

# 밀리미터파/서브밀리미터파 대역 플라즈마 진단

응용기술

이 정 해

홍익대학교 전파공학과

## I. 서 론

정보통신산업의 발달과 더불어 무선통신기술의 개발이 촉진되고 주파수 대역 또한 수십 GHz 이상으로 확대되어 밀리미터파 대역의 중요성이 대두되고 있다. 밀리미터파 대역의 응용분야는 이동통신, 위성통신 등의 산업분야 이외에도 여러 기초과학 연구분야에 많이 응용되어 왔다. 이 중에서 밀리미터파/서브밀리미터파 플라즈마 진단 기술은 미래 에너지를 개발하기 위해 고안된 장치인 토카막의 성공적 개발 및 실용화를 위한 핵심 기술 중의 하나이다. 토카막은 고온, 고밀도의 플라즈마를 충분한 시간동안 가둠으로써 핵융합을 일으킬 수 있는 에너지 발전로이다. 이 장치의 개발 및 실용화를 달성하기 위해서는 고온, 고밀도 플라즈마의 특성을 진단하고 제어할 수 있어야 가능하다. 이를 위하여 밀리미터파/서브밀리미터파 대역의 전자파를 플라즈마에 입사하여 투과 혹은 반사된 전자파를 감지하여 플라즈마의 중요한 파라미터인 전자밀도, 전류분포를 알 수 있다. 플라즈마내에서 방사되는 밀리미터파 대역의 전자파를 감지하여 전자온도 분포도 측정한다. 본 고에서는 위에 기술한 측정 기법들 즉, Interferometry, Reflectometry, Polarimetry, Radiometry의 원리를 설명하고 각 기법을 구현한 밀리미터파/서브밀리미터파 대역 시스템 및 감지기법을 소개한다. 끝으로 서브밀리미터파 대역의 중요한 Source인 Far-Infrared Laser에 관하여 논의한다.

## II. 밀리미터파 플라즈마 진단 기법

### 2-1 Interferometry

전자파가 자화된 (B) 플라즈마 매질에 존재할 수 있는 모드는 수십 종류 이상이며<sup>[1]</sup> 아직도 새로운 모드가 발견되며 발견자의 이름을 따라 그 모드의 이름이 명명되고 있다. 이 중에서 전자파의 주파수( $f$ )가 전자플라즈마주파수( $f_p$ ) 근처에 있거나 그 이상이고 전자파의 전계가 자계(B)에 평행하고 자계에 수직으로 전파되는 전자파 모드를 Ordinary Electromagnetic Wave (O-모드)라 하고 이 전자파의 굴절율( $n_o$ )은 다음의 식으로 주어진다.<sup>[1],[2]</sup>

$$n_o = \sqrt{1 - f_p^2 / f^2} \quad (1)$$

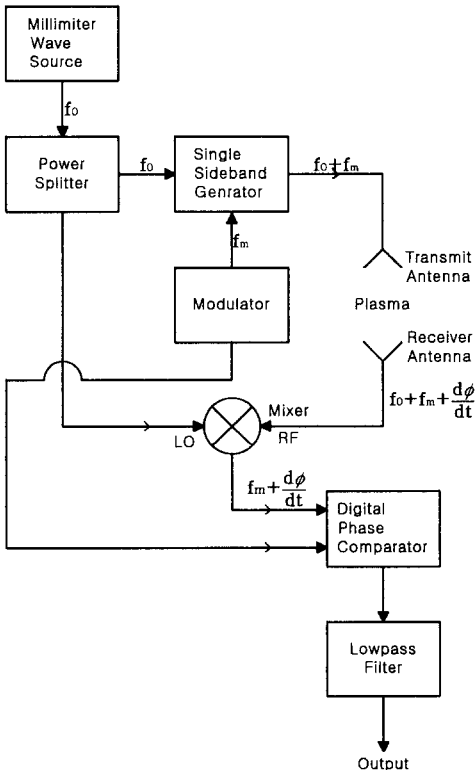
여기서  $f_p = 90n_e^{0.5}$  GHz이고  $n_e$ 는 전자밀도이다. 세계적으로 유명한 토카막의 전자밀도는  $10^{17} \sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 이므로 이에 해당되는 전자플라즈마주파수는 28.5~90 GHz의 밀리미터파 대역에 있다. 만일 외부에서 입사되는 전자파의 주파수가 전자플라즈마주파수보다 작은 경우에는 전자파의 굴절율이 영이되어 전반사가 되고 이 원리를 이용한 것이 후에 논할 reflectometry의 원리가 된다. 따라서 입사된 전자의 주파수가  $f_p$ 보다 큰 경우 전자파는 반사되지 않고 플라즈마를 통과하게 된다. 이때 전자파의 굴절율은 공기의 굴절율 1보다 작으므로 같은 길이의 공기를 통과한 전자파와의 위상차( $\phi$ )

는 다음과 같다<sup>[3]</sup>.

$$\phi = 2\pi/\lambda \int_0^L (1 - n_0) di \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 전자파의 파장이고  $L$ 은 전자파가 플라즈마를 진행한 거리이다. 위상차를 비교 측정함으로써 플라즈마내 전자밀도를 알 수 있다. 하지만 (2)식에서 보듯이 측정된 전자밀도의 값은 측정 경로의 평균값을 나타내므로 정확한 전자밀도 분포를 알 수 없다. 정확한 전자밀도 분포를 알기 위해서는 측정 채널을 증가시키고 토카막 플라즈마의 원통형 대칭성과 Abel Inversion 기법을<sup>[3]</sup> 이용하면 알 수 있다.

예전에 흔히 쓰이던 Interferometer의 Detector



[그림 1] 밀리미터파 Interferometer.

출력은  $E_s E_r \cos\phi$ 로 주어진다. 여기서  $E_s$ 와  $E_r$ 는 Signal과 Reference 빔의 전계 크기이고  $\phi$ 는 플라즈마에 의해 발생한 위상차이다. 이러한 시스템에서는 출력이 위상 변화뿐만 아니라 진폭 변화에 민감하므로 순수한 위상 변화를 측정하기 어렵고 시간에 따른 위상 증감을 알 수 없는 단점을 가지고 있다. [그림 1]은 이러한 단점을 극복하기 위해 고안된 밀리미터파 Interferometer 시스템이다. 그림에 보여지듯이 single-side band generator에 의해 변조된 신호 ( $f_0 + f_m$ )는 플라즈마를 진행하여 위상차를 가지고 수신단으로 들어와 mixer에 의하여  $f_m + (d\phi/dt)$ 로 down-conversion 된다. 이 신호는 reference 신호( $f_m$ )와 같이 digital phase comparator로 전달된다. 이 comparator는 upward 카운터와 downward 카운터로 구성되어 있어서 위상의 증감을 구별할 수 있다. Comparator의 출력은 digital adder와 D/A converter에 의해 신호 처리되어 위상에 비례한 최종신호를 얻게된다.

## 2-2 Reflectometry

Reflectometry는 플라즈마 진단 기법으로써 1950~60년대에 지구로부터 전리층의 높이와 전리층 플라즈마 밀도를 측정하는데 처음으로 응용되었다<sup>[2],[4]</sup>. 현재에는 Reflectometry의 뛰어난 공간 해상도 때문에 토카막 플라즈마와 같은 핵융합 장치에서 전자밀도나 density fluctuation을 측정하는데 이용되어 왔다<sup>[5]-[8]</sup>.

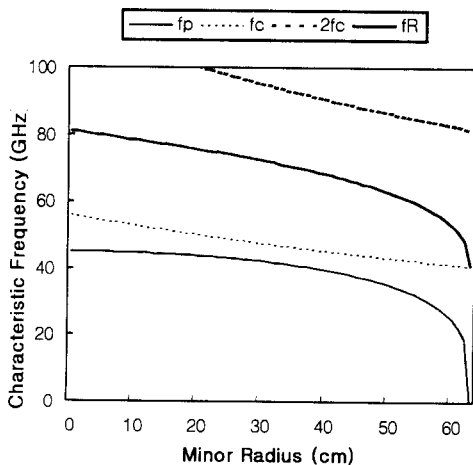
앞에서 논의한 Ordinary Electromagnetic Wave (O-mode wave) 외에도 자화된 (B) 플라즈마 내에는 Extraordinary Electromagnetic Wave (X-모드)가 존재할 수 있으며 이 모드의 전계가 플라즈마 자계(B)에 수직하고 자계에 수직한 방향으로 입사될 때 전파되는 모드이고 굴절율( $n_x$ )은 아래와 같이 주어진다.<sup>[1],[2]</sup>

$$n_x = \sqrt{1 - \frac{f_p^2(f^2 - f_p^2)}{f^2(f^2 - f_p^2 - f_c^2)}} \quad (3)$$

여기서  $f_c$ 는 전자 cyclotron resonance frequency 이고 그 값은 28 [GHz/Tesla]로 주어진다. 토카막의 자계(B)의 크기는 보통 1~3 [Tesla]이므로 이에 해당되는 전자 cyclotron resonance frequency ( $f_c$ )는 28~84 GHz 이다.

외부에서 입사되는 전자파 전계가 B에 평행한 경우는 굴절율은 식 (1)로 주어지고 이 때 전반사가 일어나는 주파수는 즉  $n_0$ 가 영이되는 지점이므로  $f=f_p$ 일 때이다. 따라서 외부로부터 입사된 전자파는 플라즈마 내부로 전파되다가 전자밀도가 점점 내부로 가면서 증가하므로 굴절율 영이되는 지점에서 전반사가 일어난다. 또한 X-mode의 경우는  $n_x$ 가 영이 되는 지점에서 전반사가 일어나고 이때의 주파수를 각각  $f_R$ 과  $f_L$ 이라 하고 아래의 식으로 주어진다.

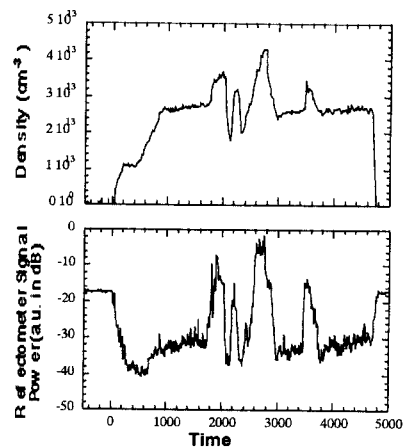
$$f_{R,L} = \pm \frac{f_c}{2} + \sqrt{f_p^2 + \frac{f_c^2}{4}} \quad (4)$$



[그림 2] DIII-D 토카막의 특성 주파수

[그림 2]에는 미국 General Atomic사에서 동작 중인 DIII-D 토카막의 전형적인 파라미터로부터 ( $B=2T$ ) 계산된 각 모드의  $f_p$ ,  $f_R$ 과 첫 번째와 두 번째 전자 cyclotron resonance( $f_c$ ,  $2f_c$ )주파수를 나타내었다. 그림에서 minor radius가 영인 플라즈마의 중심부이고 minor radius가 63 cm인 지점은 플라즈마의 끝부분이다.

[그림 3]은 앞에서 토의한 X-모드 reflectometer의 반사 원리를 실험적으로 확인한 결과를 나타내었다. 윗부분의 결과는 DIII-D 토카막의 플라즈마의 전자 밀도의 시간에 따른 변화를 interferometer로 측정된 것이다. 식 (3)에 보이듯이  $f_R$ 은 전자 밀도에 의존한다. 전자밀도가 영인 시간대에서는 ( $t < 0$  msec,  $t > 4800$  msec) 입사된 70 GHz의 신호는 토카막 내부의 벽으로부터 반사되어 온다. 점차 전자 밀도가 증가함에 따라 reflectometer 신호의 감소를 관찰할 수 있는데 이는 70 GHz의 신호가  $f_R$  layer를 만나지 않고 2<sup>nd</sup> harmonic electron cyclotron resonance layer에서 70 GHz의 신호가 흡수되기 때문이다. 이후 전자 밀도가 더욱 더 증



[그림 3] Reflectometer 신호 ( $B=1 T$ )

가하게 되면 70 GHz 신호는  $f_R$  layer를 만나게 되어 전반사를 시작하게 ( $t \sim 1750$  msec) 되므로 결과에 보듯이 반사된 신호의 크기가 커지게 된다. 이후 전자 밀도의 감소와 증가의 과정이 반복되면서 신호가 흡수와 반사의 과정을 반복함을 알 수 있다.

위에 설명한 전자파의 반사 특성을 이용하여 플라즈마내의 전자밀도 분포를 측정할 수 있다. 이는 Interferometer의 원리와 같이 전자파 진행에 따른 위상차를 측정함으로써 가능하고 O-모드와 X-모드 전파일 경우 그 위상차는 WKB 모델로부터 아래의 식으로 주어진다.<sup>[2],[3]</sup>

$$\phi = 4\pi/\lambda \int_{L_{reference}}^{L_{cutoff}} n_{o(X)} dl + \pi/2 \quad (5)$$

여기서  $\pi/2$ 는 Full Wave 해와 WKB 해의 위상차이다. 전자밀도 분포를 측정하는 기법은 여러 저자들에 의하여 개발되어 왔는데 그 대표적인 방법은 FM(frequency modulation)과 펄스 레이더 등이 있다. FM 기법<sup>[5],[6]</sup>에서는 입사되는 전자파의 주파수를 선형적으로 변화시킴으로 각 주파수에 해당되는 위상차를 측정하고 이를 Analytic 혹은 Numerical Inversion하여 전자밀도 분포를 알아낸다. 펄스 레이더 기법<sup>[7]</sup>에서는 펄스 전자파를 입사하면 펄스의 각 Fourier성분의 Wave Packet들이 각각 다른 지점들로부터 반사되어 각 성분들은 다른 지연시간(delay time)을 가지고 되돌아오므로 이 지연시간을 직접 측정함으로써 전자밀도를 알 수 있다.

Reflectometry가 이상의 전자밀도 분포에 이용될 뿐만 아니라 최근에 보고된 바와 같이<sup>[9],[10]</sup> RF wave의 전계 측정에 활용될 수 있다. Reflectometry는 전자파를 입사하면 플라즈마의 non-uniform한 굴절률 때문에 전자파가 차단되는(Cutoff) 지점에서 반사됨을 이용하는 것이다. 반사되는 위치는 앞

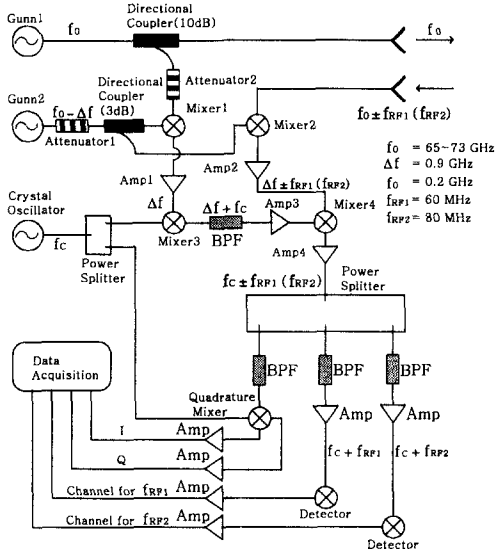
의 식 (1)과 (3)에 보듯이 전자밀도( $n_e$ )와 자계(B)에 의존한다. 그런데 반사되는 지점은 플라즈마내에 존재하는 다른 전자파 ( $f_{RF}$ ) 전계에 의하여 그 주파수로 ( $f_{RF}$ ) 변조되고, 이 변조 주파수의 크기를 측정함으로써 플라즈마 내 RF wave의 전계 결정을 할 수 있다.

본 고에서는 non-inductive 전류구동에 이용되는 60 MHz/80 MHz의 RF wave의 한 종류인 fast magnetosonic wave(FW)의 전계 분포의 결정 방법에 관하여 논하고자 한다. FW reflectometer 신호의 해석 모델은 1-D Geometrical Optic 방법을 이용하면 다음의 식으로 주어진다.<sup>[9]</sup>

$$S_N \propto \omega \frac{1 + (\omega_c \omega / \omega_p^2)}{1/L_n + (\omega_c \omega / \omega_p^2) / L_B} \frac{\sqrt{n_e}}{B^2} E_{FW} \quad (6)$$

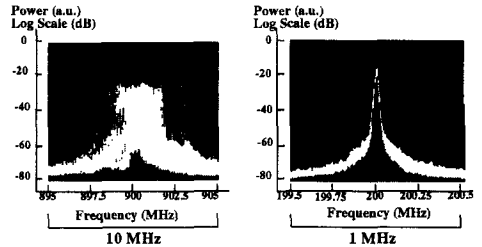
여기서  $L_n$ 과  $L_B$ 는 각각 전자밀도( $n_e$ )와 자계(B)의 Gradient Scale Length이다. 식 (6)에서 보듯이 FW reflectometer 신호는 FW의 국부적인 전계( $E_{FW}$ )에 비례함을 알 수 있다. 이 신호의 여러 지점에서의 검출은 FW의 전계 구조를 알 수 있으므로 전자파의 플라즈마 매질에서의 전파 현상을 실험적으로 규명할 수 있다. 식 (6)에서 주목할 점은 반사된 FW 신호가 전체 반사된 신호에 의하여 정규화 되었는데 이는 신호가 FW 전계 크기에 비례할 뿐만 아니라 전자파의 플라즈마 매질 내의 굴절, 흡수 그리고 주파수 변화에 따른 Reflectometer 시스템의 Gain의 변화에 의한 오차를 제거하기 위함이다.

[그림 4]에는 DIII-D 토카막의 non-inductive 전류구동에 이용되는 60 MHz/80 MHz FW의 전계 분포 측정을 위해 고안된 heterodyne, tracking receiver reflectometer 시스템을 나타내었다. FW의 공간적 전계분포를 얻기 위해서는 반사 지점을 얻을 수 있어야 하므로 주파수 변화가 가능



[그림 4] Heterodyne, tracking receiver reflectometer.

한 밀리미터파 소스인 두 개의 varactor tunable Gunn oscillator가 (65~73 GHz) 각각 probe 빔 (Gunn1)과 local oscillator(Gunn2)로 사용되었다. SNR (Signal-to-Noise Ratio)를 증가하기 위해서 heterodyne 감지기법이 이용되고 이는 또한 큰 출력의 60 MHz의 transmitter에서 발생하는 전자파 pickup을 제거할 수 있는 필요한 기법이다. 모든 소스는 자체의 주파수의 instability를 가지고 있고 feedback 된 신호에 의한 frequency pulling 현상 때문에 주파수의 instability가 증가되어 측정에 정확성을 감소시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 feedforward tracking receiver 기법이 이용되었다. 그림에 보여지듯이 mixer 2 출력단 신호에 실린 주파수의 instability 성분이 똑같이 mixer 1에 의하여 tracking되고 이 instability 성분은 mixer 4에서 상쇄되어 stable한 신호를 얻을 수 있다. [그림 5]는 tracking receiver의 동작 성능을 실험하기 위하여 horn 안테나 probe 빔을 외부의 회전 fan blade를 이용하여 feedback 신호를 Gunn1에



[그림 5] Tracking 실험 결과

보내어 frequency pulling에 의한 주파수 instability를 유기하였다.

실험 결과에 보이듯이 tracking 되지 않은 경우는 주파수 변화가 ~6 MHz의 unstable한 신호를 갖는다. [그림 5]의 우측에 보이듯이 tracking한 신호는 주파수 변화가 10 kHz 이내의 우수한 주파수의 신호를 얻을 수 있다.

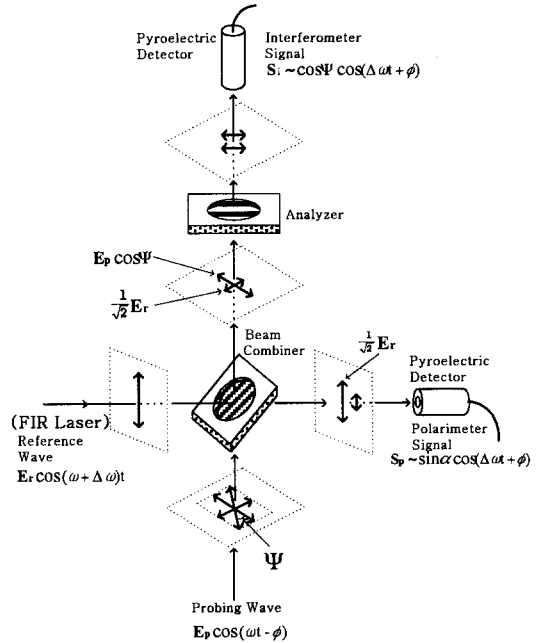
### 2-3 Polarimetry

자화된 플라즈마 내에서는 수십 종류 이상의 전자파 모드가 존재하는데 자계(B) 방향에 수직으로 입사되는 경우 앞 절의 O-모드와 X-모드로 전파된다. 전자파가 자계(B) 방향에 평행하게 입사될 때는 Right-Hand Circularly Polarized Wave (R-Wave)와 Left-Hand Circularly Polarized Wave (L-Wave)가 존재하고 각각의 굴절율이 다른 값으로 주어진다. 토카막을 구동하기 위해서는 플라즈마 전류가 필요하고 이 전류는 다시 자계(B<sub>p</sub>)를 만든다. 따라서 전자파의 진행 경로를 (B<sub>p</sub>)에 평행하게 플라즈마에 입사하면 R-wave와 L-wave로 전파되고 다른 굴절율에 의한 Faraday Rotation 때문에 통과된 전자파의 전체 Polarization이 회전하게 된다. 입사 전자파의 주파수(f)가  $f_p$ ,  $f_c$  보다 훨씬 큰 경우 회전각도는 아래의 간단한 식으로 주어진다.<sup>[3]</sup>

$$\phi \cong 2.6 \times 10^{-13} \lambda^2 \int_0^L n_e B_p dl \quad (7)$$

여기서 단위는 SI Unit이고  $\lambda$ 는 전자파의 파장이고  $L$ 은 전자파가 플라즈마를 진행한 거리이다. 위의 조건을 만족하는 주파수 대역은 서브밀리미터 파 대역 이상이다. 토카막 플라즈마내의 자계는 매우 복잡한 구조를 갖고 있으므로 전자파 진행 경로에 수직인 자계 성분이 존재하고 이로 인한 통과된 전자파의 elliptization이 일어나 전체 회전 각도는 훨씬 복잡한 형태를 갖게 되지만 본고에서는 이 효과는 무시하기로 한다. 따라서 위의 식에 보여지듯이 회전각도의 측정으로부터  $B_p$ 를 알 수 있고  $B_p$ 는 플라즈마 전류와 비례하므로 전류분포를 결정할 수 있다.

[그림 6]에는 빔을 재합성하여 Faraday rotation에 의하여 회전된 각도  $\phi$ 를 측정하는 간단한 원리를 나타내었다. 여기서 이용된 소스는 FarInfrared (FIR) Laser가 이용된다. Reference 빔의 주파수는 probe 빔의 주파수에 비하여  $\Delta\omega$ 만큼 shift 되었는데 이는 pyroelectric electric detector의 응답특성을 증가시킬 수 있기 때문이다. 이  $\Delta\omega$ 는 twin FIR Laser나 회전 grating을 가지고 얻을 수 있다. 빔 combiner는 전자파 전계가 grid wire에 평행한 성분은 반사되고 수직인 성분은 통과됨을 이용한다. 따라서 detector에 감지되는 probe 빔의 전계 크기가  $\sin\phi$ 에 비례하게 된다. 결국 detector의 출력은  $\sin\phi \cos(\Delta\omega + \phi)$ 이므로 회전 각도를 측정할 수 있다. 여기서  $\phi$ 는 전자파가 플라즈마를 통과하여서 생긴 위상차이므로 그림처럼 interferometer 신호도 동시에 얻을 수 있다. 하지만 위의 시스템 역시 probe 빔의 진폭변화에 의하여 순수한  $\phi$ 를 얻기 어려운 단점을 가지고 있다. 이는 Quadrature 나 heterodyne 감지 기법으로 극복할 수 있다.<sup>[11]</sup>



[그림 6] Polarimeter 시스템 개요도

## 2-4 Radiometry

자계내의 전자는 일정한 orbit 을 가지고 자계 주위를 회전하면서 cyclotron frequency ( $\omega_c$ )의 정수배의 (harmonic) 주파수로 전파를 방사한다. 전자파가 방사될 때 전자파의 전계 성분이 자계에 수직인 상태로 방사되는 경우와 평행한 상태로 방사되는 경우로 나눌 수 있고 이는 앞에서 논의한 바와 같이 각각 X-모드와 O-모드에 해당된다. 복사되는 모드와 주파수에 따라 1<sup>st</sup> harmonic O-mode electron cyclotron emission (ECE), 1<sup>st</sup> harmonic X-mode ECE, 2<sup>nd</sup> harmonic O-mode ECE, 2<sup>nd</sup> harmonic X-mode ECE, 3<sup>rd</sup> harmonic O-mode ECE, ... 등 무수한 전자파가 복사된다. 이때 복사특성은 optical thickness( $\tau$ )로 구별한다. [그림 7]은 DIII-D토카막에서의 각모드의 optical thickness를 계산한 결과를 보였다. 계산 결과에 보

여지듯이 1<sup>st</sup> harmonic O-mode ECE와 2<sup>nd</sup> harmonic X-mode ECE의 optical thickness는 1보다 크고 이를 optically thick하다고 하며 특히  $\tau \gg 1$ 인 경우 복사특성은 Black Body 복사와 같고 이때의 방사 intensity는 다음과 같다<sup>[3]</sup>.

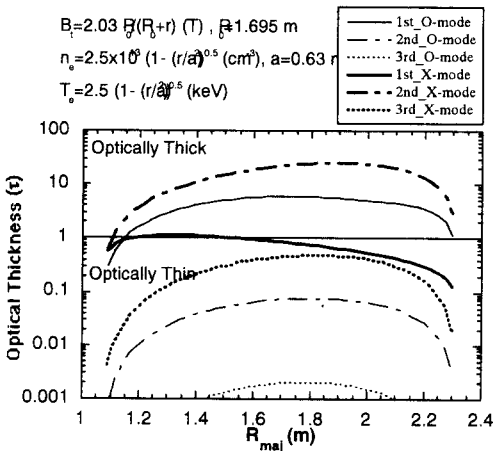
$$I(\omega) \cong \frac{\omega^2 T_e(R)}{8\pi^3 c^2} \quad (8)$$

위식에서  $\omega$ 는 electron cyclotron frequency ( $\omega_c$ )의 정수배이다.  $\omega_c$ 는 eB/me이고 e와  $m_e$ 는 각각 전자전하 전자질량이다.  $T_e(R)$ 은 R지점의 전자온도, c는 빛 속도이다. 토카막 장치에서는 자계 크기가 외부로 나옴에 따라 감소하므로 ( $B \propto 1/R$ ) 앞절의 [그림 2]에서 보는 바와 같이 각 지점에서 방사되는 전파의 주파수는 단순 감소하므로 복사 주파수와 복사 위치는 일대일의 관계이다. 식 (8)과 같이 2<sup>nd</sup> harmonic X-모드 복사 intensity는 복사 지점의 전자 온도에 직접 비례하므로 전자온도 분포를 측정할 수 있다.

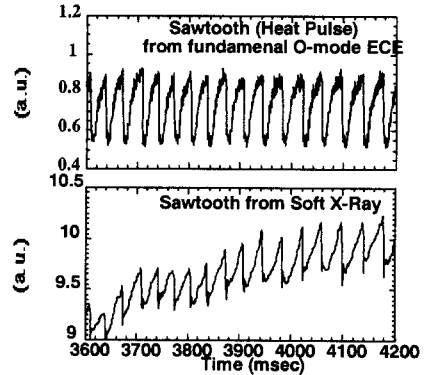
전자 온도 분포를 측정하는 ECE Radiometer 시스템은 기본적으로 Reflectometer 시스템과 유사하

다. 차이점은 Reflectometer의 경우는 능동적으로 전자파를 입사하여 반사 신호를 해석하는 것임에 반하여 ECE Radiometer의 경우는 수동적으로 플라즈마내의 각 ECE layer에서 복사되는 전자파 신호로 해석하는 것이다. 가령 그림 4의 시스템에서 Gunn1을 제거하면 ECE Radiometer 시스템으로 바로 전환된다.

[그림 8]은 앞의 [그림 4]의 시스템을 가지고 Gunn1의 power off 상태에서 70 GHz에 해당되는 ECE를  $f_{RF1}$  출력단에서 관찰한 결과이다. 이 주파수에 해당되는 복사지점은  $R_{maj} \sim 1.4$  m 지점의 fundamental electron cyclotron frequency ( $\omega_c$ )이다. 전자 밀도가 증가하고  $\omega_c = \omega_p$ 일 때 신호가 급격히 감소하는 관찰로부터 O-모드 복사임을 확인하였다. 하지만 원래 시스템이 X-모드의 전파만을 감지하도록 설계되었는데 O-모드가 관측된 것은 토카막 내부의 벽면을 통한 Multiple Reflection에 의하여 전자파의 polarization이 X-모드 polarization으로 변화하였기 때문으로 추정할 수 있다. [그림 8]의 상단에 있는 ECE 시스템에서 얻은 플라즈마내의 Instabilty의 한 종류인 Sawtooth Pulse (Heat Pulse)의 관측을 나타내었고 Soft-X ray diagnostic 결과를 하단에 표시하였다. 위 결과는



[그림 7] Optical thickness ( $\tau$ ).



[그림 8] Fundamental O-mode ECE의 heat pulse 관측

ECE 신호 감지 원리를 Sawtooth의 예로 설명하였지만 이 시스템의 채널을 증가시키고 시스템의 calibration을 통하면 플라즈마내의 절대 전자 온도 분포를 측정할 수 있음을 알 수 있다.

### 2-5 서브밀리미터파의 소스

마지막으로 앞에서 논의된 시스템들에 공통으로 이용되어지는 서브밀리미터파의 소스인 Optically Pumped Far-Infrared (FIR) Laser에 관하여 간략히 소개하고자 한다. FIR Laser는 가스 상태의 분자들을 선형 형태의 cavity에 가두어 넣고 Infrared 빔으로 Optically Pump시키면 molecule들이 빔 에너지를 흡수하여 낮은 상태의 rotational level로부터 높은 상태의 rotational level로 전이되어 emission한다. 이 에너지 레벨의 차이에 해당되는 주파수 영역이 바로 서브밀리미터파 영역이다. 대개 pump 빔으로 CO<sub>2</sub> Laser가 이용되며 800여 종류 이상의 서브밀리미터파 line들이 존재하고 몇 line들을 <표 1>에 주파수에 따라 표시하였다<sup>[12]</sup>.

선형으로 이루어진 FIR laser는 feedback 신호

<표 1> 서브밀리미터파 소스 라인

$f$ (GHz)	$\lambda$ (mm)	Pumped Medium	Pumping Line (CO <sub>2</sub> Laser)
245	1.223	<sup>13</sup> CH <sub>3</sub> F	9P32
294	1.020	CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub>	10P14
337	0.890	CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub>	10P22
393	0.7641	CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub>	10P10
429	0.6995	CH <sub>3</sub> OH	9P34
452	0.6633	CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub>	10P24
526	0.5705	CH <sub>3</sub> OH	9P16
637	0.471	CH <sub>3</sub> OH	10R38
719	0.4171	CH <sub>3</sub> OD	9P6
8085	0.3727	CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub>	10P12
938	0.320	CH <sub>3</sub> OD	9P30

에 의하여 frequency pulling 현상에 의한 주파수 instability 의 문제가 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 cavity를 Ring 형태로 하여 traveling wave를 발진시키면 feedback의 영향을 거의 받지 않는 매우 안정된 발진 주파수를 얻을 수 있다<sup>[13]</sup>.

위의 선형이나 Ring형 소스들의 단점은 그 부피가 커서 상업용으로 이용되기가 매우 어려워 주로 본고의 연구들과 같은 과학용으로 이용되어 왔다. 이들 소스의 구조 소형화 연구부터 소형의 상업용 서브밀리미터파 소스의 개발을 기대할 수 있다.

### III. 결 론

본고에서는 미래 에너지원을 개발하기위해 고안된 장치인 토카막의 핵심 기술 중의 하나인 밀리미터파/서브밀리미터파 플라즈마 진단 기술의 원리와 측정 시스템에 대하여 고찰하였다. 전자 밀도 분포를 측정할 수 있는 Interferometry와 전자 밀도와 RF wave 전계를 측정할 수 있는 Reflectometry를 고찰하고 감지 기법에 관하여 논의하였다. 전류 분포와 전자 온도 분포를 각각 측정할 수 있는 Polarimetry, Radiometry의 원리를 설명하고 각 기법을 구현한 밀리미터파/서브밀리미터파 대역 시스템에 관하여 논하였다. 특히 보고에서 소개한 Reflectometer 진단기술은 최근에 많이 개발되는 상업용 Radar System에 바로 응용 및 활용이 가능하다. 마지막으로 서브밀리미터파 대역의 중요한 Source인 Far-Infrared Laser를 소개하였다. 특히 이 주파수 영역의 소스는 다른 영역에 비하여 매우 그 개발이 미흡한 단계이므로 소형화를 통하여 상업용으로서의 활용이 가능할 것으로 기대한다.



## 참고문헌

- [1] T. H. Stix, *Waves in Plasmas*, AIP Press, New York, 1992.
- [2] V. L. Ginzburg, *Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas*, Gordon and Breach, New York, 1961.
- [3] I. H. Hutchinson, *Principles of Plasma Diagnostics*, Cambridge University Press, 1987.
- [4] K. G. Budden, *The Propagation of Radio Waves*, Cambridge University Press, 1985.
- [5] E. J. Doyle et al., "X-mode Broadband Reflectometric Density Profile Measurements on DIII-D," *Rev. Sci. Instrum.* 61, 2896 1990.
- [6] K. W. Kim et al., "Advances in Reflectometric Density Profile Measurements on the DIII-D Tokamak," *Rev. Sci. Instrum.* 66, 1229 1995.
- [7] C. W. Domier et al., "UltrashortPulse Reflectometry", *Rev. Sci. Instrum.* 66, 399 1995.
- [8] W. A. Peebles et al., "Fluctuation Measurements in the DIII-D and TEXT Tokamaks via Collective Scattering and Reflectometry," *Rev. Sci. Instrum.* 61, 3509 1990.
- [9] J. H. Lee et al., "Determination of Internal, Radio Frequency Frequency Electric Field Profiles via Millimeter Wave Reflectometry in the DIII-D Tokamak", *Rev. Sci. Instrum.*, 68, 462 1997.
- [10] J. H. Lee et al., "Internal Electric Field Structure of Launched Fast Magnesonics waves in the DIII-D Tokamak," *Physical Review Letters*, 80, 2330 1998.
- [11] J. Howard, "A New Multi-Channel Heterodyne Polarimeter for Plasma Current and Electron Density Measurements," *Infrared Physics*, 34, 175 1993.
- [12] K. J. Button, *Infrared and Millimeter Waves*, vol. 2, Academic Press, 1979.
- [13] J. H. Lee et al., "Development of a Far-Infrared Ring Laser for Plasma Diagnostic Applications", *Rev. Sci. Instrum.*, 63, 4678 1992.

### ≡필자소개≡

이 정 해

1985년 2월: 서울대학교 전기공학과  
(공학사)

1988년 2월: 서울대학교 전기공학과  
대학원(공학석사)

1996년 3월: 미국 U.C.L.A. E.E. Dept.  
대학원(공학박사)

1993년 4월~1996년 3월: 미국 회사 General Atomics  
(교환 연구원)

1996년 3월~1996년 8월: 미국 U.C.L.A. E.E. Dept.  
(Post Doctor)

1996년 9월~현재: 홍익대학교 전파공학과 조교수

[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 회로설계 및 플라즈마 진단

