사법은 실험적 결과와 상이한 결과를 보인다. 따라서 본 연구는 용이하게 제어할 수 있는 실험실 플라즈마에 마이크로파 Reflectometry를 적용하여 Reflectometry의 신호특성을 정량적으로 파악하고자 한다.

2장에서는 마이크로파 Reflectometry를 구성하는데 고려하여야 할 사항과 몇 가지 구성 예를 제시하며, 3장에서는 실험적인 연구방법을 기술하고, 4장에서는 실험적인 마이크로파 Reflectometry 응답특성과 수치해석적으로 얻은 응답특성 결과를 기술하며 결론에서는 앞으로 수행되어야 할 과제를 제시한다.

II. Reflectometry System

마이크로파 Reflectometry는 그림에서와 같이 입

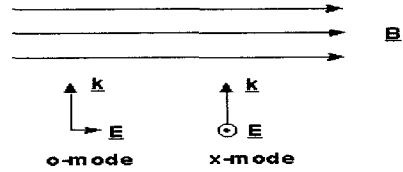


그림 2. O-mode, X-mode 마이크로파 Reflectometry의 개념도

Fig. 2. Field configuration for O-mode and X mode microwave reflectometry systems.

사하는 전자기파의 주파수가 비균질 플라즈마에 입사할 때, 플라즈마의 밀도가 증가함에 따라 그룹 전달 속도가 0이 되면서(또는 굴절률이 0이 되면서) 반사가 일어나며, 반사된 전자기파로부터 반사가 일어난 위치 정보나 국지적인 교란 정보를 반사된 전자기파의 시간적인 지연량이나 위상의 변화로부터 얻어서 밀도 분포나 국지적인 섭동 분포를 구할 수 있는 방법이다. 이 때, 반사되는 차단주파수(cut-off frequency)는 자장의 존재 여부에 따라서(그림 2 참조) 식 (1)과 같이 정리할 수 있다^[3].

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

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

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

여기서 $\omega_{O,p}$ 는 자기장의 영향이 없을 때의 차단주파수로 플라즈마 자연 진동수와 같으며, $\omega_{X,R}$ 과 $\omega_{X,L}$ 는 자기장의 영향을 받을 때의 차단주파수로 각각 right-handed circularly polarized wave와 left-handed circularly polarized wave의 차단주파수이다. 또한, $\omega_c = eB/m_e$ 는 전자의 cyclotron 주파수로, e 는 전자의 전하, m_e 는 전자의 질량, B 는 자속 밀도, ϵ_0 는 자유공간의 유전율, n 은 국지 플라즈마 밀도이다.

위 식에서 보듯이, 응용 플라즈마 연구분야에서는 플라즈마를 제어하기 위해서 자장이 사용되는 경우가 많으며, 마이크로파 Reflectometry에 사용되는 주파수는 플라즈마 밀도 및 자장의 영향을 고려하여 결정된다. 이러한 주파수 분포를 그림 3에서는 예시적인 플라즈마 밀도와 자장의 분포를 가정한

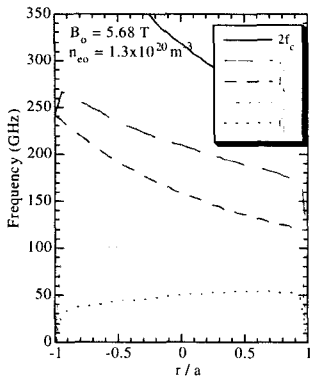


그림 3. 마이크로파 Reflectometry 장치를 적용하기 위한 응용 플라즈마 장치의 주파수 분포

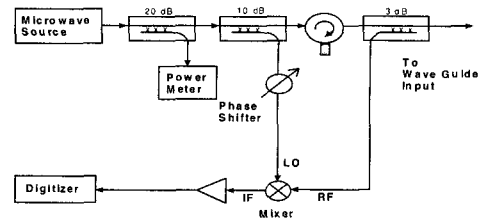
Fig. 3. Frequency distribution for the application of microwave reflectometry system to the plasma research device.

토러스 형태의 플라즈마 실험장치에 마이크로파 Reflectometry에 적용할 때 요구되는 주파수 분포를 반경 $-a < r < a$ 에서 보이고 있다. 이 경우 O-mode Reflectometry를 사용하면 약 0~100 GHz의 주파수 대역이 필요하며, 외곽의 급격한 밀도 상승 영역과 내부의 평이한 밀도변화 영역에서의 급격한 신호변화를 예상할 수 있다. X-mode Reflectometry를 사용하면 130~240 GHz 대역의 주파수가 필요한데, 여기서 주의할 사항은 마이크로파가 플라즈마와 강하게 간섭하는 주파수인 Cyclotron 공명주파수는 피하여 사용하여야 한다. 따라서 이 경우는 왼쪽에서 오른쪽으로 입사되는 시스템을 구성하여야만 Cyclotron 공명주파수와 의 간섭을 피할 수 있다.

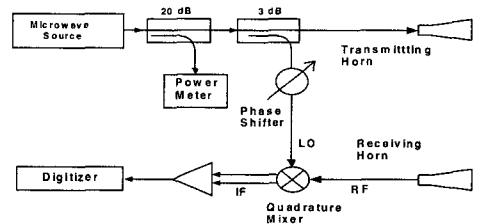
자기장이 존재하지 않거나, 그림 2와 같이 전기장과 자기장의 방향이 일치할 경우, O-mode Reflectometry 시스템이며, 외부 자기장이 전기장과 수직인 경우 X-mode Reflectometry 시스템이 된다. 또한, 얻고자 하는 정보에 따라서 고정 주파수 시스템, 가변 주파수 시스템 등으로 분류할 수 있다.

단일한 마이크로파 발생장치를 사용하는 Homodyne 시스템과 Noise로부터 신호를 용이하게 구분하여 S/N 비를 높이기 위하여 별도의 마이크로파 발생장치를 사용하는 Heterodyne 시스템이 있다.

Transmitter와 Receiver가 동일한 Monostatic 시스템과 각각이 분리되어 있는 Bistatic 시스템으로도



(a) homodyne, monostatic reflectometer 장치
(a) homodyne, monostatic reflectometer system



(b) homodyne, bistatic, quadrature reflectometer 장치
(b) homodyne, bistatic, quadrature reflectometer system

그림 4. 마이크로파 reflectometry 장치 구성 예
Fig. 4. Microwave reflectometry system configurations.

분리할 수 있다(그림 4(a), (b)).

Reflectometry 시스템의 신호는 마이크로파가 입사된 후 반사되어 돌아온 RF신호, 입사되는 신호로 기준신호인 LO 신호, 그리고 이 두 신호가 Mixer에서 결합하여 발생하는 IF 신호가 있다. 이 때, IF 발생장치인 Mixer에 Quadrature hybrid combiner가 사용된 Quadrature 시스템도 응용된다.

III. 연구방법

마이크로파 Reflectometry를 응용 플라즈마 물리 분야에 적용할 경우 요구되는 신호 응답 특성을 실험적으로 조사하기 위하여 저밀도의 실험실 플라즈마 발생장치를 이용하였다.

그림 5에 보이는 바와 같은 지름 60 cm, 길이 88 cm의 플라즈마 발생장치는 플라즈마의 밀도분포와 섭동량을 가변시킬 수 있으며, 변화 가능한 플라즈마 밀도와 이에 상응하는 마이크로파 주파수 범위 그리고 밀도 섭동 주파수 범위등을 표 1에 기술하였다. 플라즈마 밀도섭동은 Stainless Steel mesh를 사용하여 Ion Acoustic Wave를 발생시키는 방법을 사용하였으며, 이 때 사용한 변조회로는 그림 6에 나

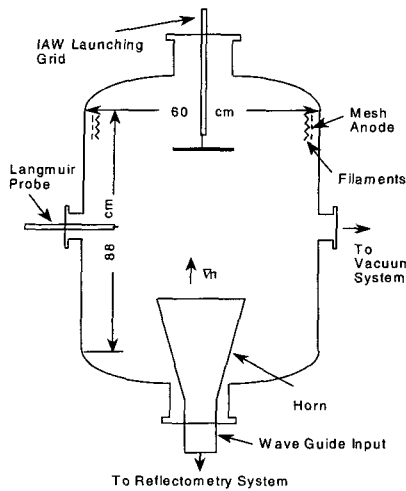


그림 5. 마이크로파 Reflectometry의 특성측정을 위한 실험실 연구장치 구성
 Fig. 5. Laboratory experimental arrangement for microwave reflectometry study.

타난 회로를 적용하였다.

자기장의 영향을 받지 않은 O-mode 마이크로파 Reflectometry 시스템을 적용하여 실험하였으며, Monostatic system, Bistatic system, Quadrature sys-

표 1. 실험적 측정을 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 ms×4.0 ms
Ion Species	Argon, Xenon
Electron Density n_0	$1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \sim 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
Electron Temperature T_e	1 eV ~ 2eV
Ion Acoustic Wave Parameters	
Grid (longitudinal)	8.5×13cm
Ion Wave Frequency	20 kHz ~ 100 kHz ($\lambda = 2.5 \sim 12 \text{ cm}$)
Ion Wave Damping Frequency	20 ~ 50 kHz
Reflectometry Microwave Source	
Microwave Frequency	3 kHz ~ 6 kHz ($\lambda_0 = 5 \sim 10 \text{ cm}$)
Power	< 50 mW

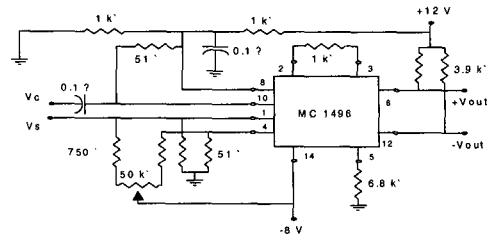


그림 6. 밀도교란에 사용된 변조회로
 Fig. 6. Modulation circuit configuration used to launch ion acoustic wave.

tem 등의 마이크로파 Reflectometer 시스템을 적용하였다. 이 때, 사용된 horn 변수를 표 2에 기술하였다.

실험적으로 얻은 결과를 수치해석적인 결과와 비교하기 위하여 마이크로파와 플라즈마의 상호작용을 1차원 Full wave 방정식으로 모델링 하였다^[4].

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + N^2 k_0^2 E = 0 \quad (2)$$

여기서 N 은 반사지수로 $N(x) = (1 - f_{pe}^2 / f^2)^{1/2}$ 이며, k_0 는 입사하는 마이크로파의 자유공간에서의 파동수이다. f_{pe} 는 국지 플라즈마 주파수로서 플라즈마 밀도의 함수이며, f_f 는 입사하는 마이크로파의 주파수이다. 밀도분포와 섭동 주파수를 변화시키며 Full wave 방정식으로부터 위상변화를 계산하여 실험적인 측정치와 비교하였다.

표 2. 실험적 측정을 위하여 사용된 Reflectometry 장치의 Horn 안테나 변수값들

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

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

IV. 소신호 응답 특성

마이크로파 Reflectometer의 신호는 반사된 RF 신호와 Reference 신호인 LO신호가 Mixer에서 결합되면서 국지적인 섹동신호만 IF 신호로 남는다. 여기서는 IF 신호에 기여가 큰 것으로 관측된 cutoff 지역으로부터 기인하는 신호의 특성을 살펴보기로 한다.

이러한 IF 신호를 그림 7에 예시하였다. 이 때, 밀도교란신호는 RF 신호의 cutoff 지역보다 높은 밀도 지역에서 보내지므로 교란신호와 관측된 IF 신호와의 시간지연은 교란신호가 RF 주파수의 cutoff 지역까지의 전파시간을 의미한다. 여기서 교란신호의 주파수는 30 kHz이며, 마이크로파 주파수는 3.8 GHz이다. IF 신호는 교란신호와 비교할 때, 파군의 퍼짐이 아주 적으며, 신호가 공간적으로 매우 잘 Localized 되어 있음을 알 수 있다.

마이크로파 Reflectometry 시스템의 IF 신호는 Quadrature 시스템인 경우 식 (3)과 같이 sine/cosine 함수로 표시할 수 있다.

$$s_1(t) = A(t) \sin(\phi(t))$$

$$s_2(t) = A(t) \cos(\phi(t)) \quad (3)$$

이로부터 진폭 $A(t)$ 와 위상각 $\phi(t)$ 는 각각 식 (4)와 같이 표시된다.

$$A(t) = \sqrt{s_1(t)^2 + s_2(t)^2}$$

$$\phi(t) = \arctan(s_1(t)/s_2(t)) \quad (4)$$

IF 신호의 진폭과 위상각의 밀도섹동에 대한 민감도를 실험적으로 얻은 결과는 그림 8과 같다. 여기서 밀도섹동레벨은 교란신호로 사용된 Ion Acoustic 파의 진폭을 국지 밀도로 정규화하여 결정된다. 이 결과는 섹동량이 1% 이하로 충분히 작은 경우,

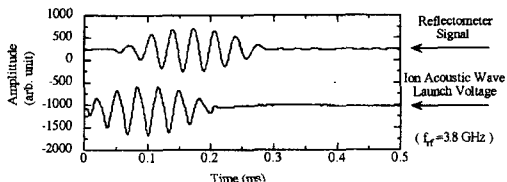


그림 7. 마이크로파 Reflectometry의 IF 신호
Fig. 7. Typical IF signal from a microwave reflectometry system.

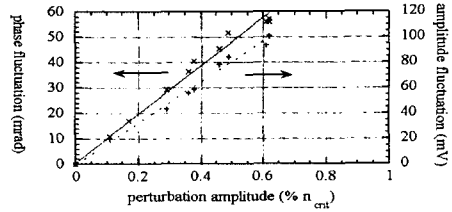


그림 8. 마이크로파 Reflectometry의 밀도섹동레벨에 따른 민감도 측정
Fig. 8. Microwave reflectometry sensitivity to the density perturbation level.

마이크로파 Reflectometry의 신호는 섹동량에 비례한다는 것을 보이고 있다. 이 결과는 섹동주파수 40 kHz에 해당하는 결과이며, 섹동주파수가 변화하면 비례계수도 변화한다.

섹동신호의 파동수에 대한 IF 신호로부터 얻은 위상각의 민감도를 실험적으로 얻은 결과가 아래 그림 9이다. 여기서 섹동신호의 파동수는 입사된 RF 신호의 자유공간에서의 파동수로 정규화된 값이다. 이 결과는 파동수가 작은 경우 같은 정도의 밀도섹동레벨로부터 기인하는 IF 신호의 크기가 훨씬 크다는 것을 보이고 있다.

그림에서 실선은 수치해석적인 결과로서, 수치해석적인 결과는 O-mode 시스템의 경우 위상각은 전자기파의 cutoff 위치의 변화량과 전자기파의 파동수의 곱으로 식 (5)와 같이 근사된다.

$$\phi_o \approx 2k_o \delta x \quad (5)$$

여기서 δx 는 밀도 섹동에 따른 cutoff 위치의 변화량이며, k_o 는 전자기파의 자유공간에서의 파동수

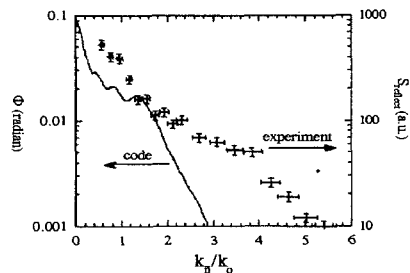


그림 9. 마이크로파 Reflectometry의 밀도섹동 파동수에 따른 민감도
Fig. 9. Microwave reflectometry sensitivity to the density perturbation wavenumber(normalized to the microwave wavenumber).

이다. 이러한 근사는 원거리장의 근사 결과이며, 근거리장인 경우 파동수의 변화를 고려하여야 하므로 파동 방정식으로부터 그 값을 얻어야 한다.

그림 9는 이와 같이 구한 위상각의 섭동 파동수에 관한 반응결과는 파동수가 커질수록 실험적 결과와 차이가 남을 보이고 있다.

V. 결 론

마이크로파 Reflectometry는 Radar 기법을 사용하여 물질의 특성을 비접촉, 비간섭적으로 측정하는 기술이다. Reflectometry를 사용하여 비균질 물질의 밀도특성을 정량적으로 해석하기 위해서 요구되는 시스템의 구성을 제안하고, 신호특성을 결정하기 위한 연구방법을 기술하였다. 실험적으로 측정된 밀도 섭동레벨에 관한 민감도와 파동수에 관한 민감도를 1차원의 파동방정식 결과와 함께 비교 기술하였다. 이러한 결과는 실험적 결과와 수치해석과는 차이가 남을 보이고 있다. 이는 마이크로파 및 섭동 신호의 전파현상이 다차원적으로 해석되어야 함을 나타낸다. 따라서, 마이크로파 Reflectometry를 이용하여 응용 플라즈마 물리 분야에서 섭동량을 정확하게 정량적으로 결정하기 위해서는 다차원적 해석과 고급 이미지 해석기법의 연구 등이 필요하며, 홀로그래픽 Reflectometry 등으로의 발전이 예상된다.

또한 마이크로파 신호는 cutoff 지역에서 기인하는 성분 외에 마이크로파의 전파 경로 상에서 산란하는 신호도 관측되는데 이 신호의 특성은 별도의 논문에서 기술할 예정이다.

마이크로파 Reflectometry의 응용은 국내에서는 최근에 소개되어 도입되기 시작한 단계이며, 국외에서도 플라즈마 연구분야에의 응용 및 의료용 진단 장비 등으로 응용범위를 찾아가는 과정으로 새로운 응용분야를 개척하기 위하여 기초연구가 더욱 필요하며, 또한 신호처리 분야, 의료분야, 생체통계분야 등 관계되는 분야와의 협동연구가 요구되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] H. P. Kalmus, et al., "Nonquantized Frequency-Modulated Altimeter," *IRE Trans.*, ANE-1, 15, 1954.
- [2] S. Baang, et al., "Spatial Resolution of Microwave/Millimeter-Wave Reflectometry," *Rev. Sci. Instrum.* 61, 3013, 1990.
- [3] F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics*, Plenum Press, 1974.
- [4] A. E. Chou, "Computational Investigation of Reflectometry as a Density Fluctuation Diagnostic," *M. S. Thesis*, U.C.L.A., 1993.

방 성 근



1996년: 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