Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 24, No. 8 pp. 16-21, 2023

https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.8.16
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

고굴절 폴리머 안경렌즈를 위한 효과적인 점진적 굴절률 반사방지 코팅

김기출
목원대학교 식품제약학부

Effective Graded Refractive-index Anti-Reflection Coating for High Refractive-index Polymer Eyeglass Lens

Ki-Chul Kim
Division of Food and Pharmaceutical Technology, Mokwon University

요 약 폴리머 안경렌즈는 유리 안경렌즈보다 가볍고, 고도근시자의 비율이 증가함에 따라 높은 굴절률을 갖는 폴리머 안경렌즈가 특히 주목을 받고 있다. 안경렌즈 시장은 경쟁이 치열하여 생산성을 향상시키고, 원가를 절감하여 가격 경쟁력을 확보하는 것이 매우 중요한 상황이다. 본 연구에서는 굴절률 1.70의 고굴절 폴리머 안경렌즈의 생산성을 향상시킬 수 있는 효과적인 점진적 굴절률 반사방지(AR, Anti-Reflection) 코팅에 대하여 연구하였다. 굴절률 1.70인 고굴절률 폴리머 안경렌즈는 열중합 공정의 인젝션 몰드 방법으로 제조되었다. 폴리머 안경렌즈에 E-beam 진공증착 시스템을 이용하여 AR 코팅 공정을 진행하였고, 전통적인 7층의 다층 박막 AR 코팅과 3층의 점진적 굴절률 AR 코팅을 각각 E-beam 증착하였다. 안경렌즈의 반사율을 자외선-가시광선 분광학(UV-visible spectroscopy)으로 분석하였다. 그 결과 SiO_2 (125 nm, n=1.485)/MgF_2 (25 nm, n=1.380)/ITO (5 nm, n=1.174)의 3층 구조를 갖는 점진적 굴절률 AR 코팅의 폴리머 안경렌즈의 평균 반사율은 파장 400 nm ~ 800 nm의 가시광선 영역에서 2.17%를 나타내어 7층의 다층 박막 AR 코팅의 평균 반사율 3.22%보다 우수하였다. 또한, AR 코팅 공정도 절반 이하로 줄어들어 생산성 향상에 효과가 있었다. 3층 구조를 갖는 점진적 굴절률 AR 코팅 공정은 1.70의 높은 굴절률을 갖는 고굴절 폴리머 안경렌즈의 생산성 향상에 적용될 수 있을 것으로 전망된다.

Abstract Increasing attention is being given to polymer eyeglass lenses with a high refractive index due to their low weight compared to a glass lens and the increasing rate of high myopia. It is very important to increase productivity and to reduce cost because the eyeglass lens market is a red ocean. In this study, effective graded-refractive-index antireflection (AR) coating technology was investigated for a high-refractive index polymer lens with n= 1.70 to increase productivity. The lens was fabricated by injection molding method of thermal polymerization process. A conventional multi-layer AR coating with seven layers and the graded-refractive-index AR coating with three layers were processed by E-beam evaporation. The reflectance of the polymer eyeglass lens was characterized by UV-visible spectroscopy. The graded refractive-index AR coating with three layers of SiO_2 (125 nm, n=1.485)/MgF_2 (25 nm, n=1.380)/ITO (5 nm, n=1.174) exhibits average reflectance of 2.17% for wavelength of 400 nm to 800 nm in the visible light range. This is superior to the average reflectance of 3.22% of the conventional seven-layer AR coating. Also, the productivity of the AR-coated polymer eyeglass lens was increased due to the decrease of the AR coating process to half. The graded refractive-index AR coating could be applied to high-refractive-index polymer eyeglass lens manufacturing to increase productivity.

Keywords : Anti-Reflection, E-beam Evaporation, Graded Refractive-index, Multi-layer Coating, Polymer Eyeglass Lens

*Corresponding Author : Ki-Chul Kim(Mokwon University)
email: kckim30@mowkon.ac.kr
Received June 5, 2023 Revised June 27, 2023
Accepted August 10, 2023 Published August 31, 2023

1. 서론

빛의 광학적 성질에 대한 인류의 탐구는 기원전 1200년경부터 시작되었다. 하지만 빛의 광학적 성질은 17세기가 되어서야 비로소 과학적으로 규명되기 시작하였다[1]. 빛은 굴절률이 다른 매질을 전파해 나갈 때, Fig. 1 (a)에 나타낸 것처럼 굴절률이 다른 경계에서 반사되거나 굴절되는 성질이 있다[2]. 굴절률이 1.5인 유리(n_s=1.5)의 표면에 입사하는 빛은 공기의 굴절률(n_0=1.0)과의 차이에 의해서 유리의 윗면과 아랫면에서 각각 4%씩 반사된다. 따라서 입사되는 빛의 92%만이 유리를 투과하게 된다[3]. 유리가 태양전지의 커버글래스, 안경렌즈, 디스플레이 커버글래스 등 다양한 산업에 활용되면서 유리 표면에서의 반사를 최소화시키는 반사방지 코팅(Anti-Reflection coating, 이하 AR 코팅) 기술은 Fig. 1 (b)에 나타낸 것처럼 매우 중요한 기술이 되었다. 태양전지의 커버글래스에 적절하게 구현된 AR 코팅은 태양전지 모듈에 입사되는 태양빛을 최대화시켜서 태양전지의 광전변환효율을 향상시킬 수 있다[3-6]. 또한 디스플레이에 적용해 빛의 반사를 최소화하여 선명한 화질을 구현할 수 있고, 안경렌즈에 적용되면 빛의 투과를 최대화시켜 선명한 이미지를 구현하고 시인성을 향상시킬 수 있다[3,7,8].

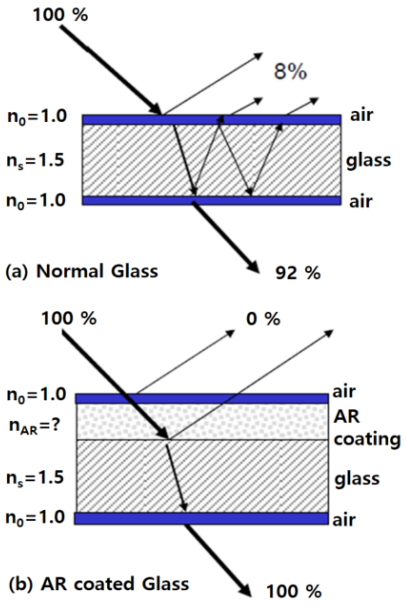

Fig. 1. Schematic diagram of transmission and reflection of light for normal glass and AR(anti-reflection) coated glass[2]

반사방지 코팅을 구현하는 기술은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 다양한 방법이 있다. 가장 단순한 구조는 Fig. 2 (a)에 나타낸 것처럼 반사방지 코팅소재의 두께(d)와 입사하는 빛의 파장(λ_0)이 $d=\lambda_0/4n_{AR}$의 조건을 만족시키면 빛의 반사는 $n_{AR}=\sqrt{n_0 n_s}$ 일 때 0이 된다(여기에서 n_{AR}은 반사방지 코팅소재의 굴절률, n_s는 기판의 굴절률이다)[3,5,7,8]. 즉 파장 550 nm의 녹색 빛이 입사하는 경우 n_{AR}=1.23의 반사방지 코팅소재를 112 nm의 두께로 코팅하면 빛의 반사를 0으로 만들 수 있다. 하지만 이러한 굴절률을 갖는 양질의 광학소재가 존재하지 않기 때문에 단일층 반사방지 코팅을 구현하는 것은 매우 어렵다. 최근 굴절률을 조절할 수 있는 다공성 실리카 나노입자를 이용하여 단일층 AR 코팅을 구현하는 연구가 보고되었지만 완벽하게 반사를 최소화시키는 데에는 한계가 있다[7,9].

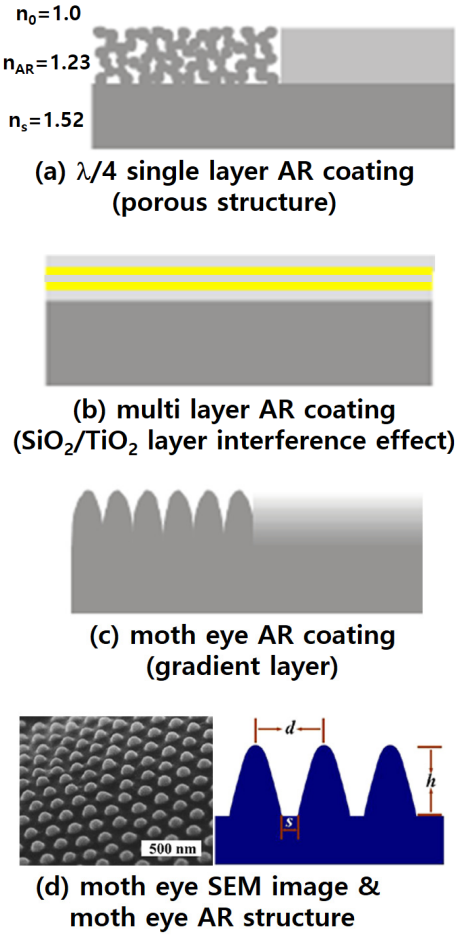

Fig. 2. Schematic diagram of AR coating technology with various method[7-10]

산업적인 응용의 측면에서 반사방지 코팅을 구현하기 위해 가장 많이 적용되는 방법은 Fig. 2 (b)에 나타낸 것처럼 고굴절률의 반사방지 코팅소재와 저굴절률의 반사방지 코팅소재를 교대로 진공증착 공정으로 적층하여 간섭현상을 이용하여 반사율을 최소화시키는 방법이다[8]. 하지만 이러한 방법은 Fig. 3 (a)에 나타낸 것처럼 최소 6~7층의 박막을 진공증착 공정으로 연속 증착해야 된다. 따라서 생산성을 저하시키고, 많은 공정시간을 요구한다.

기술적으로 가장 완벽하게 반사율을 최소화시키는 방법은 Fig. 2 (d)에 나타낸 것처럼 나방눈의 나노돌기 구조를 Fig. 2 (c)에 나타낸 것처럼 기판 위에 균일하게 구현하는 것이다[10,11]. 하지만 자연의 나방눈처럼 나노돌기의 높이(h)와 나노돌기의 간격(d와 s)을 정밀하게 제어하여 기판 위에 구현하는 것은 고가의 반도체 공정장비를 사용해야만 구현이 가능하다. Kiwoon Choi 등은 매우 정밀한 5단계 에칭공정을 이용하여 나방눈 AR 구조를 구현하였고, 400 nm ~ 710 nm 영역의 파장에 대하여 평균 1% 이하의 반사율을 구현하였다[11]. 하지만 대면적으로 나방눈 AR 구조를 구현하기 위해서는 많은 한계를 극복해야한다. 따라서 K-S. Han 등은 나노 임프린트(nano-imprint) 기술인 hot embossing 기술로 유사 나방눈 AR 구조를 구현하여 AR 코팅 결과를 보고하였지만 가시광선 영역에서 투과율이 86%에서 93%로 증가하여 반사방지 효과 구현에는 한계가 있었다[6]. 또한 S. Wang 등은 Ag 증착 후 RIE(Reactive Ion Etching) 공정으로 유사 나방눈 AR 구조를 갖는 반사방지 코팅의 구현을 보고하였지만 가시광선 영역에서 평균 반사율이 약 5%정도로 미흡하였다[12].

산업적인 응용 측면에서 가장 많이 활용되고 있는 진공증착 공정을 이용하면서 Fig. 2 (c)처럼 기판에서부터 공기층으로 가면서 굴절률이 점차적으로 낮아지는 점진적 굴절률(graded refractive-index) 반사방지 코팅 기술이 보고되었고, 반사방지 효과도 우수하였지만(M-L Kuo 등 : 평균 반사율 3.79%[4], S. Chhajed 등 : 평균 반사율 5.9%[5]) 점진적 굴절률 반사방지 코팅 공정이 적용된 모재가 Si 웨이퍼이었고, AR 코팅 소재의 코팅공정이 너무 복잡하여 폴리머 안경렌즈의 AR 코팅으로 적용하는 데에는 한계가 있다4,5].

따라서 본 연구에서는 Fig. 3 (b)에 나타낸 것처럼 3층 구조의 점진적 굴절률 AR 코팅기술을 적용하여 1.70의 높은 굴절률을 갖는 폴리머 안경렌즈에 효과적인 반사방지 코팅기술을 구현하는 방법에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

안경렌즈 모재의 굴절률이 높을수록 빛이 경계면에서 굴절되는 정도가 증가하므로 동일한 수준의 시력 교정을 위해서는 굴절률이 낮은 안경렌즈보다 굴절률이 높은 안경렌즈가 유리하다. 따라서 고도근시의 안경 사용자는 보다 얇은 안경렌즈를 착용할 수 있어서 안경의 무게를 줄일 수 있고, 디자인적으로도 세련된 안경을 착용할 수 있다. 1980년대에는 유리 안경렌즈가 대세였지만 유리보다 가볍고, 광학적 특성도 우수한 폴리머 안경렌즈(CR39, n=1.498)가 개발되면서 현재에는 폴리머 안경렌즈가 주로 사용되고 있다. 특히 폴리머 안경렌즈는 유리렌즈와 비교하여 가공성이 뛰어나기 때문에 다초점 안경렌즈의 제작비용이 절감되어 저렴한 가격으로도 다초점렌즈 안경을 착용할 수 있게 되었다. 폴리머 안경렌즈 업계에서는 보다 굴절률이 높은 안경렌즈 모재 개발에 주력하였고, 현재에는 굴절률 1.56, 1.60, 1.67, 1.70, 1.74의 폴리머 안경렌즈가 개발되었다.

폴리머 안경렌즈 모재의 굴절률이 높아지면 안경렌즈의 반사방지 코팅 기술도 함께 개발되어야한다. 안경렌즈 산업은 기술혁신이 정체되어 경쟁이 매우 치열한 산업으로서 생산성 향상 및 원가절감을 위한 공정기술 개발이 절실한 분야이다. 이에 본 연구에서는 굴절률 1.70의 고굴절용 폴리머 안경렌즈에 적용 가능한 반사방지 코팅기술에 대하여 연구하였다.

굴절률 1.70의 폴리머 안경렌즈는 원재료인 모노머와 알킬인산에스터(alkyl phosphoric ester)로 이루어진 이형제(MR inner releaser, Mitsui Chemicals Inc, Japan), 이염화부틸주석(dibutyltin dichloride)으로 이루어진 촉매제의 혼합물을 1.0 Torr의 진공 분위기에서 교반한 후, 인젝션 몰드 방법의 열중합 공정으로 제조하였다. 열중합 된 렌즈는 경시변화가 발생하지 않도록 125 ℃에서 2시간 동안 열처리하였다[3,8,13].

제조된 안경렌즈의 표면을 깨끗하게 세척한 후, 표면경도를 강화하기 위해 dip coating 공정으로 실리카 성분이 분산되어 있는 용액에 담가서 하드코팅(hard coating)을 실시한 후, 이전에 보고한 것과 동일하게 전자빔 증착 시스템(E-beam evaporation system)을 이용하여 AR 코팅을 실시하였다. 안경렌즈를 회전하는 안경렌즈 zig에 장착하고 진공도가 5×10^{-5} Torr 이하에 도달한 이후에 AR 코팅 공정을 진행하였다[3,8,13]. 이때 Fig. 3 (a)에 나타낸 것처럼 기존의 AR 코팅 공정인 7층의 다층 박막을 굴절률 1.70인 폴리머 안경렌즈의 단

면, 또는 양면에 진공 증착하였다. 또한 본 연구에서 수행한 효과적인 점진적 굴절률 AR 코팅은 Fig. 3 (b)에 나타낸 것처럼, 굴절률이 1.458인 SiO_2 박막을 125 nm 두께로 증착한 다음, 굴절률이 1.380인 MgF_2 박막을 25 nm, 50 nm, 100 nm의 두께로 각각 증착하였다. 이후에 굴절률이 1.174인 ITO 박막을 5nm 두께로 얇게 증착하였다[3,8,13].

굴절률 1.70인 고굴절률 폴리머 안경렌즈의 단면 또는 양면에 E-beam evaporation 공정으로 다층 박막 AR 코팅, 또는 점진적 굴절률 AR 코팅된 안경렌즈의 광학적 특성을 UV-visible spectrophotometer로 가시광선 파장 영역에 대하여 분석하였다.

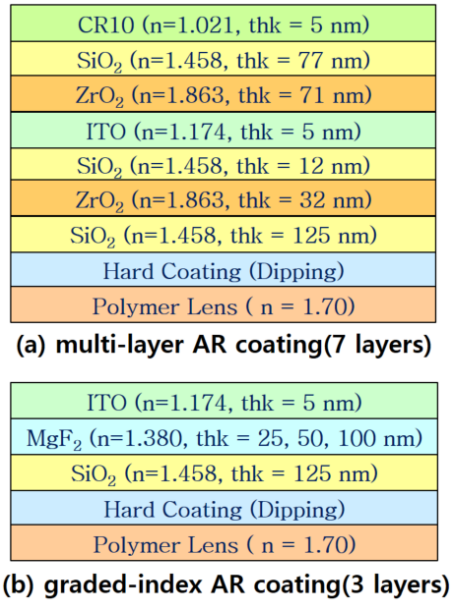

Fig. 3. Schematic diagram of the (a) multi-layer AR coating structure, and (b) graded refractive-index AR coating structure

3. 실험결과 및 고찰

진공증착 된 박막은 증착 시스템과 증착 공정조건에 따라 박막의 품질이 크게 좌우된다. 따라서 폴리머 안경렌즈의 AR 코팅 층으로 적용한 모든 소재에 대하여 동일한 증착조건으로 Si 웨이퍼 위에 진공 증착하여 시편을 준비하였고, 각 소재의 굴절률과 박막의 다공성(porosity), 표면 거칠기 등을 타원편광 반사법(Ellipsometry), 단면 전계방출 주사전자현미경(cross-sectional FE-SEM), 원자힘 현미경(AFM) 등으로 분석한 결과, 선행 연구결과에서 보고한 것처럼 AR 코팅 소재의 굴절률은 벌크 소재의 굴절률과 크게 다르지 않았고, E-beam 증착 공정으로 코팅된 박막은 매우 조밀한 구조를 갖는 양질의 박막임을 확인하였다[3,8,13].

굴절률이 1.70인 고굴절률 폴리머 안경렌즈에 Fig. 3 (a)와 같은 7층의 다층 박막 AR 코팅을 단면, 또는 양면에 진공 증착한 안경렌즈의 반사율 측정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. AR 코팅 공정이 실시되지 않은 폴리머 안경렌즈(bare)의 평균 반사율은 파장 400 nm ~ 700 nm 영역에서 7.6%이었다. 반면에 7층의 다층 박막으로 구성된 기존의 반사방지 코팅공정으로 AR 코팅된 안경렌즈는 단면 AR 코팅 안경렌즈의 경우에는 평균 반사율이 3.0%, 양면 AR 코팅 안경렌즈의 경우에는 평균 반사율이 2.2%로 분석되었다. 따라서 7층의 다층 박막 구조를 갖는 AR 코팅 공정의 경우, 폴리머 안경렌즈의 양면에 AR 코팅 공정을 실시하는 것이 보다 효과적인 반사방지 코팅공정임을 확인할 수 있다.

굴절률이 1.70인 폴리머 안경렌즈의 양면에 Fig. 3 (b)와 같이 3층의 점진적 굴절률 AR 코팅 공정이 적용된 폴리머 안경렌즈의 반사율을 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 파장 400 nm ~ 800 nm의 가시광선 전체 영역에 대하여 반사율을 측정한 결과, AR 코팅 공정이 적용되지 않은 폴리머 안경렌즈(bare)의 평균 반사율은 7.61%이었고, Fig. 3 (a)와 같이 7층의 다층 박막 구조를 갖는 기존의 AR 코팅 공정이 양면에 적용된 폴리머 안경렌즈의 평균 반사율은 3.22%이었다. 특히 7층의 다층 박막 구조의 AR 코팅 안경렌즈의 경우, 고굴절률 AR 코팅소재와 저굴절률 AR 코팅소재의 간섭효과에 의해 파장이 700 nm 이상에서 반사율이 급격히 증가하는 특징을 나타내었다.

반면에 굴절률이 1.70인 폴리머 안경렌즈의 양면에 Fig. 3 (b)와 같이 점진적 굴절률을 갖는 3층의 AR 코팅 공정이 적용된 폴리머 안경렌즈는 파장 400 nm ~ 800 nm 가시광선 전체 영역에서 평균 반사율이 2.17%(MgF_2 25 nm), 2.88%(MgF_2 50 nm), 4.60%(MgF_2 100 nm)로 분석되었다. 특히 MgF_2 박막의 두께가 25 nm인 AR 코팅의 경우, 가시광선 전체 영역에서 평균 반사율이 낮을 뿐만 아니라, 높은 에너지를 갖고 있는 짧은 파장 영역에서의 반사율이 높은 특성을 나타내었다. 이러한 경향은 MgF_2 박막의 두께가 50 nm인 AR 코팅의 경우에도 비슷하게 나타났다.

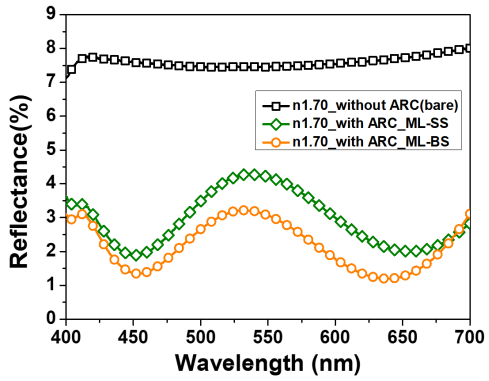

Fig. 4. Reflection spectra of polymer eyeglass lens (n=1.70) without anti-reflection coating(ARC) (bare), with ARC of multi-layer both side coated(ML-BS), and with ARC of multi-layer single side coated(ML-SS)

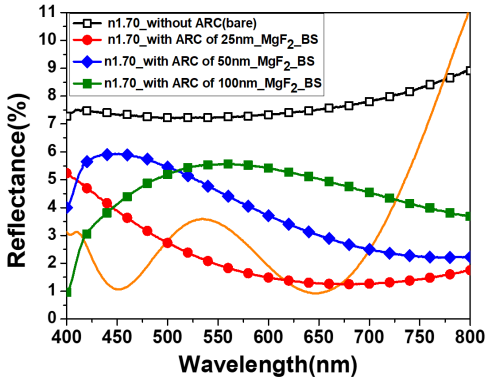

Fig. 5. Reflection spectra of polymer eyeglass lens (n=1.70) without ARC(bare), with ARC of graded refractive-index both side coated(BS) for different MgF_2 thickness(25 nm, 50 nm, 100 nm, respectively). Orange solid line is a ARC of multi-layer both side coated(ML-BS)

인간이 살아가면서 가장 많이 사용하는 신체기관인 눈은 외부의 자극에 매우 민감하며, 노화의 영향을 가장 많이 받는다. 또한 한번 나빠지면 회복이 불가능한 기관으로 알려져 있다. 이러한 눈의 망막에 에너지가 높은 청색광을 일정한 세기 이상으로 노출시키면 망막 세포를 파괴하는 독성물질이 생겨 황반변성이 유발될 수 있다는 연구결과가 보고되었다[14]. 따라서 비교적 높은 에너지를 갖고 있는 파장 411 nm 이하의 가시광선이 차단되는 것이 눈 건강에는 유익하다. 이러한 관점에서 본다면 MgF_2 박막이 25 nm 두께로 적용된 점진적 굴절률 AR 코팅 공정을 적용하는 것이 굴절률 1.70인 고굴절률 폴리머 안경렌즈의 AR 코팅 공정으로 적절하다. 특히 점진적 굴절률 AR 코팅은 기존의 7층 AR 코팅 공정보다 공정 단계가 짧은 3층의 진공 증착이고, 사용되는 AR 코팅 소재도 절약이 가능하여 생산성 향상과 원가절감에 유리하다. 뿐만 아니라 400 nm 파장대의 가시광선을 기존의 다층 박막 AR 코팅보다 상대적으로 많이 차단하여 눈 건강에 유리할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 굴절률이 1.70인 고굴절률 폴리머 안경렌즈를 인젝션 몰드의 열중합 공정으로 제조하였고, 폴리머 안경렌즈에 대하여 효과적인 AR 코팅공정에 대하여 조사하였다. 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 굴절률이 1.70인 고굴절률 폴리머 안경렌즈의 양면에 AR 코팅 공정을 적용하였을 때 효과적인 반사방지 코팅효과가 나타났다.

둘째, 기존에 적용하던 7층의 다층 박막 진공증착 공정이 폴리머 안경렌즈의 양면에 적용된 AR 코팅의 경우, 파장이 400 nm ~ 800 nm 영역의 가시광선 영역에서 평균 반사율이 3.22%이었다. 반면에 3층의 박막 구조를 갖는 점진적 굴절률 AR 코팅의 경우, 평균 반사율이 2.17%(MgF_2, 25 nm)로 낮아서 반사방지 효과가 뛰어났다.

셋째, 3층의 박막 구조를 갖는 점진적 굴절률 AR 코팅의 경우, MgF_2 박막의 두께가 25 nm 또는 50 nm인 경우에는 가시광선 중에서 에너지가 비교적 높은 파장 400 nm ~ 420 nm 영역에서의 반사율이 상대적으로 높아 기존의 다층 박막 AR 코팅 방법과 비교하여 고에너지 가시광선의 차단 효과가 있는 것으로 판단된다.

이상에서 살펴본 것처럼 3층 구조의 점진적 굴절률 AR 코팅 공정은 굴절률이 1.70인 고굴절률 폴리머 안경렌즈의 반사방지 코팅 공정으로 적절하며, 생산성 향상과 원가절감 및 고에너지 청색광 차단 기능까지 구비하고 있으므로 굴절률이 1.70인 고굴절률 폴리머 안경렌즈의 반사방지 코팅 공정에 적용될 수 있을 것으로 전망된다.

References

[1] E. Hecht, Optics (Chap. 1 A Brief History), pp. 1-11, Addison-Wesley Publishing Company, 1987.

[2] E. Hecht, Optics (Chap. 4 The Propagation of Light),

pp. 79-127, Addison-Wesley Publishing Company, 1987.

[3] K-C. Kim, "A Study on the Anti-Reflection Coating Effect of Polymer Eyeglass Lens", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 18, No. 1, pp. 216-221, 2017.
DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.1.216

[4] 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: https://doi.org/10.1364/OL.33.002527

[5] 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: https://doi.org/10.1063/1.3050463

[6] K-S. Han, H. Lee, D. Kim, H. Lee, "Fabrication of antireflection structure on protective layer of solar cells by hot-embossing method", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 93, pp. 1214-1217, 2009.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.01.002

[7] 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

[8] K-C. Kim, "Effective Graded Refractive-ndex 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

[9] 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

[10] Y. Li, J. Zhang, and B. Yang, "Antireflective Surfaces Based on Biomimetic Nanopillared Arrays", *Nano Today*, Vol. 5, pp. 117-127, 2010.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.nantod.2010.03.001

[11] 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: https://doi.org/10.1002/adma.201001678

[12] S. Wang, X. Z. Yu, H. T. Fan, "Simple lithographic approach for subwavelength structure antireflection", *Applied Physics Letters*, Vol. 91, p. 061105, 2007.
DOI: https://doi.org/10.1063/1.2767990

[13] K-C. Kim, "Polymer eyeglass lens with ultraviolet and high-energy visible light blocking function for eye health", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 12, pp. 10-15, 2020.
DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.12.10

[14] L. Knels, M. Valtink, C. Roehlecke, A. Lupp, J. de la Vega, M. Mehner, R. H. W. Funk, "Blue light stress in retinal neuronal (R28) cells is dependent on wavelength range and irradiance", *European Journal of Neuroscience*, Vol. 34, pp. 548-558, 2011.
DOI: https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2011.07790.x

김 기 출(Ki-Chul Kim) [종신회원]

- 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 식품제약학부 교수

〈관심분야〉
에너지 저장 소재, 가스센서, 나노 바이오 응용 소재