

자유공간-플라즈마-금속평면계에서의 전자기파의 감쇠

심윤보, 김광일

금속경계에 입사한 전자기파는 금속평면우에 형성된 플라즈마층에서 효과적으로 감쇠될 수 있다. 플라즈마층에서의 전자기파의 반사와 감쇠, 투과에 대하여서는 널리 연구[1, 2]되었다. 플라즈마층에서의 전자기파의 감쇠는 플라즈마파라미터들 특히 금속평면우에 형성된 플라즈마층에서의 전하밀도분포에 크게 관계된다.[3, 4] 선행연구들[2, 5]에서는 플라즈마층에서 전자기파의 전파를 계산하기 위하여 수값풀이방법을 리용하였다.

본문에서는 자유공간-플라즈마-금속평면계에서 플라즈마에 의한 전자기파의 감쇠특성을 다중반사와 투과를 고려하여 기초리론적으로 논의하고 흡수정도를 정량적으로 평가하였다.

완전전도성도체로 간주하는 금속평면우에 형성된 불균일한 플라즈마층으로 평면전자기파가 수직으로 입사한다고 하자.(그림 1)

이때 불균일한 플라즈마층은 플라즈마파라미터들이 일정하다고 볼수 있는 얇은 부분층($n=1, 2, \dots, M$)들로 나눌수 있다.(그림 2)

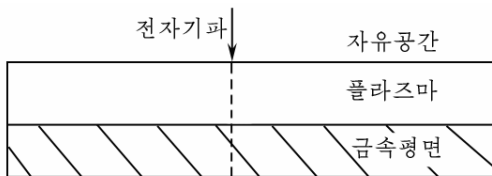


그림 1. 플라즈마층으로의 전자기파입사

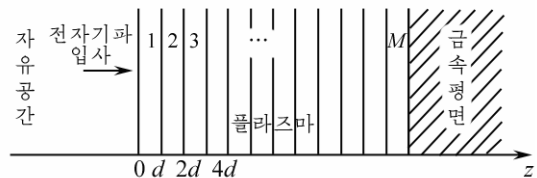


그림 2. 플라즈마층의 분할

n 번째 부분층으로부터 $n+1$ 번째 부분층으로 전자기파가 입사할 때 n 번째 부분층과 $n+1$ 번째 부분층사이의 경계에서의 전자기파의 반사률과 투과률을 각각 $R_{n+1, n}$, $T_{n+1, n}$, 플라즈마에 의한 전자기파의 감쇠를 특징짓는 인수를 $\alpha_n (n=1, 2, \dots, M)$ 이라고 하자.

그러면 n 번째 층과 $(n+1)$ 번째 층사이의 경계에서 전자기파의 총반사률은 다음과 같이 근사화할수 있다.

$$R_{\text{총}}^{(n)} = [R_{n+1, n} + \alpha_{n+1}^2 (1 - R_{n+1, n}^2) R_{n+2-\delta_{nM}, n+1-\delta_{nM}} (1 - \delta_{nM})] \cdot \prod_{k=1}^{n+\delta_{n0}} [\alpha_k (1 - R_{k, k-1})]^{1-\delta_{n0}} \quad (1)$$

여기서 첨수 $n=0$ 은 자유공간구역, $n=1, 2, \dots, M$ 은 플라즈마부분층, $n=M+1$ 은 금속평면층이다.

플라즈마유전률에 대한 아플레톤의 공식을 리용하면

$$R_{n+1, n} = \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{Re}}^{(n)}} - \sqrt{\epsilon_{\text{Re}}^{(n+1)}}}{\sqrt{\epsilon_{\text{Re}}^{(n)}} + \sqrt{\epsilon_{\text{Re}}^{(n+1)}}} \quad (n=0, 1, 2, \dots, M). \quad (2)$$

여기서

$$\bar{\varepsilon}_{\text{Re}}^{(n)} = 1 - \frac{\left(\frac{\omega_p^{(n)}}{\omega}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega_{en}^{(n)}}{\omega}\right)^2}, \quad \omega_p^{(n)} = \sqrt{e^2 \frac{N_n}{m_e \varepsilon_0}}$$

인데 N_n 은 n 번째 플라즈마부분층의 전자밀도이다.

전자기파가 플라즈마층의 두께가 d 인 부분층을 통과할 때 전자기파의 감쇠를 특징짓는 인수는

$$\alpha_n = e^{-\frac{\omega}{c} \gamma_n d} \quad (3)$$

이다. 여기서

$$\gamma_n = \sqrt{\frac{-\left[1 + \left(\frac{\omega_{en}^{(n)}}{\omega}\right)^2 - \left(\frac{\omega_p^{(n)}}{\omega}\right)^2\right] + \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\omega_{en}^{(n)}}{\omega}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{\omega_{en}^{(n)}}{\omega}\right)^2 - 2\left(\frac{\omega_p^{(n)}}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\omega_p^{(n)}}{\omega}\right)^4\right]}}{2 \left[1 + \left(\frac{\omega_{en}^{(n)}}{\omega}\right)^2\right]}}.$$

부분층들사이의 경계에서 전자기파가 반사, 투과할 때 반사굴절법칙을 리용하면 에네르기가 $P_{\text{입}}^{(0)}$ 인 전자기파가 자유공간으로부터 입사하는 경우 금속평면층에 도달하는 전자기파의 에네르기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{\text{입}}^{(M)} &= P_{\text{투}}^{(M-1)} e^{-2\frac{\omega}{c} \gamma_M d} = \\ &= P_{\text{입}}^{(0)} \prod_{n=0}^{M-1} (1 - R_t^{(n)^2}) e^{-2\frac{\omega}{c} \gamma_n d} \cdot e^{-2\frac{\omega}{c} \gamma_M d} \end{aligned} \quad (4)$$

이때 에네르기보존법칙에 의하여

$$P_{\text{입}}^{(0)} = P_{\text{반}}^{(0)} + P_{\text{입}}^{(M)} + P_{\text{흡}}'. \quad (5)$$

여기서 왼변의 항은 플라즈마에 입사한 전자기파의 에네르기이며 오른변의 첫항은 자유공간으로부터 입사한 전자기파의 플라즈마경계에서의 반사로 인한 에네르기, 두번째 항은 플라즈마를 통과하여 금속평면에 도달한 전자기파의 에네르기, 세번째 항은 플라즈마에 의한 전자기파의 흡수에 해당하는 에네르기이다. 따라서

$$\frac{P_{\text{흡}}'}{P_{\text{입}}^{(0)}} = 1 - R_t^{(0)^2} - \prod_{n=0}^{M-1} (1 - R_t^{(n)^2}) e^{-2\frac{\omega}{c} \gamma_n d} \cdot e^{-2\frac{\omega}{c} \gamma_M d}. \quad (6)$$

금속평면에 도달한 전자기파가 금속평면에서 반사되어 다시 자유공간쪽으로 전파되어 나오는 파정도 같은 방법으로 적을수 있다. 이때

$$\frac{P_{\text{입}}''}{P_{\text{입}}^{(M)}} = 1 - (1 + R_{10})^2 e^{-2\frac{\omega}{c} \gamma_1 d} \prod_{k=1}^{M-1} \tilde{T}_t^{(k)^2} e^{-2\frac{\omega}{c} \gamma_{k+1} d}. \quad (7)$$

식 (6), (7)을 리용하면 자유공간-플라즈마-금속평면계에서 자유공간으로부터 입사한 전자기파가 플라즈마에 의하여 흡수되는 정도를 다음과 같이 평가할수 있다.

$$\zeta = \frac{P'_{\text{흡}} + P''_{\text{흡}}}{P_{\text{입}}^{(0)}} = 1 - R_t^{(0)2} - \prod_{n=0}^{M-1} (1 - R_t^{(n)2}) e^{-2\frac{\omega}{c}\gamma_n d} \cdot e^{-2\frac{\omega}{c}\gamma_M d} + \left[1 - (1 + R_{10})^2 e^{-2\frac{\omega}{c}\gamma_1 d} \prod_{k=1}^{M-1} \tilde{T}_t^{(k)2} e^{-2\frac{\omega}{c}\gamma_{k+1} d} \right] \prod_{n=0}^{M-1} (1 - R_t^{(n)2}) e^{-2\frac{\omega}{c}\gamma_n d} \cdot e^{-2\frac{\omega}{c}\gamma_M d} \quad (8)$$

맺 는 말

논문에서는 자유공간-플라즈마-금속평면계에서 전자기파가 전파할 때 플라즈마에 의한 전자기파의 감쇠특성을 논의하여 전자기파의 흡수정도를 평가하기 위한 이론적결과를 얻었다. 얻어진 결과는 플라즈마의 불균일성이 심한 경우에도 적용할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. Cao et al.; J. Radio Science, **17**, 2, 125, 2002.
- [2] J. Zhang et al.; Int. J. Infrared and Millimeter, **28**, 71, 2007.
- [3] C. Curel et al.; Electromagn. Research Lett., **12**, 171, 2009.
- [4] C. Curel et al.; Progress in Electromagnetics, B **21**, 385, 2010.
- [5] H. W. Yang et al.; Optik, **124**, 2037, 2013.

주체105(2016)년 5월 5일 원고접수

Reduction of EM Wave in Free Space-Plasma-Metal Plane System

Sim Yun Bo, Kim Kwang Il

The reduction of electromagnetic wave in free space-plasma-metal plane system is theoretically discussed. Here the absorption of electromagnetic wave by interaction with plasma is evaluated. The obtained result can be applied to the propagation of the electromagnetic wave in highly inhomogenous plasma.

Key words: plasma, electromagnetic wave, reduction