

파장보다 작은 크기의 슬릿이 주기적으로 뚫린 금속 필름에서  
 표면 플라즈몬에 의한 빛의 투과율 증가에 대한 연구  
 SPP resonance and transmission Enhancement Of 1D  
 Sub-Wavelength Slit Array on Aluminum Film at  
 Microwave Regime

김명우, 김튼튼, 김재은, 박해용  
 KAIST 물리학과  
[mwkim99@kaist.ac.kr](mailto:mwkim99@kaist.ac.kr)

T. W. Ebbesen은 1998년에 은으로 된 금속 필름에 파장보다 작은 크기의 구멍을 주기적으로 뚫었을 때 특정 파장에서 그 필름을 통과하는 빛의 투과율이 구멍이 하나인 필름을 통과할 때보다 최고 1000배 가까이 비정상적으로 증가한다는 사실을 실험적으로 증명하였다<sup>(1)</sup>. 이는 주기적으로 뚫린 구멍에 의해 금속 필름을 통과하는 빛이 표면에서 회절되어 생기는 표면 플라즈몬(Surface Plasmon Polariton) 현상에 의한 것으로 설명되었다. 특히 금속 필름에서, 주기적으로 뚫린 구멍은 입사하는 빛에 대해서 회절격자처럼 작용하여 공기중의 빛과 표면 플라즈몬이 커플링할 수 있는 조건을 마련해준다. 이때 여기되는 표면 플라즈몬 - SPP-Bloch wave(SPP-BWs)라 불린다 - 의 파장은 아래의 식과 같이 금속 필름의 표면에 뚫린 구멍의 주기 P와 밀접한 관련이 있으며<sup>(2)</sup>, 투과 스펙트럼의 최대값과 최소값에 해당하는 파장의 값을 결정하는 가장 큰 요소가 된다.

$$\lambda_{SPP} = \frac{P}{n_x^2 + n_y^2} \left( \frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d} \right)^{1/2} \quad - (1)$$

본 연구에서는 아래 그림 1과 같이 알루미늄 금속판에 얇은 슬릿을 주기적으로 뚫은 뒤 Network Analyzer와 마이크로파 안테나를 이용하여 마이크로파 영역의 빛을 수직입사 시켜 나오는 투과스펙트럼을 측정해 투과율의 비정상적인 증가와 감소를 보이고, 이론적으로 계산한 결과와 비교해보았다.

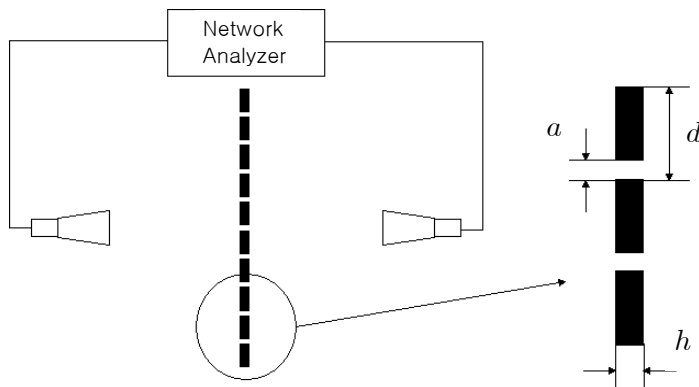


그림 1. Experimental setup

마이크로파 영역에서 알루미늄은 완전도체(Perfect Conductor)로써, 유전율  $\epsilon_m$ 의 값이 음의 무한대로 발산하게 되어, 1차원 슬릿에 대해 위의 식은  $\lambda_{SPP} = \frac{P}{n}$  으로 간단히 바뀐다. 또한, 수직으로 입사하는 빛과 투과하는 빛을 Rayleigh 회절차수에 따라 전개하고 슬릿 내부의 빛을 Waveguide에서의 도파모드로 전개하여 경계조건을 맞추어주면 우리는 수직으로 나오는 0차 모드의 빛의 투과율을 이론적으로 다음과 같이 구할 수 있다<sup>(3,4)</sup>.

$$T_0 = \frac{2ia}{d \sin(kh)[1 + k^2 W^2] + 2ikWd \cos(kh)} \quad - (2)$$

이때 W와  $\alpha_n$  값은 다음과 같다.  $W = \sum_n \frac{\frac{1}{a} \int_0^a e^{i\alpha_n x} dx \frac{1}{d} \int_0^a e^{-i\alpha_n x} dx}{\sqrt{k^2 - \alpha_n^2}}, \alpha_n = \frac{2n\pi}{d}$

알루미늄(Al)으로 된 금속필름의 두께  $h$ 는 4, 6, 8mm, 슬릿의 폭  $a$ 는 3, 4, 5, 6mm 그리고 슬릿 사이의 간격  $d$ 는 15, 20, 25, 30mm으로 변화시켜가며 투과율을 측정하였다. 또한 위의 식대로 0차 투과율을 계산하였으며, FDTD를 이용하여 수치적으로도 계산하였다. 측정결과 예측한 주파수에서 빛의 투과율이 Reference값보다 더 크게 증가하거나, 거의 투과하지 않는 것을 관찰하였다. 전체적인 투과 스펙트럼 또한 이론적으로 계산한 결과와 어느 정도의 일치를 보였으며, 금속필름의 두께, 슬릿의 폭 그리고 슬릿 사이의 간격과 같은 구조적인 변수에 의해 투과 스펙트럼이 변한다는 것을 관찰하였다.

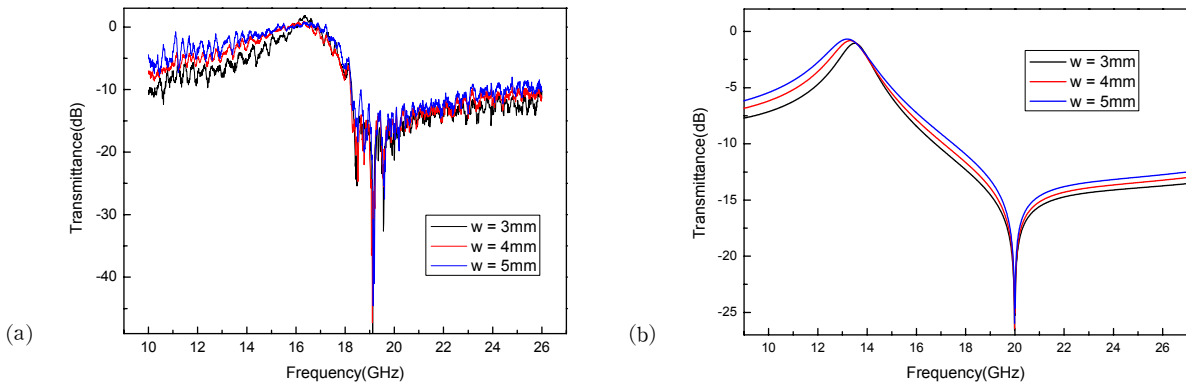


그림 2. 알루미늄판 위에 뚫린 슬릿의 투과율 (a) 실험결과 (b) 계산결과(식(2))

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(London) 391, 667-669(1998).
2. S-H Chang and S. K. Gray, and G. C. Schatz, "Surface Plasmon generation and light transmission by isolated nanoholes and arrays of nanoholes in thin metal films", OPTICS EXPRESS 13, 3150(2005)
3. K. G. Lee and Q. H. Park, Phys. Rev. Let. 95, 103902(2005)
4. J. H. Kang, J. W. Lee, M. A. Seo, D. S. Kim and Q. H. Park, JKPS, 49, 881(2006)