

두께에 따른 금속 슬릿 내에서의 전기장 향상

Electric field enhancement in the metal slit at different thickness

구석모, 유선규, 정영진, 박동원, 한상훈, 김대식*, 박남규

서울대학교 전기공학부, *서울대학교 물리천문학부

e-mail : nkpark@snu.ac.kr

파장보다 작은 크기의 금속 hole / particle 구조에서 빛의 에너지를 focusing 할 수 있다. 이러한 연구의 시작은 Ebbesen의 연구⁽¹⁾로, 파장보다 작은 구멍의 array 구조에서 빛의 투과량이 고전적인 생각과 다르게, 많이 투과하는 경우가 있었다. 이러한 연구를 필두로 직사각형의 금속 slit 구조⁽²⁾에서 빛의 공진현상을 이용해서 우수한 편광 특성과 extraordinary transmission (EOT) 특성을 해석적으로 연구된 바가 있었으며, 실제 실험⁽³⁾으로도 입증되기도 하였다. 또한, slit의 길이가 무한한 공진현상이 없는 구조⁽³⁾에서도 EOT 특성을 가질 수 있음이 보고되었다. 이러한 금속 슬릿 구조에서, 폭(a_x)과 두께(t)를 줄이면서, 금속 끝 부분에 전하량 밀도가 높아지게 되는데, 이것이 바로 전기장의 세기를 더 크게 만들게 된다. 하지만, 금속의 두께를 계속 줄이면서, 슬릿에서 전하가 모이는 부분의 면적이 좁아지게 되는데, 이로 인해서 슬릿 내에 모이는 전기장 에너지가 더 이상 늘어나지 않을 가능성이 있다. 이를 확인하기 위해서 이 논문에서는 FDTD (Finite-difference time-domain)⁽⁴⁾의 방법을 이용하도록 한다.

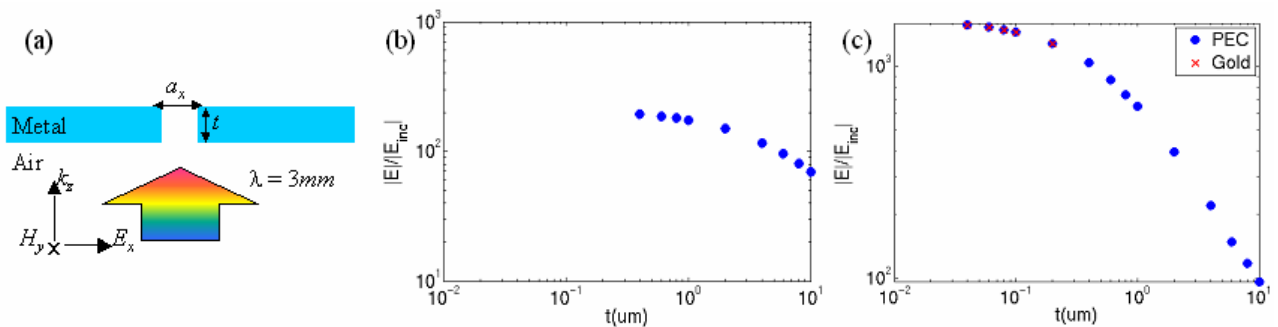


그림 1. (a) Metal Slit 구조 (b) 금속 두께(t)에 따른 E field enhancement 특성 ($a_x=1\mu m$) (c) 금속 두께(t)에 따른 E field enhancement 특성 ($a_x=0.1\mu m$)

그림 1(a)와 같은 금속 슬릿에서 폭이 각각 $1\mu\text{m}$, $0.1\mu\text{m}$ 인 서로 다른 2 가지 경우에 대해서 두께를 바꾸면서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시간을 줄이기 위해서 non-uniform grid를 사용했는데, 금속 slit 부근에서 grid의 크기를 5nm 로 먼 쪽에서는 $25\mu\text{m}$ 까지로 결정하였다. 사용한 빛의 파장은 3mm 이고, 입사방향이 슬릿에 수직 방향인 평면파이다. 편광 방향은 E_x , E_z , H_y 만 존재하는 transverse magnetic (TM) mode 이다. 그리고 금속은 perfect electric conductor (PEC) ($\epsilon = \infty$)로 가정하고 수치 해석을 수행하였고, 추가적으로 금속의 두께가 좁은 경우에, skin depth의 효과를 보기 위해서 Drude model의 gold parameter를 넣고 수치해석을 하였다.

먼저 그림 1(b)와 (c)를 분석해 보면, 금속의 두께를 줄이면서 E field enhancement가 더 커짐을 알 수 있다. 이것은 금속 슬릿에 모이는 전하량 밀도가 더 세지기 때문이다. 빛에 의해 유도된 전류는 같지만 두께가 얇아짐으로써 슬릿의 면적이 좁아지고 이로 인해서 밀도가 더 세지게 된다. 하지만 두 경우 모두 어느 정도 이하로 줄어들면 더 이상 E field enhancement가 늘어나지 않고 포화 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 두께가 좁아지면서, 더 이상 평행판 축전기처럼 전하가 쌓이지 않기 때문이다. 두께가 충분히 클 경우에는 금속판에 유도된 전류로 인해 생긴 전하가 모두 슬릿 끝 부분에 쌓이게 된다. 하지만 두께가 얇아지면서 슬릿 바깥부분으로 전하가 분포하게 된다. 두 경우 모두 포화 하게 되는데, 그 포화 하는 지점은 다르다는 것을 알 수 있다. 금속의 두께가 폭보다 작은 경우 포화가 시작되는 지점으로 볼 수가 있는데, 폭이 좁은 경우 전하간에 작용하는 힘이 세지기 때문에, 더 좁은 두께까지 전하가 슬릿 내에 분포할 수 있게 만들게 된다.

이로써 금속 슬릿 두께에 따라서 빛의 투과 특성의 경향성을 살펴보았다. 두께를 줄일수록 E field enhancement는 커졌으며, 금속 폭 이하로 두께를 줄일 때에는 그 특성이 거의 포화 함을 알 수 있었다.

Reference

1. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature* 391, 667 (1998).
2. F. J. Garcia-Vidal, E. Moreno, J. A. Porto, and L. Martin-Moreno, "Transmission of light through a single rectangular hole," *Phys. Rev. Lett.* 95, 103901 (2005).
3. J.W. Lee, M. A. Seo, D. H. Kang, K. S. Kim, S. C. Jeoung, and D. S. Kim, "Terahertz electromagnetic wave transmission through random arrays of single rectangular holes and slits in thin metallic sheets," *Phys. Rev. Lett.* 99, 137401 (2007).
4. A. Taflove, and S. C. Hagness, *Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, (Boston, Artech House, 2000) 852.