

# 세계 빛의 해 (IYL) 2015 특집 ■ 우리나라 광학 연구 및 개발의 역사 (개인적인 소회 및 경험을 바탕으로)

## 한국 광학코팅 산업의 현황과 전망



김구철\*, 황보창권\*\*

### 1. 서론

광학코팅은 렌즈, 유리, 프리즘 등 광학부품의 반사, 투과, 흡수, 편광, 위상 스펙트럼을 조절하기 위해 사용하며, 광학부품을 완성하는 마지막 공정으로서 중요한 역할을 하고 있다. 광학 표면(surface)이 있는 곳에는 반드시 광학코팅이 필요하므로, 광학코팅은 광학기기 및 광학기술의 발전과 함께 나아간다고 할 수 있다. 독립적인 제품으로 사용하기 보다는 광학적 기능 향상에 없어서는 안 되는 필수 광학부품이므로 광학코팅을 광학의 만능기술(enabling technology)이라 부르기도 한다.

최근 다양하고 복잡한 광학 시스템에 사용하는 무반사 코팅, 특수 필터, 편광 필터, 첩 거울 등에서는 기존 코팅보다 높은 성능이 요구되어 설계, 제작, 평가 등에서 새로운 기술들이 개발되고 있다. 특히 나노구조 제작기술의 발전에 따라 나노구조 광학박막을 이용하여 기존의 큰 광학부품을 얇은 광학코팅으로 대체하거나, 새로운 기능의 광학부품으로 활용하려는 연구와 Si 기반의 모바일 시스템의 나노구조에 부합하는 광학코팅 개발도 진행하고 있다.

이에 한국 광학코팅 산업의 발전을 되돌아 보고 이를 바탕으로 새로운 광학코팅 기술 동향을 소개하는 것은 한국 광학코팅 산업이 나아갈 방향 모색에 도움이 될 것으로 것으로 보인다. 따라서 본 소고의 전반부에서는 한국 광학코팅 산업의 발전사를 간략히 소개하고 후반부에는 최근의 광학코팅의 연구 및 기술 동향을 소개하고자 한다.

### 2. 한국 광학코팅산업의 변천

한국의 광학코팅 산업은 1965년 설립된 대한광학(1965~1992)이 1970~90년대에 세계 시장의 50% 이상을 차지한 쌍안경과 카메라의 다층 무반사 코팅으로부터 시작했다고 볼 수 있다. 1972년 한국와코(주)로 출발한 삼양광학(주) (1979년 상호 변경)이 쌍안경, 카메라 교환렌즈 관련 광학코팅을 양산하였으며, 1974년 서울광학산업(주)이 광학부품 및 광학코팅 생산을 추가하였고, 1979년에 한국광학기술개발(주) (현 EO System)이 현대적 코팅 챔버와 클린룸 시설을 갖추고 야간감시경 및 레이저 광학부품용 정밀 광학코팅을

\* ㈜아이브이유 테크 대표, \*\* 인하대학교 물리학과 교수

## 한국 광학코팅 산업의 현황과 전망

생산하였다.

1981년에는 레이저 광학부품 코팅을 주요 품목으로 시작한 한국전광(주)이 출발하였고, 1987년 설립된 (주)유남하이텍 (현 (주)유남옵틱스)에서 각종 광학부품용 정밀 광학코팅을 생산하기 시작하였으며, 1988년 서울 올림픽을 계기로 카메라 산업을 일으킨 아남, 삼성, 금성, 대우 등이 카메라용 무반사 코팅을 양산하였다. 80년대 말부터는 CD 및 DVD가 생산되면서 무반사코팅 외에도 다이크로익 필터, 빔가르개 코팅, 거울코팅 기술, 간섭필터 등이 필요하게 되었다. 이후 프로젝션 TV, 프로젝터 등을 개발, 생산하면서 큐브 빔가르개 코팅, 다이크로익 거울 코팅, 편광 코팅 등의 양산이 본격적으로 시작되었다. 이에 맞추어 1996년에는 서울정광(주), 1997년에는 그린광학(주), 1999년에는 램다리서치 옵틱스 코리아 등이 설립되어 각종 광학부품은 물론 각종 간섭 필터, 밴드패스 필터 등 고급 광학코팅을 생산하고 있다.

2000년대 들어서는 2001년 밀레니엄 옵틱스, 2005년 레인보우옵틱코리아 (현 쓰리엘 시스템), 2008년 (주)아이브이유테크 등에서 광학산업의 발전과 함께 정밀 광학코팅산업의 확장을 이어가고 있다.

최근 IT 산업의 발달과 함께 급격히 스마트폰이 보편화 되고 폰카메라 모듈이 급증하면서 IR-cut 필터 코팅이 화상장치에 필수가 되어 매년 생산량이 증가하고 있으며 특히 화상장치의 픽셀수가 증가하면서 공정기술이 급격히 향상되고 있다. IR-cut 필터 전문 생산업체들로는 현재 옵트론텍, 이노웨이브, 나노스, LMS 등이 양산을 하고 있으며, 렌즈 전문업체로는 세코닉스, 해상산업, 방주산업, 코렌, 디오스텍, 디지털옵틱 등에서 광학코팅을 활발하게 진행하고 있다.

본고에서는 한국 광학코팅산업의 변천사를 충분히 않은 자료와 경험을 바탕으로 물리증기증착 광학코팅 회사 위주로 작성했기 때문에 일부 코팅 회사들이 서술되지 않았을 수 있으며, 이는 저자들의 무지에서 발생한 것이고 저자들의 책임임을 밝힌다. 또한 안경코팅산업, 광학코팅장비산업, 외장코팅산업 관련 회사들도 본고에는 포함하지 않았다.

## 3. 최근의 광학코팅 기술과 전망

### 가. 무반사코팅

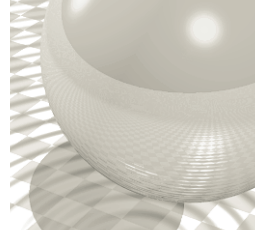
광학코팅 중에 가장 많이 생산하는 것이 광학표면의 반사율을 줄이기 위해 사용하는 무반사 코팅일 것이다. 모든 렌즈, 프리즘, 윈도우, 필터 등에는 무반사 코팅이 사용되고 있으며 고급 광학기기로 갈수록 무반사 코팅의 성능은 낮은 반사율과 넓은 스펙트럼 대역으로 향상되고 있다.

#### (1) 균일 굴절률 물질을 이용한 무반사코팅

균일하고 등방성인 고굴절률과 저굴절률의 두 물질을 이용하는 무반사 코팅을 가장 많이 사용하고 있다. 평균 반사율, 무반사 대역, 두께, 굴절률 등의 관계를 보면, 일반적으로 평균 반사율을 작게 하기 위해서는 가능한 한 두 코팅물질의 굴절률 차이를 크게 하고, 두 물질 중 낮은 굴절률은 가능하다면 가장 작은 값의 물질을 사용해야 한다. 저굴절률 박막으로 많이 사용하는 cryolite, MgF<sub>2</sub> 보다 굴절률을 더 작게 하기 위해서 박막의 밀도를 낮춘 다공성 물질을 이용할 수 있다. 무반사 코팅은 무반사 대역이 넓을 수록 층수(두께)가 증가한다. 또한 층수가 증가할수록 평균 반사율은 감소하며, 무반사 대역이 증가할수록 평균 반사율은 증가한다.

#### (2) 불균일 굴절률 무반사코팅

입사매질과 기판의 굴절률 차이에 의해 반사가 발생하므로, 만약 두 매질의 굴절률 차이를 점진적으로 연속 함수로 줄이는 불균일 굴절률 박막을 사용한다면 반사율을 줄일 수 있을 것이다. 무반사용 연속 굴절률 함수는 깊이(두께)의 5차 함수가 널리 알려져 있다. 실제 제작에서는 굴절률을 부드럽게 연속으로 변화시키는 것이 어려워, 연속 굴절률 함수에 가장 가까운 여러 층의 점진적으로 변하는 균일 굴절률 (graded index) 박막으로 나누어 제작한다. 굴절률이 기판과 공기 사이의 박막을 차례로 만들 수 있어야 하며, 공기와 접하는 박막의 굴절률은 1.1~1.2 근처에 있어야 한다. 이 경우 무반사 대역이 넓어질수록 총 두께가 증가하는 경향이 있다.



두 개의 균일 굴절률 박막을 이용하는 경우도 공기와 접촉하는 첫 번째 층의 굴절률을 매우 작게 하면 무반사 효과를 크게 볼 수 있다. 결상계에서 발생하는 플레어(flare)나 고스트(ghost) 상은 대부분 곡률이 큰 렌즈에 입사하는 빛의 입사각이 커지면서 무반사 코팅의 반사율이 증가하여 발생한다. 따라서 곡률이 큰 특정 렌즈만 큰 입사각에 대한 무반사 코팅이 필요하며 이때 다공성의 낮은 굴절률 박막을 활용할 수 있다.

### (3) 나노구조 무반사 효과

최근에는 나노구조 제작 기술이 발전함에 따라 나방눈의 주기적 나노구조를 모방하여 무반사 효과를 보고 있다. 사용하는 빛의 파장보다 매우 작은 주기 200~300 nm, 높이 100~200 nm의 반구, 포물선, 콘, 막대 등의 3차원 나노구조를 활용하면, 큰 입사각에 대해서도 반사율을 낮출 수 있다. 또한 플라즈마 에칭을 이용하여 제멋대로 나노 패턴을 만들어 무반사 효과를 증가시킬 수 있으며, 나노임프린트를 이용하여 넓은 폴리머 평면 위에 나노 구조를 만들 수 있다. 이와 같은 무반사용 나노구조는 LED의 출력 향상, 태양전지의 수광 효율 증가 등에 사용할 수 있으며, 곡면 위의 무반사용 나노구조 제작 기술을 렌즈 위에도 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

### (4) DLC 무반사 코팅

원적외선 영역에서는 물리적으로 외부 환경에 강하고 원도우 표면을 보호해줄 수 있는 무반사 코팅으로 diamond-like carbon (DLC) 코팅을 많이 사용하고 있다. 내마모성이 높고 표면 색을 조절할 수 있는 DLC 무반사 코팅이 많이 필요해지고 있으며 스퍼터링, 화학증기증착법 등의 활용이 증가할 것으로 보인다.

## 나. 완전흡수 코팅

일반적으로 물질 내에서 빛의 산란과 흡수는 손실로 여기며, 이 중 흡수는 물질의 복소수 광학상수( $N = n - ik$ )에 의해 결정된다. 흡수 박막의 경우 최대 흡수율은 50%이며, 최근 파장보다 매우 작은 나노 두께 박막에서의 완전흡수(perfect absorption)에 관한 흥미 있는 연구가 발표되고 있다. 흡수율이 100%인 경우가

완전흡수이며, 에너지 보존 법칙  $A = 1 - R - T$ 에서  $R = T = 0$ 이면 완전흡수가 된다.

수직입사 633 nm 빛에 대해 공기 중 Cr 박막에서 완전 흡수를 얻는 방법을 알아 보자. 반사율을 0%( $R = 0$ )으로 하기 위해서는, Cr 박막의 표면 어드미턴스가 공기 (1,0)와 일치하여야 한다. 공기로부터 출발한 Cr 박막을 3.2 nm 정도 역으로 어드미턴스를 추적하면, 원점 근처에 Cr 박막의 출발 어드미턴스에 도착하게 된다. 이렇게 작은 복소수 어드미턴스의 기판이 존재하지 않으므로, 새로운 위상결합 박막을 기판에 추가한다. Ag를 기판으로 하고 흡수가 없는 위상결합 층으로  $TiO_2$ 를 51.8 nm 사용하면 Cr 박막의 출발점 어드미턴스를 구할 수 있다. 즉 [공기|Cr(3.2 nm)| $TiO_2$ (51.8 nm)|Ag]의 나노 Cr 박막에서 완전흡수를 얻을 수 있다. 이는 얇은 두께의 Cr 박막에서 반사되는 빛과  $TiO_2$ 층을 투과하여 Ag에서 반사되는 빛이 상쇄간섭을 일으켜  $R = 0$ 이 되고, 기판인 Ag에서  $T = 0$ 이므로, 파장보다 매우 작은 두께의 나노 Cr 박막에서 완전흡수( $A = 1$ )가 되는 것이다.

최근 유전상수가 0인( $\epsilon \approx 0$ , epsilon-near-zero; ENZ) 물질에 관한 연구가 많이 진행되고 있으며 나노 포토닉스 분야에서 응용이 가능한 다양한 물질이 알려져 있다. ENZ 물질 중 투명 전도성 산화물(transparent conductive oxide; TCO)은 광통신 영역에서 활용할 수 있으며, ITO, AZO, GZO 등이 대표적 TCO이다. TCO 물질은 유전상수의 실수가 0이( $Re(\epsilon) = 0$ ) 되는 파장( $\lambda_{ENZ}$ )이 광통신 영역인 1500 nm 근처에 있다. 매우 얇은 TCO 박막의 경우 수직 흡수율은 0%이나 경사입사의 경우 흡수율은 최대 50%이다. 파장보다 매우 작은 수십 nm 두께 ITO 박막에서 완전흡수( $A = 1$ )를 구현하기 위해서는 Ag 기판을 사용하거나 프리즘 감쇠전반사(attenuated total reflection)를 이용할 수 있다. 나노 두께 ITO 박막에 ENZ 모드를 발생시키면 나노박막 내의 전기장이 균일하고 매우 커져서 흡수계수가 작더라도 100% 흡수율을 얻을 수 있다. 이 조건을 임계결합(critical coupling) 조건이라 부르며 유전상수의 허수 값이 작을수록 흡수박막의 두께가 나노 크기로 얇아진다. 이는 표면플라즈몬 폴라리톤의 전기장이 유전체-금속계면에서 강하고 수직방향으로 서서히 지수함수로 감소하는 것과는 다른 현상이다. 또한

## 한국 광학코팅 산업의 현황과 전망

ITO 박막의  $\lambda_{enz}$ 를 결정하는 플라즈마 진동수가 전자 밀도의 함수이므로 ITO 제작 과정에서 열처리를 이용하여  $\lambda_{enz}$ 를 조절할 수 있다. 따라서  $\lambda_{enz}$ 가 다른 ENZ ITO 다층박막을 이용하면 광통신 영역에서 광대역 완전흡수를 얻을 수 있다.

두께가 파장보다 매우 작은 나노 흡수박막의 경우 양방향에서 입사하는 빛에 의해서도 완전흡수를 얻을 수 있다. 이 경우 박막 내에서 완전흡수를 일으키는 보강간섭이 일어나야 하므로, 가간섭 완전 흡수 (coherent perfect absorption; CPA)라 부른다. CPA는 양방향에서 입사하는 빛에 의한 선형 흡수 박막 간섭계이며, 레이저 이득매질에서 양방향으로 빛을 시간에 대해 되돌린(time-reversal) 것이므로 반레이저 (antilaser)라 하기도 한다. 즉 두 개의 빔을 서로 마주 보는 양방향에서 박막에 입사시켰는데, 두 개의 출력 빔이 모두 0이 되는 경우이다. 이를 산란 행렬을 이용하여 분석하면 산란행렬의 고유값이 0(행렬식이 0)인 경우이다. 이로부터 CPA 조건을 얻을 수 있으며, 박막의 양방향 투과율은  $T = \sqrt{R_1 R_2}$ 이고 투과 위상은 두 반사위상의 평균값이 된다. 여기서  $R_1, R_2$ 는 각각 한 쪽 방향에서만 빛이 입사할 경우 반사율이다.

이 두 조건을 만족하는 CPA 박막의 설계에는 음수 어드미턴스를 활용할 수 있다. CPA에서는 입사매질과 기판매질에 각각 오직 한 개의 서로 반대 방향으로 입사하는 파동만 있다. 입사매질에서 전기장과 자기장 방향을 모두 양으로 가정하면 어드미턴스가 양수이다. 한편 기판 매질에서는 입사 파동이 반대 방향으로 진행하므로 전기장 방향을 양으로 하면 자기장 방향이 음이어야 한다. 따라서 기판 매질에서 반대방향으로 진행하는 파동의 어드미턴스는 음수가 된다.

가령 공기 중에서 Ge 박막의 양방향 가간섭완전흡수를 수직입사 450 nm 빛에 대해 유리 기판 위에 설계해보자. 최종 표면 어드미턴스인 공기 (1,0)에서 출발하는 어드미턴스를 음의 두께로 증가시키면 (역 어드미턴스), Ge의 역 어드미턴스의 실수부가 음수가 되기 시작하고 음의 실수 축과 만나게 된다. 이 점이 유리 기판 매질에서 입사하는 파동의 음수 어드미턴스인 (-1.5,0)와 일치하면 CPA가 이루어진다. 만약 일치하지 않으면, 유리 기판과 Ge의 어드미턴스를 만나게 해주는 위상결합 층이 필요하다. 만약 유리 기판의 어

드미턴스 (-1.5,0)으로부터  $Ta_2O_5$ 를 양의 두께로 증가시키면 반시계 방향으로 원을 그리며, Ge의 역 어드미턴스와 만나는 점을 두 개 찾을 수 있다. 이 중 얇은 두께의 해를 선택하면 수직입사 450 nm에서 [공기|Ge(19.7 nm)| $Ta_2O_5$ (49.7 nm)|유리]의 CPA 설계를 할 수 있다. 이 경우 비대칭 광학계이므로 두 입사빔의 위상과 세기를 CPA 조건에 맞추면, 파장보다 매우 작은 나노 두께 Ge 박막에서 CPA를 만들 수 있다. CPA는 선형 완전흡수 박막간섭계이며, 양방향 입사하는 빛 사이의 위상을 조절하면 출력 빔을 광모듈레이터나 광스위치로 응용할 수 있다.

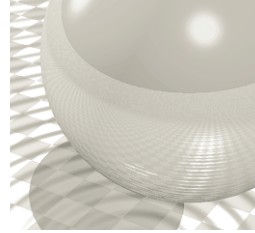
### 다. 극초단펄스 코팅

펨토초(fs)의 1주기 광학파동에 관한 기초 연구가 이제는 응용 단계로 발전하여, 펨토초 레이저 빔의 산업 현장 활용이 점진적으로 증가하고 있다. 이에 따라 펨토초 레이저 및 빔전달 광학 시스템에 필요한 펨토초 광학코팅의 설계도 다양하게 발전하고 있다.

먼저 나노초(ns)나 피코초(ps) 펄스보다 펨토초 펄스에 반사율이 높은 위상 조절용 광학코팅이 특별히 필요한 이유를 살펴보자. 극초단 펄스는 각 주파수의 위상 정보를 전달해주는 반송파와 이를 둘러싸는 포락선으로 구성되며, 스펙트럼은 주어진 밴드폭의 주파수들이 연속으로 모여 구성된다. 극초단 펄스가 분산매질을 지나면 각 주파수들의 군속도가 달라 포락선의 피크 위치에 대해 반송파의 주파수 위치가 변한다. 정상분산의 경우 펄스 내에서 주파수가 선형으로 변하여, 긴 파장의 반송파가 앞에 오고 짧은 파장 반송파는 뒤에 오게 되면서, 펄스의 군속도가 지연된다. 더 나아가 주파수에 따라 군속도가 변하는 군지연분산 (group delay dispersion, GDD)에 의하여 펄스 폭이 증가하게 된다. 일반적으로 투명한 매질의 GDD는 양수이며 이 경우 넓어진 펄스폭을 감소시키기 위하여 음의 GDD가 필요하다.

입사 펄스의 위상을 조절할 수 있는 광학부품으로 부피가 작고 레이저 시스템의 GDD에 맞게 설계와 제작기술이 이미 확립된 다층 광학코팅을 사용하는 것이 간단한 방법이다. 펨토초 광학코팅은 특히 각주파수에 대한 위상의 2차 미분인 GDD를 목표치에 맞도





록 다층박막을 최적화 설계할 수 있고 기존의 증착기술로 제작할 수 있는 장점이 있다. GDD를 조절하기 위한 반사거울은 주파수가 시간에 대해 선형으로 증가하는 칩(chirp) 현상과 반대로, 짧은 파장이 거울 앞쪽에서 반사되고 긴 파장은 거울 깊이 들어가 늦게 나오는 비주기 다층박막으로 설계하므로 칩거울 혹은 분산거울이라 부른다. 일반적으로 목표 반사율과 목표 GDD에 맞추기 위하여 최적화 설계를 사용하며, 공기와 거울 앞면 사이의 반사율을 감소시키고 GDD 잔물결(ripple)을 줄이기 위해 다양한 방법을 사용하고 있다. 설계 방법에 따라 이중칩거울, Gires-Tournois 간섭계 거울, 브루스터각 칩거울 등 다양한 분산 보상용 거울이 가능하다. 최근에는 보상거울에서 반사된 스펙트럼으로부터 펄스폭 계산과 기존의 반사율과 GDD 최적화 설계를 연계하는 방법을 사용하여 입사각이 서로 다른 이중각도 분산거울을 설계하였고, GDD가 밴드폭 내에서 비교적 일정하여 푸리에-제한에 가까운 펄스폭을 얻을 수 있었다. 일반적으로 밴드폭이 커지면 GDD가 작아지므로, GDD를 크게 하려면 밴드폭이 좁아야 한다. 층 수가 많아 두꺼운 칩거울은 각 층의 두께가 정확하고 굴절률이 일정해야 하며 조밀도가 높고 흡수가 없어야 하므로, 이온빔 스퍼터링이나 마그네트론 스퍼터링 등을 사용하여 제작한다.

## 라. 이득 박막

나노 포토닉스 분야에서 메타물질이나 플라즈몬 물질에 의한 흡수 손실을 보상하기 위해 이득(gain) 매질을 박막으로 사용하고, PT-대칭 광학 시스템에서는  $N(z) = N^*(-z)$ 인 이중 (흡수박막/이득박막) 을 활용하는 등 이득박막을 이용한 연구가 많이 진행되고 있다. 이는 이득박막을 다층박막 설계에 사용하여 새로운 광학소자로 활용할 수 있는 길을 열어 놓았다.

흡수박막의 복소수 광학상수는  $N_a = n - ik$ 로 표시하고 이득박막의 광학상수는  $N_g = n + ik$ 로 표시하자 ( $e^{i\omega t}$  시스템 사용). 공기 중 비교적  $k$ 가 큰 흡수박막의 경우 두께가 증가하면 표면 어드미턴스가  $(n - ik)$ 에 접근하여, 반사율이  $R = \frac{(1-n)^2+k^2}{(1+n)^2+k^2} < 100\%$ 이고 에너지 보존법칙( $R + T + A = 1$ )이 성립한다. 반면 이득박막은 두께가 증가하면  $(-n - ik)$ 에 접근하여 반사율이  $R =$

$\frac{(1+n)^2+k^2}{(1-n)^2+k^2} > 100\%$ 되고 에너지 보존법칙의 의미가 없어진다. 즉 두꺼운 이득박막의 경우 표면 어드미턴스의 실수부가 음수가 되므로, 반사율과 투과율 모두 100%보다 훨씬 클 수 있다. 만약 표면 어드미턴스가  $(-1, 0)$ 에 접근하면 반사율이 무한대가 된다. 이득박막의 반사율, 투과율, 위상, 전기장 분포 등의 계산은 기존의 전달행렬과 어드미턴스를 그대로 사용할 수 있으므로, 다층 (흡수박막/이득박막)을 활용하여 CPA-레이저, 비등방 투과공명 등이 가능하고, 새로운 나노광학소자로의 응용이 증가할 것으로 기대한다.

## 마. (금속/유전체) 메타물질 광학코팅

일축 비등방 매질에서 두 유전상수 성분 중 한 개가 음수이면 등주파수면이 쌍곡면이 된다. 최근 많은 연구가 진행되고 있는 쌍곡면 메타물질은 (금속/유전체) 다층박막이나 금속 나노로드(디스크)가 들어 있는 유전체 복합매질 등으로 구현할 수 있으며, 회절한계를 넘어서는 수퍼렌즈, 나노 리소그래피, 자발방출 등에 응용할 수 있어 많은 관심을 끌고 있다.

(금속/유전체) 다층박막의 수퍼렌즈 효과는 금속과 유전체 사이 계면에서 발생하는 표면플라즈몬 폴라리톤의 에바네스cent 파가 회절한계 보다 작은 물체에서 발생하는 큰 파수를 캡처하고, 이를 금속 층 사이의 플라즈몬 커플링을 통하여 상공간으로 전달하는 것으로 설명할 수 있다. 이는 유전상수와 투자상수가 모두 음수인 음의 굴절률(negative index) 매질에 의한 완전렌즈(perfect lens)가 아니고, 금속의 유전상수의 실수부가 음수일 때 나타나는 음의 굴절 효과(negative refraction)를 이용한 수퍼렌즈(superlens)이다.

광학코팅의 관점에서 다층박막 수퍼렌즈 효과를 설명해 보자. 유전상수가 양수(굴절률 양수)인 유전체에서 다른 유전체(굴절률 양수)로 빛이 경사 입사할 경우, 빛은 투과 유전체 매질에서 양의 방향으로 굴절하며 (보통 사용하는 스넬의 법칙), 어느 정도의 두께를 진행한 후 빔의 위치는 수직입사 빔의 위치보다 보다 양의 방향으로 횡이동(lateral shift)한다. 반면 유전체(굴절률 양수)에서 유전상수 실수부가 음수인 금속으로 경사 입사할 경우, 계면에서 금속 안으로 빛은 음의 방향으로 굴절되며 적정 두께 진행한 후 빔의 위치는

## 한국 광학코팅 산업의 현황과 전망

음의 방향으로 회이동한다 (실제로는 금속에 의한 흡수 때문에 먼 거리를 진행할 수 없다). 만약 각 층의 두께가 파장보다 매우 작은 (금속/유전체) 다층박막에 빔이 경사 입사하면, 금속박막에서는 음의 방향, 유전체 박막에서는 양의 방향으로 굴절이 일어나며, 층수가 많아지면 다층박막을 통과한 후 빔의 총 회이동이 큰 음수가 될 수 있다. 이는 (금속/유전체) 다층박막의 유효 굴절률(effective index)이 음수인 것으로 볼 수 있다. (금속/유전체) 다층박막을 투과한 경사 입사 빔의 회이동 거리( $x$ )은 다층박막의 투과위상( $\phi$ )으로부터  $x = \frac{d\phi}{dk_x}$  로 주어지며, 여기서  $k_x$ 는 수평방향 파수벡터이다. (금속/유전체) 다층박막의 회이동 거리가 음수(- $x$ )이면 스넬의 법칙으로부터 다층박막의 유효 굴절률이 음수가 되고, 이는 음의 굴절(negative refraction)에 의해 회절현상을 극복하는 수퍼렌즈로 활용할 수 있다.

광학코팅 소프트웨어를 이용하여 회이동 거리가 큰 음수가 되게 다층박막을 설계할 수 있으며, 다층박막의 투과율과 투과위상을 물체 스펙트럼의 푸리에 변환에 적용하면, 다층박막에 의해 전달된 회절현상 내에 있는 상의 크기와 모양을 계산할 수 있다.

일반적으로 유전체 박막의 투과위상은 입사각에 따라 양의 값으로 선형 증가한다. 반면 금속박막의 경우 투과위상은 입사각에 대해 TM파는 감소하고 TE 파는 증가한다. 즉 TM파만 (금속/유전체) 다층박막에서 수퍼렌즈 역할을 한다.

Ag 나노막대가 유전체 매질에 들어 있는 복합매질은 유효매질근사식을 이용하여 유효 유전상수의 실수부가 음수가 되도록 설계할 수 있으며, 이 때 복합매질은 일층박막 수퍼렌즈가 된다. 더 나아가 복합매질의 앞과 뒤에 광학코팅을 추가로 이용하면 수퍼렌즈의 성능을 향상시키거나 새로운 광소자의 응용도 가능할 수 있다.

자외선부터 적외선 영역까지 (Ag/MgF<sub>2</sub>), (Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), (Ag/SiO<sub>2</sub>), (Ag/TiO<sub>2</sub>), (Ag/Si), (Ag/Ge) 등 다양한 (금속/유전체) 다층박막이 시도되고 있다. 다층박막의 투과율이 높아야 하므로 Ag 박막의 두께가 ~20 nm 내외로 파장보다 매우 작아야 한다. 다층박막에서 Ag 박막의 두께를 정확히 유지해야 하며, 계면에서 표면 거칠기가 작아야 하고 Ag 박막이 열과 산소에 약하

므로 산화박막과의 상호확산이 작아야 한다. (Ag/유전체) 다층박막 증착 기술은 에너지 효율 증가용 저방출(low emissivity) 코팅 분야에서 이미 개발하여 양산에 사용하고 있으므로 제작이 용이하며, 유전체 물질로 ITO, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 등을 사용하기도 한다. 금속에 의한 빛의 흡수, Si과의 적합성, 열에 대한 취약성, 에칭 용이성 등을 고려할 때 Ag를 대체할 수 있는 물질에 대한 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

## 4. 결론

본고에서는 우리나라 광학코팅 산업의 태동과 현황을 간단히 살펴 보았고, 최근 새로운 광학코팅 기술들을 소개하여 나아갈 방향을 제시하고자 하였다. 지금까지의 세계 광학기술의 발전 추세를 바탕으로 전망한다면, 새로운 물리에 기반한 광학기술은 계속 발전해 나갈 것이고, 광학기술이 있는 곳에는 어디에서나 광학코팅이 있을 것이므로 광학코팅의 미래는 매우 밝다고 할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] 각 회사들의 웹사이트.
- [2] W.H. Southwell, Opt. Lett. 8, 584-586 (1983).
- [3] U. Schulz, Appl. Opt. 45, 1608-1618 (2006).
- [4] M. Badsha, Opt. Commun. 312, 206-213 (2014).
- [5] Y.D. Chong et al, Phys. Rev. Lett. 105, 053901 (2010).
- [6] H.A. Macleod, SVC Bulletin 13, Fall, 28-33 (2013).
- [7] H.A. Macleod, SVC Bulletin 12, Spring, 20-25 (2012).
- [8] S. Longhi, Phys. Rev. A 82, 031801(R) (2010).
- [9] V. Pervak, Appl. Opt. 50, C55-C61 (2011).
- [10] L. Ferrari et al., Progress in Quantum Electronics 40, 1-40 (2015).
- [11] H.A. Macleod, SVC Bulletin 14, Spring, 24-31 (2014).
- [12] R.E. Klinger et al., Appl. Opt. 45 3227-3242 (2006).

## 약 력



### 김구철

#### 1. 학 렳

- 1997 ~ 2004 제주대학교(이학박사, 무기화학)
- 1995 ~ 1997 제주대학교(이학석사, 무기화학)
- 1978 ~ 1982 경북대학교(이학사, 화학)

#### 2. 경 렳

- 2013. 7 ~ 현재 (주)아이비유테크 대표이사
- 2013. 1 ~ 현재 한국광학기기산업협회 학술 운영위원
- 2008. 2 ~ 2013. 6 아이비유광학 대표
- 2006. 12 ~ 2008. 1 (주)한일진공 기술영업이사
- 2006. 1 ~ 2006. 12 (주)한기 연구소장
- 2005. 5 ~ 2005. 12 (주)오엘아이 상무이사
- 2004. 5 ~ 2005. 4 (주)한일진공 영업이사
- 2001. 9 ~ 2004. 4 람다리서치옵틱스코리아 대표이사
- 1996. 6 ~ 2001. 8 한일진공 기술영업부장
- 1987. 12 ~ 1996. 5 (주)유남하이텍 기술영업부장
- 1982. 3 ~ 1988. 2 한국화학연구원 연구원
- 2001. 9 ~ 2004. 2 대전대학교 화학과 겸임교수
- 2004. 3 ~ 2011. 12 한국산업기술대학교 겸임교수

#### 3. 연구분야

- 단결정 육성(Single Crystal Growing)
- 광학박막 진공증착(Optical Thin Film Vacuum Deposition)
- 광학부품 생산 및 개발(Laser Mirror, Beam Splitter, AR/HR Coatings)
- 원적외선용 렌즈 무반사코팅

#### 4. 사회활동

- 한국광학회 : 평의원(경력 : 광기술분과, 양자전자분과 간사역임)
- 한국광학기기산업협회 학술운영위원

#### 5. 수상경력

- 기술상(한국광학회 2015. 1)

### 황보 창권



#### 1. 학 렳

- 1984. 8 ~ 1988. 12 Univ of Arizona, Optical Sciences Center(0 학박사, 광학)
- 1978. 3 ~ 1980. 2 KAIST, 물리학과(이학석사, 물리학(광학))
- 1974. 3 ~ 1978. 2 서울대학교, 물리학과(이학사, 물리학)

#### 2. 경 렳

- 1989. 3 ~ 현재 인하대학교 물리학과 교수
- 2002. 4 ~ 현재 인하대학교 광기술교육센터 소장
- 2014. 7 ~ 현재 한국연구재단 책임전문위원 (물리)
- 2013. 3 ~ 2014. 2 한국광학회 회장
- 2009. 1 ~ 2010. 12 한국물리학회 부회장
- 1983. 3 ~ 1984. 8 충북대학교 물리학과 전임강사
- 1980. 3 ~ 1983. 2 삼성항공 광학연구소 연구원

#### 3. 연구분야

- 광학박막 설계 및 제작
- ENZ 박막의 완전흡수 및 응용
- 경사입사증착을 이용한 나노구조 광학박막
- 주기적 나노나선과 나노로드 광학박막

#### 4. 사회활동

- 한국광학회 : 평의원(경력 : JOSK 편집위원장, 총무/재무이사, 광기술분과위원장, 국가광과학 기술로드맵위원장, 부회장, 회장)
- 한국물리학회 : 평의원(경력 : 부회장, 새물리편집위원장)

#### 5. 수상경력

- 공로상(한국광학회, 2005, 2009, 2015)
- 공로상(한국광학기협회, 2011)