특집 빛공해

청색파장이 강한 백색광의 옥외조명 적용이 초래할 빛공해 양상

안소현〈에스제이엘 대표〉

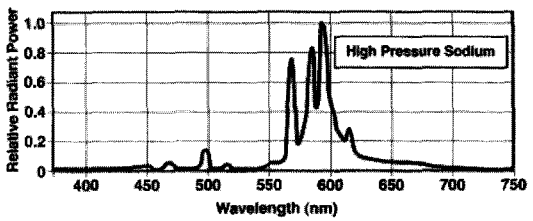
1. 서 언

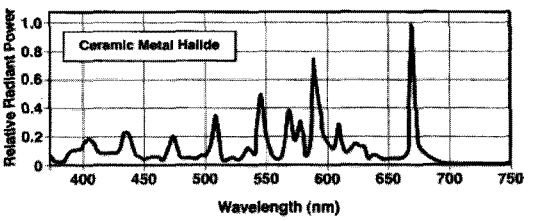
우인공광원의 빛은 광원의 종류에 따라 각기 다른 파장분포도를 지니고 있으며 각 파장영역에 따라 방사에너지량도 차이가 난다. 또한 연색성이 같은 광원이라도 파장분포에서는 편차를 보일 수 있다. 〈청색파장이 강한 백색광원〉이란 450~500[nm]의 청색파장에서 방사에너지가 많은 광원을 일컫는다. 본고에서는 옥외조명을 위해 인공광원을 선택하여 적용하는데 있어서 에너지효율, 연색성 외에도 파장스펙트럼 역시 필수적으로 검토해야 할 요소임을 강조하고자 한다. 빛공해에 대한 경각심이 높아지면서 청색파장이 강한 광원이 옥외조명에 광범위하게 적용되었을 때 수반될 수 있는 폐해가 속속 보고되고 있기 때문이다.

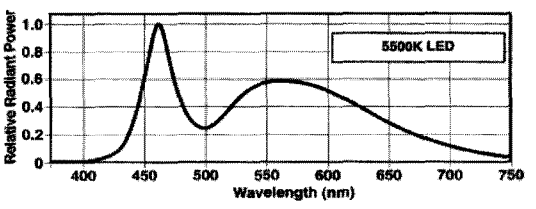
2. 산란광

아래 그림은 광원종류별 파장영역에 따른 방사에너지의 분포도이다. 가로축은 파장영역이고 세로축은 최대치를 1로 설정했을 때의 상대적 방사에너지량이다.

고압나트륨 램프는 550~650[nm]에서 거의 모든 에너지를 방사하며, 청색파장대인 500[nm]이하에서 방사하는 에너지는 가시광선 대역에서의 총방사량 중 7[%]에 불과하다. 그에 반해 세라믹메탈할라이드 램프는 500[nm] 이하 파장에서도 가시광선 대역의 방사량 중 20~30[%]를 방사한다. 그리고 5,500[K] LED는 465[nm]에서 방사에너지가 최고점을 이루면서 상당히 많은 에너지가 청색파장대에 몰려있음을 확인할 수 있다.







청색파장이 강한 광원이 옥외조명에 적용될 때 유발되는 빛공해 현상 중 하나는 산란광(sky glow)이다. 산란광이란 지면의 인공조명으로부터 공중으로 새어나오는 빛이 먼지층에 의해 산란을 일으켜 밤하늘이 부분적으로 환하게 보이는 현상이다. 산란광이 심해지면 밤하늘이 더 이상 어둡지 않아 육안으로 별을 보기가 힘들고 기구를 통한 별관측 역시 어려워진다.

그간의 연구에 의하면 광산란(light scattering)은 입자의 크기에 따라 산란율과 산란양상이 달라진다. 직경 0.1[㎛] 이하 미립자에 의한 분자산란에서는 산란율이 광파장의 네 제곱에 반비례하며 사방으로 균일하게 산란이 일어나고, 0.1~1.0[㎛] 미립자에 의한 에어로솔 산란에서는 산란율이 입자의 크기에 따라 진동적으로 변하며 산란이 전방으로 일어난다. 입자크기가 큰 수증기(안개)에 의한 미에 산란은 파장에 따른 산란의 차이가 없다.

대기는 분자와 에어로솔을 모두 포함하고 있지만, 인공조명에 의한 산란광 증대는 주로 공기의 분자산란으로 촉진된다. 분자산란의 경우 장파장에서 보다 단파장에서의 산란율이 훨씬 높기에, 단파장인 청색파장이 많은 광원이 옥외조명에 폭넓게 적용된다면 지금보다 산란광 현상은 훨씬 심각해질 것이다. 뒤리스쾨(D.M. Duriscoe)가 측정한 바에 의하면 백색광원을 적용했을 때는 고압나트륨램프를 적용했을 때보다 밤하늘이 4배 더 밝아졌고 백색광의 파장 중에서도 청색파장 영역이 황색파장 영역보다 약 2.5배 더 강하게 산란을 일으켰다.

3. 침해광

넓은 의미에서 침해광(obstructive light)은 빛공해와 동의어로 사용되기도 하지만 여기서는 인간에게 피해를 주어 삶과 건강을 해치는 빛공해 양상을 일컫고자 한다. 사용자에 국한된 실내조명과 달리 가로등, 도로등, 보안등, 광고판, 경관조명 등 옥외조명시설은 개개인이 임의로 제어할 수 없는 것이기에, 무기력하게 노출된 인간에게 장기적으로 직간접적 피해를 줄 수 있다. 글레어로 불쾌감을 주기도 하고, 시인성을 저해하기도 하고, 수면에 방해가 되기도 하며, 생체리듬을 파괴해 건강을 해칠 수도 있다. 침해광의 성립여부는 인간의 시지각 양태에 의해 결정된다.

가시광선의 좁은 스펙트럼 내에서 인간의 시지각은 특정 파장에서 높은 감도를 지닌다. 주변이 밝을 때는 555[nm]에 대한 시감이 가장 크고 깜깜할 때는 507[nm]에 대한 시감이 가장 크다. 망막의 원추체가 이용되는 시감을 명소시(photopic vision), 망막의 간상체가 이용되는 시감을 암소시(scotopic vison), 원추체와 간상체 두 가지가 함께 작동하는 시감을 혼합시(mesopic vision)라 부른다.

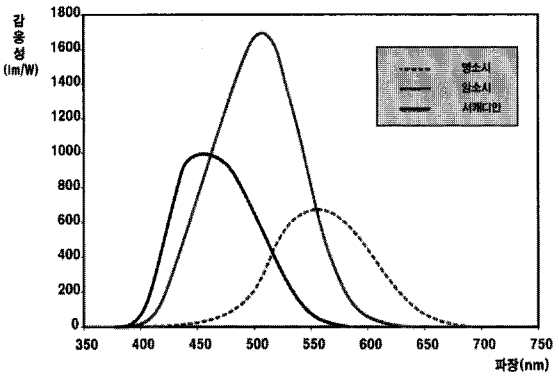
일반적으로 인간의 동공이 수축하고 확장하는 것은 광휘도와 연관된 것으로 생각되지만, 이미 오래전에 광휘도보다는 청색광과 강한 상관관계가 있다는 연구가 발표된 바 있었고, 청색광이 강한 빛이 황색광에 비해 동공의 수축을 훨씬 더 많이 유발한다는 사실 또한 입증되었다. 휘도가 낮더라도 청색광이 강하면 동공은 필요이상으로 줄어든다. 그래서 청색파장이 강한 백색광에 노출되었던 경우에는 혼합시 혹은 암소시로의 순응시간이 길어질 수밖에 없다. 또한 청색광은 여타 색보다 훨씬 많은 글레어를 유발한다. 불로프(J.D.Bullogh)의 연구에 의하면 불쾌글레어 유발은 507[nm]에서 반응의 정점에 달하는 간상체보다는 오히려 420[nm]에서 가장 강한 반응을 하는 S-원추체에 연동되어 있기 때문이다. 게다가 350~430[nm]의 청색광은 안구의 수정체가 형광을 발하게 하여 결과적으로 광막휘도가 생기게 한다는 연구가 발표되기도 했다.

인류는 이미 100여년 전부터 인공조명을 이용하여 밤을 낮처럼 이용할 가능성을 지니고 있었다. 그런데도 어쩔 수 없는 경우가 아니면 밤에는 잠을 자고 낮에는 깨어 있다. 그 이유는 인간에게 서캐디안 리듬

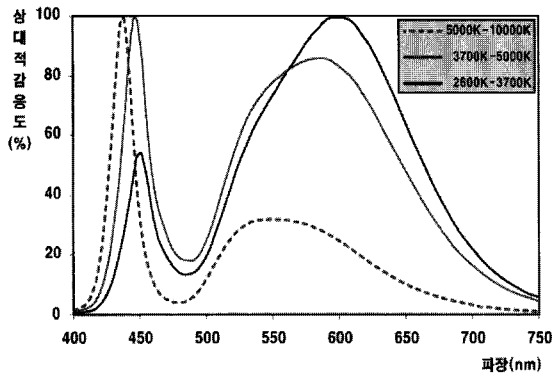
(circadian rhythm)이 체화되어 있기 때문이다. 일일주기 생체리듬인 서캐디안 리듬은 인간의 몸에 내재해있는 시계와 같다. 이는 인간이 의식적으로 통제할 수 있는 것이 아니다. 동굴탐사가 미쉘 시프르(Michel Siffre)가 헤드랜턴과 최소한의 식량만 가지고 지하 120[m] 동굴에서 50일 동안 생활했던 결과가 이를 입증한다. 시계가 없는 상태에서도 그의 생활은 하루의 밤과 낮으로 이루어지는 서캐디안 리듬에 부합되었다. 이후 연구가들은 서캐디안 리듬이 콧부리에서 2~3[cm] 뒤쪽에 있는 시신경교차상핵(SCN)에 의해 주도되며 그 속의 신경세포들이 전극신경작용으로 서캐디안 리듬을 만들어내고 있음을 확인하였다. 서캐디안 리듬이 깨지면 멜라토닌 형성이 저하되고 면역체계에도 문제가 생기고, 심할 경우 폐암이 유발되기도 한다.

그런데 이러한 인간내면의 하루 주기성 시계는 빛을 기준으로 움직인다. 망막 아래에 있는 멜라놉신이라는 색소는 색깔과 형태는 구분하지 않고 단지 〈어둡다〉 〈밝다〉라는 정보를 감지해서 시신경교차상핵에게 전달해준다. 잠을 잘 때나 눈을 감고 있을 때도 이 색소의 정보전달활동은 지속된다. 그래서 자연광이든 인공광이든 빛이야말로 인간의 서캐디안 리듬에 가장 주요한 요소이다. 흥미로운 것은 서캐디안 리듬에 가장 강력한 영향을 미치는 것이 빛의 청색파장 영역이라는 사실이다. 어째서 빛의 청색파장이 강한 작용을 하는지에 대한 의문은 2002년 데이비드 버슨(David Berson)이 망막 안에서 그간 알려지지 않았던 신경절세포를 발견함으로써 밝혀졌다. 이 신경절세포는 독자적으로 광색소를 작동시키고 눈의 여타 수용체세포와 무관한 광감도를 지니므로, 〈독자적 감광성을 지닌 망막 신경절세포ipRGGs〉 (intrinsically photosensitive retinal ganglion cell)로 명명되었다. ipRGGs의 파장감도는 460~480[nm], 즉 청색파장 영역에서 최고를 이룬다.

다음 그림은 명소시, 암소시, 서캐디안의 감응성을 파장별로 산출해 놓은 것이다.



서캐디안 리듬의 형성정보를 제공하는 ipRGGs가 청색파장에 가장 민감하고, 그래서 서캐디안 감응성이 청색파장 영역에서 가장 강하다는 사실은 특히 주거지에 근접한 장소에 옥외조명을 설치할 때 광원선택에 신중성을 기해야 하는 이유를 말해준다. 다음은 색온도별 백색 LED의 감응도를 나타낸 그림이다.



LED라 하더라도 색온도에 따라 상대적 감응도에서 차이가 난다. 5,000[K]이 넘는 LED는 430~450[nm] 파장에서 가장 큰 감응도를 유발하는 반면, 3,700[K] 이하의 LED는 600[nm]에서 최고의 감응도를 유발한다. 에너지효율을 높이기 위해 청색파장을 강하게 하면 할수록 서캐디안 리듬이 손상될 가능성은 그만큼 커진다.

4. 생태환경 파괴

무분별한 조명시설 설치 및 과도한 빛방출이 생태환경에 얼마나 심각한 피해를 주는지에 관한 연구가 나날이 활발해지고 있다. 미국 플로리다 해변에서만도 매년 수천마리의 새끼 바다거북이 탈수증으로 죽음을 맞고, 달빛을 찾아 가려던 야행성 곤충 수백만 마리가 방향을 잃은 채 가로등에 달려들어 열에 타죽고 그 중 일부는 멸종되기도 한다. 캐나다의 〈죽음을 부르는 빛 자각하기 프로그램〉의 자료에 의하면, 스카이빔으로 인해 갈 길을 찾지 못한 철새 중 매년 일억 마리가 건물, 자동차 등에 부딪쳐 죽는다. 인공광으로 인한 생태환경의 파괴는 이제 더 이상 간과할 수 없을 정도로 수위가 높아졌다.

생태환경 파괴에 있어서 인공광원의 파장분포가 얼마만큼 차별적 영향을 끼치는지에 관한 연구는 아직 미흡하다. 그 중 야행성 곤충에 대한 폐해가 가장 많이 보고 되고 있는데, 인간의 가시대역과 달리 곤충들은 자외선 영역의 빛을 가장 강한 빛으로 지각하며 특정 파장에 대해 주광성을 지니고 있기 때문이다. 그래서 각국 및 기관의 빛공해 방지지침에서도 곤충에의 유인성이 언급된다. 이는 특히 도로등, 가로등에 해당된다.

"곤충에 대한 빛의 유인성은 빛파장에 의해 강하게 좌우된다. 특히 자외선 영역이 유인성이 강하다. 기본적으로 말하자면 광원이 자외선영역, 청색파장영역을 적게 가지면 가질수록, 유기체에 끼치는 영향은 적어진다. 백색광에서는 색온도가 3,000[K] 보다 낮은 웜화이트를 권장한다." (스위스 쥬리히의 빛공해방지지침, 2008)

"광원선택에 있어서 핵심요소는 환경친화성 그리고 조명의 경제성이다. 에너지 절약의 잠재력이 높은 광원 중에서 단파장이 가급적 적게 들어간 광원을 권장한다. 자외선 함량이 적을수록 그만큼 환경친화적 광원이다."(오스트리아 조명협회, 2008)

2008년 독일정부는 〈에너지효율적 도시조명을 위한 경진대회〉를 개최하였고 합격점 14점 이상인 조명기구들에 대한 기술자료 모음집을 발표하였다. 그 중 자연보호를 척도로 하는 점수도 1점 들어가 있다.

"도시조명은 야행성 곤충에게 피해를 줄 수 있다. 곤충들은 300~400[nm]의 단파장 영역에 매우 민감하다. 이 때문에 노랑색에서 붉은색 스펙트럼에 거쳐있는 빛보다 파랑색, 보라색, 자외선 스펙트럼 빛에 더 강하게 이끌린다. 환경 측면에서 광원의 곤충보호 여부가 평가된다. 청색파장영역이 적은 광원이 1점을 얻는다."

탄소배출량을 줄이기 위해 에너지 효율성이 높은 광원을 선택하여 사용하는 것은 바람직한 일이다. 하지만 에너지 효율성 이면에는 인공광이 수반할 수 있을 또다른 빛공해가 도사리고 있다. 사용용도에 따라 적절한 광원을 선택하고 누설광을 최소화시킬 배광의 조명기구를 선별하여 정확한 위치에 꼭 필요한 조명시설만을 설치하는 엄밀한 지혜가 요구된다.

참 고 문 헌

[1] International Dark-Sky Association, "Visibility, Environmental, and Astronomical Issues associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting", 2010.
[2] Thomas Posch etc.(Ed.), "Das Ende der Nacht. Die globale Lichtverschmutzung und ihre Folgen", 2010.
[3] Kohei Narisada and Duco Schreuder, "Light Pollution Handbook", 2004.
[4] "Sammlung energieeffizienter Techniken in der Stadtbeleuchtung", 2009.

◇ 저 자 소 개 ◇

안소현(安素賢)
1960년 10월 10일생. 1983년 연세대학교 독문학과 졸업. 1985년 연세대학교 졸업(석사). 1994년 연세대학교 졸업(박사). 연세대, 인천대, 한신대, 덕성여대 강사. 현재 (주)에스제이엘 대표.
E-mail : anna@sjllighting.com