

광학활성을 가진 동축의 복층 원통에 의한 광산란

Light Scattering by the two concentric optically active cylinders

김현우, 김진승
 전북대학교 물리기술학과
 khw0313@chonbuk.ac.kr

광학활성이 있는 매질로 된 동축의 복층 원통에 수직하게 들어오는 전자기파의 산란 문제를 해석적으로 풀어, 산란된 빛의 밝기 및 편광상태 분포를 계산하였다. 지금까지 원통형 물체에 의한 광산란 이론에서는 광학활성이 없는 균일 매질로 이루어진 단일 원통⁽¹⁾ 및 복층 원통⁽²⁾, 광학활성이 있는 매질로 이루어진 단일 원통에 대한 해석적인 해⁽³⁾가 보고되었을 뿐 광학활성이 있는 매질로 된 복층 원통의 산란문제에 대해서는 수치 계산 결과⁽⁴⁾만 보고되었다. 이 문제는 막대모양의 생물세포(간상균) 등에 의한 광산란 특성 연구와 관련된다.

광학 활성 매질에 대한 물성 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \vec{E} + \gamma \epsilon \nabla \times \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} + \gamma \mu \nabla \times \vec{H} \end{aligned}$$

여기에서 ϵ 과 μ 는 각각 유전율과 투자율, γ 는 매질의 광학 활성도를 나타내는 매개변수이다. 이 식은 광학 활성 매질에서 전자기장이 서로 얽혀 있음을 보여주며, 전자기 파동 방정식은 다음과 같은 꼴이 된다.

$$\nabla^2 \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{H} \end{pmatrix} + [K]^2 \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{H} \end{pmatrix} = 0$$

여기에서 $[K]$ 는 2×2 행렬로 일반적으로 비대각요소의 값이 0이 아니다. 이것을 주축변환을 하면 다음과 같은 꼴로 바뀐다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \begin{pmatrix} \vec{Q}_+ \\ \vec{Q}_- \end{pmatrix} + [\Lambda]^2 \begin{pmatrix} \vec{Q}_+ \\ \vec{Q}_- \end{pmatrix} &= 0 \\ \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{H} \end{pmatrix} &= [A] \begin{pmatrix} \vec{Q}_+ \\ \vec{Q}_- \end{pmatrix} \end{aligned}$$

여기에서 $[\Lambda]$ 는 대각화된 2×2 행렬로써 \vec{Q}_+ 와 \vec{Q}_- 는 분리되었고, 전파상수가 다르다.

이 문제를 푸는 방법은 각 영역의 전자기장을 그 영역에서의 파동방정식을 만족시키는 벡터 조화함수로 전개하고, 경계조건을 써서 전개계수를 결정하는 것이며, 해석적 해는 각 영역에 맞는 벡터조화함수의 전개식이 된다. 이 해는 아주 복잡하므로 다음과 같은 간접적인 방법으로 해가 맞는 것을 확인했다: 안쪽 및 바깥쪽 원통을 이루는 매질이 같으면 광학 활성이 있는 단일 원통과 해가 같고, 두 매질 모두 광학 활성이 없으면, 광학 활성이 없는 균질 복층 원통과 해가 같은 꼴이 된다.

이렇게 구한 해를 써서 산란과의 밝기와 편광 분포를 계산했다. 편광 상태는 산란 각도에 따라서 대단히 자주 변하는 것으로 나타났고, 따라서 그 변화를 직접 측정하기는 쉽지 않다. 따라서 우리는 원통 축과 나란한 편광 성분과 축에 수직인 편광 성분으로 나누어 밝기를 계산했다.

광학 활성이 없으면 선편광이 들어올 때, 산란된 빛도 똑같은 선편광이지만, 광학 활성이 있으면 산란된 빛에는 들어오는 빛과 수직인 편광 성분도 나타난다. 어떤 특정한 각도에서는 입사 선편광에 직교하는 편

광 성분이 더 많다. 원편광이 들어 올 때는 산란된 빛의 밝기분포가 좌우 대칭이 되지 않는다.

다음 그림에서 각 세 개의 그래프는 세 종류의 동심 복층 원통의 산란광 분포인데, 크기와 굴절률은 같고 (안쪽과 바깥 굴절률 1.3; 반지름은 안쪽 $0.5\mu\text{m}$, 바깥쪽 $1.0\mu\text{m}$), 광학활성도는 각각 안쪽과 바깥쪽이 $2.0\text{E}-8$ 와 $1.0\text{E}-8$, $1.0\text{E}-8$ 와 $1.0\text{E}-8$, $0.0\text{E}-8$ 와 $0.0\text{E}-8$ 이다.

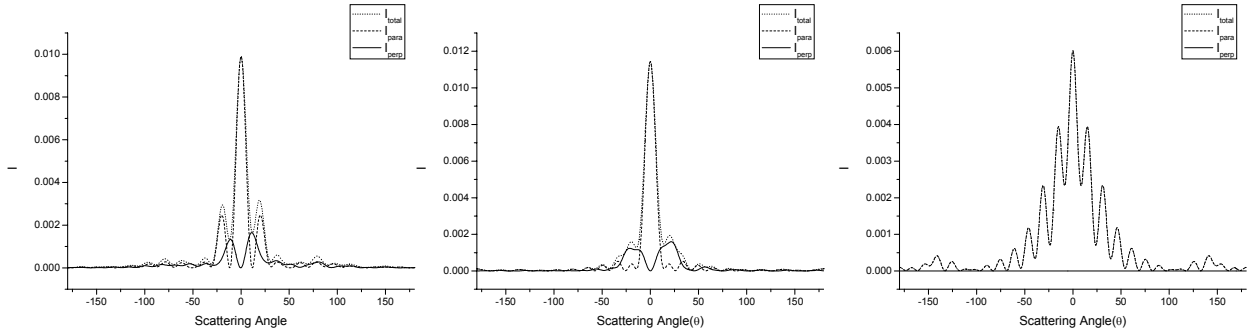


그림 1. 선편광을 비출 때 산란된 빛의 밝기 분포

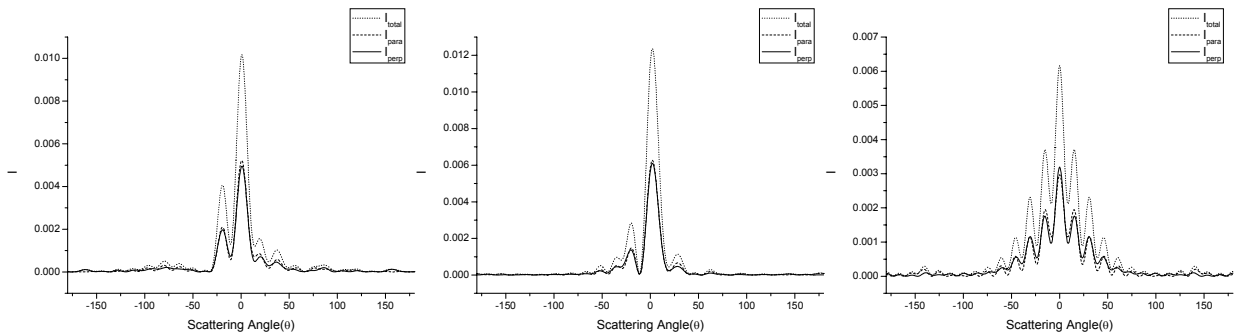


그림 2. 오른손 원편광을 비출 때 산란된 빛의 밝기 분포

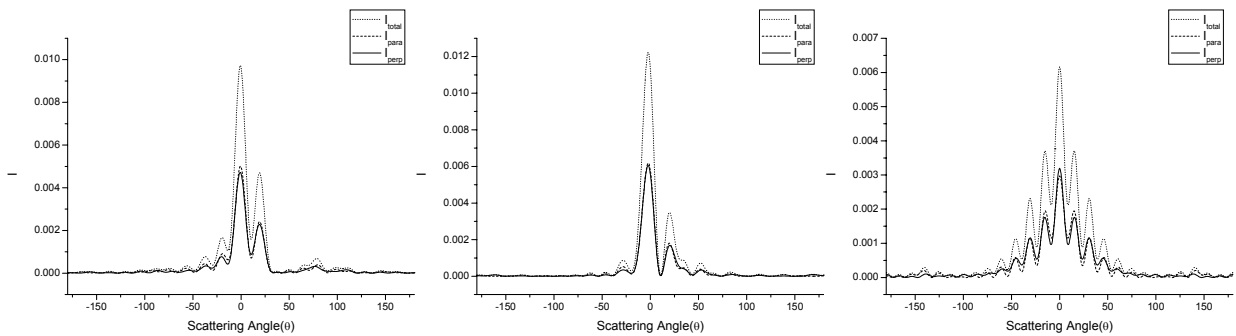


그림 3. 왼손 원편광을 비출 때 산란된 빛의 밝기 분포

입자에 광학 활성이 있나 없나를 가리려면 선편광을 비추고 그와 직교하는 편광성분이 세게 나오는 방향에서 산란광의 밝기를 재거나, 원편광을 비추고 산란되는 빛의 밝기분포의 좌우 대칭을 따지면 된다.

[참고문헌]

1. C.F. Bohren, and D.R. Huffman, Absorption and Scattering of Light by Small Particles (John Wiley & Sons, Inc., 1983).
2. Elsherbeni, A.Z., and Tew, M., "Electromagnetic scattering from a circular cylinder of homogeneous dielectric coated by a dielectric shell with a permittivity profile in the radial and azimuthal directions—even TM case", Southeastcon '90. Proceedings., IEEE, 996-1001 (1990).
3. C.F. Bohren, "Scattering of electromagnetic waves by an optically active cylinder," J. Colloid Interf. Sci., 66, 105-109, (1978).
4. M.S. Kluskens, and E.H. Newman, "Scattering by a Multilayer Chiral Cylinder," IEEE Trans. Antennas Propagat., 39, 91-96, (1991).