

Exposure-Limit Distance as a Safety-Indicating Parameter of a High-Intensity Flash Source

Seung-Man Park^{1,2†} and Sang-Wook Kim¹

¹Department of Nanobionics, Hoseo University,

²Department of ICT automotive Eng., Hoseo University,

20, Hoseo-ro 79beon-gil, Beabang-eup, Asan-si, Choongnam 31499, Korea

(Received October 27, 2016; Revised manuscript December 5, 2016; Accepted January 10, 2017)

A systematic understanding of the effects of high-intensity flash sources on the human eye is strongly needed, not only for proper use of the sources, but for human eye health. In this study, the exposure-limit distance (ELD), indicating the minimal safe distance in case of seeing by chance a high-intensity flash, is proposed. The optical procedures to determine the ELD of a high-intensity flash are clarified, and the dependence of ELD on its parameters such as luminous intensity, duration, and radius of a flash are thoroughly investigated. From this investigation it is obvious that, while being weakly dependent on duration, the ELD is nearly proportional to the luminous intensity and the radius of a flash. The proposed ELD as an intuitive safety-indicating parameter is more useful and intuitive than the other characteristic parameters of a high-intensity flash. The ELD is expected to be an essential parameter as a safety indicator, to characterize the performance of a high-intensity flash and to promote the safety of the human eye.

Keywords: Radiometry, Exposure limit Radiance, Exposure limit distance, High intensity light source, Eye protection

OCIS codes: (120.5240) Photometry; (120.5630) Radiometry; (330.5370) Physiological optics; (330.7329) Visual optics, pathology

고광도 섬광의 안전지표로서 노출제한거리

박승만^{1,2†} · 김상욱¹

¹호서대학교 나노바이오트로닉스학과

☎ 31499 충남 아산시 배방읍 호서로79번길 20

²호서대학교 자동차ICT공학과

☎ 31499 충남 아산시 배방읍 호서로79번길 20

(2016년 10월 27일 받음, 2016년 12월 5일 수정본 받음, 2017년 1월 10일 게재 확정)

고광도 섬광에 의하여 사람 눈에 미치는 영향을 체계적으로 이해하는 것은 고섬광의 사용상이나 눈의 보건의학적인 관점에서 큰 가치가 있다. 본 논문에서는 고섬광의 안전지표로서 노출제한거리를 제안하고, 섬광의 특성으로부터 노출제한 노출제한거리를 구하는 방법을 제시한다. 본 연구에서 고려한 고섬광에 대한 노출제한을 결정하는 요인은 망막에서 투영되는 열적 에너지이며 이는 망막의 열적위험을 나타내는 열적유효복사휘도로 표현된다. 고섬광의 노출제한거리는 열적 유효복사휘도 또는 광도와 광원 반경에 거의 비례하나 지속시간에는 거의 의존하지 않는다. 고섬광의 노출제한거리가 지속시간에 비례하지 않는다는 점은 눈에 미치는 영향이 노출되는 시간에 비례할 것이라는 기대와는 다른 중요한 발견으로 생각된다. 본 연구에서 제안된 노출제한거리는 고섬광의 연구개발과 활용에서 뿐만 아니라 눈을 보호하는 보건의학 분야에서도 안전지표로서 중요하게 활용될 것으로 기대된다.

Keywords: 복사계측, 노출제한 복사휘도, 노출제한 거리, 고섬광, 눈의 보호

OCIS codes: (120.5240) Photometry; (120.5630) Radiometry; (330.5370) Physiological optics; (330.7329) Visual optics, pathology

[†]E-mail: smanpark@hoseo.edu

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

고섬광은 고광도 광원으로서 매우 짧은 시간 동안 강한 빛을 방출하여 전자광학 장비뿐만 아니라 사람에게도 영향을 미칠 수 있다.^[1-3] 강한 빛을 가까운 거리에서 보게 되는 경우에는 매우 큰 광량이 일시적으로 망막의 영상면에 집중되어 시력에 영향을 미칠 수 있으며 더욱이 눈의 동공의 직경이 낮아는 2 mm에서 캄캄하게 어두운 밤에는 8 mm까지 커지는 것을^[4,5] 고려하면 야간에 사용되는 고섬광을 가까운 거리에서 바라보게 되는 상황은 시력에 매우 심각한 영향을 미칠 수 있다.^[4-6] 이런 점들을 고려하면 고섬광에 의하여 사람의 시력에 미치는 영향을 보다 체계적으로 접근하는 것이 필요하다. 이런 필요성에도 불구하고 고섬광이 눈에 미치는 영향을 연구한 결과를 찾기는 매우 어렵다. 이런 원인은 대부분의 고섬광에 대한 연구개발의 결과가 발표되기 어려운 것으로 분류되어 있기 때문이라고 생각된다.

최근의 국내에서 고섬광 발생장치 연구를 통하여 섬광의 광도와 지속시간을 측정할 수 있었고^[2,3], 개략적으로라도 섬광의 적외선 발광 특성도 측정할 수 있었다.^[6,7] 또한 최근의 연구에서 섬광의 발광 특성, 섬광에 노출되는 거리, 그리고 주변 환경의 조도에 따른 망막에 도달되는 복사조도(irradiance)와 총 입사에너지를 모델링하였다.^[8] 이 결과로부터 특정 섬광에 대하여 노출거리와 주변 조도에 따른 망막에 도달되는 복사조도와 총 입사에너지를 알 수 있다. 여기에 눈의 안전에 허용될 수 있는 최대 입사 복사조도 또는 망막에 허용될 수 있는 최대 광속과 에너지를 알 수 있으면 고섬광이 눈의 안전에 미치는 영향을 정량화하는 것에 더 근접해갈 수 있을 것이다.

LED (light emitting diode) 및 LD (laser diode) 등의 인조 광원이 개발되기 시작하면서 이들 인조광원에 대한 눈의 보호는 그동안 많은 연구가 되어 왔으며 이런 연구를 바탕으로 정리해놓은 지침이 바로 ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)의 지침서들로 요약된다.^[9-12] 이 지침들은 조명등 및 조명등 시스템의 광·생물학적 안전지침인 IEC 62471/CIE S 009/E&F를 포함하여^[13] 가시광과 적외선 파장영역에서 LED와 LD의 안전지침을 기술한 문서들이며 자외선(UV) 파장영역에서도 이와 유사한 ICNIRP 2004의 지침서가 있다.^[8,9] 가장 최근의 지침으로는 2013년에 발표된 것으로 앞서 2009년에 발표한 지침보다 2.5 배로 강화한 지침서이다.^[11-14] 이 지침은 UV에서 가시광과 적외선까지를 포함한 복사광에 대한 노출제한 지침서이다.^[11]

눈에 입사되는 광은 눈의 각 부분에서 흡수되면서 최종적으로 가시광과 적외선의 일부가 망막(retina)에 도달한다. 대부분의 UVB와 UVC 영역의 빛은 각막에서 흡수되고 대부분의 UVA는 렌즈에서 흡수된다. 가시광 보다 에너지가 적은 적외선 IRB와 IRC는 역시 각막과 수양액에서 대부분 흡수되고 대부분의 IRA가 망막까지 도달한다.^[5,15] 그림 1에는 자외선에서부터 적외선 영역까지의 각 영역의 명칭을 구분하였다. 그림 1에 표기한 복사휘도(radiance, $W/(sr \cdot m^2)$)는 온

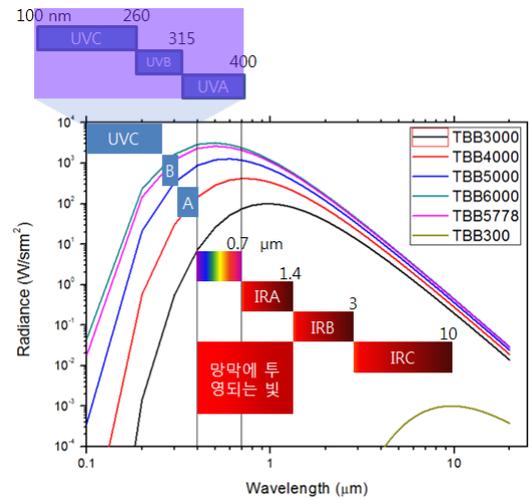


Fig. 1. Light spectrum and the name of each region from UV to IR overlapped with Blackbody radiance curves of various temperatures.

도가 3000-6000 K (여기에 추가로 300 K)의 흑체복사의 복사휘도를 나타내며 5778 K의 흑체는 태양의 흑체복사 등가 온도이다. 이 그림에서 보듯이 400-1400 nm 파장범위의 가시광선과 IRA가 망막에 투영되고 흡수는 빛이다.

눈으로 입사된 광 가운데 각막과 렌즈를 투과하여 유리체를 지나서 망막에까지 도달되는 광은 가시광선과 IRA영역의 광이다. 광에 의한 망막의 손상은 가시광 중에 600 nm 미만의 광에 10 초 이상 노출될 경우에는 광화학적 손상이 주를 이루고 이 보다 짧은 수초 미만의 기간 동안 노출되는 경우에는 열적인 손상이 된다. 특히 적외선 영역의 빛에 의한 광화학적 손상이 보고된 적은 없으며 10 초 이상의 긴 노출인 경우에도 열적인 현상이 나타난다.^[12,15] 한편 망막의 열적 손상은 제논 아크 플래시, 핵폭발 플래시 등 매우 강한 빛, 즉 고광도 광원에 의해서만 가능하다.^[12]

본 연구에서는 위 지침에 따라 고광도 섬광원에 대한 노출 제한을 연구하였다.^[16] 특히 본 연구에서는 고섬광의 노출제한거리를 제안하고, 고섬광의 특성 파라미터로부터 노출제한 거리를 구하는 방법을 제시한다. 본 연구의 결과로부터 확보되는 고섬광에 대한 노출제한거리와 이를 구하는 방법은 고섬광의 연구개발과 활용에서는 고광도 섬광의 효과를 명확하게 표현하는 성능지표로 활용될 수 있으며, 나아가 어쩔 수 없이 고섬광에 노출되는 경우에는 눈을 보호하는 보건의 학적인 지표로서도 활용될 수 있을 것이다.

2장에서는 ICNIRP의 가시광과 적외선에 노출제한 지침서에서 규정하고 있는 노출제한을 살펴보고 이 지침에 근거한 고섬광의 노출제한거리를 제안한다. 3장에서는 섬광 특성에 따른 노출제한 거리를 구하는 세부 과정과 결과를 살펴보고 그 의미를 논의하고자한다.

II. 고섬광의 노출제한거리

광원에 대한 노출제한 지침은 자연광원 뿐만 아니라 인조

광원을 제조하거나 취급하는 등의 이와 관련된 분야에서 일하는 사람들에게 안전한 지침을 제공하는데 그 목적이 있다.^[9-12] ICNIRP의 지침에서 제공하는 노출제한은 명확하게 알려진 부상문턱치(injury threshold)를 근거로 규정하고 있다. 이 지침에서는 파장이 300 nm에서 1 mm, 즉 자외선(UV)에서 가시광과 적외선의 전 영역에 대한 지침을 제공하고 있으며, 이 지침에는 광화학적 작용과 열적인 작용에 의하여 망막에서 파장에 따른 영향을 고려한 각각의 위험함수(hazard function)를 고려하고 있다.

ICNIRP 지침^[12]에서는 380-1400 nm의 파장범위에서 망막의 위험요인이 고려된 광원의 특성을 사용한다. 이 지침에서 제공되는 노출제한 내용을 요약하면 다음과 같다.

가. 망막의 열적인 위험(380-1400 nm)의 노출제한 유효 복사휘도(effective radiance)

$$L_R^{EL} = 2.0 \times 10^4 \alpha^{-1} t^{-0.25} \quad (1)$$

($1 \mu s \leq t \leq 0.25 \text{ s}$, $1.5 \text{ mrad} \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad}$)

나. 청색광에 의한 망막의 광화학적 위험(300-700 nm)의 노출제한

$$D_B^{EL} = 1.0 \times 10^6 J m^{-2} sr^{-1} \quad (0.25 \text{ s} \leq t \leq 10,000 \text{ s}) \quad (2)$$

$$L_B^{EL} = 100 W m^{-2} sr^{-1} \quad (t \geq 10,000 \text{ s}) \quad (3)$$

여기서 L_R^{EL} 은 노출제한 유효복사휘도, D_B^{EL} 는 L_R^{EL} 을 노출 시간 대하여 적분한 dose에 해당된다. 또한 α 는 광원 유지각으로 단위는 radian이고, t 는 광원에 노출되는 시간으로 초 단위를 갖는다. 광원 유지각은 광원을 구형으로 볼 때 광원에 노출되는 위치에서 광원을 바라본 각도로 광원의 직경과 광원에서 노출위치 간의 거리의 비로 정의되며, 또한 앞으로 광원 노출시간은 광원의 유지시간과 동일하게 취급한다. 식 (1)은 광원노출시간의 범위가 $1 \mu s \leq t \leq 0.25 \text{ s}$ 이고 광원의 유지각이 $1.5 \text{ mrad} \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad}$ 에서 적용된다. 이 시간과 유지각의 범위는 본 논문에서 고려하는 고섬광에 적용되는 범위이다.

위의 두 가지 노출제한 이외에도 ICNIRP 노출제한 지침에는 각막과 렌즈의 노출제한, 피부에 노출제한, 그리고 장기간동안에 걸친 노출제한 지침이 있으나 1-100 ms 범위의 상대적으로 짧은 시간동안 지속되는 고섬광을 다루고 있는 본 연구에서는 해당되지 않는다. 위 두 가지 항목에서도, 노출시간을 고려하면, 본 연구에서의 고려할 대상은 첫 번째 항목인 망막의 열적위험에 대한 노출 제한임을 알 수 있다.

특정 광원에 대하여 망막에 투영되는 유효복사휘도, L_R 을 구하고 그 값이 제한 값을 넘는지를 살펴보면 그 광원에 노출이 위험한지의 여부를 판단할 수 있다. 망막에 투영되는

유효 복사휘도를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$L_R = \sum_{380}^{1400} L_\lambda \times R(\lambda) \times \Delta\lambda \quad (4)$$

여기서 L_λ 는 광원의 분광복사휘도(spectral radiance)이고 $R(\lambda)$ 는 망막에서의 열적위험함수(retinal thermal hazard function)로 망막손상을 유발하게 하는 파장에 따른 효율로 생각할 수 있다. 이 함수는 ICNIRP 지침에서 찾을 수 있다.^[12]

광원의 반경을 r_f , 그리고 광원에 노출되는 거리를 p 라 하면 광원의 유지각은 $\alpha = 2r_f/p$ 로 표현되고 이를 이용하여 식 (1)에서 노출거리를 구하면 그 거리는 다음과 같이 노출제한 복사휘도에 해당되는 노출제한 거리(p^{EL})가 된다.

$$p^{EL} = 1.0 \times 10^{-4} r_f t^{0.25} L_R^{EL} \quad (5)$$

여기서 r_f , p^{EL} 의 단위는 미터(m)이고 L_R^{EL} 의 단위는 $Wsr^{-1}m^{-2}$ 이다. 식 (5)에서 의미하는 바는 노출시간이 일정할 때 노출제한 거리는 노출제한 복사휘도(또는 광도)와 광원의 반경에 비례한다. 또한 노출제한거리는 노출시간 의존성이 매우 약하다. 즉 섬광의 노출 시간이 100배 증가해도 노출거리는 약 3.2배만 증가된다는 의미이다. 이는 섬광의 지속시간을 늘리면 늘어난 시간만큼 비례하여 사람의 눈에 더 영향을 미칠 것이라는 지금까지의 기대와는 매우 다른 결과이다.

식 (5)로 제안된 노출제한 거리는 이 거리보다 먼 거리에서 광원을 바라보는 것이 눈에 안전함을 알려주는 안전지표이다. 따라서 고광도의 섬광원에 대하여 안전한 노출거리를 제한하는 안전지표로 활용되기에 적합하다. 고섬광에 대한 노출제한 거리는 고광도의 인조광원 뿐만 아니라 태양과 같은 자연광원에도 적용된다.

III. 고섬광의 노출제한거리의 도출과 논의

이 장에서는 고섬광의 성능 파라미터로부터 노출제한거리를 구하는 과정을 살펴보자. 고섬광에 대한 스펙트럼 복사휘도, 망막에 열적위험의 유효복사휘도 그리고 고섬광의 노출제한거리를 순서대로 구한다. 보통 고섬광의 특성으로 광도(luminous intensity)와 섬광의 지속시간이 주어지고 부가적으로 화염의 크기가 주어지기도 한다. 여기서 광원의 밝기를 나타내는 광도는 가시광선 범위에서 정의된 소위 광측정량(photometric quantity)이나 앞에서 노출제한을 나타내는 유효복사휘도는 복사측정량(radiometric quantity)이다. 따라서 광도로부터 유효복사휘도를 바로 연관시키기 어렵다. 광측정량의 정의를 따라 광측정량인 광도에서 이에 대응되는 복사측정량인 복사도(radiant intensity)로 변환하고 이 복사도로부터 광원면적을 고려하여 복사휘도를 구할 수 있을 것이다. 이 관계를 식으로 표현하면 식 (6)과 같다. 하지만 이런 방법은 빛재기 양인 광도가 파장의 함수로 주어진 경우에 만 가

시광부분에서만 복사도를 구할 수 있다. 일반적으로는 광도로부터 복사도를 직접구할 수는 없다.

$$I_v (cd) = K_m \int_{380}^{830} V(\lambda) I_e(\lambda) d\lambda = K_m A_s \int_{380}^{830} V(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

여기서 K_m 은 변환상수로 683 lm/W이고 $V(\lambda)$ 는 발광효율 함수(luminous efficacy function)이고 A_s 는 광원의 면적이며 λ 는 nm 단위로 빛의 파장을 나타낸다.

본 연구에서는 고섬광을 흑체로 보고 광도에 대응되는 복사도를 구하고 이를 광원 면적을 고려하여 광원의 복사휘도를 구하였다.^[6,8,15] 즉 광원을 흑체복사법칙을 따르는 이상적인 광원인 흑체로 가정하면 고섬광의 광도를 발하게 하는 흑체의 온도를 유일하게 구할 수 있다. 광원을 흑체로 가정하여 분광복사휘도를 구하는 방법은 고섬광 뿐만 아니고 다른 결맞음이 없는 광원에 대하여 적용한 예가 있었다.^[6,8,18] 또한 흑체 가정에 더하여 광원은 지속시간 동안에만 일정한 광도를 유지하는 펄스형태의 광원으로 가정하며 광원의 지속시간과 광원에 노출시간은 같다고 하자.

고섬광의 파라미터로부터 망막에 영향을 고려한 유효복사휘도, 노출제한 복사휘도 그리고 노출제한 거리를 구하는 일련의 과정을 그림 2에 정리하였다. 그림 2에서 보듯이, 보통 고섬광의 특성파라미터로 광도(I_v)와 그 지속시간(t_s)이 주어지고 추가로 얻을 수 있는 정보로 광원의 직경, 즉 화염구의 직경(d)를 얻을 수 있다. 광원을 흑체로 가정하여 광도에 대응되는 복사측정량으로 변환하여 복사도(I_e)를 얻을 수 있고 여기에 광원면적을 고려하여 복사휘도(L_e)를 구할 수 있다.^[6,8] 보다 정확히 기술하면 식 (6)을 만족하는 흑체의 온도를 구하여 이로부터 광원의 파장에 따른 복사휘도 ($L_e(\lambda)$)를 구할 수 있다. 즉 광도가 $I_v(cd)$ 되도록 하는 식 (6)을 만족하는 흑체의 온도를 수치 해석적으로 구하면 그 온도의 흑체의 복사휘도 $L_e(\lambda)$ 가 광원의 복사휘도가 된다. 또한 보통 고섬광의 화염을 구로 가정할 수 있으며 이때 광원의 면적은 겉보기 면적(apparent area)으로 구할 수 있다. 이는 광원이 램

버시안 임을 의미하며 또 다시 광원을 흑체로 가정할 수 있는 특징이기도하다. 파장에 따른 광원의 복사휘도를 얻으면 식 (4)로 열적유효복사휘도 L_R 을 얻을 수 있다. 이렇게 구한 열적유효복사휘도 L_R 을 식 (5)에 대입하여 노출제한 거리를 구할 수 있다.

그림 3은 반경이 5 m인 고섬광, 즉 흑체의 온도와 이 광원에서 발하는 광도의 관계를 나타낸다. 이 그림에서 온도 범위가 2400-6000 K인 흑체에서 방출하는 가시광의 광도를 파악할 수 있으며 온도 증가에 따라 광도는 매우 크게 증가함을 볼 수 있다. 한편 그림 3에서 광원의 사이즈가 다른 경우를 유추하려면 광원면적만을 고려해주면 된다.

그림 4에는 열적 유효복사휘도(L_R), 청색광 유효복사휘도(L_B), 열적 유효복사휘도와 같은 파장영역에서의 흑체 복사휘도(L_{BB})를 광원의 광도의 함수로 나타내었다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 열적 유효복사휘도는 흑체복사휘도보다 약 3-4 배 정도 적은 값을 나타내며 광도가 증가할수록 그 차이는 감소하는 경향을 보인다. 이는 우리가 고려하는 범위에서 광도가 증가할수록 흑체복사에서 가시광의 비중이 증가하기 때문이다. 또한 식 (1)로 주어진 노출제한 열적 유효복사휘도에서 광원의 유지각 α 를 0.1 rad 로 하면 노출 시간 1초 인 경우에 노출제한 복사휘도는 $2 \times 10^5 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 가 된다. 이를 고려하면 1 초미만 지속되는 10 Mcd 미만의 광도를 갖는 고

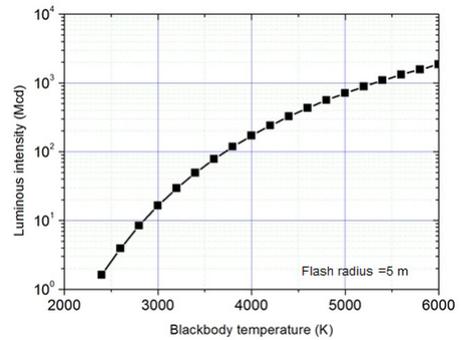


Fig. 3. The luminous intensity obtained from a flash (blackbody) source with radius of 5 m, as a function of the blackbody temperature.

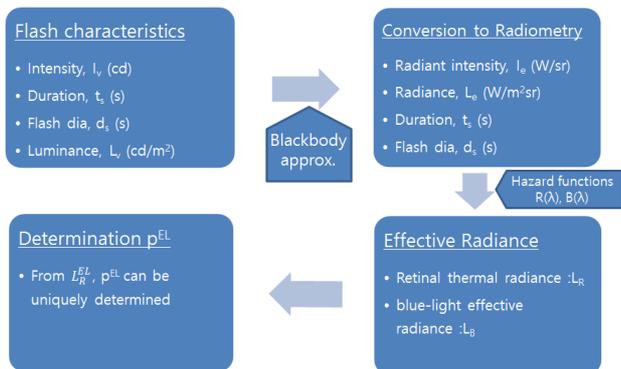


Fig. 2. The procedure to find the exposure limit distance of a high intensity flash source.

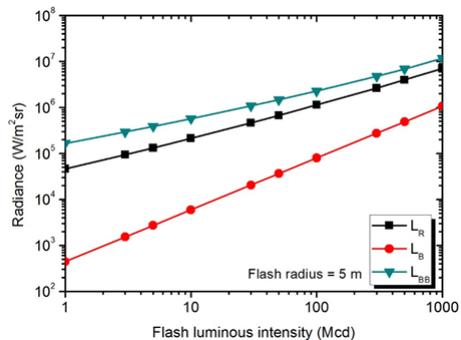


Fig. 4. The effective retinal radiance (L_R), the blue-light effective radiance (L_B) and blackbody radiance (L_{BB}) as a function of flash luminous intensity.

섬광은 노출제한 복사휘도를 넘지 못함을 알 수 있다, 즉 광도가 10 Mcd인 고섬광이 100 m전방에 나타나도 눈에 위험하지 않다는 의미이다.

그림 5에는 반경이 5 m 이고 지속시간이 1, 10, 100 ms인 고섬광의 광도에 따른 노출제한거리를 보이고 있다. 그림 5에서는 노출거리는 광원의 광도에 거의 비례함을 볼 수 있으며 이는 그림 5에서 볼 수 있듯이 열적 유효복사휘도(L_R)가 광도에 거의 비례하기 때문이다. 또한 이 그림에서 볼 수 있는 것처럼 노출제한거리는 노출시간에 크게 의존하지 않는 것이 관찰된다. 광원의 지속시간이 100배 증가함에 따라서 노출 거리는 겨우 3.2배가 증가됨을 볼 수 있다. 이는 식 (5)에서 볼 수 있듯이 지속시간에 4승근에 비례하기 때문이다.

그림 6에는 고섬광의 지속시간이 10 ms 이고 1, 10, 100, 1000 Mcd의 광도일 때 광원 반경에 따른 노출제한 거리를 보이고 있다. 그림 6에서 노출 제한거리축이 대수로 주어진 점을 고려하면 노출제한 거리는 반경에 비례함을 알 수 있다. 고섬광의 반경은 보통 광도에 비례하는 경향을 보이고 화약량에도 관련된다. 한편 광원의 반경은 실험적으로 관찰이 가능한 변수이다. 그림 7에는 광도가 1, 10, 100, 1000 Mcd이고 반경이 5 m인 고섬광에 대한 광원의 노출시간에 따른 노출제한거리의 기울기가 모든 광도에서 모두 동일

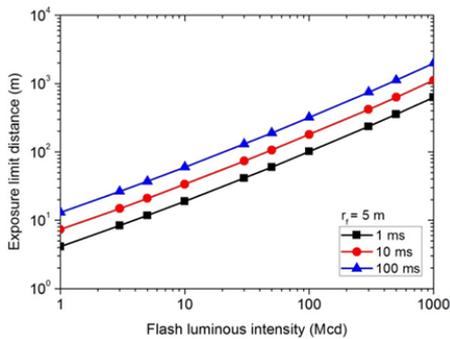


Fig. 5. The exposure limit distance of high intensity flashes with flash time of 1, 10, 100 ms as a function of luminous intensity.

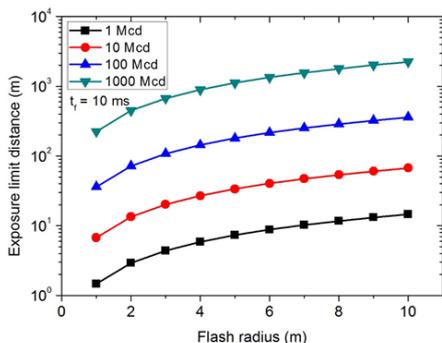


Fig. 6. The exposure limit distance of high intensity flashes with flash luminous intensity of 1, 10, 100, 1000 Mcd as a function of flash radius.

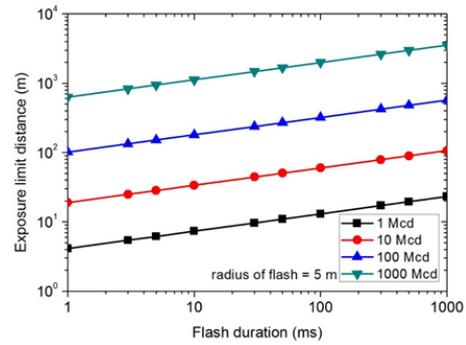


Fig. 7. The exposure limit distance of high intensity flashes with flash luminous intensity of 1, 10, 100, 1000 Mcd as a function of flash duration.

함을 알 수 있다. 그 기울기가 0.25로 노출제한거리는 지속시간에 4승근에 비례하기 때문이다. 100 Mcd 광도인 고섬광에서 지속시간이 1 ms 와 100 ms에서 노출제한 거리는 101 m와 320 m가 된다. 즉 광원의 유지 시간을 100배 늘려도 노출제한 거리는 단지 약 3.2배 증가한다는 것을 보이고 있다.

지금까지 살펴본 노출제한거리는 어떤 의미를 갖는지를 생각해보자. 노출제한거리는 고섬광 눈에 영향을 미치지 않는 최소 거리로 이 거리 보다 더 가까운 거리에서 고섬광에 노출되지 않도록 권고하는 의미가 있다. 그러면 이 권고가 만들어지기까지의 과학적이고 의학적인 근거와 의미를 살펴보자. 우선 과학적인 측면에서는 이미 알려진 광에 의한 안질환에 관한 노출 임계치를 구분해 내고 이에 감소계수를 적용하여 의학적인 임계치보다 최소 2배를 낮춘 값으로 노출제한 복사휘도를 정하여 권고의 기준으로 삼고 있다는 것이다.^[12] 따라서 ICNIRP 지침을 근거로 유도된 섬광의 노출제한 거리는 노출제한 복사휘도의 안전계수와 같이 2배의 감소인자를 적용받고 있다고 생각할 수 있다.

고섬광의 노출제한거리는 고섬광의 효과를 직접적으로 표현하는 지표로서 사용될 수 있으며 섬광의 사용자나 섬광에 의하여 영향을 받는 측 모두에게 매우 중요한 안전지표로 활용될 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 고섬광의 안전지표로서 노출제한거리를 제안하고 구하는 방법을 제시하였다. 제안된 노출제한거리는 사람의 눈에 영향을 미치지 않는 최소 거리로, 이 거리 보다 먼 거리에서 섬광에 노출되는 경우 눈에 안전하다는 의미이므로 고섬광의 안전지표로 사용하기에 매우 적합한 지표이다. 본 연구를 통하여 고섬광의 특성으로부터 노출제한거리까지의 관계를 정립하였다.

본 연구에서 고려한 고섬광에 대하여 노출제한을 결정하는 주요한 원인은 망막에 투영되는 열적 에너지이며 노출제한 거리는 열적위험함수가 적용된 노출제한 유효복사휘도, 노출

시간 그리고 광원의 반경에 의하여 결정된다. 본 연구에서 중요한 발견은 고섬광의 노출제한 거리는 광도에 거의 비례하나 지속시간에는 거의 의존하지 않는다는 점이다. 이는 고섬광이 사람의 눈에 미치는 효과는 동일한 광도일 때 섬광의 지속시간에 비례할 것이라는 이전의 기대를 뒤집는 결과이다. 제안된 노출제한거리는 고섬광 뿐만 아니라 대부분의 고광도 광원에도 적용될 수 있다. 따라서 본 연구의 결과는 고광도 광원이 시력에 미치는 영향을 예측하고 나아가 예방하는데 사용될 수 있다.

References

1. J. H. Jin, S. O. Han, H. W. Yang, and S.-M. Park, "Design and implementation of a radiative temperature measurement system for a flash light," *Korean J. Opt. Photonics*, **26**, 31-37 (2015).
2. H. J. Kim, S. W. Choi, M. R. Kwon, J. S. Hwang, and K. H. Chang, "A Pyrotechnic Mixture Composition and Design Verification," *Journal of the KIMST*, **17**, 289-295 (2014). DOI: <http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2014.17.3.289>
3. K. S. Kim, J.-W. Ahn, H.-W. Yang, and M. R. Kwon, "Experimental study on Design parameters of Explosive-driven High Intensity Flash Generator," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B.* **40**, 283-288 (2016).
4. P. N. Youssef, N. Sheibani, and D. M. Albert, "Retinal light toxicity," *Eye* **25**, 1-14 (2011). DOI: 10.1038/eye.2010.149
5. A. J. Zele and D. Cao, "Vision under mesopic and scotopic illumination," *Front. Psychol.*, **5**, 1-15 (2015). <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01594>
6. S. Y. Lim and S.-M. Park, "Infrared Characteristics of Some Flash Light Sources," *Korean J. Opt. Photonics*, **27**, 18-24 (2016).
7. J. H. Jin, S. O. Han, J. G. Shin, K. H. Chang, and S.-M. Park, "Design of IR characteristics measurement system for flash source," in *Proc. 2014 Symposium of KIMST* (Jeju International Convention Center, Korea, June 2014) P. 314.
8. S.-M. Park and S. O. Han, "Irradiant Energy into an Eye from a Flash Light", *Trans. of the KIEE*, **7**, 1225-1230 (2016).
9. ICNIRP, "ICNIRP Guidelines on Limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38-3 μ m)," *Health phys.*, **73**, 539-554 (1997).
10. ICNIRP, "ICNIRP statement on light-emitting diodes and laser diodes: Implications for hazard assessment," *Health phys.*, **78**, 744-752 (2000).
11. ICNIRP, "ICNIRP Guidelines on Limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation)," *Health phys.*, **87**, 171-186 (2004).
12. ICNIRP, "Guidelines on Limits of exposure to broad-band incoherent visible and infrared radiation," *Health phys.*, **105**, 74-96 (2013).
13. IEC/CIE, "Photobiological safety of lamps and lamp systems," IEC 62471/CIE S 009/E&F (2006).
14. K. Schulmeister, "Expected Changes for the Retinal Thermal Exposure Limits for Broadband Incoherent Radiation of IEC 62471 and ICNIRP," in *Proc. Int. Laser safety Conference*, (San Jose, California, March, 2011) pp. 255-259.
15. M. B. Rozanowska, "Light-induced damage to the retina: current understanding of the mechanisms and unresolved questions: a symposium-in-print," *Photochem Photobiol.* **88**, pp. 1303-1308. DOI: 10.1111/j.1751-1097.2012.01240.x
16. S. W. Kim and S.-M. Park, "Exposure limit of high intensity light sources," in *Proc. OSK Summer meeting* (Busan BEXCO, Korea, July. 2016), CD, paper MP-V11.
17. M. Rozanowska, B. Rozanowski, and M. Boulton, "Light-induced damage to the retina," <http://photobiology.info/Rozanowska.html>
18. <http://fp.optics.arizona.edu/Palmer/rpfaq/rpfaq.htm>