

박물관의 전시 조명 기준 설정 연구 - 분광분포 스펙트럼을 중심으로

Study on Determining
Requirements for Museum
Exhibition Lighting
- Focusing on Spectral Energy
Distribution

이승은*, 박학수
국립중앙박물관 보존과학부

Lee Sungeun, Park Haksoo
Conservation Science Division, National
Museum of Korea
Lee Sungeun*, Park Haksoo

요약

기존 박물관에서 사용하던 할로겐등이나 형광등 등은 제품의 종류나 연색성, 색온도 등이 차이에도 불구하고 분광분포 스펙트럼 기준으로 비교해 보면 에너지에 큰 차이가 없다. 그러므로 문화유산 보존 측면에서 박물관의 전시 조명 기준은 조도나 적산조도 등 빛의 양을 기준으로 설정할 수 있었다.

그러나 최근 전시 조명으로 급격하게 도입되고 있는 LED의 경우 다양한 제조 방법과 형광물질이 존재하므로 조도가 같다 하더라도 분광분포 스펙트럼에 차이가 있으므로 에너지 차이가 있을 확률이 높다. 현재 시판되고 있는 LED 조명은 각기 고유의 스펙트럼을 가지고 있기 때문에 조도 기준만으로는 문화유산에 대한 조명 기준을 설정하기 어려운 점이 있다. 따라서 여러 나라에서는 전시 조명의 기준을 조도 뿐 아니라 색온도, 연색성, 분광분포 스펙트럼 등 다양한 항목으로 늘려가고 있다. 앞으로 박물관의 전시 조명은 조도 뿐 아니라 스펙트럼의 측정을 기반으로 문화유산에 대한 전시 조명의 안전성 여부를 검토하여야 할 것이다.

주제어: 박물관 조명, LED, 조도, 복사조도, 분광분포 스펙트럼

Abstract

Halogen lamps and fluorescent lamps that have been in museums so far are single light sources. Despite variations in product types, color rendering and color temperature do not demonstrate significant differences in energy when compared on a spectral energy distribution. Therefore, in terms of cultural heritage conservation, museum exhibition lighting requirements could be set based on factors such as illuminance or accumulated illuminance.

However, LEDs, which have been rapidly introduced as exhibition lighting, are produced using various manufacturing techniques and with various fluorescent materials. Accordingly, the probability of encountering LEDs with different levels of energy—since they have different spectral power distribution, even if they have the same illuminance—is high. Also, as each commercially available LED light has its own spectrum, it is challenging to use illuminance as a single lighting requirement for cultural heritages. Therefore, many countries are expanding their requirements for exhibition lighting to include not only illuminance but also color temperature, color rendering, and spectral power distribution. Museum exhibition lighting should be examined for the safety of cultural heritages based on spectral power distribution measurements as well as illuminance.

Keywords : Museum lighting, LED, illuminance, radiance, spectral power distribution

* Corresponding Author:
Lee Sungeun
Tel: 82-2-2077-9432
E-mail: sungeune@korea.kr

1. 서론

전 세계적으로 기후 변화, 이산화탄소 감축, 에너지 절약이란 화두와 함께 박물관에 도입되는 조명에서도 LED의 보급이 급격하게 확대되고 있다. LED 조명은 기술적으로 조명의 스펙트럼을 조절할 수 있으므로 자외선 방출을 대부분 차단할 수 있다. 따라서, 기존 조명에 비하여 문화유산에 변색에 영향이 적은 것으로 알려져 있지만, 여러 연구에서 LED 조명으로 인한 변색에 대한 보고와 연구도 계속 진행되고 있다[1-5].

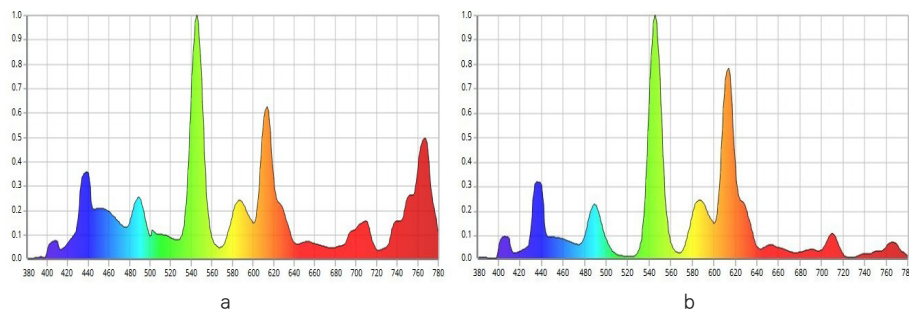
LED는 형광등, 할로겐 등과 다르게 다양한 파장의 광원을 가질 수 있는 조명이므로, 기존 조명을 기준으로 만들어진 박물관 조도 기준을 LED 조명에 적용하는 것이 바람직한 것인가에 대한 검토가 필요하게 되었다.

2. 본론

1. 조도와 분광분포 스펙트럼

기존 조명과 LED의 가장 큰 차이점은 조명마다 분광분포 스펙트럼이 다르게 나타난다는 것이다. 과거 많이 사용되었던 퇴색 방지 형광등과 비교해 보면 그 차이가 더 확연하게 드러난다.

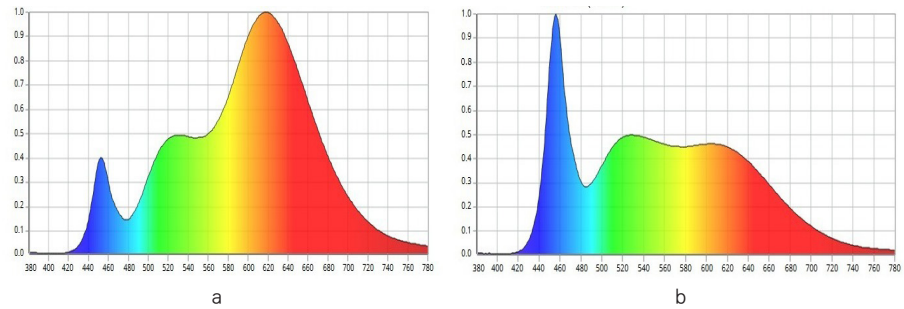
도1은 박물관에서 주로 사용하던 퇴색방지 형광등의 분광분포 스펙트럼이다[2]. 색온도가 다른 두 스펙트럼을 비교할 때 700nm 이상 부분에서 약간의 차이는 있으나 자외선 영역부터 청색광이라고 할 수 있는 500nm이하의 분광분포는 LED에 비해 큰 차이가 없는 것으로 관찰되었다.



도1. 형광등의 분광분포 스펙트럼 (a: 3000K, b: 5000K)[2]

그러나 LED의 경우 도2에서처럼 색온도에 따라 매우 다른 분광분포를 보인다[2]. 이러한 차이는 LED 광원의 특성에서 원인을 찾을 수 있다. LED는 칩, 형광체, 밀봉수지 등 다양한 부재를 조합하여 광학 현상, 구조 현상을 복합적으로 고려하여 만들

어진 광원이므로 분광분포 스펙트럼이 매우 다양하다.

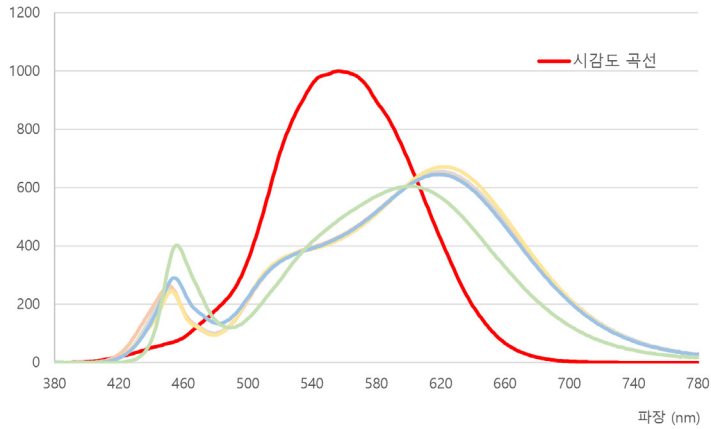


도2. LED의 분광분포 스펙트럼 (a: 2800K, b: 5800K)[2]

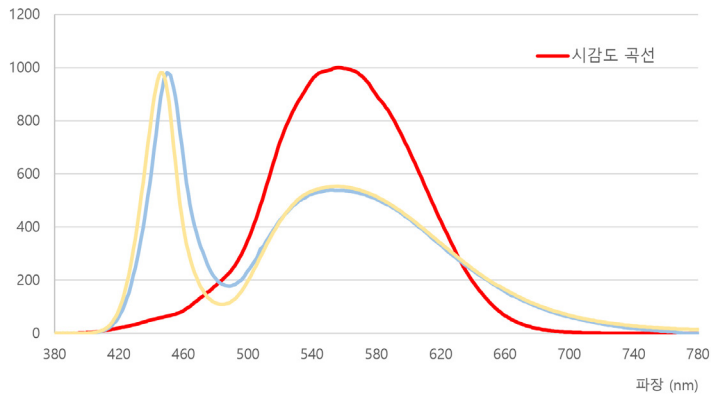
빛에 의한 문화유산의 손상 문제는 오랫동안 인식되어 왔으며 특히 오랜 기간 빛에 노출되는 전시 공간에서의 손상은 지속적으로 고민되어야 할 문제이다[6]. 박물관 전시 공간의 광화학적 손상 문제는 광범위한 방출 스펙트럼을 제공하는 LED 기반 광원의 출현으로 더욱 중요하게 대두되고 있다.

기존 조도계는 조도 즉 럭스(lux)를 측정한다. 조도란 사전적 정의로 보면 단위 면적당 비추어지는 빛의 밝기이다. 하지만 조도는 사람의 눈이 느끼는 밝기(시감도)를 기준으로 만들어진 물리량이므로 시감도 곡선에 가까운 광감도가 요구되는데, 센서의 광감도가 시감도와 현저하게 다른 경우 시감도를 보정한 측정치가 측정된다. 그에 비해 복사조도는 시감도를 보정하지 않은 에너지 값 즉 물리량이다. 복사조도 값 즉 에너지값과 조도가 일치하지 않는 것은 광원이 가지고 있는 스펙트럼이 각자 다르기 때문이다.

도3과 도4는 LED 색온도와 시감도 곡선을 비교한 것이다[7]. 도3에서 붉은색 곡선이 시감도곡선이며 그 외 곡선은 다양한 제품의 색온도 3000K LED 분광분포 스펙트럼이다. 도4 역시 붉은색이 시감도 곡선이며 그 외 곡선은 색온도 5000K 이상 다양한 제품의 LED 분광분포 스펙트럼이다. 색온도가 높은 경우 시감도 곡선과 조명의 스펙트럼에 많은 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 조도가 같더라도 스펙트럼이 다르다면 다른 복사조도 즉 다른 에너지 값을 가질 수 있다. 이러한 이유로 우리가 같은 500lux로 조명된 문화유산을 감상하더라도 어떤 조명의 경우 더 강한 에너지를 줄 수 있다.



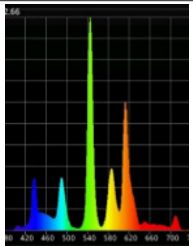
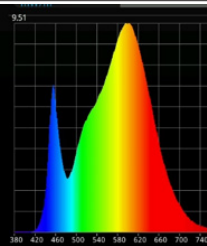
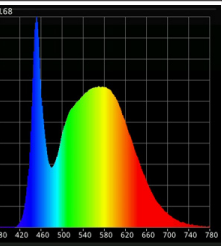
도3. 시감도 곡선과 3000K LED 스펙트럼 비교[7]



도4. 시감도 곡선과 5000K 이상의 LED 스펙트럼 비교[7]

표1은 박물관에서 기존 사용하던 퇴색방지 형광등과 일반적인 LED 조명을 같은 조도에서 분광측색계(MS-350S, UPRtek, Taiwan)를 사용하여 측정, 비교하였다. 조도계에서 측정 조도는 500lux로 동일하나 그 외 값은 각 광원마다 다른 특색을 보여 준다. 표1에서 보면 같은 조도라도 색온도에 따라 스펙트럼에 차이가 있다. 이러한 스펙트럼을 1nm 단위로 나누어 측정한 복사조도의 값은 3종류의 조명에너지 차이를 보여준다.

표 1. 형광등과 LED의 조명 비교 검토

광원의 종류	형광등	LED 3400K	LED 5200K
조도(lux)	500	500	500
색온도(K)	4100	3400	5200
연색성(CRI)	75.2	82.9	80.6
복사조도(mW/m ²)	1496	1664	1873
스펙트럼			

기존 박물관에서 사용하던 조명은 대부분 비슷한 유형의 광원을 가지고 있으므로 조도(lux)가 그 기준이 될 수 있었으나 LED처럼 여러 유형의 빛을 비교해야 하는 경우 생성된 빛의 스펙트럼을 고려하는 것이 필요하다. LED에 대한 기술 개발로 더 높은 효율과 연색성 등을 가진 조명들이 개발되고 있으므로, 분광분포 스펙트럼에서 보여지는 새로운 문제점을 분석하고 LED와 기존 광원 간의 손상 차이에 대한 새로운 접근이 필요하다. Piccablotto 등은 LED가 할로겐 램프보다 문화유산의 퇴색이 더 느릴 수 있지만 색온도(CCT)가 높은 LED는 손상 위험이 더 높을수도 있다는 것을 보여주었다[1].

2. LED의 스펙트럼 비교

표1에서처럼 대부분 LED의 청색광은 색온도와 높은 상관관계가 있지만 모든 LED 조명이 그러한 것은 아니다. 특히 LED가 더 높은 연색성을 얻으려면 흑체복사 스펙트럼과 가깝게 파장을 변환해야 하며, 따라서 청색광이 감소하는 경우가 많다. 그러므로 빛의 양과 에너지에 대하여 본질적으로 관련된 효과를 검토할 때 분광분포 스펙트럼 데이터를 비교 검토하는 것이 중요하다.

최근 LED 조명 중에는 색온도 조절이 가능한 조명들이 등장하고 있다. 표 2,3,4는 색온도 조절이 가능한 각기 다른 연색성을 가진 LED 조명을 대상으로 색온도에 따른 분광분포 스펙트럼과 에너지값 등을 분광측색계를 사용하여 측정한 결과이다.

표2의 조명은 우리가 흔하게 보는 일반적인 조명으로 색온도가 올라갈수록 청색광이 많아지며 연색성이 떨어지고 복사조도가 증가하는 특징을 보였다. 이것은 대부분 LED에서 관찰되는 특징이다.

표2. 색온도에 따른 분광분포 스펙트럼(연색성 약 80~85)

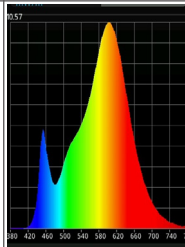
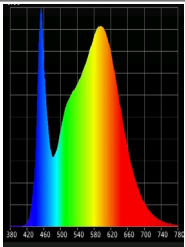
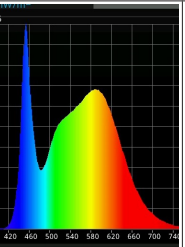
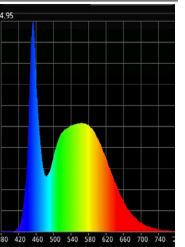
조도(lux)	500	500	500	500
색온도(K)	2928	3988	4752	6248
연색성(CRI)	82	85	84	81
복사조도(mW/m^2)	1501	1529	1543	1562
스펙트럼				

표3. 색온도에 따른 분광분포 스펙트럼(연색성 약 95 이상)

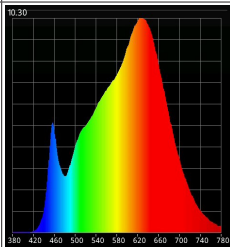
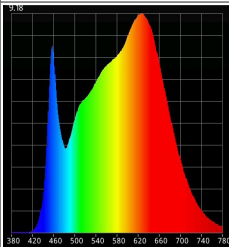
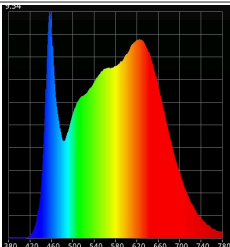
조도(lux)	500	500	500
색온도(K)	3014	4006	5016
연색성(CRI)	96	96	97
복사조도(mW/m^2)	1778	1763	1893
스펙트럼			

표3의 조명은 표2의 조명보다 연색성이 좋은 조명으로 3000K과 4000K에서는 복사조도에 크게 차이가 없으나 5000K에서는 급격한 에너지 증가를 보인다.

표4. 온도에 따른 분광스펙트럼(연색성 약 98이상)

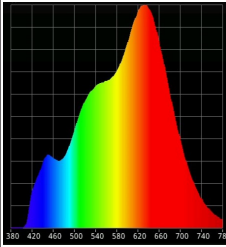
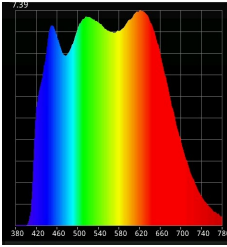
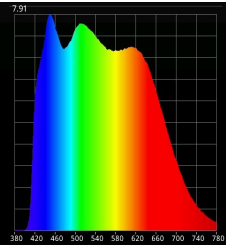
조도 (lux)	500	500	500
색온도(K)	3209	5016	5855
연색성(CRI)	98	98	98
복사조도(mW/m^2)	1862.661	1892.591	1907.254
스펙트럼			

표4의 조명은 연색성이 높은 자연광을 재현한 LED로 분광분포 스펙트럼을 보면 청색광이 특별하게 들어나지 않으며 전 영역에 걸쳐 고른 에너지 분포를 보인다. 아직 많은 곳에서 사용하고 있지는 않으나, LED의 단점으로 생각되던 Cyan(하늘색)에 대한 색재현도 매우 좋으므로, 색이 중요한 문화유산 특히 도자기 등을 조명하기에 좋을 것이다. 그러나 에너지 값을 보면 전 영역에 골고루 분포되어 있어 상당히 높게 측정되는 편이므로 향후 이 부분에 대한 추가 연구가 필요하다. 여기서 주목할 점은 표3과 표4의 조명이 연색성에 있어 큰 차이를 보이지는 않지만 표3의 경우 480nm 영역에서 급격하게 감소하여 색재현에 불리하다는 것이다. 따라서 박물관 조명 선택시 연색성과 함께 분광분포 스펙트럼을 확인해서 특정 영역의 피크가 현저하게 적은 것은 피하는 것이 바람직하다.

3. 새로운 조명 기준에 대한 제안

LED 기술의 발전에 따라 해마다 좋은 조명이 개발되고 있으며 그에 따른 다양한 분광분포 스펙트럼이 등장하고 있다. 따라서 박물관이라는 특수한 공간에서 소장품의 변색에도 안전하며, 소장품의 감상에도 도움이 될 LED 조명에 대한 선택의 기준이 요구되고 있다.

박물관 조명에 대한 연구(Garside et al. 2017)[9]에서는 분광분포 스펙트럼을 기준으로 450nm의 피크가 전체 범위 스펙트럼 방출 높이의 3배를 초과해서는 안 된다고 제안하였다. 현재 미국의 예술 작품 전시 지침에서는 450nm의 피크가 스펙트럼 전체 최대 에너지의 50%를 초과해서는 안 된다고 제시하고 있다(Miller 및 Druzik 2012 등)[3,9,10]. 우리와 비슷한 재질의 문화유산을 가진 나라들의 경우 청색광 스펙트럼의 크기를 명시하거나 연색성 좋고(90 이상), 색온도가 낮은 조명을 사용하도록 권장하고 있다. 좀 더 자세하게 살펴 보면 일본 도쿄국립박물관의 경우

(2024년) LED 광원은 특수연색성(R1-R15의 값이 95 이상), 광원의 흑체 방사선의 궤적으로부터의 편차가 작으며, 400nm 이하의 파장을 제거한 것 등을 기준으로 사용하고 있다. 중국 문화재 보호 산업 표준 문물중심(2003년)에서는 빛에 민감한 소장품의 색온도 기준을 3000K 이하로 하고 있다. 또한 대만 고궁박물관(2023년)의 경우 LED의 색온도는 최대 4,000K 기준으로 낮은 것이 바람직하며, 스펙트럼은 500nm 미만인 청색광의 비율은 15% 이하를 권장하며 최대 20% 이하를 기준으로 하고 있다.

국립중앙박물관에서는 2023년 소장품 보존 환경 기준을 일부 개정하면서 LED 조명에 대하여 새로운 기준을 설정하였다. 서화나 직물 등을 전시할 경우 색온도 3500K 이하, 연색성 90 이상의 조명을 선정하도록 제안하고 있다. 지금까지 나온 연구 결과를 고려할 때, 상당히 보수적으로 선정한 LED 조명 기준으로 볼 수 있다. 이렇게 색온도와 연색성을 기준으로 하고 있는 이유는 현재 시판되고 있는 LED 조명 대부분이 색온도가 낮으면 청색광이 덜 발생하며 특히 연색성이 높고 색온도가 낮을 경우 청색광이 상당히 적게 발생하기 때문이다.

향후 전시 공간의 조명 기준에 대한 연구가 좀 더 진행되어 분광분포 스펙트럼과 변색과의 상관관계가 세부적으로 규명된다면 문화유산에도 안전하면서 관람에 도움이 될 수 있는 새로운 LED 조명 기준이 설정될 수 있을 것이다.

3. 결론

박물관 조명에서 친환경적이며 에너지 절약이란 대명제 앞에 LED는 이제 대체로 자리잡고 있다. 그러나 LED는 지금까지의 조명과 달리 광원과 형광체마다 다른 특색의 스펙트럼을 가지고 있다. 기존 조명들은 비슷한 스펙트럼을 가지고 있으므로 색에 대한 반사, 흡수와 변색에 대한 변수 없이 일정 조도만으로 박물관의 조명 기준을 설정하였다. 그러나 LED의 경우 모든 빛이 동일하지 않다는 것이 빛에 의한 문화유산 손상을 연구할 때 새로운 과제이다. 따라서 박물관에서 사용할 조명을 선정할 때는 이러한 부분 또한 복합적으로 검토되어야 할 것이다. 현재 국립중앙박물관에서는 서화나 직물 등을 전시할 경우 색온도 3500K 이하, 연색성 90 이상의 조명을 선정하도록 제안하고 있다. LED의 기술은 계속 발전하고 있으며 점점 태양광에 가까운 LED도 생산되고 있다. 앞으로는 분광분포 스펙트럼과 문화유산이 가지고 있는 색의 반사와 흡수, 변색과의 상관관계의 세부적 규명이 필요할 것이다. 일반적인 경우 평균적으로 UV와 청색광(파장이 낮고 에너지가 높음)이 적색광(파장이 높고 에너지가 낮음)에 비해 문화유산에 더 많은 변색을 유발할 수 있는 것으로 연구되고 있지만 동양화나 건축물에 대해 상대적으로 민감한 스펙트럼 파장과 잠재적 손

상 사이의 정확한 관계에 대해서는 앞으로 많은 연구가 필요하다. 그러므로 LED의 경우 광원에 따라 스펙트럼이 상당히 다양하므로 전체 복사조도인 에너지 값에 대한 검토도 필요하지만 스펙트럼의 형태에 따른 변색 연구도 다각적으로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Gabriele Piccablotto Chiara Aghemob 등, Study on conservation aspects using LED technology, for museum lighting, *Energy Procedia* **78**, p1347-1352, (2015).
2. 이승은·노현숙, 박물관 전시 공간 조명 환경 기준 연구(Ⅰ)-색온도를 중심으로, *박물관 보존과학* **18**, p65-76. (2017).
3. Emma Richardson, Elizabeth Woolley, Asya Yurchenko & David Thickett, Assessing the Impact of LED Lighting on the Stability of Selected Yellow Paint Formulations, *The Journal of the Illuminating Engineering Society* **16**, NO.1, p67-85, (2020).
4. 김지원, 이유정, 등, LED광원에 의한 회화 전색제의 변색 영향 연구, *Journal of Conservation Science* **34**, p77-85, (2018).
5. 博物館·美術館の展示照明, https://www.ccs-inc.co.jp/guide/column/light_color/vol37.html, (2024).
6. CIE: International Commission on Illumination, Control of Damage to Museum Objects by Optical Radiation, *Technical Report CIE 157*, Vienna, (2004)
7. Further information relating to examination of SPD Curves, https://research.ng-london.org.uk/scientific/spd/?page=info#relative_spectral_sensitivity, (2024)
8. Daniel Garside, Katherine Curran, Capucine Korenberg, Lindsay MacDonald, How is museum lighting selected? An insight into current practice in UK museums, *Journal of the Institute of Conservation* **40**, No. 1, p 3-14, (2017).
9. James R. Druzik and Stefan W. Michalski, Guidelines for Selecting Solid-State Lighting for Museums, J. Paul Getty Trust and Canadian Conservation Institute, (2012)
10. NJ Miller, JR Druzik, *Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Retrofit Lamps*, p 1-20, Northwest National Laboratory, Washington, (2012)

