

## 표면 플라즈몬 공명 흡수의 일반적 메카니즘

### A general mechanism of a resonant absorption by surface-plasmon resonances

윤재웅, 최기영, 류영화, 송석호  
BK 21 센터, 한양대학교 물리학과  
yoon.jaewoong@gmail.com

흡수 매질을 포함하는 광학계에서, 공명 모드의 발생은 입사광의 강한 흡수 및 속박 그리고 강력한 국소 전자장 증폭을 나타낸다고 알려져 있다. 따라서 빛의 공명 흡수 현상은, 빛과 매질의 강한 상호작용이 요구되는 다양한 광학 소자의 주요 작동 원리를 제공한다. 공명 모드에 의한 빛의 강한 흡수 현상은 Wood anomaly라고 하는 금속 격자의 비정상 회절 현상과 감쇠 전반사를 통한 표면 플라즈몬의 광 여기를 통해 처음으로 관측되었다. 그 이후, 흡수 매질을 포함하는 다층막 구조와 도파로 격자 구조에서도 동일한 현상이 나타난다는 사실이 입증되었다. 한편, 이 현상을 설명하는 이론들은 Fresnel 반사 계수와 산란 행렬 방법에 기초하고 있다. Kretschmann 이론, pology 그리고 다중 간섭 모델 등이 그것인데, 이들은 서로 다른 구조에 대해 전개된 이론이며 또한 서로 다른 접근 방법을 취하고 있다<sup>1-3</sup>. 그럼에도 불구하고, 이들 서로 다른 이론들은 해당 구조에 대한 공명 모드 흡수 현상의 원인이 거의 동일한 메카니즘에 의한다고 설명한다. 그 메카니즘이란 다음과 같다. 입사광의 강한 공명 흡수는 소멸 간섭에 의한 반사광의 억제에 의해 나타난다. 특히, 공명 모드의 방사 손실과 내부 손실이 서로 같을 때, 반사광은 완전히 소멸되며 입사된 빛은 공명 모드에 완전히 속박된다. 서로 다른 구조에서의 동일한 현상 관측 그리고 서로 다른 이론에 의한 동일한 메카니즘은 이 현상이 방사 모드와 공명 모드가 서로 결합하고 있는 파동 역학계의 일반적인 특징이라는 사실을 시사한다. 따라서 이 현상을 설명하는 일반화 된 이론을 구성하여 그 메카니즘의 일반성을 증명함과 동시에 보편성을 가지는 규칙을 도출하는 것은 흥미롭다.

본 발표에서는 일반화된 시간영역 모드 결합 이론을 확장하여 공명 모드에 의한 파동의 강한 흡수 현상을 설명하는 운동학적 이론을 구성하고, 금속 격자에서의 표면 플라즈몬 공명 흡수에 대한 전산 모사 결과가 이 이론을 정량적으로 잘 뒷받침 한다는 사실을 증명한다.

N개의 방사 모드와 결합하고 있는 단일 공명 모드에 대해, 입사파가 n번 째 방사 모드로만 공명 모드로 입사할 때, 시간영역 모드 결합 이론은 다음과 같은 흡수 스펙트럼을 가져야 한다고 예측한다.

$$A^{(n)}(\omega) = \frac{4\gamma_i \gamma_r^{(n)}}{(\omega - \omega_0)^2 + \gamma_{tot}^2} \quad (1)$$

여기에서  $\omega_0$ 는 공명 주파수를 나타내며,  $\gamma_i$ ,  $\gamma_r^{(n)}$  그리고  $\gamma_{tot}$ 는 공명 모드가 가지는 내부, n번 째 포트로의 방사 그리고 전체 감쇠율을 각각 나타낸다. 전체 방사 감쇠율은  $\gamma_r = \sum_{n=1}^N \gamma_r^{(n)}$ 로 그리고

전체 감쇠율은  $\gamma_{tot} = \gamma_i + \gamma_r$ 로 주어진다. 이는 공명 모드에 의한 흡수 스펙트럼이 수식 (2)와 같은 합-규칙을 가지며 공명 모드의 부분 감쇠율은 수식 (3)과 (4)와 같이 주어진다는 사실을 의미한다.

$$S_{abs} = \sum_{n=1}^N A^{(n)}(\omega_0) = 4\eta_{rad}(1 - \eta_{rad}) \tag{2}$$

$$\gamma_r = \eta_{rad}\Delta\omega_{HWHM}, \gamma_r^{(n)} = \frac{A^{(n)}(\omega_0)}{S_{abs}}\gamma_r \tag{3}$$

$$\gamma_i = (1 - \eta_{rad})\Delta\omega_{HWHM} \tag{4}$$

시간 영역 모드 결합 이론의 적용 범위와 같이, 이 관계는 시간 반전 대칭을 가지는 모든 파동 역학계에 적용된다.

위와 같은 해석적 결론을 정량적으로 확인하기 위해, Gaussian 모양의 골을 가지는 금속 (Ag) 회절 격자에서의 표면 플라즈몬 공명흡수를 Chandezon 방법을 통해 전산모사 하였다. 전산 모사 결과를 통해 수식 (2)의 합규칙이 이론과 잘 일치함을 확인하였고, 그림 1와 같이, 수식 (3)과 (4)를 이용해 입사파를 표면 플라즈몬으로 손실 없이 완전히 결합시키는 조건을 도출하여 이를 전산 모사하였다. 이론 주는 조건 하에서 방사 손실 없이 입사파는 완전히 표면 플라즈몬 모드에 속박됨을 확인할 수 있다.

우리는 이 이론을 통해, 공명 모드 여기에 의한 흡수현상을 실험적으로 연구하는데 있어서 유용한 정량적 관계를 제공함과 동시에, 흡수 매질을 가지는 파동 역학계에 대해 공명 모드 여기에 이용한 보다 다양한 형태의 응용을 가능케 할 것으로 기대한다.

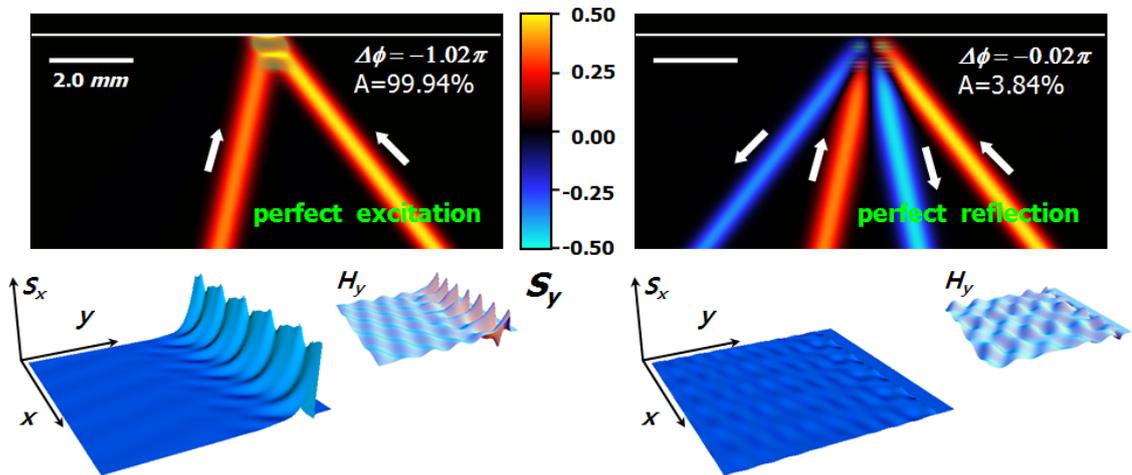


그림 1. 표면 플라즈몬의 완전 여기 및 입사파의 완전 반사

1. E. Kretchmann and H. Reather, Naturforsch., 23a, 2135-2136 (1968)
2. M. Nevier et al, J. Opt. Soc. Am. A., 12(3), 513-523 (1995)
3. A. Sharon et al, J. Opt. Soc. Am. A., 14(3), 588-595 (1997)