



자외선에 의한 눈의 독성 및 예방

Ocular Toxicity Caused by Ultraviolet Radiation and Preventive Measures

김 훈¹ · 윤지현² · 조경진¹

Hoon Kim, PhD¹, Jihyun Yoon, PhD², Kyong Jin Cho, MD, PhD¹

단국대학교 의과대학 안과학교실¹, 백석문화대학교 스마트소프트웨어공학과²

Department of Ophthalmology, Dankook University College of Medicine¹, Cheonan, Korea

Department of Smart Software Engineering, Baekseok Culture University², Cheonan, Korea

Ultraviolet (UV) radiation, a form of non-ionizing radiation, poses a significant threat to ocular health, and is classified by wavelength into UVA, UVB, and UVC, each category is absorbed by different eye tissues, leading to acute and chronic diseases. This review analyzes the toxic mechanisms of each UV wavelength on the cornea, lens, and retina and examines the pathological effects of major diseases, such as photokeratitis, cataracts, pterygium, and age-related macular degeneration, based on recent research. Furthermore, this study aimed to provide scientific evidence for preventing UV-induced eye damage by outlining the role of sunglasses in effective UV protection and presenting the criteria for their proper selection.

Ann Optom Contact Lens 2025;24(4):155-162

Key Words: Age-related macular degeneration, Cataract, Ocular toxicity, Radiation protection, Ultraviolet radiation

자외선(ultraviolet, UV)은 전자기 스펙트럼에서 가시광선보다 짧은 파장(100-400 nm)을 가지는 비이온화 방사선으로, 파장에 따라 UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm), UVC (100-280 nm)로 구분된다.¹ 지구의 성층권 오존층이 대부분의 UVC와 상당 부분의 UVB를 흡수하지만, 지표면에 도달하는 UVA와 일부 UVB는 인체, 특히 외부 환경에 직접 노출되어 있는 눈에 상당한 영향을 미친다(Fig. 1).²

세계보건기구(World Health Organization, WHO)에 따르면 전 세계적으로 약 1,800만 명이 백내장으로 인해 실명 상태에 있으며, 이 중 상당 부분이 UV 노출과 관련이 있는

것으로 추정된다.³ 또한 나이 관련 황반변성(age-related macular degeneration, AMD)은 선진국에서 50세 이상 인구의 주요 실명 원인으로, UV 노출이 중요한 환경적 위험 인자로 지목되고 있다.⁴

안구는 각막, 수정체, 망막 등 서로 다른 광학적 특성을 가진 조직들로 구성되어 있으며, 각 조직은 특정 파장의 UV를 선택적으로 흡수하는 특성이 있다.⁵ 각막은 UVB와 UVC의 대부분을 흡수하고, 수정체는 UVA와 잔여 UVB를 흡수하며, 극소량의 UVA만이 망막에 도달한다. 그러나 이러한 흡수 과정은 해당 조직에 광화학적 손상을 유발하며, 이는 급성 또는 만성적인 안과 질환의 원인이 된다.⁶

본 종설에서는 UV 파장별 안구 조직에 미치는 독성 기전을 체계적으로 분석하고, 이와 관련된 주요 안과 질환의 역학적 특성과 병태생리학적 메커니즘을 최신 연구 결과를 바탕으로 검토하고자 한다. 또한 UV로부터 눈을 보호하기 위한 효과적인 예방 전략을 제시하는 것을 목적으로 한다.

■ Received: 2025. 9. 22.

■ Revised: 2025. 10. 21.

■ Accepted: 2025. 12. 4.

■ Address reprint requests to **Kyong Jin Cho, MD, PhD**
Department of Ophthalmology, Dankook University Hospital,
201 Manghyang-ro, Dongnam-gu, Cheonan 31116, Korea
Tel: 82-41-550-3295, Fax: 82-41-556-0524
E-mail: perfecture@dankook.ac.kr

* Conflicts of Interest: The authors have no conflicts to disclose.

Copyright © 2025, The Korean Optometry Society
The Korean Contact Lens Study Society

© Annals of Optometry and Contact Lens is an Open Access Journal. All articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

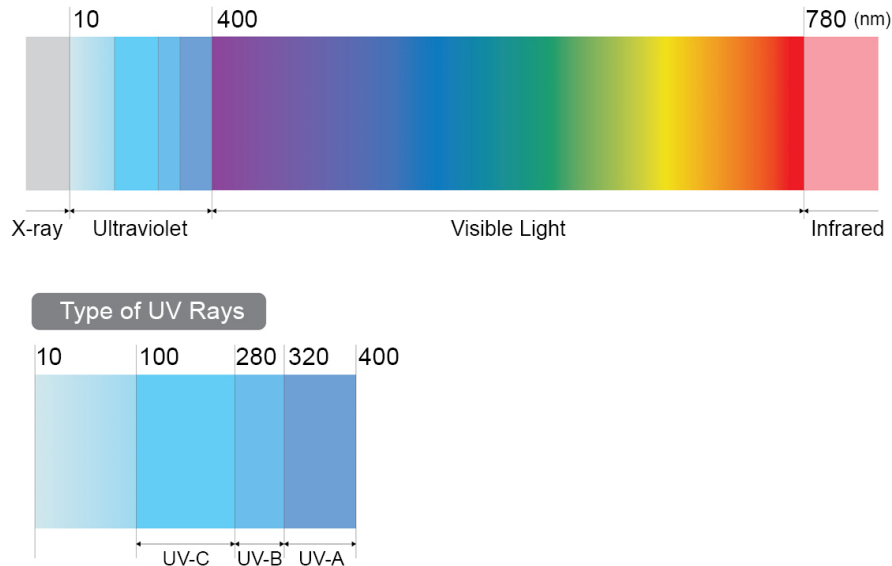


Figure 1. Spectrum and classification of ultraviolet (UV) radiation by wavelength. The electromagnetic spectrum includes X-rays, UV rays, visible light, and infrared radiation, differentiated by wavelength. UV radiation (approximately 100-400 nm) is further categorized into UVC (100-280 nm), UVB (280-320 nm), and UVA (320-400 nm). Shorter wavelengths correlate with higher energy and potential biological effects.

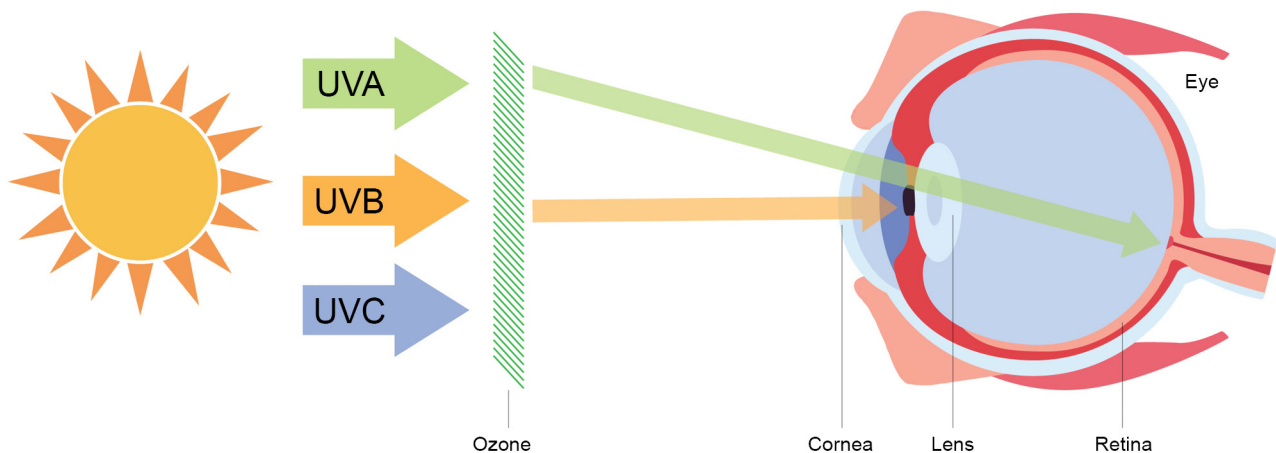


Figure 2. Ocular absorption of ultraviolet (UV) radiation according to wavelength. Different ocular components absorb specific types of UV radiation. The cornea primarily absorbs UVC and most UVB radiation, whereas the lens absorbs the remaining UVB and part of the UVA radiation. Longer-wavelength UVA radiation penetrate deeper, reaching the retina. The atmospheric ozone layer effectively blocks UVC and most UVB radiation from reaching the Earth's surface.

UV의 종류 및 특징

UV의 생물학적 영향은 파장에 따라 현저한 차이를 보인다. 각 파장대의 물리적 특성과 안구 조직에서의 흡수 패턴은 다음과 같다(Fig. 2).

UVC (100-280 nm)는 세 가지 UV 파장 중 가장 높은 에너지(4.43-12.4 eV)를 가지며 생물학적으로 가장 유해하다.^{6,7} 다행히 대부분이 성층권 오존층에서 흡수되어 지표면에는 거의 도달하지 않는다. 그러나 작업중에 인공 광원(용접

아크, 살균 램프, 수은등)에서 방출되는 UVC에 노출될 경우 심각한 급성 각막 손상을 유발할 수 있다.⁸ UVC는 각막 상피에서 거의 100% 흡수되며, DNA의 피리미딘(pyrimidine) 염기에 직접 흡수되어 티민 이량체(thymine dimer)를 형성하고 세포 사멸을 유발한다.⁹

UVB (280-315 nm)는 부분적으로 오존층에 흡수되지만 상당량(약 10%)이 지표면에 도달하며, 대부분의 UV 관련 안과 질환의 주요 원인이다.^{6,7} UVB는 주로 각막과 전방 수정체에 흡수되며, 일부는 수정체 중심부까지 침투한다. 각

막에서 UVB는 직접적인 DNA 손상과 함께 활성산소종(reactive oxygen species, ROS) 생성을 촉진하여 염증 반응과 세포 사멸을 유발한다.¹⁰

UVA (315-400 nm)는 오존층에 거의 흡수되지 않아 지표면 도달 UV의 약 95%를 차지한다.^{6,7} UVA는 UVB보다 개별 광자의 에너지는 낮지만(3.10-3.94 eV), 각막과 방수를 쉽게 통과하여 수정체 전체와 일부는 망막까지 도달할 수 있다. UVA의 주요 손상 기전은 광감작 반응(photosensitized reaction)으로, 내인성 광감작제(endogenous sensitizer)와 상호작용하여 ROS를 생성하고 간접적으로 세포 손상을 유발한다. 또한, UVA 노출이 핵경화 백내장 발생과 유의한 연관성을 보이는 것으로 알려져 있다.⁶

UV에 의해 유발되는 안질환

외안부 질환

각막은 안구의 최전방 구조로서 UV 방사선에 가장 먼저 노출되며, 따라서 UV 관련 질환의 일차 표적이 된다(Table 1).

광각막염(photokeratitis)

광각막염은 과도한 UV 노출 후 6-12시간 내에 발생하는 급성 각막 상피 손상으로, ‘설맹(snow blindness)’ 또는 ‘용접공 결막염(welder’s flash)’으로도 알려져 있다.⁸ 주로 UVB와 UVC에 의해 유발되며, 스키장, 해변, 용접 작업장 등에

서 발생한다.

병리학적으로 UV는 각막 상피세포의 DNA에 직접 손상을 가하여 티민 이량체와 6-4 광생성물을 형성한다.⁹ 손상된 세포는 염증성 사이토카인(IL-1 β , TNF- α)과 프로스타글란딘(prostaglandin) E2를 방출하여 통각 수용체를 자극하고 혈관 투과성을 증가시킨다.^{8,11} 이로 인해 극심한 안통, 이물감, 눈물 과다 분비, 결막충혈, 안검경련 등의 증상이 나타난다.

다행히 각막 상피는 뛰어난 재생 능력을 가지고 있어 대부분 24-72시간 내에 완전히 회복되며 후유증을 남기지 않는다.¹² 그러나 반복적인 광각막염은 각막 상피의 기저막 손상을 유발하여 재발성 각막미란(recurrent corneal erosion)의 위험을 증가시킬 수 있다.¹³

익상편(pterygium) 및 검열반(pinguecula)

익상편(군날개)은 구결막의 섬유혈관 조직이 각막으로 침입하는 진행성 질환으로, 전 세계적으로 약 2억 명이 이환되어 있는 것으로 추정된다. 적도 지역 및 건조한 기후의 국가에서 유병률이 높으며, 위도 40도 부근 내 유병률이 그 외 지역의 10배 이상 높게 나타난다.¹⁴

역학 연구에 따르면 일일 UV 노출량이 높은 지역일수록 익상편 유병률이 유의하게 증가하며, 야외 작업자에서 실내 작업자보다 약 5배까지 높은 발생률을 보이는 것으로 보고되었다.¹⁵

Table 1. Eye diseases by type of UV radiation

Conditions	Related UV types	Key content and features
Photokeratitis	UVB, UVC	An acute corneal and conjunctival burn that occurs from excessive UV exposure, usually 6 to 12 hours after exposure. Also known as “snow blindness” or “welder’s flash.” It causes severe eye pain, tearing, and light sensitivity, and symptoms typically subside within 24 to 72 hours.
Pterygium/pinguecula	Chronic UV exposure (mostly UVA, UVB)	A condition where a fleshy growth or yellowish patch develops on the conjunctiva, which is the tissue covering the white part of the eye. It’s caused by damage to conjunctival stem cells from chronic UV exposure.
Cataract	Cortical cataract: UVB Nuclear cataract: UVA Posterior subcapsular cataract: UV correlation is low	A disease where the eye’s lens becomes cloudy. Cortical cataract: Strongly correlated with UVB exposure. Nuclear cataract: Correlated with UVA exposure over a long period. Posterior subcapsular cataract: Highly correlated with other factors like steroid use and diabetes.
Age-related macular degeneration	UVA and overall UV exposure	A leading cause of central vision loss in people over 50. UVA radiation reaches the RPE, causing oxidative stress and promoting cell death.
Solar maculopathy	High-intensity UV and visible light	An acute macular burn that can occur from directly looking at the sun, such as during a solar eclipse. It can result in a permanent central blind spot.
Photoc retinopathy	UV (when taking specific medications)	Retinal toxicity can be exacerbated if the eye is exposed to UV while taking certain drugs (e.g., chloroquine).

UV = ultraviolet; RPE = retinal pigment epithelium.

Summary of major ocular diseases linked to different UV spectra (UVA, UVB, UVC) and exposure patterns. Acute UV exposure mainly causes photokeratitis and photic retinopathy, while chronic exposure contributes to pterygium, cataract, and age-related macular degeneration through oxidative and photoinduced damage to ocular tissues.

병태생리학적으로 만성 UV 노출은 다음과 같은 기전을 통해 이상편을 유발한다: 각막윤부 줄기세포 손상으로 정상적인 각막 상피 재생을 방해하고, 결막 섬유아세포의 증식과 콜라겐 합성을 촉진하며, matrix metalloproteinase (MMP)-1, MMP-3, MMP-9의 발현 증가로 각막 기질의 분해와 재구성을 촉진하고, 혈관 내피 성장인자(vascular endothelial growth factor, VEGF)와 염기성 섬유아세포 성장인자(basic fibroblast growth factor)의 발현 증가로 결막 혈관의 각막 침입을 촉진한다.¹⁴

검열반은 이상편의 전구 병변으로 여겨지며, 결막에 발생하는 황백색의 융기된 병변이다. 조직학적으로 결막 기질의 탄력 섬유증(elastosis)과 히알린 변성을 특징으로 하며, 유사한 UV 관련 병태생리 기전에 의해 발생한다.¹⁴

수정체 질환

수정체는 각막을 통과한 UV를 흡수하여 망막을 보호하는 천연 UV 필터 역할을 하지만, 이 과정에서 자체적으로 손상을 받아 백내장이 발생할 수 있다.

백내장(cataract)

백내장은 전 세계 실명 원인의 약 45%를 차지하는 주요 질환으로, 2020년 기준 약 9,400만 명이 백내장으로 인한 시각 장애를 겪고 있다.³ WHO 추산에 따르면 백내장으로 인한 실명의 약 20%가 UV 노출과 관련이 있는 것으로 평가된다.⁶ 야외 활동이 한 시간 증가할 때마다 피질 백내장 위험이 4.3%씩 증가한다는 연구가 보고된 바 있고,¹⁶ 특히 한국 성인을 대상으로 한 분석에서는, 하루 UV 노출 시간이 5시간 이상인 경우에서 그렇지 않은 경우에 비해 유의하게 높은 백내장 유병률을 보였다.¹⁷

백내장 형성의 분자생물학적 기전은 다음과 같다: UV에 의한 산화 스트레스 및 단백질 손상 기전에서 UV는 수정체 내에서 다양한 ROS (superoxide anion, hydrogen peroxide, hydroxyl radical)의 생성을 촉진한다.⁶ 생성된 ROS는 수정체의 주요 구조 단백질인 α -, β -, γ -crystallin을 산화시키고, 황 함유 아미노산(cysteine, methionine)의 산화를 통해 단백질 간 이황화 결합과 교차결합을 형성한다. 이러한 변성된 단백질들은 고분자량 응집체를 형성하여 수정체의 투명성을 감소시키고 빛 산란을 증가시킨다.¹⁸ 글루타치온(glutathione, GSH) 고갈 측면에서는 수정체가 GSH를 주요 항산화 방어 시스템으로 사용하는데, UV 노출은 GSH의 산화적 소모를 촉진하고, 나이가 들면서 GSH 재생 능력이 감소하여 산화 스트레스에 대한 방어력이 약화된다.⁶ 수정체 상피세포 손상에서는 UV가 수정체 전방 하부의 상피세포에 직접적인 DNA 손상을 가하여, 손상된 상피세포의

$\text{Na}^+ - \text{K}^+$ ATPase와 같은 이온 펌프의 기능이 저하되어 수정체의 이온 균형과 투명성 유지에 필수적인 항상성이 파괴된다.¹⁹ 당화 반응 촉진에서는 UV가 수정체 단백질의 비효소적 당화(glycation)를 촉진하여, 최종당화생성물(advanced glycation end products, AGEs)의 형성을 증가시켜, AGEs가 단백질 교차결합을 유발하고 갈색 색소를 형성하여 핵경화 백내장의 발생에 기여한다.⁶

백내장 유형별 UV 연관성을 살펴보면, 피질 백내장(cortical cataract)은 UVB 노출과 가장 강한 연관성을 보이며 수정체 피질 부위의 크리스탈린 섬유가 팽창하고 수분 함량이 증가하여 특징적인 썰기 모양의 혼탁이 나타난다.⁶ 핵경화 백내장(nuclear cataract)은 주로 UVA의 장기간 노출과 관련이 있으며, 수정체 핵의 단백질 농도 증가와 굴절률 변화로 인해 근시화 현상과 함께 갈색 착색이 나타난다.²⁰ 후낭하 백내장(posterior subcapsular cataract)은 UV보다는 스테로이드 사용, 당뇨병 등 다른 요인과의 연관성이 더 높은 것으로 알려져 있다.¹⁷

망막 질환

정상적인 조건에서 대부분의 UV는 각막과 수정체에서 흡수되어 망막에는 전체 UV의 1-2%만이 도달한다.⁵ 그러나 무수정체안이나 UV 차단 기능이 없는 인공수정체를 삽입한 경우, 또는 수정체의 UV 흡수 능력이 감소한 고령자에서는 더 많은 양의 UV가 망막에 도달할 수 있다.²¹

AMD

AMD는 50세 이상에서 중심 시력 상실의 주요 원인으로, 전 세계적으로 약 1억 9,600만 명이 이환되어 있으며 2040년까지 2억 8,800만 명으로 증가할 것으로 예상된다.⁴ UV 노출은 AMD의 여러 환경적 위험 인자 중 하나로, 흡연, 고혈압, 비만과 함께 중요한 수정 가능한 위험 인자로 간주된다. 기존에는 일생 동안의 UV 노출량에 따라 AMD 위험이 증가하는 연구가 알려져 왔으나,^{4,22} 최근에는 매우 낮은 UV 노출과 매우 높은 UV 노출이 모두 초기 AMD 위험을 증가시키는 U자형 관계를 나타낸다는 것이 확인되어, 보다 복잡한 메커니즘을 가지고 있음을 시사하였다.²³

AMD에서 UV의 병태생리학적 기전은 주로 산화 스트레스의 증가와 관련이 있다.²⁴ 망막색소상피(retinal pigment epithelium, RPE) 세포 손상에서는 UVA가 RPE 세포에 도달하여 미토콘드리아 기능 장애를 유발하고 adenosine triphosphate (ATP) 생산을 감소시키며, 리포푸신(lipofuscin)의 축적을 촉진하여 세포 독성을 증가시킨다.²⁵ 드루젠(drusen) 형성 촉진에서는 산화 스트레스가 RPE 세포의 포식 기능을 저하시키고, 브루크막(Bruch's membrane)에 노폐물의

축적을 촉진하여 드루젠 형성을 가속화한다. 보체 시스템 활성화에서는 UV에 의한 조직 손상이 보체 경로를 활성화시켜 만성 염증 반응을 유발하며, 특히 보체 인자 H (complement factor H, CFH) 유전자 변이가 있는 경우 UV 노출의 해로운 영향이 더욱 증폭된다.²⁶ 혈관신생 촉진에서는 만성 염증과 산화 스트레스가 VEGF 발현을 증가시켜 맥락막 신생혈관 형성을 촉진할 수 있다.²⁷

기타 망막 질환

광황반병증(solar maculopathy)은 일식 관찰이나 태양 응시 등으로 인한 고강도 가시광선 및 UV 노출로 발생하는 급성 황반 손상이다. 중심와에 특징적인 황백색 병변이 나타나며, 대부분 부분적인 회복을 보이지만 영구적인 중심 암점이 남을 수 있다.²⁸ 광독성 망막병증(photic retinopathy)은 특정 약물(클로로퀸, 하이드록시클로로퀸 등) 복용 중 UV 노출이 증가하면 망막독성이 가중될 수 있다.²⁹

위험요인 및 역할

UV 관련 안질환의 발생에 영향을 미치는 위험요인들은 다음과 같이 분류할 수 있다.

환경적 요인

UV 관련 안질환의 발생에 영향을 미치는 주요 환경적 요인들은 다음과 같다. 지리적 위치는 가장 중요한 요인으로 적도에 가까울수록 UV 강도가 높아지며, 위도 1도 감소 시 UV-B 강도가 약 1-2% 증가한다.³⁰ 고도 또한 중요한 요인으로 해발 1,000 m 상승 시 UV 강도가 10-12% 증가하여 고산 지역 거주자에서 백내장과 익상편 유병률이 높은 이유를 설명한다.³¹ 계절 및 시간적 요인으로서는 여름철과 오전 10시-오후 4시 사이에 UV 강도가 최대에 달하며,³² 날씨 조건에서는 맑은 날씨에 UV 강도가 높지만 구름이 있어도 80% 이상의 UV가 투과될 수 있다.³³ 표면 반사는 UV 노출량을 크게 증가시키는데, 신선한 눈에서 80-90%, 모래에서 15-25%, 물에서 10-20%, 콘크리트에서 8-12%의 UV 반사가 일어난다.³⁴

개인적 요인

개인의 UV 감수성에 영향을 미치는 요인들은 다양하다. 연령은 중요한 요인으로 고령일수록 누적 UV 노출량이 증가하고, 동시에 항산화 방어 시스템이 약화되어 UV 손상에 더욱 취약해진다.³⁵ 성별 차이도 관찰되는데, 일반적으로 남성이 여성보다 야외 활동이 많아 UV 노출량이 높은 경향이 있다.³⁶ 직업적 요인은 특히 중요한데, 농업 종사자,

건설 근로자, 어업 종사자 등 야외 작업자에서 UV 관련 안질환 위험이 일반인보다 2-3배 높은 것으로 보고된다.³⁷ 홍채 색깔도 영향을 미치는 요인으로, 밝은 색 홍채를 가진 사람에서 어두운 색 홍채를 가진 사람보다 AMD 위험이 높다는 연구 결과들이 있다.³⁸

유전적 요인

개인의 UV 감수성에는 유전적 요인도 중요한 역할을 한다. 핵산 절제 복구(nucleotide excision repair) 경로와 같은 DNA 복구 관련 경로에 변이가 있는 경우 UV 손상에 대한 감수성이 증가하는 것으로 알려져 있다.³⁹ 항산화 효소 유전자들인 초과산화물 불균등화효소(superoxide dismutase), 카탈라제(catalase), GSH 과산화효소(GSH peroxidase) 등과 같은 항산화 효소들의 유전자 변이는 눈을 산화 손상으로부터 보호하는 데 필수적인 역할을 하며, 노화 등으로 인해 효소들의 기능이 저하될 경우, UV와 같은 외부 스트레스에 매우 취약하다.⁴⁰ 특히 AMD와 관련해서는 보체 시스템 관련 유전자들이 중요한데, CFH, C3 등 보체 관련 유전자 변이가 있는 경우 UV 노출에 의한 AMD 위험이 더욱 증가하는 것으로 보고되고 있다.^{41,42}

의인성 요인

자연적인 노출 이외에도 의료행위 과정에서 발생하는 의인성 요인(iatrogenic factor)으로 인해 UV 관련 안질환이 발생할 수 있다. UV 관련 안질환의 의인성 위험 인자는 단순한 UV 노출뿐 아니라, UV와 연계된 화학물질 노출 및 UV 기반 치료법 등 복합적 요소가 포함된다.

UV 노출과 함께 안과용 점안액에 흔히 사용되는 방부제인 벤잘코늄 클로라이드(benzalkonium chloride, BAK)는 인간 각막 상피세포에 독성 영향을 미친다. 특히 UV 방사선과 BAK는 각각 독성 효과를 나타내지만, 두 요인이 결합될 경우 상피세포에 대한 독성 효과가 상승하는 시너지 효과를 보여, 실제 환경에서 두 자극이 동시에 존재할 때 눈 건강에 보다 심각한 영향을 줄 수 있다.⁴³

원추각막(keratoconus)과 같은 각막 질환 치료에 사용되는 교차결합술(corneal cross-linking)은 치료 목적으로 고용량의 UVA를 각막에 직접 조사하는데, 각막을 강화하는 효과와 더불어 여러 안조직에 잠재적인 독성을 유발할 수 있기 때문에, 얇은 각막을 가진 환자의 경우 특별히 주의가 요구된다.⁴⁴

예방 및 보호 방법

UV로 인한 안구 손상은 대부분 예방 가능하므로, 적절한

보호 방법의 실행이 무엇보다 중요하다.

선글라스 사용

선글라스는 UV로부터 눈을 보호하는 가장 효과적이고 실용적인 방법이다. 선글라스 선택 시 가장 중요한 기준은 UV 차단 능력으로, 'UV400' 또는 '100% UV protection' 라벨이 부착된 제품을 선택해야 한다. 이는 400 nm 이하의 모든 UV를 99% 이상 차단함을 의미하며, 미국 국립표준협회(ANSI Z80.3)나 유럽 안전 기준(CE 마크)을 만족하는 제품이 권장된다.⁴⁵ 렌즈 재질 면에서는 폴리카보네이트가 가볍고 충격에 강하며 자연적으로 UV를 차단하는 장점이 있고, CR-39는 광학적 품질이 우수하나 UV 코팅이 필요하다. 렌즈 색상은 그레이, 브라운, 그린의 색상 왜곡을 최소화하며, 편광 렌즈는 반사광 차단으로 시각적 편안함을 제공하지만 UV 차단 기능과는 별개이므로 UV400 보호 기능이 함께 있는지 확인해야 한다.⁴⁶ 디자인 측면에서는 랩어라운드(wrap-around) 형태가 측면 UV 차단 효과를 증대시키고, 큰 렌즈는 눈 주위 피부까지 보호할 수 있으며, 코와 귀에서 흘러내리지 않는 적절한 착용감이 중요하다.

기타 보호 방법

선글라스 외에도 다양한 UV 보호 방법들이 있다. 챙이 7.5 cm 이상인 모자 착용은 눈에 도달하는 UV를 50% 이상 차단할 수 있어 효과적인 보조 수단이다. 그늘을 이용하는 것도 도움이 되지만, 나무나 건물 그늘에서도 산란된 UV에 노출되므로 선글라스 착용을 병행해야 한다.⁴⁷ 백내장 수술 등을 통해 인공수정체를 삽입할 경우, UV 차단 인공수정체를 사용하면 UV로 인한 손상을 방지할 수 있다.⁴⁸ 시간대를 조절하여 UV 지수가 높은 오전 10시-오후 4시 사이의 야외 활동을 자제하는 것이 권장되며, WHO UV 지수를 활용한 일일 UV 노출 위험도 평가가 유용하다.¹ UV 지수 3-5 (보통)에는 선글라스가 권장되고, 6-7 (높음)에는 선글라스 및 모자 착용이 필수이며, 8-10 (매우 높음)에는 추가 보호 조치가 필요하고, 11 이상(위험)에는 야외 활동 자제가 권고된다. 특수 상황에서는 더욱 주의가 필요한데, 수상 스포츠 시에는 물 반사로 인해 UV 노출량이 2배 증가하므로 편광 선글라스가 권장되고, 설상 스포츠 시에는 눈 반사로 UV 노출량이 최대 4배 증가하므로 고글 형태 보호구가 필수이다.⁴⁹ 고도 지역에서는 해발 3,000 m 이상에서 UV 강도가 평지보다 40% 증가하므로 더욱 강화된 보호 조치가 필요하다.⁵⁰

교육 및 인식 개선

UV 관련 안질환의 예방을 위해서는 대중의 인식 개선이

필수적이다. UV의 위험성과 보호 방법에 대한 지속적인 홍보가 필요하며, 특히 12-15세 어린이의 80% 이상이 UV에 의한 눈 손상이 확인될 만큼 어린 시절에 상당한 UV 눈 손상이 발생하므로, 일찍부터 UV 보호 습관을 형성할 수 있도록 학교 교육 프로그램을 개발해야 한다.^{51,52} 또한 농업, 건설, 어업 등 야외 근로 현장에서는 UV가 눈 건강에 미치는 위험이 매우 크므로, 근로자들을 위한 직업적 노출에 대한 건강 감시 및 예방 프로그램이 필요하다. 나아가, 이러한 UV 관련 안질환을 직업병으로 공식 인정하고, 노동 보건 차원에서 정기 검진 및 예방 조치를 의무화해야 한다.⁵³

결론

UV는 눈 건강에 중대한 위협을 가하는 환경적 요인으로, 파장별로 각막, 수정체, 망막에 서로 다른 독성 기전을 통해 다양한 질환을 유발한다. UVB는 주로 급성 각막 손상과 백내장을 유발하며, UVA는 더 깊숙이 침투하여 수정체 혼탁과 망막 변성에 기여한다.

역학적 연구들은 만성적인 UV 노출이 백내장 발생 위험을 2-3배, 익상편 발생 위험을 2.4배 증가시킨다는 일관된 증거를 제시하고 있다. 분자생물학적으로는 직접적인 DNA 손상, ROS 생성을 통한 산화 스트레스, 단백질 변성, 그리고 염증 반응 활성화가 주요 병태생리학적 기전으로 작용한다.

다행히 UV로 인한 안구 손상의 대부분은 적절한 예방 조치를 통해 방지할 수 있다. UV400 보호 기능을 갖춘 선글라스의 착용이 가장 효과적인 예방 방법이며, 모자 착용, 그늘 이용, 고위험 시간대 회피 등의 추가적인 보호 조치가 권장된다. 특히 어린 시절부터 UV 보호 습관을 형성하는 것이 중요하며, 야외 작업자와 같은 고위험군에 대한 특별한 관리가 필요하다.

안과 의료진과 보건 당국은 UV의 위험성에 대한 대중의 인식을 높이고, 과학적 근거에 기반한 예방 전략을 적극적으로 홍보하여 UV 관련 안질환의 발생을 최소화하는 데 노력해야 한다.

REFERENCES

- 1) World Health Organization (WHO). Global solar UV index : a practical guide. Geneva: WHO, 2002;18.
- 2) Engel A, Rigby M, Burkholder JB, et al. Update on ozone-depleting substances (ODSs) and other gases of interest to the Montreal Protocol. In: Doherty SJ, Means T, Stewart BC, et al., eds. Scientific assessment of ozone depletion. Geneva: World Meteorological Organization, 2018; 588.
- 3) GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators; Vision

- Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study. Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: the Right to Sight: an analysis for the Global Burden of Disease Study. *Lancet Glob Health* 2021;9:e144-e160.
- 4) James LM. Age-related macular degeneration. *Nursing* 2024;54:50-3.
- 5) Nunomura CY, Sousa SJFE. Ultraviolet radiation and the human eye. *Arq Bras Oftalmol* 2022;86:e2021-0354.
- 6) MacFarlane ER, Donaldson PJ, Grey AC. UV light and the ocular lens: a review of exposure models and resulting biomolecular changes. *Front Ophthalmol (Lausanne)* 2024;4:1414483.
- 7) Boretti A, Banik B, Castelletto S. Use of ultraviolet blood irradiation against viral infections. *Clin Rev Allergy Immunol* 2021;60:259-70.
- 8) Izadi M, Jonaidi-Jafari N, Pourazizi M, et al. Photokeratitis induced by ultraviolet radiation in travelers: a major health problem. *J Postgrad Med* 2018;64:40-6.
- 9) Volatier T, Schumacher B, Cursiefen C, Notara M. UV Protection in the cornea: failure and rescue. *Biology (Basel)* 2022;11:278.
- 10) Guo C, Ning X, Zhang J, et al. Ultraviolet B radiation induces oxidative stress and apoptosis in human lens epithelium cells by activating NF- κ B signaling to down-regulate sodium vitamin C transporter 2 (SVCT2) expression. *Cell Cycle* 2023;22:1450-62.
- 11) Maugeri G, D'Amico AG, Magri B, et al. Regulation of UV-B-induced inflammatory mediators by activity-dependent neuroprotective protein (ADNP)-derived peptide (NAP) in corneal epithelium. *Int J Mol Sci* 2023;24:6895.
- 12) Ghafar NA, Jalil NAA, Kamarudin TA. Wound healing of the corneal epithelium: a review. *Asian Biomed (Res Rev News)* 2021;15:199-212.
- 13) Miller DD, Hasan SA, Simmons NL, Stewart MW. Recurrent corneal erosion: a comprehensive review. *Clin Ophthalmol* 2019;13:325-35.
- 14) Shahraki T, Arabi A, Feizi S. Pterygium: an update on pathophysiology, clinical features, and management. *Ther Adv Ophthalmol* 2021;13:25158414211020152.
- 15) Hatsusaka N, Yamamoto N, Miyashita H, et al. Association among pterygium, cataracts, and cumulative ocular ultraviolet exposure: a cross-sectional study in Han people in China and Taiwan. *PLoS One* 2021;16:e0253093.
- 16) Tang Y, Ji Y, Ye X, et al. The association of outdoor activity and age-related cataract in a rural population of Taizhou Eye Study: phase 1 report. *PLoS One* 2015;10:e0135870.
- 17) Jang HJ, Kang JG. Correlation between sunlight exposure time and cataract prevalence in Korean adults. *Appl Sci* 2024;14:10707.
- 18) Li J, Buonfiglio F, Zeng Y, et al. Oxidative stress in cataract formation: is there a treatment approach on the horizon? *Antioxidants (Basel)* 2024;13:1249.
- 19) Thorn DC, Grosas AB, Mabbitt PD, et al. The structure and stability of the disulfide-linked γ S-crystallin dimer provide insight into oxidation products associated with lens cataract formation. *J Mol Biol* 2019;431:483-97.
- 20) Kodera S, Hirata A, Miura F, et al. Model-based approach for analyzing prevalence of nuclear cataracts in elderly residents. *Comput Biol Med* 2020;126:104009.
- 21) Fukuoka H, Gali HE, Bu JJ, et al. Ultraviolet light exposure and its penetrance through the eye in a porcine model. *Int J Ophthalmol* 2023;16:172-7.
- 22) Colijn JM, Buitendijk GHS, Prokofyeva E, et al. Prevalence of age-related macular degeneration in Europe: the past and the future. *Ophthalmology* 2017;124:1753-63.
- 23) Amari B, Merle BMJ, Korobelnik JF, et al. Lifetime ambient ultraviolet radiation exposure and incidence of age-related macular degeneration. *Retina* 2024;44:28-36.
- 24) Ruan Y, Jiang S, Gericke A. Age-related macular degeneration: role of oxidative stress and blood vessels. *Int J Mol Sci* 2021;22:1296.
- 25) Rózanowska MB. Lipofuscin, its origin, properties, and contribution to retinal fluorescence as a potential biomarker of oxidative damage to the retina. *Antioxidants (Basel)* 2023;12:2111.
- 26) Hallam D, Collin J, Bojic S, et al. An induced pluripotent stem cell patient specific model of complement factor H (Y402H) polymorphism displays characteristic features of age-related macular degeneration and indicates a beneficial role for UV light exposure. *Stem Cells* 2017;35:2305-20.
- 27) Ochoa Hernández ME, Lewis-Luján LM, Burboa Zazueta MG, et al. Role of oxidative stress and inflammation in age related macular degeneration: insights into the retinal pigment epithelium (RPE). *Int J Mol Sci* 2025;26:3463.
- 28) Jourieh M. Solar retinopathy: a literature review. *Oman J Ophthalmol* 2024;17:173-80.
- 29) Glickman RD. Ultraviolet phototoxicity to the retina. *Eye Contact Lens* 2011;37:196-205.
- 30) Eide MJ, Weinstock MA. Association of UV index, latitude, and melanoma incidence in nonwhite populations--US Surveillance, Epidemiology, and End Results (SEER) Program, 1992 to 2001. *Arch Dermatol* 2005;141:477-81.
- 31) Tang X, Yang T, Yu D, et al. Current insights and future perspectives of ultraviolet radiation (UV) exposure: Friends and foes to the skin and beyond the skin. *Environ Int* 2024;185:108535.
- 32) Raksasat R, Sri-Iesaranusorn P, Pemcharoen J, et al. Accurate surface ultraviolet radiation forecasting for clinical applications with deep neural network. *Sci Rep* 2021;11:5031.
- 33) Calbó J, Pagès D, González JA. Empirical studies of cloud effects on UV radiation: a review. *Rev Geophys* 2005;43:RG2002.
- 34) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). ICNIRP statement--protection of workers against ultraviolet radiation. *Health Phys* 2010;99:66-87.
- 35) Burke KE. Environmental aging of the skin: new insights. *Plast Aesthet Res* 2020;7:59.
- 36) Wallace DA. Light exposure differs by sex in the US, with females receiving less bright light. *npj Biol Timing Sleep* 2024;1:16.
- 37) Cherrie JW, Cherrie MPC. Workplace exposure to UV radiation and strategies to minimize cancer risk. *Br Med Bull* 2022;144:45-56.
- 38) Klein BE, Howard KP, Iyengar SK, et al. Sunlight exposure, pigmentation, and incident age-related macular degeneration. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014;55:5855-61.
- 39) Volatier T, Schumacher B, Meshko B, et al. Short-term UVB irradiation leads to persistent DNA damage in limbal epithelial stem cells, partially reversed by DNA repairing enzymes. *Biology (Basel)* 2023;12:265.
- 40) Cejková J, Vejrazka M, Pláteník J, Stípek S. Age-related changes in superoxide dismutase, glutathione peroxidase, catalase and xanthine oxidoreductase/xanthine oxidase activities in the rabbit cornea. *Exp Gerontol* 2004;39:1537-43.
- 41) Shaw PX, Zhang L, Zhang M, et al. Complement factor H geno-

- types impact risk of age-related macular degeneration by interaction with oxidized phospholipids. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2012;109:13757-62.
- 42) Maugeri A, Barchitta M, Mazzone MG, et al. Complement system and age-related macular degeneration: implications of gene-environment interaction for preventive and personalized medicine. *Biomed Res Int* 2018;2018:7532507.
- 43) Xu M, Sivak JG, McCanna DJ. Ocular toxicology: synergism of UV radiation and benzalkonium chloride. *Cutan Ocul Toxicol* 2020;39:370-9.
- 44) Deshmukh R, Hafezi F, Kymionis GD, et al. Current concepts in crosslinking thin corneas. *Indian J Ophthalmol* 2019;67:8-15.
- 45) Giannos SA, Kraft ER, Lyons LJ, Gupta PK. Spectral evaluation of eyeglass blocking efficiency of ultraviolet/high-energy visible blue light for ocular protection. *Optom Vis Sci* 2019;96:513-22.
- 46) Sliney DH. Photoprotection of the eye - UV radiation and sunglasses. *J Photochem Photobiol B* 2001;64:166-75.
- 47) Adler BL, DeLeo VA. Sunscreens and photoprotection. In: Bologna J, Schaffer JV, Cerroni L, ed. *Dermatology*. 5th ed. Elsevier, 2024;2344-53.
- 48) Kohnen T, Hammond BR. Blue light filtration in intraocular lenses: effects on visual function and systemic health. *Clin Ophthalmol* 2024;18:1575-86.
- 49) Andrews L, Shope C, Snyder A, Valdebran M. Commentary: sport-specific factors impacting solar ultraviolet exposure in individuals who perform outdoor sport activities. *J Dermatol Skin Sci* 2022;4:7-9.
- 50) Yam JC, Kwok AK. Ultraviolet light and ocular diseases. *Int Ophthalmol* 2014;34:383-400.
- 51) Sharma S, Rose L, Schulz A, et al. Myopia intervention and ultraviolet radiation related eye diseases: A narrative literature review. *Taiwan J Ophthalmol* 2024;14:151-8.
- 52) Tembunde Y, Brown M, Tembunde M, Cohen B. Impact of a youth sun safety educational program. *Dermatol Pract Concept* 2024;14:e2024133.
- 53) Modenese A, Chou BR, Ádám B, et al. Occupational exposure to solar radiation and the eye: a call to implement health surveillance of outdoor workers. *Med Lav* 2023;114:e2023032.

= 국문초록 =

자외선에 의한 눈의 독성 및 예방

자외선(ultraviolet, UV) 복사는 눈 건강에 심각한 위협이 될 수 있는 비이온화 방사선이다. UV 복사는 파장에 따라 UVA, UVB, UVC로 나뉘며, 각기 다른 안구 조직에 흡수되어 급성 및 만성 질환을 유발한다. 본 종설은 각 UV 파장이 각막, 수정체, 망막에 미치는 독성 기전을 분석하고, 최신 연구를 바탕으로 광각막염, 백내장, 익상편, 연령 관련 황반변성과 같은 주요 질환의 병리학적 영향을 검토한다. 또한, 효과적인 UV 차단을 위한 선글라스의 역할과 올바른 선택 기준을 제시하여 UV로 인한 안구 손상을 예방하기 위한 과학적 근거를 제공하고자 한다.

〈검안 및 콘택트렌즈학회지 2025;24(4):155-162〉
