자외선 및 청색광 차단 인공수정체 개발

김훈관*, 김성진*, 박진서*, 이민정*, 신은지*, 박빛샘*, 송기창*
*건양대학교 의료신소재학과

e-mail:kais@kais99.or.kr

Development of Intraocular lens that block ultraviolet and blue light

Hun-Kwan Kim*, Sung-Jin Kim*, Jin-Seo Park*, Min-Jung Lee*, Mun-Ji Shin*,
Bit-Saem Park*, Ki-chang Song*
*Dept. of *Biomedical Materials, Konyang University*

요 약

본 논문에서는 고에너지 빛 노출로부터 망막을 보호하기 위해 자외선 및 청색광 차단 기능을 갖춘 인공 수정체(IOL)를 개발하고 평가하는 것을 목표로 한다. Tinuvin과 Quinoline Yellow를 POEA 기반 고분자 매트릭스에 혼합하여 세가지 유형의 기능성 IOL을 제작하였다. UV-Vis 투과율 분석 결과, 모든 샘플은 400 nm 이하 구간에서 투과율이 20% 미만을 보여 효과적인 차단 성능을 확인할 수 있었다. PBS 용액(37 ℃)에서 14일간 진행된 용출 실험에서는 흡광도가 0.1% 이하로 유지되어, 최소한의 용출 위험을 가지면서 우수한 재료 안정성을 나타냈다. 접촉각 측정에서는 광학적 차단제 농도가 증가할수록 소수성이 향상되는 경향을 보였으며, 이는 표면 특성 개선을 시사한다. 이러한 결과는 제안된 IOL이 안구 보호 기능을 강화할 수 있는 가능성을 보여주며, 생체적합성 광차단 렌즈 설계를 위한 기초 자료를 제공한다. 다만 임상 적용을 위해서는 장기적인 생체 안정성과 표면 개질에 추가 연구가 필요하다

1. 서론

현대 사회에서는 컴퓨터, 스마트폰 등의 디지털 기기 사용이 증가하는 추세이다. 이에따라 청색광에 장시간 노출되는 문제가 발생한다. 이러한 자외선과 청색광 노출로 인하여 시력이 저하되고 심하면 사람의 수정체는 혼탁화가 진행되어 시야가 뿌투명해지는 백내장 질환이 발생한다. 청색광이란 파장이 약 380~500 nm 범위에 해당하는 가시광선 중의 한 종류이다. 청색광을 장기적으로 노출할 시 망막 세포에 손상 가능성 및 눈의 피로감, 건조함, 시력 저하, 수명장애가 발생할 수 있다. 자외선은 파장에 따라 UV-A(320~400 nm)와 UV-B(290~320 nm)로 구분되며, 백내장, 황반변성 등의 안과 질환을 유발할 수 있다.

백내장은 대표적인 노인성 안질환으로, 수정체가 혼탁해져 시야가 뿌옇게 보이는 질환이다. 치료를 위해 혼탁해진 수정체를 제거하고 인공수정체(IOL, Intraocular Lens)를 삽입하는 수술이 일반적이다. 기존의 인공수정체는 단순한 광학적 초점 조절 기능에 그치며, 자외선 및 청색광을 효과적으로 차단하지 못하거나, 외부 코팅 방식에 의존해 내구성과 균일성 문제를 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 방식의 한계를 극복하기 위해, 자외선 및 청색광을 동시에 차단할 수 있는 기능성 물질을 인공수정체에 직접 도입함으로써 광학적 성능은 물론 생체적합성과 안전성을 동시에 확보할 수 있는 새로운 인공수정체를 개발하고자 한다.

2. 실험

2.1 시약 및 재료

본 논문에서 사용한 주요 재료는 다음과 같다. 높은 투명성과 유연성을 지닌 고분자로, 인공수정체의 기질로 POEA(Poly(oxyethlene acrylate))가 사용되었다. 이는 생체적합성이 우수하여 안구 삽입물로 적합하다. EGDMA(Ethylene glycol dimethacrylate)는 가교제 역할을 하며, 중합체의 구조를 안정화시키고 기계적 물성을 향상시킨다. 중합 반응을 개시하는 라디칼 개시제로 AIBN(Azobisisobuturonitrile)가 사용되었다.

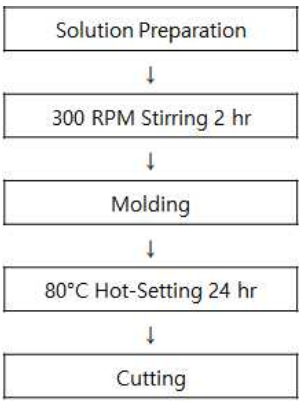
Tinuvin 477W(N)은 광안제 역할을 하며, 자외선을 효과적으로 흡수하고, 열과 빛에 대한 안정성이 높아 많이 사용된다. Quinoline Yellow는 청색광과 자외선을 선택적으로 차단할 수 있는 염료이며, 고분자와 잘 혼합되어 색 안정성과 기능성 구현에 유리하다.

PBS(Phosphate Buffered Saline)는 인체 체액과 유사한 PH(약 7.4)와 삼투압을 유지하는 완충용액으로, 용출 실험에서 인공수정체의 안정성 평가에 사용되었다.

2.2 인공수정체 Base 제조

	BASE
POEA(Poly(oxyethylene acrylate))	5.766 g
EGDMA(Ethylene glycol dimethacrylate, 98%)	0.0613 g
AIBN (Azobisisobutyronitrile)	0.0175 g

[표 1] Composition of Reagrents Used in Intraocular Lens Base Preparation



[그림 1] Schematic Diagram of the Intraocular Lens Base Fabrication Process

인공수정체 베이스는 표 1에 제시된 바와 같이 POEA(Poly(oxyethylene acrylate)) 5.766 g, 가교제 역할을 하는 EGDMA(Ethylene glycol dimethacrylate, 98%) 0.0613 g, 열 개시제 역할을 하는 AIBN(Azobisisobutyronitrile) 0.0175 g을 사용하여 제조하였다. 전체적인 제조 공정은 그림 1에 도식화되어 있다.

먼저, 세 가지 시약을 정확한 비율로 계량하여 반응 용기에 넣고, 300 RPM으로 2시간 동안 교반하여 균일한 혼합물을 형성하였다. 혼합된 용액은 준비된 몰드에 주입한 후, 80 °C에서 24시간 동안 열경화시킨 이후 경화된 시편을 몰드에서 분리하고, 원하는 형태로 절단하여 인공수정체 베이스를 완성하였다. 이 베이스는 이후 자외선 및 청색광 차단제를 첨가하는 기반 재료로 사용된다.

2.3 자외선 및 청색광 차단 인공수정체 제조

	Ref.	1	2	3
POEA (Poly(oxyethylene acrylate))	11.532 g	11.532 g	11.532 g	11.532 g
EGDMA (Ethylene glycol dimethacrylate, 98%)	0.1226 g	0.1226 g	0.1226 g	0.1226 g
AIBN	0.035 g	0.035 g	0.035 g	0.035 g
Tinuvin	non	0.01 g	0.01 g	0.01 g
Quinoline Yellow	non	0.0025 g	0.001 g	0.0005 g

[표 2] Compositions of UV and Blue Light Blocking Intraocular Lenses

자외선 및 청색광 차단 기능을 갖춘 인공수정체는 표 2에 제시된 조성에 따라 총 4종(Ref., 1, 2, 3)을 제조하였다. 모든 시료는 공통적으로 POEA(Poly(oxyethylene acrylate)) 11.532 g, EGDMA(Ethylene glycol dimethacrylate, 98%) 0.1226 g, AIBN(Azobisisobutyronitrile) 0.035 g을 포함하여 동일한 베이스 조성으로 제작되었다.

이후 자외선 차단을 위한 첨가제로 Tinuvin 0.01 g을, 청색광 차단을 위한 염료로 Quinoline Yellow을 각각 다른 농도(1: 0.0025 g, 2: 0.001 g, 3: 0.0005 g)로 첨가하였다. 대조군인 Ref. 시료에는 차단제를 첨가하지 않았다.

모든 시약은 균일한 혼합을 위해 300 RPM으로 2시간 동안 교반하였으며, 혼합된 용액은 몰드에 주입 후 80 °C에서 24시간 동안 열경화를 통해 중합하였다. 이후 경화된 시편을 절단하여 광학 분석, 용출 실험, 접촉각 측정 등에 사용하였다. 이러한 다중 조성 실험을 통해 Tinuvin 및 Quinoline Yellow의 혼합 비율에 따른 차단 효과 및 생체적 특성의 변화를 비교 분석하였다.

2.4 광학적 특성 평가

제조된 인공수정체의 자외선 및 청색광 차단 성능을 확인하기 위해 UV-Vis 분광광도계를 사용하여 투과도(transmittance) 분석을 수행하였다. 분석은 200~800 nm 범위에서 측정되었으며, 이 범위는 인공수정체의 전체 광학적 특성을 평가하기에 적절하다.

측정 결과는 파장별 투과율(%)로 나타내었으며, 특히 투과율이 20% 이하인 경우 자외선 및 청색광 차단 효과가 있는 것으로 판단하였다.

용출 실험에는 인체 환경을 모사하기 위한 PBS(Phosphate Buffered Saline) 용액을 사용하였다. 제조된 인공수정체를 PBS 용액에 침지한 후, 인큐베이터를 37 °C, 즉 인체 체온과 유사한 조건으로 설정하여 일정 기간 동안 보관하였다. 이후 각각의 시간 간격에 따라 용액을 채취하고, UV-Vis 분광광도계를 이용하여 해당 용액의 흡광도(absorbance)를 측정함으로써, 시약 성분의 용출 여부 및 정도를 정량적으로 분석하였다.

이러한 분석을 통해 인공수정체 삽입 후, 체내 환경에서 광차단제가 용출될 가능성과 그로 인한 생체 내 부작용을 사전에 예측할 수 있다. 또한 본 실험 결과는 향후 제품화 시 장기적인 안정성 확보와 더불어, 기존 시판 인공수정체와의 성능 비교 및 안정성 평가에 중요한 참고 자료로 활용될 수 있다.

2.5 접촉각 측정

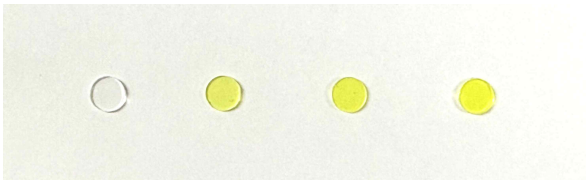
제조된 인공수정체의 표면 특성을 분석하기 위해 접촉각 측정기(Contact Angle Goniometer)를 이용하여 접촉각(contact angle)을 측정하였다. 접촉각은 고체 표면 위에 액체 방울을 떨어뜨렸을 때 형성되는 각도로, 재료의 친수성 또는 소수성을 판단할 수 있는 중요한 표면 물성 지표이다.

본 실험에서는 증류수를 사용하여 인공수정체 표면에 정량의 물방울을 떨어뜨린 후, 형성된 접촉각을 측정하였다. 일반적으로 접촉각이 90° 미만일 경우 친수성, 90° 이상일 경우 소수성으로 분류된다. 생체재료에서 친수성은 단백질 부착 억제, 세포 반응성 감소 등의 효과와 연관되며, 후발성 백내장(PCO) 예방 등 임상적 이점을 제공할 수 있다.

측정은 각각의 시편에 대해 반복 측정하여 평균값을 도출하였으며, 광차단제를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 베이스 간의 접촉각 차이를 통해 첨가제가 표면 에너지에 미치는 영향을 정량적으로 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

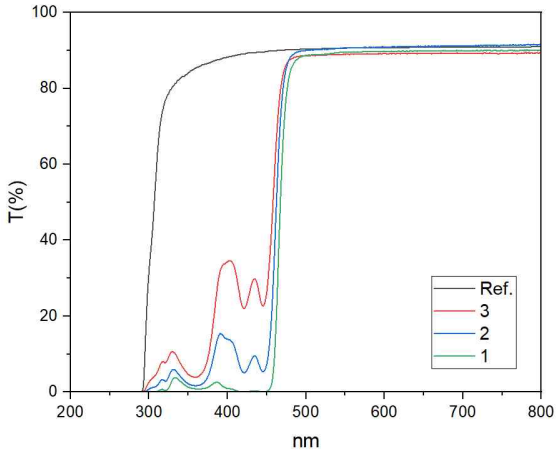
3.1 인공수정체 제조 결과



[그림 2] Fabricated Intraocular Lens Samples(Ref. to 3, left to Right)

그림 2는 본 연구에서 제조된 인공수정체의 실제 외관 사진을 나타낸 것이다. 가장 왼쪽의 무색 샘플은 차단제를 첨가하지 않은 대조군(Ref.)이며, 오른쪽으로 갈수록 Quinoline Yellow의 첨가 농도가 높아짐에 따라 시각적으로도 점점 뚜렷한 황색을 띠는 것을 확인할 수 있다. 이는 차단제가 렌즈 내에 균일하게 혼합 및 고정되었음을 간접적으로 보여주는 결과로 해석된다.

3.2 투과율 분석



[그림 3] UV-Vis Transmittance Spectra of Intraocular Lens samples with Different Quinoline Yellow Concentrations.

제조된 인공수정체의 자외선 및 청색광 차단 성능을 확인하기 위해 200~800 nm 범위에서 UV-Vis 분광광도계를 이용한 광 투과율(transmittance, T%) 분석을 수행하였다. 그림 3은 대조군(Ref.)과 Quinoline Yellow 농도를 달리한 시료(1, 2, 3)의 투과율 변화를 나타낸 그래프이다.

대조군(Ref.)은 300~500 nm 영역에서 80% 이상의 높은 투과율을 보이며, 차단 기능이 전혀 없는 투명한 상태임을 확인할 수 있었다. 반면, 광차단제를 첨가한 시료 1(0.0025 g), 2(0.001 g), 3(0.0005 g)은 파장이 짧을수록 투과율이 급격히 감소하는 경향을 보였다. 특히 450 nm 이하의 자외선 및 청색광 영역에서 투과율이

20% 이하로 낮아져, 효과적인 고에너지 광선 차단 기능을 가지는 것으로 나타났다.

또한, Quinoline Yellow의 첨가 농도가 증가할수록 차단 효과가 더 뚜렷해지는 경향을 보였으며, 이는 Quinoline Yellow의 광흡수 특성이 고에너지 영역에서 유효하게 작용함을 시사한다. 농도 0.0025 g을 첨가한 시료 1은 전반적으로 가장 낮은 투과율을 기록하였으며, 300~450 nm 영역에서 특히 강한 흡광 특성을 나타내었다.

이러한 결과는 본 연구에서 제조한 인공수정체가 자외선(UV-A, UV-B) 및 청색광을 효과적으로 차단할 수 있음을 입증하며, 광차단 첨가제의 농도 조절을 통해 원하는 수준의 차단 성능을 구현할 수 있음을 보여준다.

참고문헌

[1] 이석주, 박성종, 유근창, 이철우. (2020). Benzotriazole을 이용한 청색광 차단 하이드로겔 콘택트렌즈의 제조. 대한시과학회지, 22(4), 409-417.

[2] 이정화, 조영주, 임태형, & 조범진. (2019). 국내 생산된 인공수정체를 삽입한 백내장수술의 임상결과. 대한안과학회지, 60(12), 1185-1190.

[3] Lens, U. L. F. I. (2017). 청색광차단 인공수정체와 자외선차단 인공수정체의 시기능 비교. J Korean Ophthalmol Soc, 58(1), 34-42.

[4] 유성, 김용일, 하상원, 이광자, 이규원, & 박영정. (2016). 회절성 이중 다초점 인공수정체와 회절성 삼중 다초점 인공수정체의 임상 결과 비교. 대한안과학회지, 57(3), 405-412.

[5] 박문찬. (2020). 코팅 청색광 차단 렌즈의 제작과 특성 연구. 한국안광학회지, 25(3), 307-314.