

폴리머 안경렌즈의 반사방지 코팅효과 연구

김기출
목원대학교 신소재화학공학과

A Study on the Anti-Reflection Coating Effects of Polymer Eyeglasses Lens

Ki-Chul Kim

Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

요약 폴리머 안경렌즈를 제조할 때 가시광선 영역에서 투과되는 빛을 증가시키고, 안경렌즈 표면에 형성되는 허상을 방지하는 반사방지 기능은 매우 중요하다. 본 연구에서는 굴절률 1.56, 1.60 및 1.67을 갖는 안경렌즈를 폴리머 렌즈 모노머 및 이염화 이부틸 주석 촉매제, 알킬 인산 에스터 이형제 등의 혼합물을 인젝션 몰드 방법으로 열중합 공정을 적용하여 제조하였다. 폴리머 안경렌즈 표면에서의 반사방지 효과를 조사하기 위하여 다층 박막 반사방지 코팅 구조(양면 또는 단면 코팅), 3층 박막의 Gaussian gradient-index profile 불연속 근사 반사방지 코팅 구조, 3층 박막의 quarter-wavelength 근사 반사방지 코팅 구조 등 다양한 반사방지 코팅 구조를 설계하였고, E-beam 증착 시스템을 이용하여 열중합공정으로 제조된 폴리머 안경렌즈에 각각 코팅하였다. 폴리머 안경렌즈의 광학적 특성은 UV-visible spectrometer로 분석하였다. 반사방지 코팅 층을 구성하는 박막의 굴절률, 표면 거칠기 등의 소재 특성은 Ellipsometer와 원자힘 현미경(AFM)으로 분석하였다. 분석결과, 굴절률 1.56의 낮은 굴절률을 갖는 폴리머 안경렌즈에서 가장 효과적인 반사방지 코팅 구조는 다층 박막 반사방지 코팅 구조의 양면 코팅이었다. 하지만 굴절률 1.67의 고굴절률 안경렌즈에 대해서는 3층 박막의 Gaussian gradient-index profile 불연속 근사 반사방지 코팅 구조의 양면 코팅도 다층박막 반사방지 코팅구조의 양면코팅에 상응하는 반사방지 효과를 나타내었다.

Abstract Reducing optical reflection in the visible light range, in order to increase the share of transmitted light and avoid the formation of ghost images in imaging, is important for polymer lens applications. In this study, polymer lenses with refractive indices of $n=1.56$, 1.60 , and 1.67 were fabricated by the injection-molding method with a polymer lens monomer, dibutyltin dichloride as the catalyst and an alkyl phosphoric ester as the release agent. To investigate their anti-reflection (AR) effects, various AR coating structures, viz. a multi-layer AR coating structure, tri-layer AR coating structure with a discrete approximation Gaussian gradient-index profile, and tri-layer AR coating structure with a quarter-wavelength approximation, were designed and coated on the polymer lens by an E-beam evaporation system. The optical properties of the polymer lenses were characterized by UV-visible spectrometry. The material properties of the thin films, refractive index and surface roughness, were analyzed by ellipsometry and AFM, respectively. The most effective AR coating structure of the polymer lens with low refractive index, $n=1.56$, was the both side coating of multi-layer AR coating structure. However, both side coating of the tri-layered discrete approximation Gaussian gradient-index profile AR coating structure gave comparable results to the both side coating of the multi-layer AR coating structure for the polymer lens with a high refractive index of $n=1.67$.

Keywords : anti-reflection, coating structure, injection-mold, polymer lens, vacuum evaporation

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2016년도 산학협력력 기술개발사업(No. C0397062)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다. This work (Grants No. C0397062) was supported by Business for Cooperative R&D between Industry, Academy, and Research Institute funded Korea Small and Medium Business Administration in 2016.

*Corresponding Author : Ki-Chul Kim (Mokwon University)

Tel: +82-42-829-7489 email: kckim30@mokwon.ac.kr

Received October 7, 2016

Revised November 3, 2016

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

1. 서론

빛은 굴절률이 다른 매질의 경계면에서 반사되는 특성이 있다. 이러한 빛의 광학적 반사를 최소화시키는 기술은 여러 산업분야에서 매우 유용하게 이용된다. 태양전지 산업에 적용되면 태양전지 커버 글라스 표면에서 반사되는 빛을 최소화시키고, 태양전지에 입사되는 태양 빛을 최대화시켜서 태양전지의 광전변환효율을 향상시킬 수 있고[1-3], 디스플레이에 적용되면 빛의 반사에 의한 허상의 형상을 최소화시켜서 선명한 화질을 얻을 수 있으며, 카메라 렌즈 및 안경렌즈에 적용되면 원하는 파장대의 빛의 투과를 최대화시켜 선명한 이미지를 얻거나 시인성을 향상시킬 수 있다[4, 5].

일반적으로 빛이 경계면에 수직으로 입사하는 경우에 빛의 반사율은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$R(\%) = \frac{(n_0 - n_s)^2}{(n_0 + n_s)^2} \times 100 \quad (1)$$

여기에서 n_0, n_s 는 각각 공기의 굴절률($n_0 = 1.0$) 및 기판의 굴절률이다. 일반적인 유리의 굴절률은 1.52이므로 경계면당 4.3%의 반사가 일어나며, 총 8.6%의 반사가 일어난다. 이러한 빛의 반사를 최소화시키기 위해서는 굴절률 n_1 을 갖는 반사방지 박막을 기판 위에 코팅해야하며, 이러한 경우 빛의 반사율은 식 (2)처럼 표현된다[6, 7].

$$R(\%) = 100 \times \frac{n_1^2(n_0 - n_s)^2 \cos^2 k_0 h + (n_0 n_s - n_1^2)^2 \sin^2 k_0 h}{n_1^2(n_0 + n_s)^2 \cos^2 k_0 h + (n_0 n_s + n_1^2)^2 \sin^2 k_0 h} \quad (2)$$

여기에서 n_1, k_0, h 는 각각 반사방지 박막의 굴절률, 입사하는 빛의 phase angle 및 필름의 광학적 두께이며, $k_0 h = \pi/2$ 조건일 때 반사방지 코팅소재의 두께(d)와 입사하는 빛의 파장(λ_0)이 $d = \lambda_0 / (4n_1)$ 의 조건을 만족시키고, 식 (2)는 식 (3)처럼 표현된다(quarter-wavelength approximation, QW 근사).

$$R(\%) = \frac{(n_0 n_s - n_1^2)^2}{(n_0 n_s + n_1^2)^2} \times 100 \quad (3)$$

따라서 빛의 반사는 $n_1 = \sqrt{n_0 n_s}$ 일 때 0이 된다. 즉, 파장 550 nm의 녹색 빛이 수직으로 입사하는 경우에 굴절률 1.23을 갖는 반사방지 박막을 112 nm 두께로 코팅하면 빛의 반사는 완벽하게 0이 된다. 하지만 이러한 굴절률을 가진 광학소재가 존재하지 않고, 가시광선은 400 nm ~ 780 nm의 파장을 가지며, 입사각은 0° ~ 90°의 각도를 가지고 있으므로 단일층 반사방지 코팅으로 다양한 각도 및 가시광선 전체 파장에 대하여 완벽한 반사방지 기능을 구현하는 것은 불가능하다.

단일층 반사방지 코팅소재의 문제를 해결하는 가장 보편적인 방법은 균질(homogeneous)의 박막을 다층 박막으로 적층하는 것이며, 오래전부터 광범위하게 연구되었고, 현재 많은 산업 분야에 적용되고 있는 반사방지 코팅 기술이다[8, 9]. 또 다른 대안은 공기의 굴절률에서부터 기판의 굴절률까지 점차적으로 증가하는 gradient-index profile을 갖는 비균질(inhomogeneous) 박막 구조를 구현하는 것으로[10], Quintic[11], Gaussian[12], Exponential[13]등의 특정한 구조를 갖는 다양한 gradient-index profile 구조가 제안되었다. gradient-index profile 반사방지 코팅기술은 다층박막으로 구현된 반사방지 코팅기술과는 다르게 입사각도에 대하여 덜 민감하므로 태양전지산업과 같은 응용에 보다 유용하다고 알려져 있다[10]. 이외에도 메조포러스(mesoporous) 실리카 나노입자를 이용한 반사방지 코팅 기술[3, 4, 6] 및 나방 눈의 주기적인 나노구조물(nano-pillared arrays)을 모사한 반사방지 코팅 기술이 있다[14, 15].

본 연구에서는 기존의 유리 안경렌즈에 비하여 무게가 가볍고 가격이 저렴하여 대중적으로 인기가 많은 굴절률 1.56, 1.60 및 1.67의 폴리머 안경렌즈를 인젝션 몰드 열중합공정으로 제조하였다. 또한 Fig. 1과 같은 다층 박막 반사방지 코팅구조 및 3층 박막의 Gaussian gradient-index profile의 불연속 근사(discrete approximation of Gaussian gradient-index profile) 반사방지 코팅구조[10], 3층 박막의 quarter-wavelength 근사 반사방지 코팅구조 등의 다양한 반사방지 코팅구조를 설계하여 E-beam 증착기술로 안경렌즈에 코팅한 후 반사방지 코팅효과를 조사하였다.

CR10 (n=1.021, thickness=5 nm)
SiO ₂ (n=1.458, thickness= 77 nm)
ZrO ₂ (n=1.863, thickness=71 nm)
ITO (n=1.174, thickness=5 nm)
SiO ₂ (n=1.458, thickness=12 nm)
ZrO ₂ (n=1.863, thickness=32 nm)
SiO ₂ (n=1.458, thickness=125 nm)
Hard Coating (Dipping)
Polymer Lens (n = 1.56 or 1.60 or 1.67)

(a)

ITO (n=1.174, thickness=5 nm)
MgF ₂ (n=1.380, thickness=30 nm or 99 nm)
SiO ₂ (n=1.458, thickness=90 nm or 94 nm)
Hard Coating (Dipping)
Polymer Lens (n = 1.56 or 1.60 or 1.67)

(b)

Fig. 1. Schematic diagram of the (a) multi-layer anti-reflection coating (ARC) structure, and (b) tri-layer approximation ARC structure (MgF₂ & SiO₂ layer : left - discrete approximation of Gaussian gradient-index profile, right - quarter-wavelength approximation).

2. 실험방법

굴절률 1.56, 1.60, 1.67의 폴리머 안경렌즈는 플라스틱 렌즈의 원재료인 모노머 및 알킬인산에스터(alkyl phosphoric ester)로 이루어진 이형제(MR inner releaser, Mitsui Chemicals Inc, Japan), 이염화이부틸주석(dibutyltin dichloride)으로 이루어진 촉매제의 혼합물을 교반한 후, 인젝션 몰드 방법의 열중합 공정으로 제조하였다.

폴리머 안경렌즈에 대한 반사방지 코팅효과를 조사하기 위하여 Fig. 1 (a)에 나타난 것과 같은 다층박막 반사방지 코팅구조와 Fig. 1 (b)에 나타난 것과 같은 3층 형태의 Gaussian gradient-index profile의 불연속 근사 반사방지 코팅구조(SiO₂=90 nm, MgF₂=30 nm) 및 3층 형태의 quarter-wavelength 근사 반사방지 코팅구조(SiO₂=94 nm, MgF₂=99 nm) 등의 반사방지 코팅구조를 설계하였고, 인젝션 몰드 열중합 공정으로 제조된 안경렌즈에 E-beam evaporator를 이용하여 설계된 반사방지 코팅 구조의 박막을 코팅하였다(렌즈의 단면코팅 또는 양면코팅). 박막의 코팅 공정은 인젝션 몰드 방법으로 생산된 안경렌즈를 적당한 크기로 자르고 세척한 후, 폴리머 렌즈의 표면경도를 강화하기 위하여 dipping 법으

로 하드 코팅층을 형성한 다음, 안경렌즈를 회전하는 안경렌즈 zig에 장착하고 5 × 10⁻⁵ Torr 이하에서 진공증착 하였다[16].

안경렌즈의 광학적 특성은 UV-visible spectrometer로 분석하였고, AR 코팅에 적용되는 소재의 굴절률 및 증착율, 표면 거칠기 등은 Si 웨이퍼(Si/SiO₂(300 nm)) 위에 각각의 박막을 AR 증착 공정과 동일한 증착조건으로 준비하여 Ellipsometer 및 원자힘 현미경(AFM)으로 분석하였다.

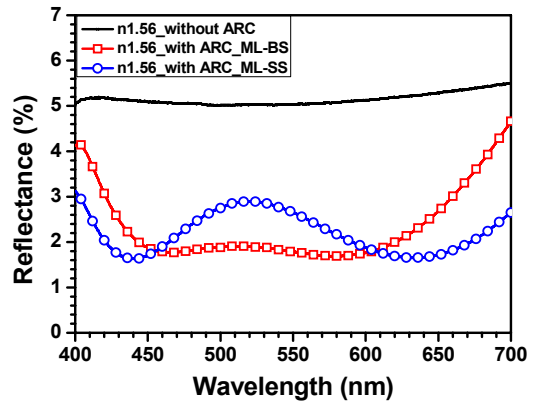


Fig. 2. Reflectance spectra of a polymer lens (n=1.56) without ARC(anti-reflection coating), with multi-layer both side coated (ML-BS) ARC, and multi-layer single side coated (ML-SS) ARC by E-beam evaporation.

3. 실험결과 및 고찰

진공증착 된 박막은 증착시스템 및 공정에 따라 박막의 품질이 크게 좌우되므로, 폴리머 안경렌즈의 반사방지 코팅 층으로 적용하기 전에 동일한 코팅조건으로 AR 코팅층을 구성하는 SiO₂, ZrO₂, ITO, CR10, MgF₂ 박막을 Si 웨이퍼 위에 코팅하여 각각의 물리적 특성을 분석하였다. 박막의 굴절률은 박막의 porosity에 의해 크게 좌우된다[1, 2]. 따라서 Ellipsometer를 이용하여 각 박막의 굴절률을 분석하였고, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 분석결과 SiO₂, ZrO₂, ITO, CR10, MgF₂ 박막의 굴절률은 벌크(bulk) 소재의 굴절률과 크게 다르지 않았다[16]. 따라서 E-beam 증착공정으로 코팅된 박막은 매우 조밀한 구조를 갖는 양질의 박막임을 확인할 수 있었다[1, 2]. 진공 증착된 박막의 표면거칠기는 AR 코팅효과

에 직접적으로 영향을 미친다. 본 연구에서 AR 코팅의 주소재인 SiO₂, ZrO₂, MgF₂ 박막의 표면거칠기를 AFM의 non-contact mode로 분석한 결과, 표면거칠기는 각각 1.37 nm, 0.22 nm, 0.73 nm로 매우 매끈한 표면을 가지고 있었다 [16].

인젝션 몰드 열중합 공정으로 제조된 굴절률 1.56의 폴리머 안경렌즈에 dip-coating법으로 하드코팅 공정을 수행한 다음, Fig. 1 (a)에 나타낸 것과 같은 다층박막 AR 코팅구조를 폴리머 안경렌즈의 단면 또는 양면에 코팅하였고, 렌즈의 광학적 특성을 UV-visible spectrometer로 분석하여 반사율을 Fig. 2에 나타내었다. 하드코팅 공정까지 적용된 폴리머 안경렌즈의 가시광선 영역(400 nm ~ 700 nm)에서의 평균 반사율은 5.2%로 측정되었다. 다층박막 AR 코팅구조를 적용한 경우에는 반사율이 현저하게 감소하였다. 가시광선 영역에서의 평균 반사율은 단면코팅의 경우에는 2.2%이었고, 양면코팅에서는 2.4%로 분석되어 큰 차이가 없었다. 사람의 시신경은 빛의 파장에 따라 반응하는 민감도가 다르다. 사람의 시신경에서 민감도가 높은 명소시 반응(photopic response) 대역인 460 nm ~ 660 nm에 대해서는 단면 코팅의 평균반사율이 2.3%인 것에 비하여 양면코팅은 1.9%로 분석되어 양면코팅이 보다 효과적인 것으로 분석되었다.

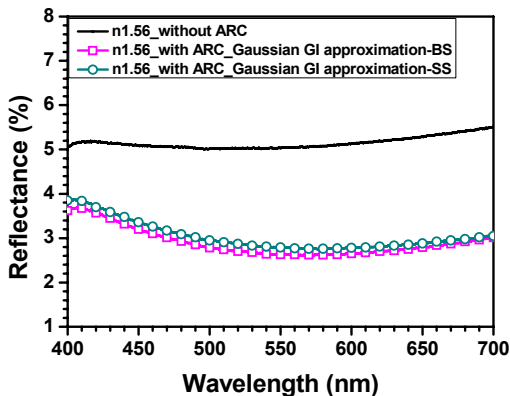


Fig. 3. Reflectance spectra of a polymer lens ($n=1.56$) without ARC, with both side coating of discrete approximation of Gaussian gradient-index profile (Gaussian GI approximation-BS) ARC, and single side coating of discrete approximation of Gaussian gradient-index profile (Gaussian GI approximation-SS) ARC by E-beam evaporation. The thickness of SiO₂, and MgF₂ are 90 nm, and 30 nm, respectively.

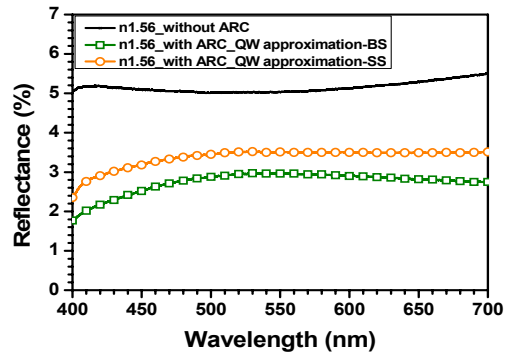


Fig. 4. Reflectance spectra of a polymer lens ($n=1.56$) without ARC, with both side coating of quarter-wavelength approximation (QW approximation-BS) ARC, and single side coating of quarter-wavelength approximation (QW approximation-SS) ARC. The thickness of SiO₂, and MgF₂ are 94 nm, and 99 nm, respectively.

굴절률 1.56의 폴리머 안경렌즈에 대하여 3층의 Gaussian gradient-index profile의 불연속 근사 반사방지 코팅구조의 AR 코팅을 폴리머 안경렌즈의 단면 또는 양면에 코팅한 후에 분석된 반사율을 Fig. 3에 나타내었다. 특이한 점은 가시광선 영역에서의 평균 반사율은 단면 AR코팅일 때 3.0%, 양면 AR 코팅일 때 2.9%로 분석되어 굴절률 1.56의 폴리머 안경렌즈의 양면에 반사방지 코팅을 한 경우와 한쪽 면에만 반사방지 코팅을 한 경우의 반사율의 차이가 미미하였다. 이러한 경향은 굴절률이 1.60 또는 1.67인 폴리머 안경렌즈의 경우에도 동일하게 나타났다.

굴절률 1.56의 폴리머 안경렌즈에 대하여 3층의 quarter-wavelength(QW) 근사 반사방지 코팅구조의 AR 코팅을 폴리머 안경렌즈의 단면 또는 양면에 코팅한 후에 분석된 반사율을 Fig. 4에 나타내었다. 가시광선 영역에서 평균 반사율은 단면 코팅 AR의 경우에는 3.4%, 양면 코팅 AR의 경우에는 2.8%로 분석되어 양면코팅 AR이 보다 효과적인 것으로 분석되었다. 굴절률 1.56의 안경렌즈에 대하여 본 연구에서 설계한 다양한 반사방지 코팅구조를 적용해본 결과 단면 AR코팅보다는 양면 AR 코팅이 보다 효과적이었다. 이러한 결과를 종합하여 한 눈에 검토할 수 있도록 굴절률 1.56 및 1.60, 1.67의 폴리머 안경렌즈에 대하여 다층박막 AR 양면코팅, 3층의 Gaussian gradient-index profile의 불연속 근사 AR 양면코팅, 3층의 quarter-wavelength 근사 AR 양면코팅에 대한 반사율 측정결과를 Fig. 5에 나타내었다.

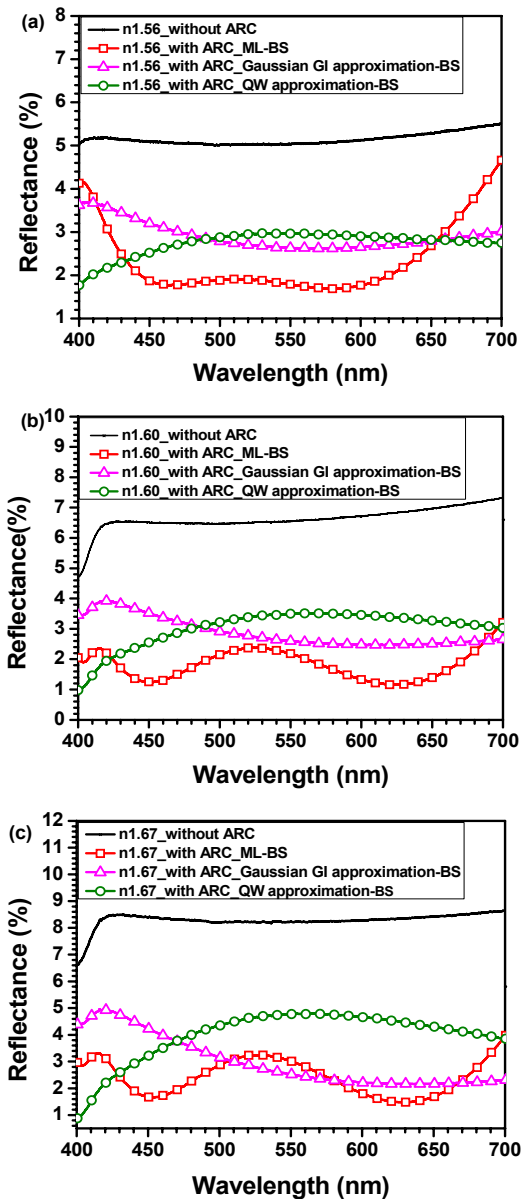


Fig. 5. Reflectance spectra of a polymer lens without ARC, with multi-layer both side coating (ML-BS) ARC, both side coating of discrete approximation of Gaussian gradient-index profile (Gaussian GI approximation-BS) ARC, and both side coating of quarter-wavelength approximation (QW approximation-BS) ARC by E-beam evaporation. (a) $n=1.56$, (b) $n=1.60$, (c) $n=1.67$.

Fig. 5 (a)에서 볼 수 있는 것처럼, 굴절률 1.56의 폴리머 안경렌즈에 대해서는 다층박막 AR 코팅구조의 양

면코팅이 가장 효과적인 것을 알 수 있다. 가시광선 영역에서의 평균 반사율은 각각의 반사방지 코팅설계(다층박막, Gaussian GI, QW)에 대하여 2.4%, 2.9%, 2.8%로 분석되었다. Fig. 5 (b)에서 볼 수 있는 것처럼 굴절률 1.60의 폴리머 안경렌즈에 대한 반사방지 효과를 분석한 결과, 다층박막 AR 코팅구조의 양면코팅이 가장 효과적이었다. 가시광선 영역에서의 평균반사율은 각각 1.8%, 2.9%, 3.0%로 분석되었다. Fig. 5 (c)는 굴절률 1.67의 폴리머 안경렌즈에 대한 다양한 반사방지 코팅설계에 대한 반사율의 측정결과이다. 가시광선 영역에서의 평균반사율은 각각 2.5%, 2.9%, 4.0%로 분석되었으며, 굴절률 1.67의 폴리머 안경렌즈에서도 다층박막 AR 코팅구조가 가장 효과적인 것으로 분석되었다. 사람의 명소시 반응대역인 460 nm ~ 660 nm에서의 평균 반사율도 각각 2.4%, 2.6%, 4.4%로 분석되어 미미하지만 다층박막 AR 코팅구조가 효과적인 것으로 분석되었다. 하지만 Fig. 5 (c)에서 볼 수 있는 것처럼, 폴리머 안경렌즈의 굴절률이 증가할수록 Gaussian GI AR 코팅구조가 다층박막 AR 코팅구조와 대등한 효과를 나타내는 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 굴절률 1.56, 1.60, 1.67을 갖는 폴리머 안경렌즈를 인젝션 몰드 열중합 공정으로 제조한 다음, 다양한 반사방지 코팅설계(다층박막 AR 코팅구조, Gaussian gradient-index profile의 불연속 근사 AR 코팅구조, quarter-wavelength 근사 AR 코팅구조)를 적용하여 폴리머 안경렌즈의 반사방지 코팅효과를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 다양한 반사방지 코팅설계 중 굴절률 1.56 및 1.60, 1.67의 폴리머 안경렌즈에 가장 효과적인 AR 코팅은 다층박막 AR 코팅구조의 양면코팅이었다. 특히 굴절률 1.56의 경우 평균 반사율이 2.4%로 다층박막 AR 코팅구조의 반사방지 효과가 가장 양호하였다.
- 2) Gaussian gradient-index profile의 불연속 근사 반사방지 AR 코팅구조의 경우, 단면코팅과 양면코팅의 차이가 미미하였다. 이러한 경향은 폴리머 안경렌즈의 굴절률에 따라 크게 다르지 않았다. 따라서 생산성 향상을 위한 공정단축을 고려할 때 Gaussian gradient-index의 불연속 근사 AR 코팅

구조를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) Gaussian gradient-index profile의 불연속 근사 반사방지 AR 코팅구조의 경우, 폴리머 안경렌즈의 굴절률이 높아질수록 다층박막 AR 코팅구조의 성능과 대등한 반사방지 코팅 성능을 나타내었다. Gaussian gradient-index profile의 불연속 근사 반사방지 코팅구조를 1.70 이상의 고굴절률 폴리머 안경렌즈에 대하여 적용한다면 다층박막 AR 코팅 구조와 대등한 AR 성능 구현이 가능할 뿐만 아니라, 단면 AR 코팅으로 인하여 약 40% 정도의 공정시간단축(생산성 향상)과 소재절약 등으로 폴리머 안경렌즈 제조에서 경쟁력 향상이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] M-L. Kuo, D. J. Poxson, Y. S. Kim, F. W. Mont, J. K. Kim, E. F. Schubert, and S-Y. Lin, "Realization of near-perfect antireflection coating for silicon solar energy utilization", *Optics Letters*, vol. 33, pp. 2527-2529, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.33.002527>
- [2] S. Chhajed, M. F. Schubert, J. K. Kim, and E. F. Schubert, "Nanostructured Multilayer Graded-index Antireflection Coating for Si Solar Cells with Broadband and Omnidirectional Characteristics", *Applied Physics Letters*, vol. 93, p. 251108, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3050463>
- [3] W. Glaubitt, and P. Lobmann, "Antireflective Coatings Prepared by Sol-Gel Processing; Principles and Applications", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 32, pp. 2995-2999, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.02.032>
- [4] J. Moghal, S. Reid, L. Hagerty, M. Gardener, and G. Wakefield, "Development of Single Layer Nanoparticle Anti-reflection Coating for Polymer Substrates", *Thin Solid Films*, vol. 534, pp. 541-545, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2013.03.005>
- [5] K-C. Kim, "Effective Graded Refractive-index Anti-reflection Coating for High Refractive-index Ophthalmic Lenses", *Materials Letters*, vol. 160, pp. 158-161, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2015.07.108>
- [6] J. Moghal, J. Kobler, J. Sauer, J. Best, M. Gardener, A. A. R. Watt, and G. Wakefield, "High-Performance, Single-Layer Antireflective Optical Coatings Comprising Mesoporous Silica Nanoparticles", *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 4, pp. 854-859, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/am201494m>
- [7] E. Hecht, "Optics", p. 375, Addison-Wesley Publishing Company, 1987.
- [8] H. G. Shanbhogue, C. L. Nagendra, M. N. Annapurna, and S. A. Kumar, "Multilayer Antireflection Coatings for the Visible and Near-infrared Regions", *Applied Optics*, vol. 36, pp. 6339-6351, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.36.006339>
- [9] U. Schulz, "Review of Modern Techniques to Generate Antireflective Properties on Thermoplastic Polymers", *Applied Optics*, vol. 45, pp. 1608-1618, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.45.001608>
- [10] M. Chen, H-C Chang, A. S. P. Chang, S-Y. Lin, J-Q. Xi, and E. F. Schubert, "Design of Optical Path for Wide-angle Gradient-index Antireflection Coatings", *Applied Optics*, vol. 46, pp. 6533-6538, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.46.006533>
- [11] W. H. Southwell, "Gradient-index Antireflection Coatings", *Optics Letters*, vol. 8, pp. 584-586, 1983.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.8.000584>
- [12] E. Spiller, I. Haller, R. Feder, J. E. E. Baglin, and W. N. Hammer, "Gradient-index AR Surfaces Produce by Ion Implantation on Plastic Materials", *Applied Optics*, vol. 19, pp. 3022-3026, 1980.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.19.003022>
- [13] P. Yeh and S. Sari, "Optical Properties of Stratified Media with Exponentially Graded Refractive Index", *Applied Optics*, vol. 22, pp. 4142-4145, 1983.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.22.004142>
- [14] Y. Li, J. Zhang, and B. Yang, "Antireflective Surfaces Based on Biomimetic Nanopillared Arrays", *Nano Today*, vol. 5, pp. 117-127, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nantod.2010.03.001>
- [15] K. Choi, S. H. Park, Y. M. Song, Y. T. Lee, C. K. Hwangbo, H. Yang, and H. S. Lee, "Nano-Tailoring the Surface Structure for the Monolithic High-Performance Antireflection Polymer Film", *Advanced Materials*, vol. 22, pp. 3713-3818, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201001678>
- [16] K-C. Kim, "Anti-Reflection Coating Technology Based High Refractive Index Lens with Ultra-Violet Rays Blocking Function", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, No. 12, 482-487, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.12.482>

김기출(Ki-Chul Kim)

[중신회원]



- 1993년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학사)
- 1996년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학석사)
- 2002년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학박사)
- 2002년 4월 ~ 2006년 3월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 신소재화학공학과 교수

<관심분야>

기능성 나노소재, 에너지관련 소재, 기능성 박막