김일성종합대학학보 주체108(2019)년
물리학 제65권 제4호

비자화플라즈마매질속으로 전파되는 전자기파의 감쇠특성

한영수, 최은화

경애하는 최고령도자 **김정은**동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《수학, 물리학, 화학, 생물학과 같은 기초과학부문에서 과학기술발전의 원리적, 방법론적기초를 다져나가면서 세계적인 연구성과들을 내놓아야 합니다.》

최근에 플라즈마와 같은 분산매질에서 전자기파의 전파특성에 대한 해석이 많이 진행되였다.[1]

우리는 플라즈마전자밀도가 포물선분포를 가지는 경우에 불균일한 비자화플라즈마구역에서 가로전자기파의 감쇠특성을 연구하였다.

1. 고주파려파기로서의 비자화플라즈마매질에 대한 조건

플라즈마는 일반적으로 고주파려파기능을 가진다.[4] 불균일한 비자화플라즈마매질속에서 전자기파의 전파는 주로 플라즈마의 굴절률에 의하여 결정되며 플라즈마의 굴절률은 그것의 전자밀도에 관계된다. 입사전자기파의 흡수를 크게 하면서 반사를 될수록 작게 하기 위하여서는 플라즈마매질에서 자유전자밀도가 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

① 플라즈마매질속에서 자유전자밀도가 불균일하여야 한다.

② 플라즈마의 반사결수가 련속이고 령보다 큰 실수여야 한다.

③ 플라즈마의 굴절률과 그 도함수가 련속이여야 한다.

불균일플라즈마층에서 전자기파의 전파를 그림 1에 보여주었다. 유한한 두께를 가진 플라즈마구역을 일정한 폭을 가진 n개의 층들로 나누고 외부자기마당 $\boldsymbol{B}$는 x축에 평행으로 입사한다고 하자. 입사구역(0)과 투과구역(p)은 자유공간이며 z방향으로 편극된 평면전자기파가 플라즈마매질에 수직으로 입사한다.

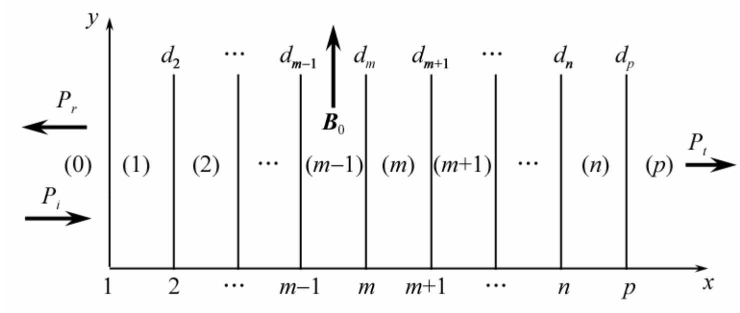

그림 1. 플라즈마층에서 전자기파의 전파

이때 전자밀도는 x의 함수로서 다음과 같은 포물선분포를 가진다.

$$N_e = \begin{cases} N_0\left(1-\dfrac{(2x-d)^2}{d^2}\right), & x \le \dfrac{d}{2} \\ N_0\left(1-\dfrac{(d-2x)^2}{d^2}\right), & x > \dfrac{d}{2} \end{cases} \tag{1}$$

여기서 N_0은 플라즈마의 최대전자밀도, d는 플라즈마구역의 두께이다.

비자화플라즈마의 유전률 ε_r 는 다음과 같이 표시된다.[3]

$$\varepsilon_r = n^2 = 1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega_0^2 + \nu^2} - j\frac{\nu}{\omega_0}\frac{\omega_{pm}^2}{\omega_0^2 + \nu^2} \tag{2}$$

여기서 n 은 플라즈마매질의 굴절률, $\omega_0 = 2\pi f_0$ 은 입사전자기파의 각주파수, ν 는 충돌주파수이다. ω_{pm} 은 m번째 층의 플라즈마주파수로서 다음과 같다.

$$\omega_{pm}^2 = e^2 \frac{N_e^{(m)}}{m\varepsilon_0} \tag{3}$$

2. 비자화플라즈마매질속으로 수직입사하는 전자기파의 감쇠특성

입사구역에서 입사마당 E_z^i 와 반사마당 E_z^s 는 다음과 같다.

$$E_z^i = E_0 e^{-i\tilde{k}_x^{(0)}x}, \quad E_z^s = E_0 R\, e^{i\tilde{k}_x^{(0)}x}$$

여기서 R는 결정하여야 할 결수이고 $\tilde{k}_x^{(0)}$ 은 자유공간에서 파수의 x성분이다.

입사구역에서 총마당은 다음과 같다.

$$E = E_0(e^{-i\tilde{k}_x^{(0)}x} + R\, e^{i\tilde{k}_x^{(0)}x}) \tag{4}$$

m번째 플라즈마층에서 총전기마당은 반사와 입사성분의 합으로서 다음과 같이 표시된다.

$$E_z^{(m)} = E_0(B_m e^{-i\tilde{k}_x^{(m)}x} + C_m\, e^{i\tilde{k}_x^{(m)}x}) \tag{5}$$

마지막구역에서는 투과파만이 있으므로 전기마당은 다음과 같다.

$$E_z^{(p)} = TE_0 e^{-i\tilde{k}_x^{(p)}x} \tag{6}$$

x=0에서 경계조건을 만족시키자면 다음의 행렬방정식이 만족되여야 한다.

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ C_1 \end{pmatrix} = S_1 \begin{pmatrix} R \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$S_1 = \frac{1}{2\tilde{k}_x^{(1)}} \begin{pmatrix} \tilde{k}_x^{(1)} - \tilde{k}_x^{(0)} & \tilde{k}_x^{(1)} + \tilde{k}_x^{(0)} \\ \tilde{k}_x^{(1)} + \tilde{k}_x^{(0)} & \tilde{k}_x^{(1)} - \tilde{k}_x^{(0)} \end{pmatrix} \tag{7}$$

m번째 경계면에서 경계조건을 고려하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} B_m \\ Cm \end{pmatrix} = S_m \begin{pmatrix} B_{m-1} \\ C_{m-1} \end{pmatrix} \tag{8}$$

여기서 S_m 은 m번째 경계면의 산란행렬이다. 즉

$$S_m = \begin{pmatrix} e^{-i\tilde{k}_x^{(m)}d_m} & e^{i\tilde{k}_x^{(m)}d_m} \\ \tilde{k}_x^{(m)}e^{-i\tilde{k}_x^{(m)}d_m} & -\tilde{k}_x^{(m)}e^{i\tilde{k}_x^{(m)}d_m} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} e^{-i\tilde{k}_x^{(m-1)}d_m} & e^{i\tilde{k}_x^{(m-1)}d_m} \\ \tilde{k}_x^{(m-1)}e^{-i\tilde{k}_x^{(m-1)}d_m} & -\tilde{k}_x^{(m-1)}e^{i\tilde{k}_x^{(m-1)}d_m} \end{pmatrix}$$

이다. $x = d_p$ 에서 경계조건을 리용하면 식 (8)은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{pmatrix} B_n \\ C_n \end{pmatrix} = V_p T \tag{9}$$

$$V_p = \frac{1}{2\tilde{k}_x^{(n)}} \begin{pmatrix} \tilde{k}_x^{(n)} + \tilde{k}_x^{(p)} e^{i(\tilde{k}_x^{(n)} + \tilde{k}_x^{(p)})d_p} \\ \tilde{k}_x^{(n)} - \tilde{k}_x^{(p)} e^{-i(\tilde{k}_x^{(n)} + \tilde{k}_x^{(p)})d_p} \end{pmatrix} \tag{10}$$

식 (9)를 일반화하면 다음과 같다.

$$S_g \begin{pmatrix} R \\ 1 \end{pmatrix} = V_p \cdot T \tag{11}$$

여기서 S_g 는 대역산란행렬이다.

$$S_g = \left(\prod_{m=n}^{2} S_m \right) S_1 \tag{12}$$

$S_g = (S_{g1},\ S_{g2})$ 로 표시하면 식 (11)은 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{pmatrix} R \\ T \end{pmatrix} = -(S_{g1} - V_p)^{-1} \cdot S_{g2} \tag{13}$$

이 결과는 반무한균일플라즈마인 경우의 결과[2]와 일치한다. 따라서 R와 T는 총반사결수와 총투과결수라는것을 알수 있다.

플라즈마매질로 전파되는 전자기파의 감쇠률은 다음과 같이 계산된다.

$$A = -20\lg T \tag{14}$$

불균일플라즈마구역을 50개의 층으로 나누고 매층에서 전자밀도는 고정시키고 충돌주파수에 따르는 전자기파의 감쇠률을 고찰하였다.(그림 2) 이때 $N_0 = 1\times 10^{17}\,\mathrm{m}^{-3}$ 이며 d=15cm이다.

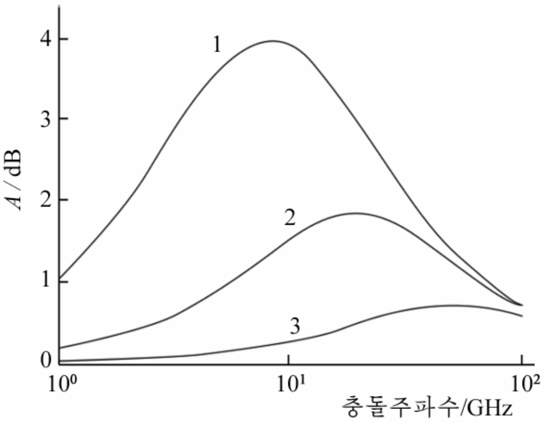

그림 2. 충돌주파수에 따르는 감쇠률
1—3은 f_0 이 각각 10, 20, 50GHz 인 경우

그림 2에서 보는바와 같이 플라즈마매질속에서 전자기파의 감쇠률은 충돌주파수가 입사주파수의 근방에 놓일 때 최대값에 도달한다. 그것은 전자기파의 주파수가 충돌주파수부근의 비교적 낮은 주파수에 있을 때 플라즈마가 강한 공명흡수를 일으켜 투과결수가 크게 감소되기때문이다.

또한 입사전자기파의 주파수가 클 때 플라즈마의 상대유전률이 1로 다가가면서 흡수가 거의 일어나지 않기때문에 감쇠률은 작아진다.

맺 는 말

불균일한 비자화플라즈마매질속으로 입사하는 전자기파의 흡수는 입사전자기파의 주파수에 따라 변하며 충돌주파수가 입사주파수근방에 놓일 때 최대로 된다.

참 고 문 헌

[1] B. W. Bai et al.; IEEE Trans. Antennas Propag., 42, 3365, 2014.
[2] W. C. Chew; Waves and Fields in Inhomogeneous Media, Van Nostrand Reinhold, 45～53, 1990.
[3] A. Piel; Plasma Physics, Springer, 143～148, 2010.
[4] 刘少斌 等; 电波科学学报, 18, 1, 25, 2003.

주체108(2019)년 6월 5일 원고접수

On Attenuation of EM Wave in Unmagnetized Plasma Medium

Han Yong Su, Choe Un Hwa

We studied the collision absorption to frequency of EM wave when EM wave is incident into unmagnetized inhomogeneous plasma medium.

Key words: unmagnetized plasma, attenuation