김일성종합대학학보 JOURNAL OF **KIM IL SUNG** UNIVERSITY
(자연과학) (NATURAL SCIENCE)
주체106(2017)년 제63권 제1호 Vol. 63 No. 1 JUCHE106(2017).

구대칭플라즈마매질에서 전자기파의 산란특성

김광명, 최창호

위대한 령도자 **김정일**동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학연구사업을 더욱 강화하여 세포공학과 유전자공학, 초고압물리학, 극저온물리학을 발전시키며 레이자와 플라즈마기술, 원자에네르기와 태양에네르기를 개발하여 인민경제에 받아들이는데서 나서는 과학기술적문제를 적극 풀어나가야 하겠습니다.》(《**김정일**선집》 증보판 제11권 139페지)

전자기파가 플라즈마매질속으로 전파될 때 전자기파의 감쇠가 일어나므로 플라즈마매질속에서 전자기파의 흡수현상은 레이다파의 전파와 측정에서 중요한 문제로 제기된다.

우리는 토막선형근사를 리용한 회전시공간유한계차방법(PLJERC-FDTD)[1]으로 비자화플라즈마속에서 2차원가로자기파(TM)의 흡수 및 산란특성을 모의하였다.

1. PLJERC계차식

충돌랭플라즈마분산매질에서 막스웰방정식과 련관방정식은 다음과 같다.

$$\left.\begin{aligned}&\nabla\times\boldsymbol{H}=\varepsilon_0\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial t}\\&\nabla\times\boldsymbol{E}=-\mu_0\frac{\partial\boldsymbol{H}}{\partial t}\\&\frac{\partial\boldsymbol{u}_e}{\partial t}=-\frac{e}{m}\boldsymbol{E}-\nu\boldsymbol{u}_e\\&\boldsymbol{J}=-en_e\boldsymbol{u}_e\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

여기서 $\boldsymbol{J}$－분극전류밀도, ε_0, μ_0－진공속에서 유전률과 투자률, n_e－전자밀도, $\boldsymbol{u}_e$－전자의 평균속도, ν－플라즈마의 충돌주파수, e, m－전자의 전하량과 질량이다.

주파수에 따르는 전기마당세기와 전류밀도관계는

$$\boldsymbol{J}(\omega)=\boldsymbol{\sigma}(\omega)\boldsymbol{E}(\omega),\quad \boldsymbol{\sigma}(\omega)=\varepsilon_0\omega_p^2/(j\omega+\nu)\ .\tag{2}$$

여기서 ω_p는 플라즈마의 각진동수로서 다음과 같다.

$$\omega_p=\sqrt{n_e e^2/(m\varepsilon_0)}\tag{3}$$

식 (2)에 대하여 푸리에거꿀변환을 실시하면

$$\boldsymbol{J}(t)=\int_0^t\boldsymbol{E}(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau\ ,\ \sigma(t)=\varepsilon_0\omega_p^2\exp(-\nu\tau)U(\tau)\ .\tag{4}$$

여기서 $U(\tau)$는 단위계단함수이다.

Yee그물에서 $t=n\Delta t$라고 하고 토막선형근사를 리용하면 분극전류밀도 J의 매 성분은 다음과 같다.

$$J_i^n = \sum_{m=0}^{n-1}[E_i^{n-m}\sigma^m + (E_i^{n-m-1} - E_i^{n-m})\xi^m] \quad (i = x,\ y,\ z)$$

여기서

$$\sigma^m = \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t}\sigma(\tau)d\tau = \frac{\varepsilon_0\omega_p^2}{\nu}[1-\exp(-\nu\Delta t)]\exp(-m\nu\Delta t)\,,$$

$$\xi^m = \frac{1}{\Delta t}\int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t}(t-m\Delta t)\sigma(\tau)d\tau = \frac{\varepsilon_0\omega_p^2}{\nu^2\Delta t}[1-(1+\nu\Delta t)\exp(-\nu\Delta t)]\exp(-m\nu\Delta t).$$

따라서 다음번시간걸음에서 전류밀도는 다음과 같다.

$$J_i^{n+1} = \sum_{m=0}^{n}[E_i^{n+1-m}\sigma^m + (E_i^{n-m} - E_i^{n+1-m})\xi^m] \tag{5}$$

여기서

$$\sigma^m = \exp(-\nu\Delta t)\sigma^{m-1}\,,\ \xi^m = \exp(-\nu\Delta t)\,\xi^{m-1}. \tag{6}$$

중심계차근사를 리용하면 식 (1)의 첫번째 식은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$(\nabla\times\boldsymbol{H})_i^{n+1/2} = \varepsilon_0\frac{E_i^{n+1}-E_i^n}{\Delta t} + \frac{J_i^{n+1}-J_i^n}{2} \tag{7}$$

따라서 비자화플라즈마속에서 PLJERC-FDTD방법[3]을 리용한 전기마당의 계차방정식은 다음과 같다.

$$E_i^{n+1} = \frac{1}{1+\dfrac{\Delta t}{2\varepsilon_0}(\sigma^0-\xi^0)}\left[\left(1-\frac{\Delta t}{2\varepsilon_0}\xi^0\right)E_i^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0}(\nabla\times\boldsymbol{H})_i^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2\varepsilon_0}\psi_i^n\right] \tag{8}$$

여기서

$$\psi_i^n = \sum_{m=0}^{n-1}[E_i^{n-m}(\sigma^m+\sigma^{m+1}) + (E_i^{n+1-m} - E_i^{n-m})(\xi^m+\xi^{m+1})]. \tag{9}$$

레이다파탐측위치에서 전체 산란출력을 $P(\omega)$, 입사세기를 $I(\omega)$라고 하면 산란자름면면적은 다음과 같다.

$$\sigma(\omega) = \frac{P(\omega)}{I(\omega)} \tag{10}$$

2. 흡수경계조건

우리는 흡수경계층으로서 완전정합층(PML)을 리용하였다.[2] 이때 PML매질의 파동저항과 린접한 매질의 파동저항은 완전히 정합된다고 가정한다. 따라서 입사파는 반사없이 경계면을 투과하여 PML에 들어가며 PML에서 급속히 감쇠된다.

PML경계조건을 리용하여 2차원TM파의 흡수를 고찰하면 TM파에 대한 막스웰방정식은 다음과 같다.

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial x} &= \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_m H_y \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} &= -\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} - \sigma_m H_x \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= \varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

여기서 σ와 σ_m은 각각 매질의 전도도와 투자률이다. PML매질에서 전기마당성분 E_z를 2개의 성분 E_{zx}, E_{zy}로 가르자. 즉 $E_z = E_{zx} + E_{zy}$로 보면 식 (11)은 다음과 같아진다.

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial(E_{zx}+E_{zy})}{\partial x} &= \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_{mx} H_y \\ \frac{\partial(E_{zx}+E_{zy})}{\partial y} &= -\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} - \sigma_{my} H_x \\ \varepsilon_0 \frac{E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} &= \frac{\partial H_y}{\partial x} \\ \varepsilon_0 \frac{E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} &= -\frac{\partial H_x}{\partial x} \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

σ_x, σ_{mx}, σ_y, σ_{my}는 PML매질의 이방성을 나타낸다. $\sigma_x = \sigma_{mx} = \sigma_y = \sigma_{my}$일 때 식 (12)는 자유공간속에서 막스웰방정식으로 넘어간다. $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, $\sigma_{mx} = \sigma_{my} = \sigma_m$일 때 PML매질은 보통의 손실매질로 된다.

PML매질의 중요한 기본조건은 저항정합조건이다. 진공속에서 평면파가 흡수경계에 수직으로 입사한다고 하면 저항정합조건은 다음과 같다.

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_m}{\mu_0} \tag{13}$$

3. 균일분포된 플라즈마구에서 전자기파의 흡수계산

반경이 75mm인 알루미니움구주위를 플라즈마로 피복하고 플라즈마층의 두께를 변화시키면서 산란자름면면적을 계산하였다. 전체 계산공간을 Yee그물로 분할하고 계산공간밖에 8개의 PML흡수경계를 설치하였다. 이 흡수공간에 의하여 반사가 절단된다. 계산할 때 공간걸음은 2.5mm, 시간걸음은 5ps로 하였다. 입사평면파를 중심주파수가 0.5GHz인 시누스충격파로, 플라즈마의 특성파라메터를 n_e=1.1×10^{17}m^{-3}, ν=3.94×10^{10}rad/s로 설정하였다.

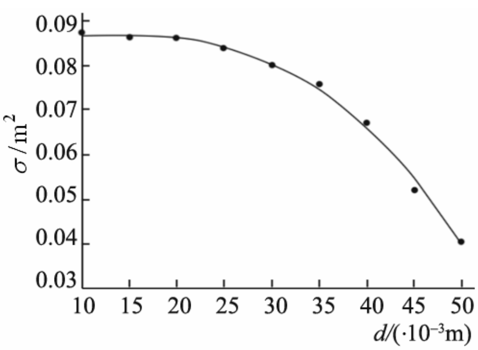

그림. 플라즈마층두께에 따르는 산란자름면면적

플라즈마층의 두께에 따르는 전자기파의 산란자름면면적은 그림과 같다.

그림에서 보는바와 같이 플라즈마층의 두께가 커질수록 산란자름면면적은 감소하며 30mm근방에서부터는 급속히 감소하여 50mm에서는 거의 령으로 된다.

맺 는 말

플라즈마매질속으로 레이다파가 입사할 때 플라즈마층의 두께에 따라 산란자름면면적이 작아지며 50mm이상의 두께에서는 거의 반사가 일어나지 않는다.

참 고 문 헌

[1] S. Liu et al.; IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 13, 5, 187, 2003.

[2] J. P. Bérenger; Perfectly Matched Layer (PML) for Computational Electromagnetics, Morgan & Claypool Publishers, 13～18, 2007.

[3] W. H. Yu et al.; Advanced FDTD Methods, Artech House, 7～11, 2011.

주체105(2016)년 9월 5일 원고접수

On Scattering Characteristics of Electromagnetic Wave in Spherically Symmetric Plasma Medium

Kim Kwang Myong, Choe Chang Ho

Using FDTD, we simulated the scattering characteristics of electromagnetic wave in the plasma surrounding metal sphere. When the radar wave were incident on plasma medium, the scattering cross section became small according to the thickness of plasma layer and in the thickness of 50mm, there were little of reflection.

Key words: FDTD, plasma, scattering