

Global Report

LED 도로 조명 : 운전자 수면 건강 및 경각성에 미치는 영향

1. -요약문
2. 제1장 소개
3. 제2장 문헌검토
4. 제3장 행동양식
5. 제4장 결과
6. 제5장 토론
7. 제6장 결론

- 요약문 -

이 프로젝트의 폭넓은 목표는 LED (Light Emitting Diode) 도로 조명이 운전자의 수면 건강과 주의력에 미치는 영향을 확인하는 것이었습니다. 수면건강은 침(타액)의 멜라토닌(수면장애 치료제)수치를 기준으로 평가되었습니다. 운전자 경각성은 운전자 감지 및 색상 인식거리, 3분 구간 (PERCLOS)에서 운전자의 눈꺼풀이 닫힌 시간비율(%)과 차선위치의 표준편차(SDLP)를 사용할 뿐 아니라 주관적으로 KSS(Karolinska Sleepiness Scale)을 사용함으로써 측정되었습니다. 안정적인 수면-경각성주기를 가진 18세에서 30세 사이의 건강한 참가자 10명이 연구에 참여했습니다. 각 참가자는 최소 1주 간격으로 분리된 5개의 실험 기간 각각에서 하나의 조명유형과 레벨을 경험했습니다. 각 실험 기간이 시작될 때 참가자들은 11:00 PM부터 1:00 AM까지 전형적인 실내 주거 조명인 200lux에 노출되었습니다. 다음 결론은 연구결과를 기반으로 합니다.

- IES (Illuminating Engineering Society) RP-8-18에서 지정한 것보다 높은 조도에서도 LED 도로조명은 건강한 운전자에게서 오전 1시부터 오전 3시까지 타액(침)의 멜라토닌을 크게 억제하지는 않습니다.
- 동일한 조도 (도로 조도 1.5cd / m² 또는 각막조도 1.9lux)에서 측정했을 때 LED와 고압 나트륨 (HPS) 도로 조명 사이의 타액 멜라토닌(수면장애 치료제)억제 간에 통계적 차이가 없습니다.
- LED 및 HPS 도로조명조건과 전기조명이 없는 도로 간에는 타액 멜라토닌 억제 간에 통계적 차이가 없었습니다.
- 감지 및 색상인식거리(반응시간), PERCLOS(3 분 구간) 및 SDLP(차선위치의 표준편차)에 의해 측정된 운전자 경각성의 객관적인 측정에서 도로조명조건(LED 또는 HPS) 또는 도로조명조건이 없는 사이에는 통계적으로 중요한 차이가 없는 것으로 관찰되었습니다.
- HPS(고압 나트륨) 도로조명의 노출시간이 증가하면 감지 및 색상인식거리가 통계적으로 상당한 감소를 초래했습니다. 이러한 차이는 LED 조명 또는 조명이 없는 도로조건에서는 관찰되지 않았습니다.
- KSS(Karolinska Sleepiness Scale)에서 측정한 주관적 운전자 경각성에 대한 HPS, LED 및 조명이 없는 도로조건 간에는 통계적 차이가 없었습니다.

이러한 결과를 기반으로 IES RP-8-18에 지정된 조명수준에서 LED 도로조명은 오전 1시부터 오전 3시까지에서 운전자의 타액 멜라토닌 또는 경각성에 영향을 미치지 않는다는 결론을 내릴 수 있습니다. 이 연구의 결과는 인간의 멜라토닌 억제 및 경각성에 영향을 미치기 위해 LED 도로조명에 대한 지침을 수정할 필요성을 뒷받침하지 않습니다.

도로조명 요구사항의 적용은 도로 사용자와 건축 환경에 영향을 미치는 여러 가지 측면에서 고려해야 합니다. 도로조명 시스템의 이러한 다양한 측면에는 도로안전, 에너지 절약, 도로 사용자 수용, 도로 사용자 건강, 하늘 빛(도시지역의 밤하늘 조명) 및 빛 침입, 주변생태에 대한 영향이 포함됩니다. 이 프로젝트는 주로 타액 멜라토닌 억제, 도로안전 (대신으로 시각적 성능을 사용) 및 주의력에 미치는 영향을 고려했습니다. 결과적으로 도로의 광량이 측정 가능한 효과를 이끌어 내기에는 너무 낮으므로, 광원의 스펙트럼 출력 분포는 도로 사용자 (특히 운전자)의 건강에 고려사항이 되지 않을 가능성이 큼니다.

이 연구에는 몇 가지 한계가 있었습니다. 수면건강의 한 측면인 타액 멜라토닌 억제는 오전 1시부터 오전 3시까지 도로 조명 노출에서만 측정되었습니다. 향후 연구는 더 긴 야간 기간 동안 혈장 멜라토닌을 측정하는 것이 도움이 될 것입니다. 중요한 것으로 향후 연구에서는 수면시작, 잠에서 깨는 횟수, 수면지속시간, 수면효율성 및 수면의 질과 같은 수면 건강의 다른 측정을 보다 현실적인 환경에서 그리고, 더 긴 시간 기간 동안 평가하여 수면건강에 대한 도로조명의 효과를 더 잘 이해해야 한다는 것입니다. 이 연구의 일환으로 수행된 문헌검토에 따르면 도로조명(LED 및 HPS)이 하늘 빛(도시 지역의 밤하늘

조명), 빛 공해, 동식물(Longcore, Rodríguez, Witherington, Penniman, Herf, & R)등에 해로운 영향을 미치는 것으로 나타났습니다. 이러한 영향을 최소화하기 위해 적절한 주의를 기울이는 것이 중요합니다.

제1장 소개

LED (Light Emitting Diode) 기술은 조명산업에 혁명을 일으켰습니다. 이러한 광원의 디밍(dimming) 및 즉시 점등(instant-on)능력과 고효율 덕분에 조명 설계자는 특히 도로 조명환경에서 이전 기술의 일부 한계를 극복할 수 있었습니다. 그러나 LED의 건강 및 환경 영향과 관련된 우려가 제기되었습니다. 미국 의학 협회 (AMA) 보고서는 LED 스펙트럼의 청색광량과 인간의 생체 리듬에 미치는 영향에 대해 우려를 표명했습니다.(Kraus, 2016) 이러한 우려에도 불구하고 실제 도로 조명 조건에서 LED 스펙트럼의 모든 부분이 건강에 미치는 영향을 정량화한 관리된 경험적 연구는 없습니다.

인체는 환경 속에서 빛에 의해 구동되는 24 시간 생체 리듬을 가지고 있습니다. 빛은 또한 송과선(pineal gland)에서 분비되는 멜라토닌 호르몬의 조절을 포함하여 강력한 신경 내분비 및 신경 행동 효과를 가지고 있습니다. 이러한 효과는 눈의 본질적으로 감광성 망막 신경절 세포(ipRGC)의 빛 자극에 의해 부분적으로 유발됩니다. 건강한 생체 및 신경 내분비 조절을 위해 인간은 낮에는 충분히 밝은 빛에, 밤에는 어둠에 노출되어야 합니다. 현대 선진국에서는 도로와 실외공간의 야간조명이 정상적인 수면, 생체 리듬 및 신경 내분비 생리를 방해한다는 우려가 제기되었습니다. 이러한 장애는 일부 암, 심장 질환 및 대사 장애의 위험과 관련이 있습니다.(Bedrosian, Fonken, & Nelson, 2016) ipRGC(intrinsically photosensitive retinal ganglion cells)는 청색광에 가장 민감하며 459-484 nm 파장 범위의 빛은 생체 시스템 및 멜라토닌 조절에 가장 강한 영향을 미칩니다. LED는 일반적으로 기존의 고강도 방전 (HID) 광원보다 청색 스펙트럼 함량이 높으며, 저녁에 LED에 노출되면 생체 리듬을 방해하여 수면손실을 초래하는 것으로 나타났습니다.

반면에 일부 연구에서는 청색광량이 높은 빛이 인간의 경각성을 높이고 인지 능력을 향상시킬 수 있음을 보여주었습니다. 따라서 청색 광량이 높은 LED 도로조명은 도로 사용자 (운전자, 보행자 등)를 더욱 경계하게 만들어 야간 교통안전을 향상시킬 수 있습니다. 효과적인 도로 조명을 설계하기 위해 도로 조명, 멜라토닌 억제, 운전자 경각성 및 건강 사이의 관계를 이해해야 할 필요성이 증가하고 있습니다. 그러나 이러한 관계는 실제 도로환경에서 조사된 적이 없습니다. 실제 도로환경에서 수행된 연구결과는 조건과 광량이 거의 동일하기 때문에 현실 세계로 쉽게 전달될 수 있습니다. 따라서 이러한 연구는 실내 실험실에서 수행된 연구에서 파생된 것보다 더 유효하고 적용 가능한 도로 조명에 대한 권장사항을 생성합니다.

제2장 문헌검토

이 프로젝트의 첫 번째 작업으로 빛이 인간의 수면 건강과 주의력에 미치는 영향에 관한 현재 지식 상태에 대한 문헌 검토가 준비되었습니다. 이 문헌검토를 통해 빛이 인간의 건강과 주의력에 미치는 영향에 대한 연구 및 지식수준의 격차가 확인되었습니다.

인간의 시력

시력은 운전의 필수적입니다. 인간의 시각 시스템은 주로 광학 구성요소(눈)와 이미지 처리 구성요소(뇌의 시각 피질에 대한 시신경)의 두 부분으로 구성됩니다. 400 ~ 700 나노미터(nm) 사이의 전자기파

스펙트럼은 사람의 눈이 이러한 파장에 민감하기 때문에 가시광선 스펙트럼이라고 합니다. 물체에서 반사된 빛이 눈에 들어간 다음 각막(눈을 덮는 보호 덮개), 동공(눈에 들어오는 빛의 양을 제어하는 개구부) 및 빛을 망막의 세포표면의 감광성 층에 집중시키는 렌즈를 통과합니다. 그런 다음 망막은 이 빛을 전기신호로 변환하고 처리를 위해 시신경을 통해 뇌의 시각피질로 보냅니다. 렌즈는 눈에서 다른 거리에 있는 물체의 초점을 맞추는 역할을 합니다. 눈의 섬모근육은 렌즈를 평평하게 하거나 둥글게 하여 초점을 맞추는 데 도움을 줍니다.

망막은 세포 또는 수용체의 감광층으로 구성되며, 이는 언급 한 바와 같이 400 ~ 700nm 사이의 전자기 복사파장에 민감합니다. 망막에는 네 가지 유형의 감광성 수용체가 있으며, 이는 추상체와 간상체라고 하는 두 가지 주요 범주로 분류될 수 있습니다. 각 광 수용체에는 서로 다른 종류의 광색소가 있어 네 가지 다른 종류의 스펙트럼에 민감합니다. 간상체는 같은 안료를 가지고 있습니다. 따라서 모든 간상체는 동일한 스펙트럼 감도를 갖습니다. 반면에 추상체는 세 가지 다른 종류의 광색소를 가지며 결과적으로 세 가지 다른 종류의 분광감도를 가지고 있습니다. 따라서 세 가지 종류의 추상체가 있습니다. 세 개의 추상 수용체는 가장 민감도가 높은 영역에 따라 짧음 (S), 중간 (M) 및 긴 (L) 추상체라고 부릅니다. S-추상체의 응답은 437nm에 집중되며 이는 청색광과 일치합니다. 빛이 S-추상체를 활성화하면 파란색으로 인식됩니다. M- 및 L- 추상체는 겹치는 구간이 많습니다. 이들의 스펙트럼 감도는 533 및 564nm에서 최고입니다. 이 추상체는 녹색에서 황록색 빛에 더 잘 반응하며 끝단의 상당 부분은 빨간색으로 인식되는 영역까지 이르게 됩니다(파장 > 600nm). 간상체와 추상체는 망막의 이미지 형성 수용체를 구성합니다. 이미지 형성 수용체 외에도, 망막에는 본질적으로 감광성 망막 신경절 세포(ipRGC)라고 하는 비 이미지 형성세포도 포함되어 있습니다. 이 세포는 생체 리듬을 조절하는데 중요한 역할을 합니다. 최대 생체 민감도는 오전 12:00에서 3:00 사이에 발생합니다. 최대 감도는 약 480nm 파장이며, 이는 청색 파장과 일치합니다.

광시, 암시 및 중시 시력

개별 광 수용체 (추상체 및 간상체)가 서로 다른 휘도에서 활성화되므로 사람 눈의 적응상태에 따라 스펙트럼 감도가 결정됩니다. 인간 눈의 분광 감도에는 세 가지 정의 된 상태가 있습니다. 즉, 광시, 암시 및 중시 시력입니다.

도로조명의 목적

도로 조명의 주요 목적은 도로 사용자(차량, 보행자, 자전거 등)가 주변 지역을 더 잘 볼 수 있도록 하는 것입니다. 이렇게 향상된 가시성은 도로 사용자에게 주변에 대한 더 많은 정보를 제공하고 더 나은 조치 및 반응 판단을 내리는데 도움이 됩니다. 결과적으로 도로를 더 안전하게 만들고 인명 및 사고와 관련된 비용을 줄입니다. 도로조명에 대한 IES (Illuminating Engineering Society of North America) 표준은 야간 사고감소, 보안 감각 증가, 교통 흐름 개선, 야간 공공시설 사용증가와 같은 도로조명에 대한 몇 가지 이점을 나열 합니다 (Illuminating Engineering Society of North 미국, 2018).

야간 도로에는 네 가지 주요 광원이 있습니다.

- 법에 의해 의무화되는 차량 헤드램프.
- IES 및 Commission Internationale De L' Éclairage (CIE)와 같은 조직의 표준에 의해 규제되는 고정식 천장조명
- 도로의 교통 신호등과 조명 또는 역 반사 표지판
- 도로에 없는 광원(예 : 인근 상업 지역 및 주차장의 빛)에서 나오는 빛

도로 조명용 광원

고강도 방전 (HID) 광원은 미국의 도로 조명에 널리 사용되었습니다. 여기에는 저압 나트륨(LPS)과 고압 나트륨(HPS)의 두 가지 유형의 나트륨 증기램프가 있습니다. 이 중 HPS 램프는 광 출력이 높고 수명이 길기 때문에 도로에 가장 일반적으로 사용됩니다. HPS 램프는 적색, 녹색 또는 청색 파장이 낮은 스펙트럼을 가지며 상관 색온도가 2100K입니다.(Murdoch, 2003) 최근 몇 년 동안 도로 조명용 LED (Light-Emitting Diodes)사용의 발전으로 에너지 소비가 대폭 감소했습니다.(최대 50 %까지) LED는 기존의 HPS 램프보다 조명효율이 높습니다. LED 조명기구는 기능, 역량, 스펙트럼 영향력분배 및 발광효율 측면에서 HPS 조명기구와 크게 다릅니다.

빛에 의한 생체 조절

생체 타이밍 시스템은 수면 및 잠에서 깬, 체온, 호르몬 분비 및 기타 생리적 매개변수와 같은 일일 리듬을 제어합니다. 이러한 고유한 리듬은 유기체의 환경이 일정한 상태를 유지하더라도 지속됩니다. 이것은 이러한 리듬이 내 인성 발진기 또는 생체 타이밍 시스템의 제어를 받고 있음을 나타냅니다. 생체 타이밍 시스템을 통해 유기체는 새벽과 황혼에 자연 환경의 중대한 변화를 예상하고 대비할 수 있습니다. 빛이 생체 시스템을 조절하는 주요 자극이기는 하지만 (Czeisler, 1999) 소리의 타이밍, 온도, 사회적 신호와 같은 다른 외부 자극도 생리적 기능에 영향을 미칠 수 있습니다.(Aschoff, 1981; Wetterberg, 1993)

생체, 신경 내분비 및 신경 행동 광수용

본질적으로 감광성 망막 신경절 세포(ipRGC)는 신경계와 빛 환경 사이의 비 시각적 반응에 대한 초기 상호작용 지점입니다. 연구에 따르면 SCN이 ipRGC의 특수 하위집합으로부터 환경 광 입력을 받는 것으로 확인되었습니다. IpRGC는 물리적으로 분리되거나 다른 신경으로부터 입력을 받지 못하도록 약물에 의해 차단될 때 자체적으로 빛에 반응합니다. 이 독특한 세포는 모든 망막 신경절 세포의 1 ~ 3 %를 구성하며, 빛반응은 24시간 생체주기 동조 및 멜라토닌 억제에 대한 반응과 유사한 것으로 보입니다.

송과선과 멜라토닌 생성

빛 정보를 전달하는 신경경로는 여러 뇌 영역에서 여러 연결을 만드는 다소 길고 간접적인 경로를 통해 SCN(교차 상핵)에서 송과선으로 확장됩니다.(Moore, 1983) 이 신경 해부학을 통해 눈을 통해 감지되는 빛과 어둠의 주기는 SCN(교차 상핵) 신경활동을 동반하고, 이는 차례로 송과선에서 멜라토닌의 리드미컬한 합성 및 분비를 동반합니다.

멜라토닌은 지금까지 연구된 모든 종에서 밤 시간에 송과선에 의해 합성되고 방출되는 호르몬입니다. 다양한 기능이 멜라토닌과 관련되어 있으며, 그중에서도 생체 리듬조절 및 주기적인 재생산이 중요합니다.(Arendt, 1995) 멜라토닌의 다른 생리적 역할에는 조직의 산화 방지와 암 억제 효과가 포함됩니다. 급격한 시간대 변화, 교대근무 수면장애 및 전이성 암 (Lewy)에 따른 시차증 치료제로 사용됩니다. 식이요법 보충제로 판매되며 미국을 포함한 여러 국가에서 널리 사용됩니다. (Bonn, 1996).Sack, 1999)

빛에 기인하는 멜라토닌 억제

멜라토닌 억제 정도에 영향을 미치는 주요 요인에는 각막광도, 광 노출 시기 및 기간, 이전 광 노출 이

력, 광원에서 방출되는 파장이 포함됩니다. 빛의 강도와 그에 따른 멜라토닌 억제정도 사이에는 잘 알려진 용량-반응 관계가 있습니다. 앞서 언급했듯이 빛은 생체 타이밍 시스템을 동반하는 가장 중요한 단서입니다. Light PRC는 짧은 1 시간의 밝은 백색광 펄스와 협 대역 청색 LED 조명을 위해 구성되었습니다. (Revell, Molina, & Eastman, 2012)

몇몇 임상시험에 따르면 주어진 기간 동안 더 높은 강도의 빛의 이력은 급성 빛 노출에 의해 후속 멜라토닌 억제의 크기를 악화 시킨다는 것을 보여주었습니다. 한 연구에서는 조절한 어두운 빛 (200 렉스 미만)에 노출된 1 주일동안 500 렉스 백색광에 의해 유발된 멜라토닌양의 53%가 억제된 반면, 같은 1 주일 동안 밝은 빛(5000-7000 렉스)에 노출된 후에는 불과 41%만 억제되는 결과가 초래되었습니다. (Hébert et al., 2002). 또 다른 연구에서, 6.5 시간 200 렉스 백색광 노출 이전에 63시간 이상 동안 0.5렉스의 빛 이력은 85.7%의 평균 멜라토닌 억제를 가져온 것에 비교해 동일한 시간 동안 200 렉스의 일정한 빛 이력 후 71.2%의 평균 멜라토닌 억제를 가져왔습니다. (Smith et al., 2004).

수면에 미치는 빛의 영향

최상의 수면 시간과 숙면을 얻으려면 수면시간이 생체시계의 시간과 적절하게 정렬되어야 합니다. 인간의 경우 저녁과 이른 밤에 빛에 노출되면 수면을 촉진하는 것으로 알려진 멜라토닌 호르몬의 방출이 억제됩니다. (Brainard et al., 1988; Zeitzer et al., 2000) 빛에 노출되면 생체시계가 나중 시간 때로 이동합니다. (Khalsa et al., 2003) 멜라토닌 억제와 시계의 위상지연은 밤에 잠들기 어렵게 만듭니다. 최근 연구에서는 인간의 생체시계에 대한 저녁 전기조명의 결과를 조사했습니다. (Wright Jr, McHill, Birks, Griffin, Rusterholz, & Chinoy, 2013) 건물 환경의 전기조명은 하계 캠핑 중에 경험하는 일광주기 (light-dark cycle)와 비슷한 생체시계의 타이밍 지연과 연관이 있는 것으로 나타났습니다. 생체시계는 생물학적 밤이 일몰에 시작되는 것 같이 태양 시간과 동시성이 있었습니다. 이러한 결과는 현대의 빛 노출 패턴이 늦은 수면 일정에 어떻게 기여하고 수면 및 생체시계를 방해하는지 강조합니다. 그러한 방해는 인간의 건강에 분명한 영향을 미칩니다.

야간 빛의 직접적인 경각성 효과

광대역, 백색 형광 광원은 경각성, 신경 행동 시험, 멜라토닌 억제 및 생체 단계변화에 대한 비교 연구에서 평가되었습니다. 초기 연구에 따르면 밝은 흰색의 다색광 노출은 빛에 노출되는 동안 경각성을 급격히 높이고 피로를 줄이는 것으로 나타났습니다. (French et al., 1990; Dawson and Campbell, 1991; Badia et al., 1991) 3,000lux의 밝은 오버 헤드, 백색 다색광(필립스 FB40 / CW / 3냉 백색 형광등)은, 100lux의 희미한 백색광과 비교할 때, 9명의 남성 피시험자에 대한 노출에서 16 간 야간조명 동안 10개의 신경 행동 시험 중 7개에서 피시험자의 성과 측정이 증가했습니다. (French et al., 1990). 야간 근무를 시뮬레이션한 유사한 연구에서는 13명의 남성 및 여성 피시험자를 대상으로 8시간 교대를 통해 200lux 미만의 희미한 백색광과 6,000lux의 백색광을 4시간 주기로 비교했습니다. 연구 첫날밤에 4시간 동안 밝은 빛을 받은 그룹은 전체 시간 동안 희미한 빛을 받은 그룹보다 야간 근무 후반기에 잠에서 깬 정도가 더 작게 감소했습니다. (Dawson and Campbell, 1991) 보다 대규모의 다른 연구는 네 가지 조명조건에서 피시험자 간 계획에서 43명의 남성 피시험자를 비교했습니다. 일련의 신경 행동 시험(test battery)에서 경각성 및 성능향상과 관련된 뇌파 주파수의 증가가 밝은 빛 노출에서 발견되었습니다. (Badia et al., 1991) 이 모든 연구에서 광원은 모든 경우에서 설명할 경우 그다지 특성화되지 않았습니다. 중요한 사항은 모든 연구에서 밝은 백색광이 행동성과 경각성에 대해 미치는 영향을 보여주지는 않았습니다. 예를 들어, 24명의 남성 피시험자를 대상으로 한 연구에서 300, 1500 또는 3000

력스의 백색 형광등의 13.5시간 빛 노출이 일련의 신경 행동 시험의 성능에 비교되었습니다.(Dollins et al., 1993) 조명조건은 일련의 신경행동 시험 성능에 영향을 미치지 않았습니다. 일련의 시험성능은 조명상태에 관계없이 연속 시험 일수에 따라 감소했습니다.

경각성과 멜라토닌의 상호 작용

여러 연구에 따르면 빛 노출은 경각성에 긍정적인 영향을 미칠 수 있습니다. 경각성에 대한 야간광선 노출효과의 경우, 작용 메커니즘이 멜라토닌 억제와 관련이 있다는 가설이 세워졌습니다.(Cajochen et al., 2003; 2005; Perrin et al., 2004; Lockley et al., 2006; Chellappa et al., 2006; Chellappa et al., 2011), 다른 사람들은 멜라토닌 억제와 경각성 사이에 관계가 없음을 보여주었습니다.(Ruger et al., 2006; Revell et al., 2010) 주간 멜라토닌 수치를 감지할 수 없기 때문에 밝은 백색광 노출에 대한 경각성 향상은 비슷한 방식으로 설명할 수 없습니다. 또한, 다른 연구는 두 가지 빛반응에 대한 스펙트럼 감도뿐만 아니라 신경처리가 다른 대체경로를 제안했습니다.(Revell et al., 2006) 이 연구에서 420nm의 단파장 빛에 대한 노출이 470nm의 빛에 노출된 것보다 주관적으로 측정된 경각성과 기분에 더 큰 영향을 미친다는 것이 관찰되었습니다. 낮 동안의 경각성에 대한 빛 노출의 중요한 효과는 멜라토닌에 의해 매개될 가능성이 낮습니다. 또한 밤에 빛에 노출될 때의 경각성 또는 성능효과가 멜라토닌 조절과 어떤 관련이 있는지는 명확하지 않습니다.

연구수준의 격차

문헌 검토에 따르면 LED 도로조명이 운전자의 수면건강과 경각성에 미치는 영향과 관련하여 두 가지 주요 지식격차가 확인되었습니다. 첫 번째는 LED 도로조명이 운전자 경각성에 미치는 영향에 대한 연구가 부족하다는 것입니다. 두 번째는 LED 광원이 수면건강과 경각성에 미치는 영향을 정량화 할 수 있는 지표가 없다는 것입니다.

지식상태에서 격차해소

이러한 확인된 차이를 기반으로 현재 연구는 다음 연구문제를 해결하는 것을 목표로 합니다.

1. LED 도로 조명의 조도, 지속시간 및 스펙트럼 영향력분포가 수면건강과 운전자의 주의력에 미치는 영향은 무엇입니까? 이러한 효과는 HPS 조명 및 도로 조명부재와 어떻게 비교되니까?
2. LED 도로 조명 (있는 경우)이 운전자의 수면 건강과 경각성에 미치는 의도하지 않은 부정적인 결과를 어떻게 완화할 수 있습니까?
3. LED 도로조명이 운전자의 수면건강과 경각성에 영향을 미친다면 LED 광원을 정량화하기 위한 어떤 지표가 그러한 반응을 이끌어내는데 가장 적합한가?

프로젝트 목표

이 연구의 목표는 LED 도로 조명이 운전자의 수면건강과 주의력에 미치는 영향을 확인하는 것이었습니다. 연구팀은 운전자의 수면건강 및 주의력 측정에 대한 다양한 조명유형과 각막조도의 영향을 평가했습니다. 수면건강은 혈장과 타액의 멜라토닌 수치를 기준으로 평가되었습니다. 멜라토닌은 송과선에서 분비되는 호르몬으로 밤 시간 동안 인간의 생체시계 시스템과 수면생리에 영향을 미칩니다. 빛에 충분히 밝은 노출은 멜라토닌을 억제할 수 있습니다. 따라서 멜라토닌 수치는 수면건강과 관련된 별도의 정량적 지표역할을 할 수 있습니다. 운전자의 경각성은 운전자의 반응시간, 운전자의 눈꺼풀이 일정 시간 동안 닫힌 시간비율 (PERCLOS), 차선위치의 표준편차(SDLP)뿐 아니라 주관적으로 Karolinska Sleepiness Scale (KSS)을 사용하여 객관적으로 측정되었습니다.

제3장 행동 양식

프로젝트 목표를 해결하기 위해 다음 두 가지 별도의 실험이 수행되었습니다.

- 각막조도 용량실험
- 운전자 수면 건강 및 경각성(DSHA) 실험

각막 조도 선정량 실험에서 각막조도는 다양한 스펙트럼 영향력분포(SPD) (LED 및 HID), 소비자 LED 장치 (태블릿, TV 및 전화) 및 차량 헤드램프 (HID 및 LED 유형)를 가진 도로조명 소스에서 측정되었습니다. 이 실험은 각막조도의 일반적인 수준과 다양한 스펙트럼 영향력 분포(SPD)의 도로광원에서 노출 기간을 결정하고자 했습니다. 소비자 전자 장치는 가로등과 차량 조명에 대한 유용한 비교 역할을 했습니다. 이 실험의 결과는 DSHA(운전자 수면 건강 및 경각성)실험에서 고려할 빛의 수준과 노출기간을 결정하기 위한 것입니다.

DSHA 실험에서 LED 광원 및 관련 조명수준(각막 조도로 측정) 및 기존 HID 광원 (HPS)이 수면건강 및 운전자의 주의력에 미치는 영향을 현실적인 야간도로 시나리오에서 조사했습니다. 도로조명이 없는 시나리오는 음성대조군(Negative control-실험결과와 효과성을 대비적으로 판단하기 위한 대조군)역할을 했습니다. 수면건강은 혈장과 타액의 멜라토닌 수치를 기준으로 측정되었습니다. 운전자 경각심을 측정하기 위해 팀은 반응시간, PERCLOS(3분 구간) 및 차선위치의 표준편차(SDLP)를 객관적인 측정으로, KSS를 주관적인 측정으로 고려했습니다.

각막 조도 선정량 실험

이 실험의 목표는 스펙트럼 영향력 분포가 다른 도로 조명 소스에서 일반적인 각막조도 수준을 결정하는 것이었습니다. 이러한 수준은 소비자 기기 및 차량 헤드램프에 유사한 노출기간 후 경험한 수준과 비교되었습니다. (표 3 참조)

운전자 수면건강 및 경각성 실험

이 실험에서는 3 개의 각막조도에서 LED 도로 조명유형이 운전자 수면건강 및 경각심의 주관적이고 객관적인 측정에 미치는 영향을 평가하여 측정 가능한 효과를 생성하는 각막조도를 결정했습니다. 운전자 수면건강과 주의력에 대한 동일한 객관적이고 주관적인 측정은 양성 대조군, 음성대조군(도로조명 없음) 및 전통적인 HID 소스(LED 소스와 일치하는 단일 각막 조도)에 대해서도 측정되었습니다.

현재 실험에서 운전자 수면건강은 혈장과 타액의 멜라토닌 수치를 기준으로 평가되었습니다.

밝은 빛에 노출되면 멜라토닌을 억제할 수 있습니다. 따라서 멜라토닌 수치는 수면건강과 관련된 별도의 정량적 지표역할을 할 수 있습니다.

운전자 경각성 반응 시간, PERCLOS(3분 구간) 및 SDLP(차선위치의 표준편차)를 측정하여 객관적으로 결정하고 주관적으로 KSS(Karolinska Sleepiness Scale)를 기반으로 결정했습니다. 다른 도로 실험 시나리오와 비교하기 위해 실험실 수행 양성 대조군 및 도로주행 음성대조군이 설정되었습니다. DSHA 실험은 18 세에서 30 세 사이의 건강한 남성 및 여성 지원자 10 명을 포함하도록 대상과제 내 반복측정 설계를 활용했습니다. 모든 참가자는 일정한 수면-경각성 패턴, 유효한 운전면허증 및 6/12 (20/40)의 양안시력을 가져야했습니다. 참가자들은 버지니아 스마트로드에서 일반적으로 발생하는 조명수준의 실외조명환경에 노출되었습니다.

각 참가자는 차량의 CAN(Controller Area Network)에 연결된 자료수집시스템(DAS)과 차량에 탑재된 카

메라 시스템이 장착된 두 대의 동일하게 계측되는 실험차량 (2016 Ford Explorers) 중 하나를 운전했습니다. DAS는 차량 속도, 차동 GPS 좌표, 4개의 비디오 이미지 (운전자 얼굴, 전방 도로, 도로 왼쪽 및 도로 오른쪽), 운전자의 오디오, 수동 버튼 누름 등을 포함하여 차량 내 실험자의 입력으로부터 자동차의 CAN 시스템으로부터 자료를 수집하였습니다. DAS(자료수집시스템)에는 VTTI가 개발한 "Road Scout"라고 하는 차선추적기가 장착되었습니다. Road Scout(차선추적기)는 전방 카메라 피드에서 비디오 프레임을 가져오는 custom machine-vision process입니다. 저장되기 보다는 오히려 "grabbed(잡은)"된 비디오 프레임은 도로 차선 표시와 관련된 차량 위치를 계산하기위하여 실시간 알고리즘 방식으로 처리됩니다.

제4장 결과

자연 모방적 운전 노출

스마트 도로 노출

도로의 조명구역에서 2 시간 노출에 대한 각막조도 선정량 및 조사결과는 표 8에 나와 있습니다.

공공 도로 노출

다양한 도로기능 등급에 대해 측정된 조도수준의 결과는 표 9에 나와 있습니다. 전반적으로, 가장 높은 평균 도로휘도는 1.4cd/m²에서 주요 수집기/지역 기능등급에 대해 측정되었으며, 모든 구역에서 가장 낮은 평균은 0.8cd/m²에서 주(state)사이에서 대한 것입니다. 주간 고속도로는 평균 수직조도 (4.1lux)가 가장 높았고 주요 수집기 / 지역 기능등급이 가장 낮았습니다.(2.8lux) 평균 수평 조도의 경우 간선도로 (9.6lux)가 가장 높았고 주(state)사이 간선이 가장 낮았습니다. (5lux) 도로 조명, 상업시설의 미광, 주차시설 등에 인접한 추가광원이 있는 경우 조명수준은 권장관례에 지정된 수준을 초과 할 수 있습니다. 조명수준은 등기구 고장 또는 먼지축적으로 인해 지정된 수준미만일 수도 있습니다.

소비자 기기 노출

2 시간 노출에 대한 소비자 장치의 평균조도 및 총 조도 선정량은 표 10에 나와 있습니다. 전체 밝기 모드에서 Apple iPad는 평균조도와 선정량이 가장 높았고 Kindle Paperwhite®가 가장 낮았습니다. 밤 모드에서는 모든 기기의 평균조도와 선정량이 낮았으며 Apple iPad Pro는 최저수준이고 Apple iPad는 최고수준 이었습니다.

일일 노출 측정

24 시간 동안 VTTI에서 근무하는 10 명의 일반 사무원의 일일 노출측정에서 얻은 조도 및 조도 선정량은 표 11에 나와 있습니다. 전체적으로 참가자들은 평균 약 1500 만 lux-s의 빛으로 400 만에서 3100 만 lux-s 사이를 경험했습니다. 표 11의 평균값은 24 시간 동안 관리자가 초당 경험한 평균조도 및 조도 선정량을 나타냅니다.

도로 조명 노출이 멜라토닌에 미치는 영향

타액(침) 멜라토닌에 대한 빛 조건 및 시간의 영향에 대한 LMM 결과는 표 15에 제시되어 있습니다. 조명 상태의 주된 효과 만 고려했습니다. 양성 대조군과 모든 도로 노출 조건 사이의 멜라토닌 차이는 통계적으로 가장 중요한데, 양성대조군이 가장 억제효과가 큰 것으로 나타났습니다.(그림 13 참조) 그러나

도로 노출조건 사이에 차이는 없었습니다.(그림 13 참조)

제5장 토 론

이 프로젝트의 목표는 LED 도로 조명이 운전자의 수면건강과 경각성에 미치는 영향을 확인하는 것이었습니다. 다섯 가지 주요 결과가 분명했습니다. 첫째, 오전 1시부터 3시까지 타액(침) 멜라토닌 억제 측면에서 4000K LED 도로조명, 2100K HPS 도로조명 및 도로 조명 없는 경우 사이에 차이가 없었습니다. 둘째, 다양한 도로조명 조건에서 물체의 감지 및 색상인식 거리에서 약간의 차이가 관찰되었습니다. 셋째, PERCLOS 또는 SDLP의 경우 도로 조명조건 사이에 차이가 관찰되지 않았습니다. 넷째, 도로 조명 조건에서 KSS 점수의 차이가 없었습니다. 다섯째, 도로조명 조건의 조도 선정량은 조명수준에 따라 다르며 동일한 2 시간 노출에 대한 소비자 전자장치의 조도 선정량보다 낮았습니다.

한계 및 향후 방향

이 연구에는 몇 가지 한계가 있습니다.

첫째, 수면건강의 한 가지 측면인 멜라토닌 억제만이 연구에서 측정되었습니다. 문헌에서 수면 건강은 잠에서 깬 횟수, 수면시간, 수면효율성 및 수면의 질과 같은 다양한 차원에서 측정됩니다. 도로조명이 수면건강에 미치는 영향을 더 잘 이해하려면 향후연구에서 도로조명 노출이 수면건강의 다른 측정에 미치는 영향을 조사해야 합니다.

둘째, 이 연구의 결과는 오전 1시부터 오전 3시까지 도로조명 조건과 도로조명이 없는 조건에서 도로 조명 노출로 인한 급성 타액(침) 멜라토닌 억제를 설명하고 있습니다. 다른 저녁 야간기간에 대한 연구는 수행하는 것이 합리적입니다. 또한, 매일 멜라토닌 억제의 장기적인 효과는 알려져 있지 않으며 연구범위를 벗어납니다. 이 분야의 향후연구는 도로 조명에 매일 노출되어 만성 멜라토닌 억제가 건강에 미치는 영향에 초점을 맞춰야 합니다. 이는 교대시간 중에 도로조명에 노출되는 주요 도시의 대중교통 버스운전자와 같은 개인에게 특히 중요합니다. 연구해야 할 다른 주제는 도로 보행자와 도로 근처에 거주하는 주민들입니다.

셋째, 이 연구에서는 움직이는 차량과 같이 조명이 약하고 비 열균이며 위험한 환경에서 혈액을 수집할 때 인간 피시험자에 대한 안전 문제로 인해 도로노출에서 타액 멜라토닌 수치만이 측정되었습니다. 연구에 따르면 혈액 샘플링은 멜라토닌의 정량적 평가에서 타액보다 더 민감합니다. 위의 그림 12는 혈장과 타액의 멜라토닌 수치의 큰 차이를 보여줍니다. 향후 연구는 혈장 멜라토닌 억제검사를 가능하게 하는 안전하고 열균된 실험실 조건에서 도로조명 노출을 모사할 수 있습니다. 이 접근법은 도로조명 노출이 멜라토닌 억제 및 기타 수면건강 매개변수에 미치는 영향을 이해하는데 크게 기여할 것입니다.

넷째, 현재 연구에서 참가자들은 도로의 조명이 있는 구간에서 2시간 동안 계속 운전했습니다. 실제로 운전자는 조명이 있는 도로환경에서 장시간 운전하는 경우는 거의 없습니다. 이 연구의 결과는 도로조명에 2시간 동안 노출된 운전자에게만 적용됩니다. 멜라토닌 억제와 도로조명에 대한 간헐적 노출로 인한 객관적이고 주관적인 경각성 측정을 이해하는 것이 향후연구의 초점이 될 수 있습니다. 또한, 경각성 측정 (PERCLOS, SDLP 및 KSS)에서 관찰된 통계적 유의성이 부족한 것도 상대적으로 작은 표본 크기 ($n = 10$) 때문일 수 있습니다. 샘플크기를 늘리면 잠재적으로 영향력이 증가하여 광원 유형 사이에 통

계적으로 유의미한 차이를 나타낼 수 있습니다.

다섯째, 스마트로드에는 교통체증이나 상업시설의 주차장 조명과 같은 외부 조명이 없었습니다. 이러한 단순화는 멜라토닌 억제 및 경각성에 대한 도로조명의 영향을 분리하는데 사용되었습니다. 교통체증 및 외부 광원의 존재는 추가광원 및 눈부심을 도입함으로써 잠재적인 혼란효과로 작용할 수 있습니다. 따라서 이러한 결과는 도로조명 이외의 외부 광원이 없는 지역에 적용할 수 있습니다. 향후 연구는 보다 현실적인 환경에서 멜라토닌 억제 및 경각성을 평가해야 합니다. 또한, 이 연구 노력의 일환으로 수집된 도로조도 및 휘도 측정은 다양한 도로기능 등급에서 운전자의 시각적 적응을 이해하는데 사용될 수도 있습니다.

제6장 결론

결론적으로, 이것은 건강한 운전자의 전기 도로조명의 강도와 스펙트럼에 대한 멜라토닌 및 경보반응을 정량화 한 최초의 실증연구입니다. 현재 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있습니다.

- 타액(침) 멜라토닌 억제로 측정된 운전자 수면건강의 한 측면은 IES RP-8-2018에 지정된 수준보다 높은 조도에서도 LED 도로조명의 영향을 크게 받지 않습니다.
- 동일한 조도(도로조도 1.5cd/m² 또는 각막조도 1.9lux)에서 측정했을 때 LED와 HPS 도로조명 사이에서 타액 멜라토닌 억제에는 차이가 없습니다.
- LED 조명수준이 증가해도 타액 멜라토닌 억제가 증가하지는 않았습니다.
- 타액 멜라토닌 억제에 있어서 통계적으로 중요한 차이는 양성 대조군과 도로 조명 조건 사이에서 관찰되었습니다. 양성대조군(3500lux)의 조명수준은 더 높은 수준 (1.9lux)에서도 도로조명조건에서 경험한 수준보다 상당히 높았습니다.
- 감지 및 색상인식거리(반응 시간), PERCLOS(3분 구간) 및 SDLP(차선위치의 표준편차)를 통해 객관적으로 측정한 운전자 경각성은 HPS(고압 나트륨), LED 및 조명 없는 도로조건 사이에 큰 차이를 보이지 않았습니다.
- 주요 감지 및 색상인식거리는 물체의 색상과 빛의 수준에 따릅니다. 광도가 증가하면 감지거리가 증가했습니다.
- HPS 도로조명의 감지 및 색상인식거리도 노출시간의 영향을 받았으며, 노출시간이 증가하면 감지 및 색상 인식 거리가 감소했습니다.
- KSS(Karolinska Sleepiness Scale)로 측정한 주관적인 운전자 경각성은 HPS, LED 및 조명 없는 도로조건 사이에 큰 차이를 보이지 않았습니다. 유일한 통계적 차이는 양성 대조군과 기타 다른 도로조명조건에서 관찰된 내용입니다.
- 도로조명조건(HPS 및 LED 광원 모두에서)의 조도 선정량은 텔레비전 및 태블릿과 같은 소비자 전자장치에서 경험하는 조도 선정량보다 상당히 낮습니다.
- IES RP-8-18에 지정된 조명수준에서 HPS 및 LED 도로조명은 오전 1시에서 오전 3시 사이에 운전자의 타액 멜라토닌 억제, 객관적 경각성 또는 주관적 경각성에 영향을 미치지 않았습니다.
- 현재 연구의 결과는 범위가 제한되어 있지만 LED 도로조명에 대한 지침을 수정할 필요성을 뒷받침하지는 않습니다. 그러나 도로 조명 (LED 및 HPS)은 하늘 빛(도시 지역의 밤하늘 조명), 빛 공해, 동식물에 해로운 영향을 미친다는 점에 유의해야 합니다. 이러한 영향을 최소화하려면 적절한 주의를 기울여

야합니다.

<원문제목> LED Roadway Lighting: Impact on Driver Sleep Health and Alertness

<원문출처> National Academy of Sciences(TRANSPORTATION RESEARCH BOARD)