

주기적 구조의 금속 그리드가 도포된 광학창에 대한 광수치해석 방법 연구

김성철*, 김성현**¹, 정혜현**², 안상혁***

A Study on Optical Numerical Analysis Methods for Optical Windows Coated with Periodic Metal Grid

Sung Chul Kim*, Seonghyun Kim**¹, Hyeheon Jeong**², and Sanghyuk An***

본 연구는 2024년 국방과학연구소의 연구비 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 U1247029TD)

요약

일반적으로 스텔스 비행체에 포함된 전자광학 시스템은 외부의 대기로부터 각종 센서를 보호하기 위해 광학창으로 둘러싸여 있으며, 또한 레이더파에 노출이 되지 않도록 전자파 차단 물질을 광학창 표면에 도포하게 된다. 한편, 광학창의 광투과 특성을 보장하기 위해서는 전자파 차단 물질을 매우 작은 선폭을 갖도록 제한하여 광이 투과되는 영역을 확보하게 되며, 이러한 구조는 일반적으로 주기적 형태로 만들어진다. 광학창 표면의 전자파 차단 구조의 형태를 어떻게 하는냐에 따라, 광투과, 광반사 특성이 달라지게 된다. 본 논문에서는 매우 작은 크기의 선폭을 갖는 전자파 차단 구조가 상대적으로 큰 크기의 주기를 가질 때 가장 적합한 광학해석 방법에 대해 연구하였다.

Abstract

In general, the electro-optical systems integrated into stealth aircraft are surrounded by optical windows to protect various sensors from the external atmosphere, and electromagnetic shielding materials are applied to the surfaces of these windows to prevent exposure to radar waves. Meanwhile, in order to ensure the optical transmittance of the window, the electromagnetic shielding material must be limited to very narrow line widths so that sufficient regions for light transmission are secured, and such structures are typically fabricated in periodic patterns. The optical transmission and reflection characteristics vary depending on the configuration of the electromagnetic shielding structure on the surface of the optical window. In this paper, we investigate the most suitable optical-analysis method when the electromagnetic shielding structure has small-scale line widths and relatively large-scale periodicity.

Keywords

optical simulation, rigorous coupled wave analysis, finite element method, ray optics, comsol multiphysics

* 명지대학교 정보통신공학전공 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5300-4871>

** 명지대학교 정보통신공학전공 학부과정

- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0002-6766-8649>

- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0001-9253-205X>

*** 국방과학연구소 책임연구원

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8286-4982>

• Received: Nov. 25, 2025, Revised: Dec. 24, 2025, Accepted: Dec. 27, 2025

• Corresponding Author: Sung Chul Kim

Dept. of Information and Communications Eng., Myongji Univ., Korea

Tel.: +82-31-330-6773, Email: schkim@mju.ac.kr

1. 서 론

최근 스텔스 기체의 전자광학 센서 시스템을 보호하는 광학창에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 스텔스 기체의 광학 센서를 외부 대기 및 날씨에 따른 여러 상황으로부터 보호하기 위해 광학창이 설치되며, 또한, 레이더파 등의 전자파를 차단하여 스텔스 기능을 유지하기 위해 광학창 표면에 전자파 차단 물질이 도포가 된다. 전자파 차단 물질은 일반적으로 가시광선, 적외선을 투과시키지 않는 특성으로, 광학창 내부의 전자광학 센서의 성능을 보장하기 위해서 전자파 차단 물질은 광학창 표면 전체가 아니라 그물망과 같은 그리드(Grid) 형태의 주기적 구조의 형태를 띄게 된다[1][2]. 이러한 그리드 구조의 형태는 전자파를 효율적으로 차단하기 위한 형태를 갖게 되며, 그리드 구조에 따라서 광학창을 투과하는 빛의 투과도 및 반사도가 달라지게 된다[3]. 또한, 그리드에서 회절(Diffraction)되어 전자광학센서에 도달하는 빛들은 센서에 맺어지는 광학 이미지의 선명도를 떨어뜨리게 된다. 그러므로, 그리드 구조에 의한 영향을 광학적 수치해석으로 분석해서 광특성을 최대한 낮추지 않는 형태를 찾을 필요가 있다. 전자파 차단 그리드 구조는 전자파 흡수에 최적화 되어 있지만, 동시에 광학 특성에 미치는 영향을 최소화해야 하는 복합적인 해석이 필요하다.

한편, 이러한 전자파 차단 그리드에 대한 정보는 많이 알려져 있지 않으나, 일반적으로 millimeter scale의 주기를 갖고 micrometer scale의 선폭, 두께를 갖는 것으로 본다. 그림 1은 그리드 예시로 육각형과 사각형 구조를 나타낸 것이다.

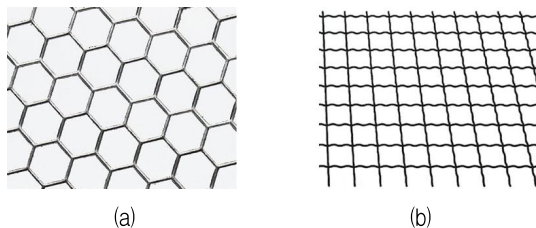


그림 1. 전자파차단 그리드 예시 (a)육각형 (b)사각형
Fig. 1. Example of electromagnetic absorbing grid
(a) Hexagonal (b) Rectangular

광학 수치해석 방법으로는 여러 가지가 있으며, 크게 ray optics와 wave optics로 나눌 수 있다. Ray optics는 광학 렌즈, 안경, 망원경 설계 등에 오래전부터 사용되던 고전적인 방법으로, 빛의 입자성을 이용하는 것으로 빛을 직선으로 간주하여 계산하는 ray tracing을 기반으로 한다. 최근에는 약간의 wave optics 방법을 추가하여 정확성을 높이는 방향으로 개선되는 중이다. 대표적인 상용 소프트웨어로는 Cove V, Zemax, COMSOL ray optics 등이 있다. 이 방법은 어느 정도 크기의 광소자에 적합하며, millimeter 이하의 micrometer-scale의 갖는 광소자 구조물에 대해서는 정확성이 떨어지는 단점이 있다. 빛은 파동의 성질을 갖기 때문에 빛의 파장 스케일에 해당하는 소자는 비록 자연광과 같은 평면파 광원이 아니더라도 파장 단위의 크기에서는 간섭 효과가 발생을 하는데, ray optics는 이러한 점을 고려하지 못하므로 정확성이 떨어지게 된다. 한편, wave optics는 빛을 전자기파 파동으로 보고, 맥스웰 방정식을 적용하여 계산하는 방법이다. Wave optics에는 여러 가지 알고리즘이 존재하는데 유한요소해석법(FEM, Finite Element Method), RCWA(Rigorous Coupled Wave Analysis)[4], FDTD(Finite Difference Time Domain) 등이 있다. 이 알고리즘 들은 각각의 특성이 있으며, 광학분야 FEM의 경우 전체 해석공간을 파장의 1/10 이하의 크기를 갖는 mesh로 잘게 나누고, 각각의 mesh에서 전자기파 경계조건 계산을 통하여 빛의 전파, 반사 등을 계산하는 방식이다. 해석하고자 하는 영역의 크기에 비해서 mesh는 매우 작은 크기이므로 mesh의 개수가 매우 클 경우 일반적인 계산용 서버에서 계산이 어려울 수 있다.

FDTD는 전체 공간을 정육각형 형태의 mesh로 나눈 후 맥스웰 방정식을 시간영역 기준으로 계산하여 전자기파의 시간에 따른 전파, 반사를 계산한다. FDTD 또한, mesh 개수가 많은 경우 계산에 어려움이 있을 수 있다.

RCWA는 해석하고자 하는 영역이 계층구조(Layered structure)일 경우에만 적용이 가능한 방법으로, 계층 내부에 주기 구조물이 있는 경우, 푸리에 변환을 통하여, 빛의 회절차수를 구한 후, 계층

의 경계에서 전자기파 경계조건을 계산하여, 빛의 전파, 반사를 계산하는 방식이다[5]-[7]. RCWA는 각각의 계층을 푸리에 변환 후 행렬로 나타내는데, 행렬의 크기는 푸리에 회절차수에 의해 결정이 되며, 계층의 개수가 많을수록 필요로 하는 계산용 서버의 용량이 커질 수 있다.

본 논문에서는 광학창 표면의 전자파 차단용 그릴드 물질로써 계산의 편의를 위해서 Au(Gold)를 사용하였다. Au가 전자파해석에서는 반사물질로 간주되나, 광학해석에서 관점에서는 광차단물질이며, 일반적인 전자파차단 물질의 대용으로 사용하였다. Au 그릴드 구조가 광학 특성에 미치는 영향을 계산하기 위해서 다양한 수치해석 해석 방법에 대해 연구하였으며, 특히 Ray optics와 FEM, RCWA에 대해 최적의 해석 방법 확인과 그릴드에 의한 영향을 해석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 전자광학 센서용 광학창해석을 위한 자연광 모사 방법 중 하나인 ETAM(Equi-spaced Thickness Average Method)에 대해 소개하며, 3장에서는 광학창 해석을 위해 ray optics, FEM, RCWA 해석결과를 바탕으로 최적의 해석 방법을 다룬다. 4장에서는 결론 및 향후 연구방향에 대하여 기술한다.

II. 자연광 모사 방법 및 실험비교

스텔스 기체의 광학창을 통하여 전자광학 장치에 입사되는 빛은 태양광이 지표면 등에서 반사되는 가시광선, 적외선과 열원체에서 방사되는 적외선 등의 자연광이다. 자연광은 레이저 광과 같은 간섭광(Coherent)이 아니라 위상이 유지되지 않는 비간섭광(Incoherent)이다. 대부분의 광학 해석 알고리즘과 이를 기반으로 한 상용 소프트웨어들은 빛을 평면파(위상 유지되는 간섭광)로 계산을 하며, 이로 인해, 자연광에서는 발생하지 않는 간섭 현상이 계산에 포함이 되어 결과가 실제 실험과 맞지 않게 된다[8]. 예를 들면, 두꺼운 광학창의 유리를 통과한 자연광은 유리 내부와 외부의 경계면에서 다중반사에 의한 간섭 현상이 없이, 그대로 투과하여 내부의 전자광학 장치에 도착하게 되나, 상용 소프트웨어를

사용하여 계산하게 되면, 유리층에 의한 간섭으로 파장 대역에서 투과도나 반사도가 주기적으로 변하는 현상이 나타나게 되며, 이러한 투과도와 반사도는 실제 관측이 되지 않는 계산상의 오류가 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나로 본 연구에서는 ETAM를 사용하여 간섭현상에 의한 효과를 제거하였다. 다음 그림 2는 ETAM 방법에 대한 개념도이다[9]-[11].

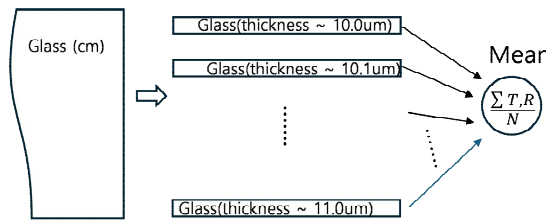


그림 2. 평면파 계산에 의한 간섭현상 제거를 위한 ETAM 개념도

Fig. 2. Schematic of ETAM to eliminate optical interference effects

그림 2에서 centimeter 두께의 glass가 있을 경우, ETAM의 예시로써, 10um, 10.1um, ... ,11um의 총 11개의 계층으로 나누고, 각 층은 두께가 0.1um 씩 증가시켰다. 이 경우 빛의 파장 1um에 대해 ETAM을 적용한 것이며, 계산하고자 하는 빛의 파장 전체에 대해 이러한 ETAM을 적용하여 계산을 하면, 간섭효과를 계산 결과에서 제거가 가능하다.

본 연구에서는 빠른 계산을 위하여 파장 대역에서 간섭 효과가 가장 크게 나타나는 짧은 파장 대역을 기준으로 설정하여 한 파장에 대하여 설정한 두께를 모든 파장 대역에 적용하였다. 따라서, 전체적으로 파장 대역에서 간섭에 의한 투과도, 반사도 등에서 주기적인 변동(Fluctuation)은 어느정도 제거되었다.

한편, 자연광은 편광이 모든 방향에 대해 고르게 분포되어 있기 때문에, 편광을 S-편광, P-편광으로 벡터 분해를 할 경우, 50:50의 비율로 나눌 수 있다. 따라서, 두 편광에 대한 투과, 반사도를 각각 구하여 평균을 취하면 된다. 본 연구에서는 편광별 계산과, ETAM을 FEM, RCWA에 적용하여 계산하였다.

본 연구에서는 ray optics는 상용 소프트웨어로

COMSOL ray optics, FEM으로는 COMSOL wave optics를 사용하였으며, RCWA는 자체 코드를 사용하였다. 한편, RCWA 코드의 신뢰성을 검증하기 위하여 실험값과 비교하였다. 실험은 광학창으로 사파이어 글래스를 사용하였으며, 여기에 전자파 차단 물질은 도포되지 않았으며, 사파이어 글래스의 brewster angle이 정확하게 계산되는지를 실험과 비교하여 RCWA 코드를 검증하였다. 또한, ETAM를 적용하여 간섭현상을 제거하였다. 그림 3은 실험과 RCWA 계산 결과를 비교한 것이다. 그림 3에서 보듯이 사파이어 글래스의 brewster 각도가 60.4도이며, P-편광에서 같은 각도에서 반사가 0, 투과가 최대가 되는 것을 확인하였으며, 실험과 계산결과가 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 여기서 ETAM은 파장 2um에 맞추어 15계층을 나누어 계산하였다. S-편광에 대한 계산도 실험과 RCWA 계산이 비슷하며, 실험에서 50도 부근에서 실험치가 갑자기 튀는 것은 실험 측정 과정에서 발생한 오차로 파악이 된다. 자체 RCWA 코드를 실험과 비교를 통하여 신뢰성을 검증하였다.

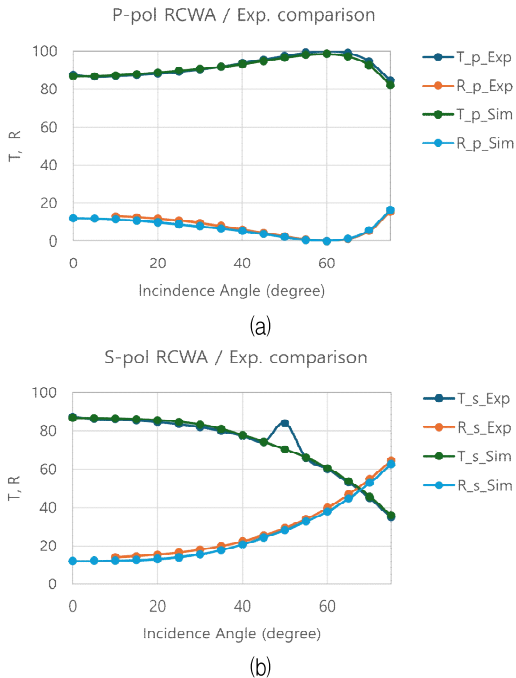


그림 3. 사파이어 글래스 투과, 반사 실험 및 RCWA 코드 비교(ETAM 적용) (a) P-편광 (b) S-편광
 Fig. 3. Comparison between RCWA and experiments on a sapphire glass(ETAM applied) (a) P-pol (b) S-pol

III. 광학해석기법 활용 및 결과

3.1 Ray optics

COMSOL ray optics 소프트웨어를 사용하여 3차원 ray optics 계산을 하였다[12]. 3차원 구조는 주기 2개 이상이 포함되도록 설계하였고, 최대한 정확성을 높이기 위해서 입사되는 ray 개수를 16만개 이상으로 두었고, 반사, 회절되는 secondary ray 개수도 16만개 이상으로 두어 최소한 1개의 입사되는 ray가 한 번의 반사, 회절이 고려되도록 하였으며, 이는 컴퓨터의 계산능력 및 메모리 용량을 고려한 최적의 계산 조건이다(서버 : intel zeon core 20개, RAM: 256GB).

그림 4에서 COMSOL ray optics 해석 구조를 나타내었다. 사파이어 글래스 밑면에 그림 1의 사각형 그리드가 있으며, 사파이어 글래스 위에서 ray가 입사된다.

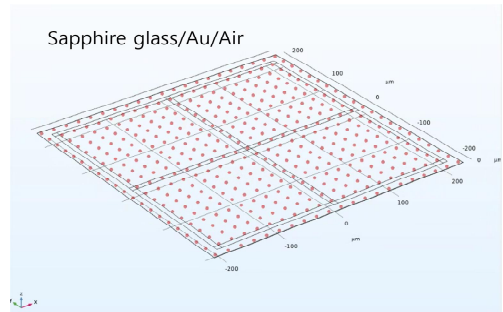


그림 4. Ray optics 해석을 위한 구조도
 Fig. 4. Simulation geometry of ray optics

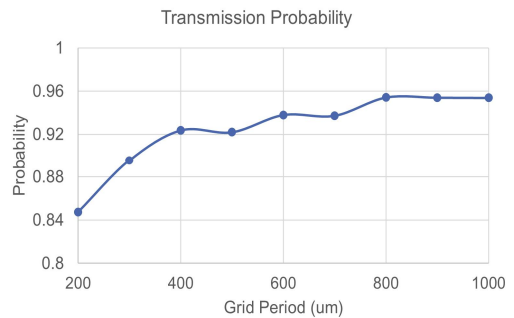


그림 5. COMSOL ray optics 투과확률 계산
 Fig. 5. Transmission probability of COMSOL ray optics

그리드의 주기 변화에 따른 투과 확률을 그림 5에 나타내었으며, 선폭을 8 μm 로 고정하고, 주기만 바꾸었을 때의 투과도를 나타낸 것이다. 주기가 800 μm 이상의 경우 투과도에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

3.2 FEM

FEM 소프트웨어로 COMSOL wave optics[13]를 사용하여 계산을 하였으나, 3차원 계산은 앞 절에서 언급했듯이, 파장의 1/10 크기의 mesh를 수 억개 이상 만들어야 하므로 계산용 서버 컴퓨터의 메모리 용량(768GB)을 넘어서게 되어 계산이 불가능하며, 2차원 해석만 가능함을 확인하였다. 2차원 해석은 사파이어 글래스 밑면에 bar 형태로 Au가 도포되어 있다고 가정하였으며, 그리드 주기 1mm, 선폭 8 μm 에 대하여 계산하였으며, 사파이어 글래스 내부에서의 다중 반사에 의한 간섭효과 제거를 위해 ETAM을 적용한 것과 미적용한 것의 비교를 그림 6에 나타내었다. ETAM을 모든 파장에 각각 적용하지 못하였기 때문에 특정 파장 대역에서 간섭효과에 의한 변동이 약간 나타나는 것을 알 수 있다.

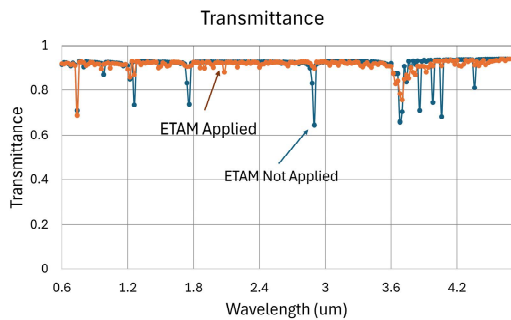


그림 6. COMSOL wave optics 투과도, ETAM 적용됨
Fig. 6. Transmittance of COMSOL wave optics, ETAM applied

FEM은 현실적으로 2차원 구조에 대한 해석만 가능하므로, 실제 그리드의 다양한 형태가 광특성에 미치는 영향을 파악하기에는 적합하지 않다고 본다.

3.3 RCWA

RCWA 알고리즘을 적용하여 3차원 구조에 대한 계산을 FEM에 비해 매우 짧은 시간 내에 결과를 얻었다. 계산시간 면에서는 ray optics와 비견될 수 있는 수준이다. 그림 7은 사각형 그리드 구조에 대한 3차원 계산 결과이며, 파장에 따른 투과도, 반사도를 그리드의 주기에 따라 나타낸 것이다. 여기서 선폭은 8 μm 로 고정하였고, 입사각은 수직입사로 두었다.

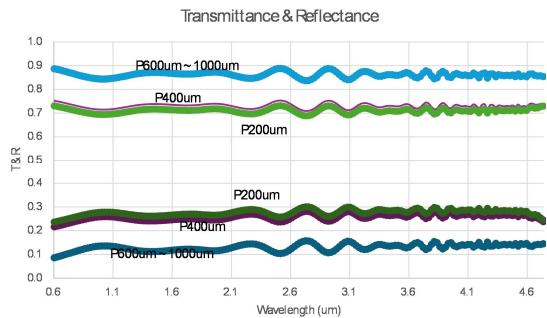


그림 7. 그리드 주기 변화, 파장대역에 따른 광학창 투과도, 반사도 계산결과
Fig. 7. Transmittance and reflectance of an optical window with rectangular grids

그림 7에서 그리드의 주기가 커질수록 투과도, 반사도는 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있으며, 이 결과는 앞의 ray optics의 그림 5와 같은 경향을 나타냄을 알 수 있다. 다음의 그림 8은 육각형 구조에 대해 그림 7과 동일한 조건으로 계산한 결과를 보인 것이다.

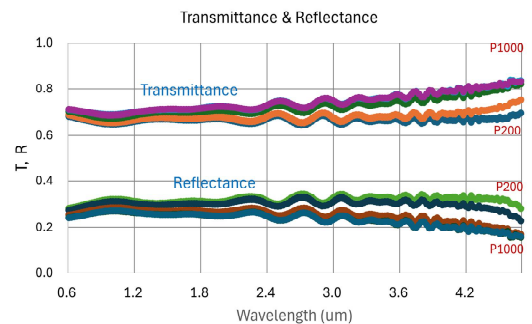


그림 8. 육각형 그리드에 대한 주기, 파장에 따른 투과도, 반사도 RCWA 계산 결과
Fig. 8. Transmittance and reflectance of an optical window with hexagonal grids by 3D RCWA

그림 8의 육각형 그리드의 결과는 그림 7의 사각형에 비해 투과도가 낮고, 반사도는 높게 나옴을 알 수 있다. 육각형 구조에서 빛의 회절이 사각형에 비해 더 많이 발생하여 최종적으로 광센서에 도달하는 빛의 양이 줄어드는 것으로 보인다. 또한, 파장이 길수록 회절되는 양이 줄어들어 투과도가 커지는 것을 확인하였다.

입사각에 따라 광투과 특성 및 반사 특성에 대한 계산 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9(a)는 육각형 구조에서 파장 2 μm 빛에 대한 계산 결과이다. 여기서, ETAM을 적용하지 않았으며, S-편광에 대해 입사각에 따른 투과, 반사도에 주기적인 변화가 있는 것으로 나오며, P-편광에 대해서도 약간의 변동(Fluctuation)이 보인다. 이러한 부분을 제거하기 위해 ETAM을 적용하였다(그림 9(b)).

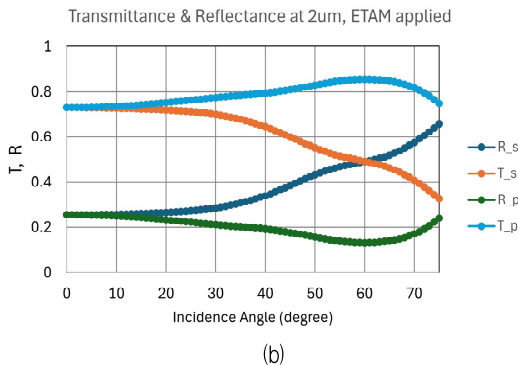
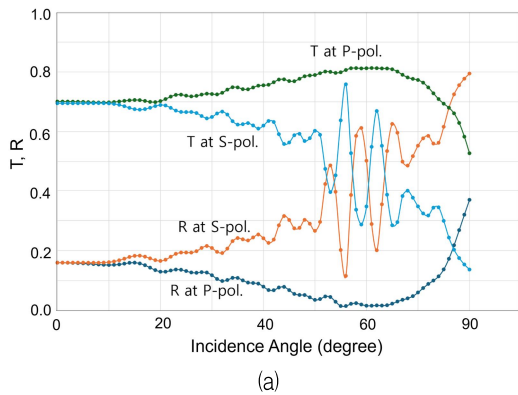


그림 9. 입사각에 따른 광특성 계산 결과(주기 600 μm , 선폭 8 μm) (a) ETAM 미적용 (b) ETAM 적용
 Fig. 9. Simulation result with incidence angles (period 600 μm , linewidth 8 μm) (a) ETAM not applied (b) ETAM applied

IV. 결론 및 향후 과제

광학창 표면에 전자파 차단 구조가 있는 경우에 대한 광학해석 방법을 비교 하였으며, 작은 스케일의 구조물이 매우 큰 스케일로 주기적으로 제작된 경우에는 기존에 많이 사용하던 FEM 해석은 현실적이지 않음을 보였다. 또한, RCWA 알고리즘의 적용 가능성을 실험 및 계산을 통하여 검증하였다. 또한, 정밀한 계산을 RCWA 알고리즘을 적용하며, 전반적인 경향성을 파악할 때는 ray optics를 사용하여 시뮬레이션 결과에 대해 상호 보완적으로 사용할 수 있음을 확인하였다. 한편, 자연광을 모사하는 방법으로써 ETAM을 적용하여 단순 평면파 해석으로 인한 결과를 보정하였고, 실험과 비교하여 검증하였다.

향후에는 전자파 차단 구조의 성능지표로서 광투과도, 반사도외에 광학장치로 인한 이미지 왜곡을 나타내는 MTF(Modulation Transfer Function)를 계산하고자 한다. MTF는 광학카메라의 렌즈로 인한 이미지 왜곡 및 선명도를 파악하기 위해 사용하는 지표이다. 광학센서를 보호하기 위한 광학창은 표면의 전자파 차단 grid로 인해 영상이미지 왜곡을 피할 수 없기 때문에 grid로 인한 영향을 파악하기 위해서는 광투과도, 반사도외에 MTF 계산이 반드시 필요한 것으로 판단된다.

References

[1] Z. Yang, Q. Hao, S. Zhang, W. Tian, and F. Liu, "Multispectral Transparent Electromagnetic-wave-absorbing Optical Window Technology Based on a Random Grid", *Opt. Exp.* Vol. 31, No. 16, pp. 26355-26367, 2023. <https://doi.org/10.1364/OE.497225>.

[2] S. Vujic, D. Peric, B. Livada, M. Radisavljevic, and D. Domazet, "Optical Protective Window Design and Material Selection Issues in the Multi-Sensor Electro-Optical Surveillance Systems", *Sensors*, Vol. 23, No. 5 pp. 2784, Mar. 2023. <https://doi.org/10.3390/s23052784>.

[3] I. Kim, K. Lim, and Y. Yu, "Reflectance and

- Transmittance Properties of Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystal Gratings", Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 5, No. 3, pp. 196-204, Sep. 2007.
- [4] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, "Rigorous Coupled-wave Analysis of Planar-grating Diffraction", Journal of the Optical Society of America, Vol. 71 No. 7, pp. 811-818, Jul. 1981. <https://doi.org/10.1364/JOSA.71.000811>.
- [5] S. Kim, "Simulation of Rough Surface of CIGS Solar Cell by RCWA Considering the Incoherency of Light", J. Opt. Soc. Kor., Vol. 18, No. 2, pp. 180-183, Apr. 2014. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2014.18.2.180>.
- [6] H. Kim, S. Kim, I. Lee, and B. Lee, "Pseudo-Fourier Modal Analysis on Dielectric Slabs with Arbitrary Longitudinal Permittivity and Permeability Profiles", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 23, No. 9, Sep. 2006. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.23.002177>.
- [7] H. Kim and B. Lee, "Pseudo-Fourier Modal Analysis of Two-dimensional Arbitrarily Shaped Grating Structures", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 25, No. 1, Jan. 2008. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.23.002177>.
- [8] M. C. Tropicovsky, A. S. Sabau, A. R. Lupini, and Z. Zhang, "Transfer-matrix Formalism for the Calculation of Optical Response in Multilayer Systems: from Coherent to Incoherent Interference", Optics Express, Vol. 18, No. 24, pp. 24715-24721, Nov. 2010. <https://doi.org/10.1364/OE.18.024715>.
- [9] C. C. Katsidis and D. I. Siapkas, "General Transfer-matrix Method for Optical Multilayer Systems with Coherent, Partially Coherent, and Incoherent Interference", Applied Optics, Vol. 41, No. 19, pp. 3978-3987, Jul. 2002. <https://doi.org/10.1364/AO.41.003978>.
- [10] K. Kang, S. Kim, and J. Kim, "Numerical Modeling of the Effect of Multiple Incoherent Layers in Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells Based on the Equispaced Thickness Averaging Method", Applied Optics, Vol. 57, No. 11, pp. 2758-2765, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1364/AO.57.002758>.
- [11] K. Kang, S. Lee, J. Lee, S. Kim, Y. Han, and S. Baek, "A Simple Numerical Modeling of the Effect of the Incoherent Thick Substrate in Thin-film Solar Cells Based on the Equispaced Thickness Method", IEEE Photonics Journal, Vol. 8, No. 5, pp. 8400312, Oct. 2016. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2614098>.
- [12] A. Potemkin, E. Vyrko, D. Volkov, and M. Proskurnin, "Numerical Simulations in COMSOL/MATLAB and Ray Tracing in Photothermal Beam-Deflection Spectroscopy", Progress in Photoacoustic and Photothermal Phenomena: Focus on Biomedical, Nanoscale, NDE and Thermophysical Phenomena and Technologies, Erice, Sicily, Italy, pp. 10, Sep. 2018. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35245.33768>.
- [13] K. Delimaris, G. D. Kolezas, C. Rockstuhl, and G. P. Zouros, "Calculation of Propagation Constants in Circular Gyrotropic Optical Fibers", 2025 IEEE 30th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), Tbilisi, Georgia, pp. 91-95, Sep. 2025. <https://doi.org/10.1109/DIPED66951.2025.11194536>.

저자소개

김 성 철 (Sung Chul Kim)



1994년 2월 : 서울대학교
전기공학과(공학사)
1996년 2월 : 서울대학교
전기공학과(공학석사)
2000년 8월 : 서울대학교
전기공학부(공학박사)
2004년 3월 ~ 현재 : 명지대학교

정보통신공학전공 교수

관심분야 : 광소자, 광통신소자, 태양전지, 실리콘포토닉스

120 주기적 구조의 금속 그리드가 도포된 광학창에 대한 광수치해석 방법 연구

김 성 현 (Seonghyun Kim)



2021년 3월 ~ 현재 : 명지대학교
정보통신공학전공 학부과정
관심분야 : 광소자해석

정 혜 현 (Hyehyeon Jeong)



2022년 3월 ~ 현재 : 명지대학교
정보통신공학전공 학부과정
관심분야 : 광소자해석

안 상 혁 (Sanghyuk An)



2003년 8월 : 서강대학교
물리학과(학사)
2006년 2월 : KAIST
물리학과(석사)
2011년 7월 : KAIST 물리학과
(박사)
2011년 9월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 스텔스, 광학창