Global Report

중국의 에너지절약 기반 조명시스템 최적화 및 스마트제어 철도운송 솔루션

1. 개요
2. 조명시스템이 전기소비에 미치는 영향에 대한 문헌연구
3. 광원 분포 최적화 방법론
4. 결과 및 검토_램프배열 최적화 시뮬레이션
5. 결론

KAIA 국토교통 과학기술진흥원

작 성 자 | 박 세 환

1. 개요

약 40여 년 동안 급속한 경제성장을 이룬 중국은 급속한 도시화(urbanization)로 인해 새로운 대응을 준비하고 있다. 특히 중국의 도시철도 시스템은 2012년 35개 도시가, 2016년에는 43개 도시가 도시철도 운송 공사승인을 받으면서 실용적이고 글로벌한 도시로의 진보 관점에서 선진국 도시교통의 주요 모드가 되었다[1]. 이로 인해 제13차 5개년계획에서 도시철도 교통의 주행거리는 총 5,357km를 기록하였다. 이는 연간 1,071km 주행거리를 기록한 제12차 5개년계획보다 거의 3.8배 많은 거리이다[2]. 2020년말 까지 총 2조 위안(3,077억 달러)의 예산을 투자하여 총 지하철 마일리지는 8,000km에 달할 것으로 예상하고 있다. 이는 중국이 무궁무진했던 천연자원이 점차 소진됨에 따라 연구자들과 정책실무자는 지속가능성을 달성하기 위해 기업 자원을 관리하는 최적의 방법을 찾는 데 주력하고 있다[4]. 이에 지하철 엔지니어링에 악영향을 미치는 요인에 대한 불확실성이 커지고 있다. 이로써 전기와 열에너지 수요에 대한 에너지공급을 보장하면서 에너지를 최적화할 수 있는 전반적인 에너지관리 전략이 필요하게 되었다[5]. 지하공간을 보다 효율적이고 유연하며 안전하고 사용자 친화적인 환경으로 전환하려면 위생 및 편안함에 대한 요구사항도 충족해야 한다. 이러한 모든 측면을 감안할 때 거의 모든 공간이 지하에 있다는 것을 고려하면 지하철 네트워크는 매우 높은 에너지 소비자인 셈이다. 아울러 지하공간의 조명 시스템은 전 세계 에너지자원의 상당 부분을 소비하고 있다. 2011년 통계에 따르면, 중국의 지하공간 조명시스템은 선진국 주요 에너지자원의 7.2%를 소비하며 430×10^9Kg의 탄소를 배출하는 것으로 나타났다[5]. 동적 조명시스템이 필요한 교통산업은 많은 에너지를 소비한다. 2014년 Casals 등이 제시한 현장조사결과에 따르면, 조명시스템이 전력에너지 소비의 37%를 차지하는 반면 환기, 에어컨 및 에스컬레이터는 전력에너지 소비의 63%를 차지한다는 것을 발견했다[6]. 대부분의 지하철 철도시스템은 지하에 건설되기 때문에 인공조명은 철도시스템 운영에 필요한 주요 조명자원을 제공한다. 규정에 따르면, 지하철 조명시스템은 지하철 시스템 전체 장비적재량의 14.2~16.1% 이내여야 한다[7]. 그러나 중국교통부가 보고한 2016년 통계자료에 따르면, 중국 내 전체 지하철의 실제 조명에너지 소비량은 20~30%로 나타났다. 지하철의 전기소비량은 베이징, 심천, 상하이가 전체 운영비용의 30% 이상을 차지하며, 이 지역의 연간 에너지 소비량은 약 1억 kWh로 나타났다[8]. 이러한 많은 에너지사용과 이로 인한 탄소배출량이 높기 때문에 에너지를 절약하고 탄소배출을 줄이기 위해 모든 측면에서 조명효율성을 향상시킬 수 있는 방안이 필요하다[9].

2. 조명시스템이 전기소비에 미치는 영향에 대한 문헌연구

지하철을 비롯한 지하 공간 건설은 자연광을 제한받을 수밖에 없다. 따라서 인공조명은 지하철 운영의 주요 원천이 된다. 기존 연구에 따르면 휘도 및 조명, 색온도, 빛 및 어둠의 적응뿐만 아니라 조명환경의 편안함이 전기소비에 영향을 미치는 주요 요인인 것으로 나타났다[10][11]. 전기소비에 영향을 미치는 주요 요인을 간단히 요약하면 다음과 같다:

■ 휘도 및 조명
- 휘도는 cd/m^2(candela/square metre)로 측정되는 조명의 표면발광 강도를 나타내는 물리적 양을 의미한다. 조명은 물체의 조명 정도를 나타내며 lux로 측정된다.
- 지하철역 조명시스템에서 조명은 일반적으로 조명 정도의 정량적 지수로 채택된다.

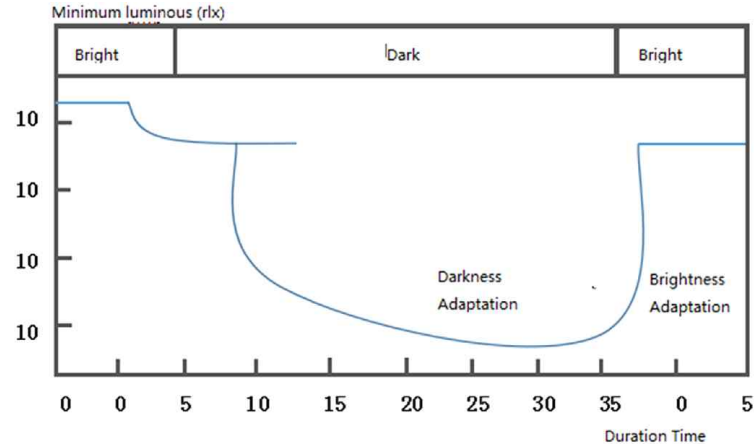
■ 색 온도
- 색 온도는 조명시스템의 기능과 예술적 효과의 조합으로 조명기능은 승객의 편안한 조명환경을 제공해야 한다.
- 지하철 주행구간에서는 자연색 온도(약 4,000K)를 유지하는 것이 바람직하며, 지하철 플랫폼 림은 약 5,700K의 색 온도를 유지해야 한다. 6,500K 이상의 광원은 상쾌하고 지하 상업 활동에 적한 것으로 알려져 있다[12].

■ 눈부심

- 눈부심은 시야에서 불편한 조명분포 또는 시공간에서 휘도의 날카로운 대조를 말하며, 시각적 불편함을 유발하고 물체의 시야를 손상시킬 수 있다. 휘도가 비례적으로 분산되고 대비가 날카로워지면 조명시스템이 불쾌한 방향감각을 발생하게 된다.
- 이러한 불쾌감은 광원의 배경 휘도를 증가하거나 표면 휘도를 감소시킴으로써 해소할 수 있으며, 광원의 휘도, 수량, 위치 및 표면 크기도 조정할 수 있다.

■ 밝기 및 어둠 적응

- 어둠에서 빛으로 시각적 적응을 밝기 적응 이라고 하며, 그 반대는 어둠 적응 이라고 한다. 이들은 모두 승객에게 불편함을 유발할 수 있으며, 그 결과 입구 또는 출구 구역에서 많은 사고가 발생하기도 했다.
- 밝기와 어둠 적응을 위한 변화곡선을 [그림 1]에 나타낸다. 입구지역에서는 과도조명을 설계하여 눈의 적응을 용이하게 하고 사고발생을 줄일 수 있다[13].



* 자료 : XiaoDong Lai et al, “Energy saving based lighting system optimization and smart control solutions for rail transportation: Evidence from China”, Results in Engineering 5 (2020) 100096, p.2.

[그림 1] 밝기와 어둠 적응을 위한 변화곡선

3. 광원 분포 최적화 방법론

3.1. 입구/출구 지역(Entrance/exit area)

지하공간과 지상 공간 사이의 과도기 영역인 지하철 입구와 출구 영역은 비교적 지하공간에서 지상 공간으로의 빛 적응이 약 1분정도로 매우 짧은 구간이다. 따라서 입구와 출구 영역에서 광원의 적응은 자연광과 인공광을 결합하여 설계하되, 가능한 자연광이 주요광원이 되어야 한다. 자연채광이 부적당한 경우 스포트라이트(spotlights)와 다운라이트(down-lights)와 같은 인공조명을 보충제로 추가할 수도 있다. 지하철 입구와 출구 영역에 자연광을 용이하게 채광하기 위해 유리와 같은 광 전달이 강력한 건축자재를 이용한다. 이처럼 우선적으로 자연광 채광 외에도 입구와 출구 영역에서 램프의 방향성 효과를 살려서 설계할 필요가 있다. 이때 램프의 배열은 조명전환 기간 동안 승객이 방향감각을 잃지 않도록 설계해야 한다.

3.2. 역 홀 구역(Station hall area)

역 홀은 넓고 다양한 기능을 갖는 영역이기 때문에 각각의 서로 다른 기능들을 다양한 유형의 램프를 혼합한 3차원 조명 레이아웃을 이용하여 설계할 필요가 있다. 또한, 과도기 영역(지하철의 입구와 출구

사이 영역)의 조명은 방향성이 있어야하며, 이러한 링크 역할을 통해 보다 더 조화로운 조명 레이아웃을 구현하는 데 초점을 맞출 필요가 있다. 이러한 영역은 명확한 분할계층과 잘 연결될 수 있도록 홀 영역의 표준조명은 100~200lux가 적당하다. 아울러 조명의 균일성(최소조명과 최대조명 사이의 간격)은 0.7보다 낮아서는 안 되며, 권장 값은 0.8입니다. 색 온도는 3,000~6,000K 사이가 적당하다[14].

3.3. 플랫폼 영역(Platform area)

플랫폼 영역은 대기 공간과 출입구 영역을 연결하는 과도기 공간으로 쾌적한 대기환경을 조성하기 위해 광원의 조명과 색 온도를 적절히 조정해야 한다. 아울러 안전을 위해 플랫폼과 열차운항영역 사이의 차폐 도어(스크린 도어)는 기본 조명으로 설정해야 한다. 예를 들어, 차폐 도어의 상부를 형광램프로 설계함으로써 승객은 사고를 방지하기 위해 플랫폼과 열차 사이의 경계를 알 수 있게 된다.

4. 결과 및 검토_램프배열 최적화 시뮬레이션

에너지 절약을 위한 최적의 조명시스템을 구현하기 위해서는 다음과 같이 전체 조명시스템 배열을 검토할 필요가 있다:

- 첫째, 지하철역 실내공간은 길이 80m, 폭 30m, 높이 5m의 실제 공간이 필요하며 이에 따라 천장, 바닥, 벽 및 작업 표면의 시공재료가 정해진다. 아울러 게이트 머신(gate machine), TVM(Ticket Vending Machine : 티켓 자동판매기), 보안점검 및 직원서비스 영역 등 해당 위치에 따른 시공재료가 결정된다. 기둥과 같은 일부 구조물은 필요에 따라 상업적 목적을 가진 영역으로 구조를 쉽게 변경할 수 있도록 벽지와 붙여넣기를 할 수도 있다. 따라서 이러한 구조의 표면재료는 종이를 이용하는 것이 바람직하다. 기타 다른 구조물의 재료는 일반적으로 사용되는 재료를 이용한다.
- 둘째, 조명장비 유형 및 공간 레이아웃을 설정한다. (표 1 참조) 지하철 역 홀의 조명 및 색온도 요구사항에 따라 출입구, TVM, 보안점검, 과도기 영역 등 주요지역에 지능형 조명장비를 배치하여 주요 조명 요구사항을 충족할 수 있도록 한다.

<표 1> 메트로 홀 설정목록

No.	수량(QTY)	영역(Areas)	No.	수량(QTY)	영역(Areas)
1	1	보안 검사(오른쪽)	6	1	보안 검사(왼쪽)
2	1	보안 검사(왼쪽)	7	1	안내실(오른쪽)
3	1	출구 게이트(오른쪽)	8	1	안내실(왼쪽)
4	2	출구 게이트(왼쪽)	9	1	입구 게이트
5	1	티켓 자동 판매기(오른쪽)	-	-	-

* 자료 : XiaoDong Lai et al, “Energy saving based lighting system optimization and smart control solutions for rail transportation: Evidence from China”, Results in Engineering 5 (2020) 100096, p.8.

- 셋째, 램프 또는 광원에 의해 빛이 방출되어 공간에 분배되는 방법을 표시하는 데 사용되는 광 분포곡선(Light distribution curve)을 통해 인공지능형 조명을 설계할 필요가 있다. 실제로 광 분포곡선은 램프의 조명 강도 및 광 분포를 묘사하며, 이는 기본적으로 지정된 공간 내에서 분포상태를 보여준다. 이 방법은 램프의 조명 강도를 다른 방향으로 기록하고 조명 플럭스, 광원 수량, 전력계수, 램프의 크기 및 효율성을 반영하는 데 사용되었다. 지능형 광 분포곡선은 램프의 유형(송신기의 형상, 투명부품, 광원의 모양 및 위치)과 밀접하게 연관된다. 지능형 광 분포곡선을 나타내

는 방법은 세 가지(극좌표 방법, 직사각형 좌표 방법 및 iso-candela 곡선 방법)가 있다.

5. 결론

이 연구에서는 지하철 운영에서 조명시스템에 대한 에너지효율 개선을 검증하는 것을 목표로 환경적 요구사항, 지하철역 조명시스템에 영향을 미치는 주요요인 및 지능형 조명기술의 동향에 대해 설명하였다. 이를 위해 지하철역 조명환경에 영향을 미치는 주요요인에 따라 다양한 영역의 조명 요구사항을 분석하였다. 특히 지하철 역 홀 영역의 에너지 성능을 확인하기 위해 지능형 조명 제어기술을 채택하여 에너지 효율성을 검증하였다. 최근 수십 년 동안 정책입안자, 산업 엔지니어 및 연구자들은 이산화탄소 배출 및 저 에너지에 대해 관심을 집중시키고 있다. 이 연구는 지능형 조명시스템의 합리적인 사용을 통해 램프의 수명을 연장하고 운영인력의 작업효율성을 향상시킬 수 있어 효과적으로 지하철역 조명의 에너지소비를 줄일 수 있다는 결론을 도출하였다. 이를 통해 기존의 조명 제어방법에 비해 지능형 조명 제어기술은 하중, 전류 테스트 및 스위치 램프를 제어하는 데 분명한 이점이 있음을 확인하였다. 그 결과, 지하철의 조명제어 및 유지보수 관리가 더욱 효율적이고 간단해졌다.
중국의 천연자원이 점차 고갈됨에 따라 지하철 시스템에서의 에너지소비가 주목받고 있다. 이에 도심지역의 교통인프라 및 조명시스템의 에너지개선에 대한 포괄적인 탐구시스템이 필요하다. 이 연구에서는 중국 난창시의 에너지절약 잠재력을 평가하고 효율성 개선을 위해 지하철 시스템의 조명운영 및 지능형 에너지관리시스템 사례연구를 제시하였다. 이 연구결과는 국내 대도시의 교통인프라 특히 지하철 조명시스템의 에너지개선 관련 정책에 밴치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

[1] C.F. Huang, X. Yuan, Research on the role of urban rail transit in promoting economic development, Procedia Eng. (21) (2011) 520-525.
[2] Huaon. Market Forecast of China's urban rail traffic construction in 2017.
<http://www.huaon.com/story/304082>
[3] China Association of Metros, Statistics and Analysis of Chinese urban mass in 2015, Urban Rapid Rail Transit 8 (4) (2016) 7-11.
[4] C.H. Lee, K.J. Wu, M.L. Tseng, Resource management practice through eco-innovation toward sustainable development using qualitative information and quantitative data, J. Clean. Prod. 202 (2018) 120-129.
[5] K. Powell, Panel4: Lessons from the Field Solid-State Lighting Program, U.S. Department of Energy, 2011.
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/powell_lessons_sslmiw>
[6] M. Casals, M. Gangolells, Núria Forcada, M. Macarulla, A. Giretti, A breakdown of energy consumption in an underground station, Energy Build. 78 (4) (2014) 89-97.
[7] G.Y. Mu, L.M. Yin, Wen, W. Ma, Analysis of energy consumption of power systems of metro station and study on the tactics for saving energy, J. Shanghai Electr. Technol. 3 (4) (2010) 44-49.
[8] Y. Nie, Energy consumption and energy-saving of lighting system at subway stations, China Stand 8 (2017) 29-30 (in Chinese).
[9] J. Zuo, Z.Y. Zhao, Green building research-current status and future agenda: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 30 (2) (2014) 271-281.
[10] State Bureau of Technical Supervision (SBTS), Standard for Lighting Design of Buildings, China Architecture & Building Press, Beijing, 2004 (Vol. GB/5880034-2004) 2004.

[11] China Academy of Building Research (CABR), Evaluation Method for Visual Environment, China Standards Press, Beijing, 2009 (Vol. GB/T12454-2008).
[12] Ismail Kıyak, Bülent Oral, V. Topuz, Smart indoor LED lighting design powered by hybrid renewable energy systems, Energy Build. 148 (2017) 342-347.
[13] I. Chew, V. Kalavally, N.W. Oo, J. Parkkinen, Design of an energy-saving controller for an intelligent led lighting system, Energy Build. 120 (2016) 1-9.
[14] China Academy of Building Research (CABR), Evaluation Method for Visual Environment, China Standards Press, Beijing, 2009 (Vol. GB/T12454-2008).

<원문제목> Energy saving based lighting system optimization and smart control solutions for rail transportation: Evidence from China
<원문출처> Results in Engineering 5 (2020) 100096