

완전도체 박막에서 고 투과율 C형 나노 개구 설계

박신중*, 한재원#

Design of a High-Transmission C-Shaped Nano-Aperture in a Perfectly Electric Conductor Film

Sin Jeung Park* and Jae Won Hahn#

ABSTRACT

We have designed a high-transmission nano aperture in a perfect electric conductor film with the incident beam of 532 nm wavelength. The aperture basically has a C-shape and is known to produce a bright spot nearby the aperture in small size less than diffraction limit. The bright spot is strongly coupled with the local plasmon excited through the aperture hole. The characteristics of transmission and peak power of the aperture output were calculated using finite differential time domain (FDTD) technique, and the geometry of the aperture was determined to get a maximum transmission and peak power. To find the effect of the surface plasmon induced near by the aperture, we calculated the variations of the transmittance and the beam sizes by changing the size of the input beam irradiated on the aperture.

Key Words : Nano-aperture (나노 개구), Near-field (근접장), FDTD (시간적 유한미분법), Surface plasmon (표면 플라즈몬)

기호설명

λ = wavelength of the incident light
 ϵ_0 = permittivity of free space
 c = speed of the light
 E = electric field

1. 서론

광 정보 저장, 리소그래피, 광 현미경 기술 등 최고의 광 해상도가 필요한 여러 분야에 입사 파장 이하 크기의 개구를 이용하여 회절 한계에 제

약 받지 않는 스폿을 만드는 방법이 적용될 수 있다. 이 때, 개구의 크기가 입사 파장보다 작아질수록 획득할 수 있는 스폿의 크기는 작아지게 된다. 그러나, 일반적으로 입사 파장 이하 크기의 개구에서 형성되는 출력은 크게 약화된다. Bethe¹에 의하면 입사 파장의 1% 이하의 크기를 가지는 원형 개구에서의 파워 투과량은 개구 크기의 네 제곱에 비례하여 줄어들게 된다. 그러므로 충분하지 못한 출력은 입사 파장 이하 크기의 개구를 이용하고자 하는 연구에 있어서 가장 큰 걸림돌이 되고 있다.

현재 많은 연구 그룹에서는 출력 약화 문제를 해결하는 방법에 관하여 연구하고 있다. 그 중,

☞ 접수일: 2005년 9월 5일; 게재승인일: 2006년 4월 14일

* 연세대학교 기계공학과

교신저자: 연세대학교 기계공학과

E-mail jaewhahn@yonsei.ac.kr Tel. (02) 2123-5811

Thio² 와 Lezec³ 등은 개구 주변에 같은 모양으로 격자를 만들어 단(single) 개구의 출력을 향상시켰다. Thio 는 표면 플라즈몬 (surface plasmon polariton) 으로, Lezec 은 CDEW (composite diffracted evanescent wave)로 격자 구조에서 출력이 증가하는 현상을 설명하고 있다. 또 다른 방법으로는 도파관(waveguide) 형태를 이용하여 개구의 모양에 변화를 주는 것이다. 안테나에서 사용된 여러 가지 형태의 도파관 모양을 이용하여 개구의 형태를 바꾸게 되면, 같은 크기의 출력 광을 만드는 원형이나 사각형 형태의 개구에 비해 보다 더 큰 출력을 얻을 수 있게 된다. 이런 도파관 형태의 개구로서 C 형⁴, H 형⁵, 보 타이(bow-tie)형⁶ 등이 있다. 이런 형태의 개구들은 모두 리지(ridge)를 이용하여 빔을 모으는 형태를 취하고 있다.

기존의 C 형 개구는 1 μm 파장에 대해 설계되었고, 개구 설계 과정에 있어 4 가지 설계 변수가 존재하는데 반해, 실제로 설계 시 고려한 변수는 출력 향상에 가장 큰 영향을 미치는 한 가지뿐이었다. 그러나 본 논문에서는 출력 향상뿐만 아니라 출력 광의 크기 변화에 대한 부분까지 고려하여 개구를 설계하기 위하여 4 가지의 설계 변수를 모두 사용하였다. 또한, Far-field 측정 실험장치에 사용될 532nm 파장의 빛에 대한 C 형 개구를 설계하였다.

2. FDTD 기법

FDTD(finite difference time domain)기법은 일반적인 구조물에서 발생하는 전자기적 현상의 해석에 사용되는 기법으로 Yee⁷ 알고리즘을 기본으로 하여 계산하고자 하는 공간을 Fig. 1 과 같이 기본 크기의 셀을 이용하여 그물 모양으로 나누어 각 점에서의 전기장과 자기장을 계산하게 된다.

FDTD 계산은 시간 의존적인 두 가지의 맥스웰 방정식 식 (1), (2)를 기본으로 하여 식에서 주어진 시간과 공간의 항을 유한 요소 근사법을 사용하여 변형시킨다. 이렇게 하여 구해진 식들은 식 (3) - 식 (1)에서 변형된 FDTD 식의 x 축 성분 계산식 - 과 같이 표현되고, 이 식에 의해 초기의 장(field)에 의해 주위의 셀에 유도되는 장이 계산되고, 시간에 따라 같은 과정을 반복함으로써 전체 계산 공간의 전기장과 자기장을 계산하게 된다.

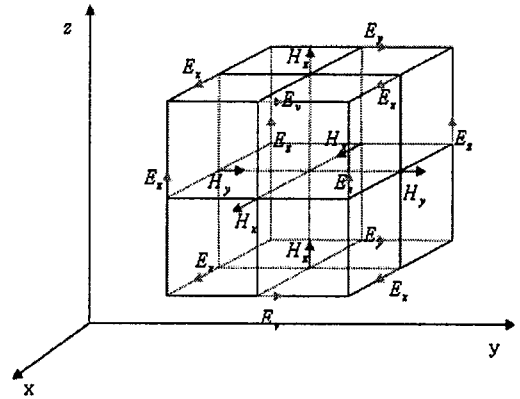


Fig. 1 The electric and magnetic field vector components in a cartesian coordinate

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{H} - \frac{\sigma}{\epsilon} \bar{E} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{E} - \frac{\rho'}{\mu} \bar{H} \quad (2)$$

$$E_{x|i,j,k}^{n+1} = \left[\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\epsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\epsilon_{i,j,k}}} \right] E_{x|i,j,k}^n + \left[\frac{\frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\epsilon_{i,j,k}}} \right] \left(\frac{H_y|i,j,k+\frac{1}{2}}^{\frac{n+\frac{1}{2}}{2}} - H_y|i,j,k-\frac{1}{2}}^{\frac{n-\frac{1}{2}}{2}} \right) \frac{\Delta z}{\Delta y} - \left(\frac{H_z|i,j+\frac{1}{2},k}^{\frac{n+\frac{1}{2}}{2}} - H_z|i,j-\frac{1}{2},k}^{\frac{n-\frac{1}{2}}{2}} \right) \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (3)$$

3. C 형 개구 설계 변수 결정

3.1 시뮬레이션 초기 조건

개구를 통과하여 발생하는 출력 광의 특성을 확인하기 위하여 전자기적 현상의 해석에 사용되는 FDTD (finite difference time domain) 기법을 이용한 OptiFDTD⁶ 프로그램을 이용하였으며 시뮬레이션의 초기 조건은 다음과 같다.

첫 번째, 입사 하는 빛의 파장은 532nm 의 단일 파장이고 x 축 방향으로 편광된 빛이다.

두 번째, C 형 개구가 존재하는 필름의 종류는 PEC(perfect electric conductor)로 정하였다. PEC를 가정함으로써 일반 금속에서 발생하는 빛의 흡수와 금속 두께, 표면파 등의 영향을 고려하지 않고 단지 물리적인 개구의 구조에 의한 영향만 고려하게 된다.³

세 번째, 시뮬레이션에서 셀의 크기는 x, y, z 방향으로 6nm로 정하였다. 기본적으로 FDTD 시뮬레이션의 결과의 안정성을 위해 셀의 크기는 $\lambda/10$ 이하로 정하도록 되어 있다.⁷

네 번째, 계산하는 영역의 경계면은 모두 PML로 정하였다. 계산 공간의 유한한 크기로 인해 발생할 수 있는 반사 등을 고려하지 않도록 경계면으로 향하는 전자기파는 모두 흡수된다 가정하였다.

다섯 번째로 관찰 거리는 필름으로부터 약 $\lambda/20$ 인 거리를 사용하였다. 이 거리보다 짧은 거리에서는 출력 광의 크기가 다소 등글지 못하기 때문이다.⁸ 그리고 이 거리에서 FWHM(full width half maximum)으로 얻은 광의 크기(Δx , Δy)와 전기장의 세기(E_z)를 이용하여 출력파워의 크기를 식 (4)과 같이 정하였다.

$$P_{out} = \frac{1}{2} c \epsilon_0 |E_z|^2 \times \pi \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(\frac{\Delta y}{2} \right) \quad (4)$$

3.2 C형 개구 설계 변수 결정

C형 개구 설계 변수를 결정하기 위하여 한 번 이 파장의 약 1/10인 정사각형 개구 5개를 이용하

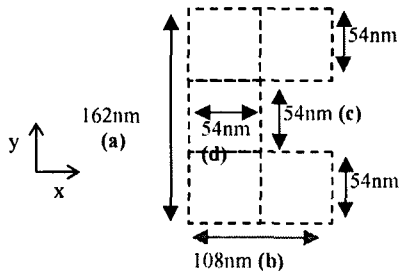


Fig. 2 Basic geometries of C-aperture

여 Fig. 2에서처럼 C형 개구의 기본 모양을 구성하였다.⁹ 그리고 기본 C형에서의 각 변수를 a, b, c, d로 정하고 나머지 변수들을 고정시킨 상태에서 각 변수가 출력에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통하여 확인한 다음, 그 결과를 이용하여 최종적인 C형 개구의 변수를 결정하였다.

C형 개구의 설계 변수 값을 결정하기 위하여 각 변수에 대한 출력 광의 크기 및 파워의 변화 추이를 관찰하였을 때, 변수 a, c와 d는 Fig. 2의 기본값을 벗어나면 공진 상태를 만족시키지 못하여 출력 광의 세기가 줄어드는 현상을 보였다. 그러나, 변수 c와 d는 변수 a에 비하여 출력 광의 파워 변화에 상대적으로 적은 영향을 준다. 또한 Fig. 3에 나타난 바처럼 변수 b가 108nm로부터 약 6nm 증가함으로써 인해, 출력 광의 크기에 큰 변화 없이 P_{out} 만이 약 9% 증가하게 된다. 따라서 출력 파워 크기에 영향을 미치는 변수 a와 b의 값을 먼저 지정한 후, 변수 c와 d 값의 미세한 조정 과정을 거쳐 최종적인 변수를 결정하는 것이 올바르다. 그러므로 1 단계 개구를 설계함에 있어 다른 변수를 기본형의 변수 값을 사용하고 변수 b의 크기를 114 nm로 결정하여 출력 광의 파워가 최대가 되도록 하였다.

C형 개구 설계에 있어 출력 광의 파워 세기 못지않게 중요한 것이 바로 출력 광의 크기이다. 그리고 C형 개구에서 빛은 개구 중간 부분의 들

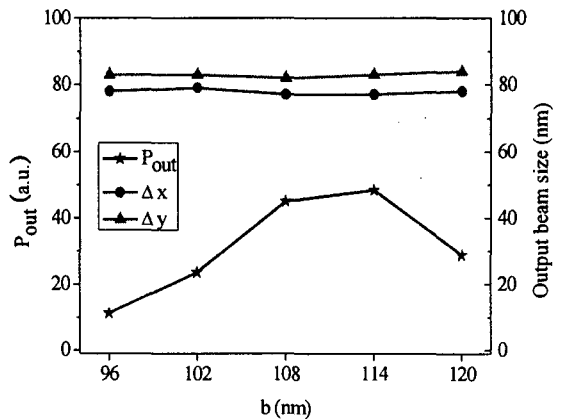


Fig. 3 Output power (P_{out}) and beam sizes (Δx and Δy) calculated as a function the aperture parameter b

출된 리지에서 모아지기 때문에 출력 광의 크기에 직접적으로 관련된 변수는 c 이다. 이에 따라, 2 단계 개구 설계는 출력 광의 크기를 작게 만들기 위하여 변수 c 를 조절하도록 하였다. 결과적으로 변수 c 가 감소할수록 출력 광의 크기가 감소하지만 변화폭이 크지 않고, 변수 c 가 42nm 가 되면 출력 광이 원형이면서 P_{out} 이 다소 높아지기 때문에 최종적인 C 형 개구의 설계 변수는 Fig. 5 로 결정하였다. 이 때 P_{out} 은 기본 C 형 개구에 비하여 약 11% 정도 증가하였다. 그리고 비슷한 크기의 출력 광 크기를 가진다고 예상된 54nm 크기의 정사각형 개구에 비하여 약 10^6 배 향상된 출력파워를 얻을 수 있었다.

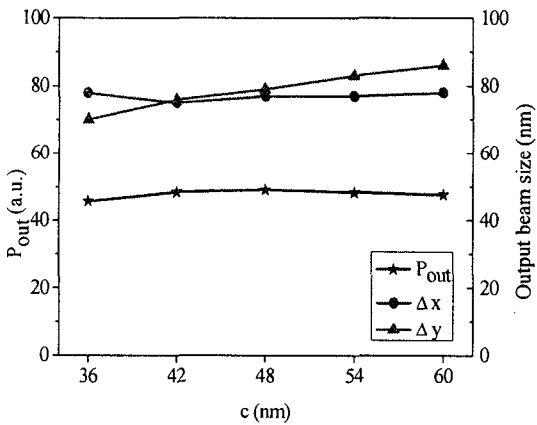


Fig. 4 Output power (P_{out}) and beam sizes (Δx and Δy) calculated as a function the aperture parameter c

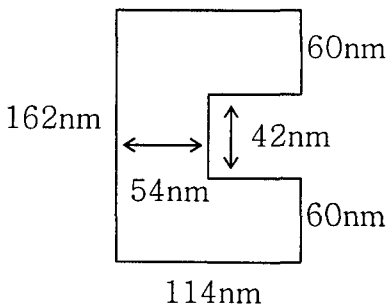


Fig. 5 Final design of C-aperture

Table 1 Comparison of output beam parameters

Beam parameter	54 nm square basic design	Final design of C-aperture
Δx (nm)	62	75
Δy (nm)	39	76
P_{out} (a.u.)	0.00013	48.45

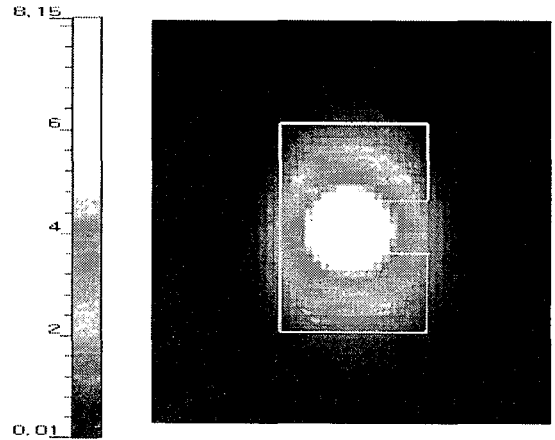


Fig. 6 Shape of Output beam produced by the C-aperture at 30 nm distance

4. 입사 광 크기의 효과

4.1 입사 광 크기 정의

출력을 증가시키는 원인은 도파관 효과와 표면파 효과가 있으며, 도파관 효과는 입사하는 파장에 적합한 공진 조건을 만족하는 개구에서 출력이 증가하는 것이다. 개구의 설계 변수가 변화하는 것은 바로 이 효과 때문이다. 또 하나의 출력 증가 요인은 표면파 효과로, 빛을 금속에 입사시킬 때 금속과 유전체 사이에서의 유전율 차이로 인해 발생하는 표면 플라즈몬을 비롯하여 C 형 개구 주변부에 유도되는 표면 전류에 의한 표면파, 금속에 입사된 빛이 반사되어 금속 표면 근처에 분포하여 작용하는 CDEW² 등 여러 가지의 표면 모드들의 작용에 의한 것이다.

Shi^3 는 C 형 개구에서 출력량이 1 보다 크다는 결과를 통해 출력이 증가하는 요인이 C 형 개구를 통과하는 빛의 영향뿐만 아니라 개구 주변으로 입사하는 빛에 의한 영향이 존재할 가능성을 제시하

였다. 만약 출력 광에 대한 입사 광의 영향이 존재하는 영역이 제한된다면, 그 영역보다 큰 영역에 입사되는 광은 출력에 변화를 주지 않을 것이다.

이를 확인하기 위하여 입사 광의 크기 변화에 따른 출력의 변화 추이를 확인하는 시뮬레이션을 실행하였다. 입사 광은 정사각형의 형태이며, 한 변의 길이를 입사 광의 웨이스트(waist)로 가정하였다. 실제 입사 광의 형태는 원형이지만, 빛이 입사되는 범위 밖의 금속면에 의한 영향을 고려하지 않고 단지 입사 광에 의한 영향만 고려하기 위하여, 입사 광은 정사각형 형태로 하고 입사 광의 크기와 계산 경계면의 크기가 같다고 가정하였다.

4.2 입사 광 크기 효과

Fig. 7 에서는 입사 광 크기의 변화에 따른 출력 변화를 나타내고 있다.

Shi³ 의 경우 입사되는 파장을 1 μ m 로 가정하였을 때, 직경 크기가 0.55 λ 인 입사 광이 투과된 광의 세기에 영향을 미친다고 하였다. 이 결과를 근거로 파장이 532nm 인 경우를 계산해 보면, 투과되는 광의 세기에 영향을 미치는 입사 광의 직경은 약 290nm 가 된다. 그러나 Fig. 7 에서는 입사 광의 웨이스트가 약 180nm 일 때 더 이상 출력에 변화가 나타나지 않았고, 이 때의 입사 광 넓이를

이용하여 원형의 입사 광을 유추하면, 직경이 약 203nm 으로 Shi 의 예상치 보다 작은 값이 됨을 확인하였다.

이 결과를 통해 실험에서 입사 광의 직경이 203nm 보다 크다면, 입사 광의 크기는 결과에 영향을 미치지 않는다고 판단할 수 있다. 그리고 532nm 파장에서 설계된 C 형 개구를 어레이 구조에 응용하고자 할 경우, 각 어레이 사이의 최소 간격을 조절해야 할 상황에서도 이 결과를 이용할 수 있을 것이다.

그러나 여기서 한 가지 짚고 넘어가야 할 문제가 있다. 앞서 계산상에 표면파 효과를 배제하기 위하여 필름은 PEC 로 가정한다는 조건을 두었다는 점이다. 즉, 비록 Fig. 7 과 같이 입사 광의 면적에 따른 영향이 존재하더라도 이전에 다른 논문들에서 주장했던 바처럼 표면파에 의한 현상이 아니라는 것이다. 오히려 이 현상은 개구의 리지가 수신 안테나의 역할을 하여 발생하는 것이다. 즉, 개구가 도파관 역할을 하여 입사 파가 개구를 잘 통과할 수 있게 만들고, 이와 함께 리지가 개구 주위로 입사하는 빛을 모으는 일종의 수신 안테나 역할을 하는 것이다. 그러므로 입사 광 크기 효과를 통해 얻어진 출력 변화가 없는 입사 광 면적은 바로 리지가 수신 안테나로써 역할을 할 수 있는 경계가 되는 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 FDTD 기법을 이용하여 완전도체 박막에서 파장이 532nm 인 레이저 입사 광에 대해 한 변이 54nm 인 정사각형 개구에 비하여 P_{out} 이 10⁶ 배 향상된 C 형 개구를 설계하였다. 또한, 약 75nm 크기의 원형으로 집속된 광을 획득할 수 있는 개구를 설계하였다. 그리고 개구로 입사되는 광의 크기에 대한 출력 광의 세기 변화를 계산하여 180nm 면적 내로 입사하는 빛에 의해 출력 광의 세기가 증가하나 그 이상의 면적으로 광이 입사할 때는 출력에 변화가 없는 것을 확인하였다. 그리고 이 면적은 리지가 수신 안테나로써 역할을 하는 경계이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 과제

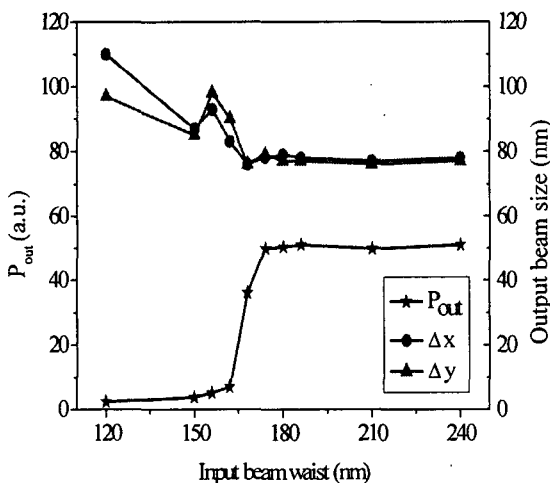


Fig. 7 Output power (P_{out}) and beam sizes (Δx and Δy) calculated as a function the input beam size

(M10400000027-04J0000-02710) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bethe, H. A., "Theory of diffraction by small holes," Phys. Rev., Vol. 66, No. 7, pp.163-182, 1944.
2. Thio, T., Pellerin, K. M., Linke, R. A., Lezec, H. J. and Ebbesen, T. W., "Enhanced light transmission through a single subwavelength aperture," Optics Letters, Vol. 26, No. 24, pp.1972-1974, 2001.
3. Lezec, H. J. and Thio, T., "Diffracted evanescent wave model for enhanced and suppressed optical transmission through subwavelength hole arrays," Optics Express, Vol. 12, No. 16, pp. 3629-3651, 2004.
4. Shi, X., Thornton, R. L. and Hesselink, L., "A Nano-aperture with 1000X Power Throughput Enhancement for VSAL," Proc. SPIE, Vol. 4342, pp. 320-327, 2002.
5. Jin, E. X. and Xu, X., "Finite-Difference Time-Domain Studies on Optical Transmission through Planar Nano-Apertures in a Metal Film," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 1, 2004.
6. Sendur, K. and Challener, W., "Near-field radiation of bow-tie antennas and apertures at optical frequencies," Journal of Microscopy, Vol. 210, pp. 279-283, 2003.
7. Commercial FDTD Program - www.optiwave.com
8. Matteo, J. A., Fromm, D. P., Yuen, Y., Schuck, P. J., Moerner, W. E. and Hesselink, L., "Spectral analysis of strongly enhanced visible light transmission through single C-shaped nanoapertures," Appl. Phys. Lett., Vol. 85, No. 4, pp. 648-650, 2004.
9. Shi, X. and Hesselink, L., "Design of a C aperture to achieve $\lambda/10$ resolution and resonant transmission," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 21, No. 7, pp. 1305-1317, 2004.
10. Xu, T., Wang, J., Sun, L., Xu, J. and Tian, Q., "Investigation of the Near-field Distribution at Novel Nanometric Aperture Laser," IUMRS-ICEM 2002, pp. 502-506, 2002.