

# 플라즈마를 포함한 포톤위상학적절연체에서 전자기파의 전파특성

박명철, 박학철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리는 과학기술분야에서 이룩한 성과에 만족하지 말고 나라의 과학기술을 새로운 높은 단계으로 발전시키기 위하여 적극 투쟁하여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제11권 133페이지)

포톤위상학적절연체(Photonic Topological Insulator: PTI)에서 전자기파의 전파특성연구는 이론적으로뿐만아니라 인민경제발전에서 매우 중요한 의의를 가진다.

포톤위상학적절연체는 위상기하학적특성에 의하여 전자기파가 모서리상태에서 오직 한방향으로만 전파되고 거울산란이 차폐되는 구조체이다. 최근에 이에 대한 연구가 활발히 벌어지고있는데 대체로 주기적구조체에 대한 연구[1, 4, 5]를 기본으로 하고있다.

론문에서는 주기적구조체가 아니라 연속체인 자화된 플라즈마를 포함한 포톤위상학적절연체에서 전자기파의 주파수분산관계에 미치는 자기마당의 영향을 연구하고 TM파의 분포특성을 고찰하였다.

## 1. 모 형 설 정

그림 1에서와 같이 자화된 플라즈마와 자화되지 않은 플라즈마를 포함한 포톤위상학적절연체에서 전자기파의 전파를 논의해보자.

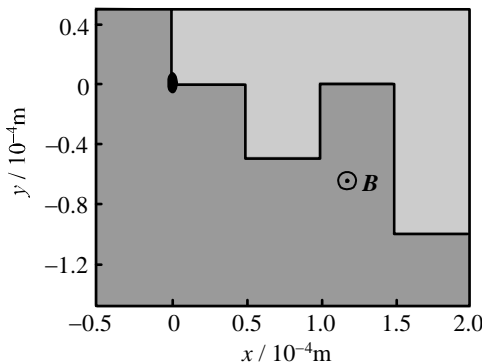


그림 1. 자화된 플라즈마(아래)와 자화되지 않은 플라즈마(위로 이루어진 포톤위상학적절연체

자화되지 않은 플라즈마를 포함한 포톤위상학적절연체에서 전자기파의 전파를 논의해보자. 이때 자기마당은 면에 수직으로 작용한다고 본다. 그리고 좌측 윗쪽 경계점에 전자기파의 원천이 놓여있다고 하자.

정상자기마당  $\mathbf{B} = zB_z$  에 의해 자화된 한성분플라즈마의 투자률은  $\mu = \mu_0$  이고 상대유전률은 다음과 같은 에르미트반대칭텐소르형태를 가진다. 즉

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & 0 \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_c^2}, \quad \epsilon_{33} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad \epsilon_{12} = -\epsilon_{21} = i \frac{-\omega_c \omega_p^2}{\omega(\omega^2 - \omega_c^2)} \quad (2)$$

으로서 이때  $\omega_c = (q_e / m_e) B_z$  는 싸이클로트론주파수이고  $\omega_p^2 = N_e q_e^2 / \epsilon_0 m_e$  는 플라즈마주파수이다.[2] 여기서  $N_e$  는 자유전자밀도이고  $q_e$  와  $m_e$  는 각각 전자의 전하와 질량이다.

xy 평면에서 전자기파가 전파될 때 즉  $\mathbf{k} = (k_x, k_y, 0)$  일 때 전자기파를  $\text{TE}(E_z \neq 0, H_z = 0)$  파와  $\text{TM}(E_z = 0, H_z \neq 0)$  파로 갈라서 취급할수 있다. 자기전기적결합이 없을 때에는 이 모드들의 분산관계가 다음과 같이 표시된다.

$$k^2 = \frac{\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{12}^2}{\varepsilon_{11}} \left( \frac{\omega_n}{c} \right)^2 \quad \text{TM파} \quad (3)$$

$$k^2 = \varepsilon_{33} \left( \frac{\omega_n}{c} \right)^2 \quad \text{TE파} \quad (4)$$

여기서  $\omega_n$  은 고유각진동수이다.

실지로 체적분산특성은 쌍방향특성을 나타내도 경계면에서는 쌍방향특성이 파괴된다.

한편 대응하는 전자기마당의 풀이는 막스웰방정식계로부터 얻을수 있다.[3] 이때

$$\begin{pmatrix} 0 & -\mathbf{k} \times I_{3 \times 3} \\ \mathbf{k} \times I_{3 \times 3} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega \varepsilon_0 \bar{\varepsilon} & 0 \\ 0 & \omega \mu_0 I_{3 \times 3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} \quad (5)$$

가 성립하므로

$$\begin{pmatrix} -I_{3 \times 3} & -\frac{\bar{\varepsilon}^{-1}}{\omega \varepsilon_0} \cdot \mathbf{k} \times I_{3 \times 3} \\ \frac{1}{\omega \mu_0} \cdot \mathbf{k} \times I_{3 \times 3} & -I_{3 \times 3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} = 0 \quad (6)$$

이다. 여기서  $I_{3 \times 3}$  은  $3 \times 3$  단위행렬로서  $(\mathbf{k} \times I_{3 \times 3})_{\mu\nu} = \varepsilon_{\mu\nu\xi} k_\xi$  이다. 이때  $\varepsilon_{\mu\nu\xi}$  는 레비-치비타 3량그반대칭텐소르이다.

## 2. 주파수분산관계에 미치는 자기마당의 영향과 전파특성

먼저 자속밀도를 40T로부터 100T까지 20T씩 증가시키면서 자화된 플라즈마를 포함한 포톤위상학적절연체의 주파수분산관계를 논의하기로 하자.

그림 2에 자화된 플라즈마를 포함한 포톤위상학적절연체에서 자기마당에 따라 주파수분산관계가 어떻게 달라지는가를 보여주었다. 그림 2에서 보는바와 같이 자기마당이 증가하는데 따라 금지주파수대역은 점차 아래로 내려간다. 이것은 이 구조체에서 자기마당을 잘 조절하면 필요한 금지주파수대역을 얻을수 있다는것을 잘 보여준다.

또한 자화된 플라즈마를 포함한 포톤 위상학적절연체에서 전자기파의 전파특성도 고찰하였다. 자속밀도가 60T일 때 포톤 위상학적절연체의 주파수분산관계를 그림 3에 보여주었다.

그림 3에서 알수 있는바와 같이  $\omega/\omega_c$  ( $\omega_c/2\pi = 1.73\text{THz}$ )가 5.70~6.09사이의 값을

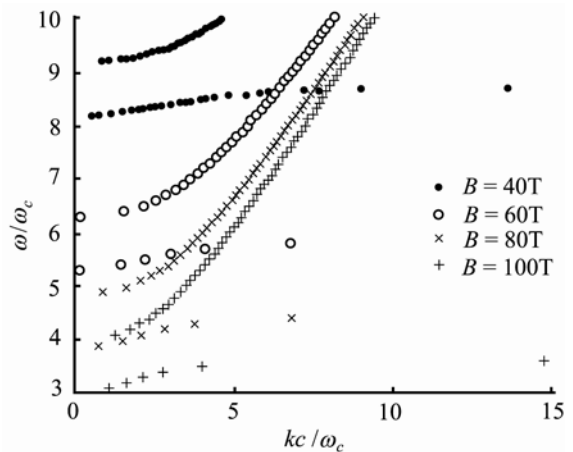


그림 2. 자기마당에 따르는 자화된 플라즈마를 포함한 포톤위상학적절연체의 주파수분산관계변화

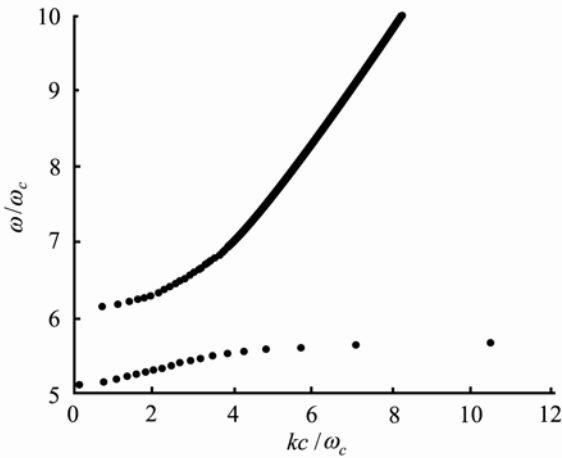


그림 3. 자속밀도가 60T일 때 포톤위상학적절연체의 주파수분산관계

가질 때에는 전자기파의 전파가 금지된다. 실지로 경계 및 모서리상태는 이 금지구역에 놓이게 된다. 포톤위상학적절연체에서는 이 경계 및 모서리상태에서의 전파특성이 특이한 성질로 된다.

이 포톤위상학적절연체의 특이한 모서리상태를 보기 위하여 금지구역안과 금지구역밖에서 TM파의 전파특성을 논의하기로 한다. 금지구역밖에서  $\omega/\omega_c=7$ 인 경우와 금지구역안에서  $\omega/\omega_c=5.8$ 인 두가지 경우를 취급한다. 계산은 COMSOL 5.1(Build: 136)의 rf-module에서 진행하였다. 계산을 진행할 때 플라즈마주파수로는  $\omega_p/2\pi=9.7\text{THz}$  를, 싸이클로트론주파수로는  $\omega_c/2\pi=1.73\text{THz}$  를

리용하였다.

금지구역밖에서  $\omega/\omega_c=7$ 인 경우의 TM파의 전파특성을 그림 4에 보여주었다. 그림 4에서 볼수 있는바와 같이 전자기파는 자화된 플라즈마구역에 완전히 퍼져 분포되어있다. 즉 모서리상태에서의 독특한 성질은 나타나지 않는다.

한편 금지구역안에서  $\omega/\omega_c=5.8$ 인 경우의 TM파의 전파특성을 보면 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는바와 같이 금지구역안에서는 자화된 플라즈마구역안으로 전자기파가 침투될수 없으므로 모서리상태로 전파하게 된다. 그것도 쌍방향특성이 아니라 한방향특성을 띠게 된다. 이것은 자화된 플라즈마를 가지고 포톤위상학적절연체를 만들수 있다는것을 보여준다.

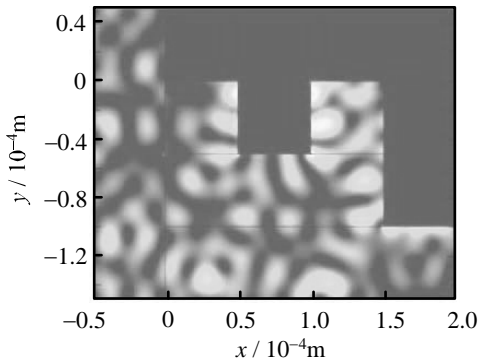


그림 4. 금지구역밖에서 전자기파의 전파특성

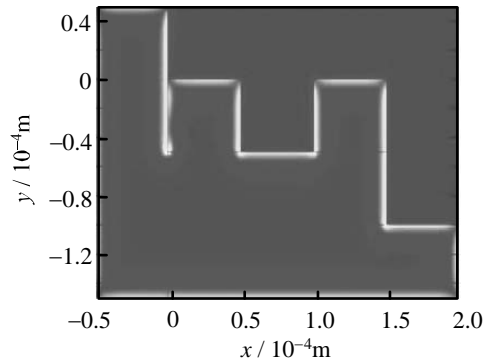


그림 5. 금지구역안에서 전자기파의 전파특성

## 맺 는 말

1) 이 포톤위상학적절연체에서 자기마당이 증가하는데 따라 금지주파수대역은 점차 아래로 내려간다는 사실을 밝혔다.

2) 또한 금지구역안과 밖에서 TM파의 분포특성을 고찰함으로써 자화된 플라즈마를

가지고 위상기하학적으로 독특한 포톤위상학적절연체를 만들수 있다는것을 확증하였다. 이것은 앞으로 주기적구조체뿐아니라 연속체에서 전자기파의 전파특성을 연구하는데서 중요한 의의를 가지게 된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(물리학), 64, 1, 6, 주체107(2018).
- [2] 김인애; 플라즈마물리, 김책공업종합대학출판사, 80~120, 주체104(2015).
- [3] G. Mario et al.; Phys. Rev., A 86, 042118, 2012.
- [4] L. H. Wu et al.; Phys. Rev. Lett., 114, 223901, 2015.
- [5] A. Scott et al.; Phys. Rev. Lett., 113, 113904, 2014.

주체107(2018)년 9월 5일 원고접수

## **Propagation Properties of the Electromagnetic Wave in Photonic Topological Insulator with Plasma**

*Pak Myong Chol, Pak Hak Chol*

In this paper we have discussed the effect of the magnetic field on a frequency dispersion relation in photonic topological insulator(PTI) with the magnetized plasma and investigated the distribution of TM-wave. We have found the fact that the higher the magnetic field gets, the lower the band gap in the PTI with magnetized plasma gets. By investigating the distribution of TM-wave in the interior and exterior of the band gap, we have demonstrated the possibility of formation of PTI by the magnetized plasma.

Key words: photonic topological insulator, TM-wave, plasma