

고압나트륨램프에서 LED램프로 터널조명등 교체에 따른 전력사용량 및 조도변화 분석

이규필^{1*} · 김정흠²

¹정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 전임연구원

Analysis of power usage and illuminance changes due to the replacement of tunnel lighting source from high pressure sodium lamp to LED

Gyu-Phil Lee^{1*} · Jeong-Heum Kim²

¹Senior Researcher, Dept. of Infrastructure Safety Research, KICT

²Researcher, Dept. of Infrastructure Safety Research, KICT

*Corresponding Author : Gyu-Phil Lee, freely@kict.re.kr

Abstract

Low-pressure sodium lamps, high-pressure sodium lamps, and fluorescent lamps are mainly used for tunnel lighting in Rep. of Korea, which accounts for the highest percentage in the tunnel maintenance costs. Therefore, tunnel lights are being replaced by LED lamp that have advantages with respect to low power consumption and sustainability. To analyze the effect of replacement high pressure sodium lamp with LED lamp, illumination and monthly power usage per year have been investigated for 10 tunnels. The usage of LED lamp results in illumination improvement from 27.9% to 490% and power saving around average 47.1%.

Keywords: Tunnel lighting, Power usage, Illumination, Light emitting diode (LED), High pressure sodium lamp

초 록

터널구조물의 특성상 터널조명은 일반 도로의 조명과 달리 주간에도 조명이 필요하므로, 터널 유지관리 비용 가운데 터널조명을 위한 전력요금은 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 유지비용 절감 등을 위하여 터널조명을 낮은 소비전력, 장수명 등의 장점이 있는 LED램프로 교체 중에 있다. 본 연구에서는 기존 터널조명이 고압나트륨램프인 10개소 터널을 대상으로 터널조명 광원을 LED램프로 교체 시 효과 분석을 위하여, 광원 교체 전·후 터널 조도측정결과 및 1년간의 월별 전력사용량을

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
23(4)211-220(2021)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.4.211>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received May 25, 2021

Revised June 24, 2021

Accepted June 24, 2021



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2021, Korean Tunnelling and Underground Space Association

조사하였다. 터널조명 광원을 고압나트륨램프에서 LED램프로 교체 후 조도는 27.9~490% 향상되었으나, 터널조명용 전력사용량은 평균 47.1% 감소한 것으로 나타났다.

주요어: 터널조명, 전력사용량, 조도, 발광다이오드(LED), 고압나트륨램프

1. 서론

터널 조명은 터널 이용자가 항상 안전하고 불안감 없이 통행할 수 있도록 조명을 하는데 목적이 있으며, 터널 이용자의 시각에 일어나는 복잡한 시각 특성의 변화 및 심리적 반응과 터널 고유의 환경 조건을 고려하여, 안전하고 쾌적한 운전 환경 제공을 위하여 터널조명 설치하여야 한다(Lee and Kim, 2019).

폐쇄적 공간특성을 갖는 터널구조물의 특성상 터널조명은 일반 도로의 조명과 달리 주간에도 조명이 필요하므로, 계획단계에서 터널 입구 부근의 시야상황, 구조, 교통, 환기 등을 고려하여야 한다. 또한 운전자에게 시각적인 정보를 제공하고 안전하게 주행할 수 있도록 충분한 밝기가 제공되어야 한다(Jeong et al., 2011).

도로설계 편람 제6편 터널에서는 터널 조명용 광원은 조명효과를 적절히 얻을 수 있고, 경제적인 면이나 유지보수 및 램프의 호환성과 구입이 용이한 것을 사용한다. 터널조명에 이용되는 광원으로는 형광램프, 고압나트륨램프, 저압나트륨램프, LED램프, 메탈할라이드램프, 무전극램프 등이 있다. 그러나 각각의 구조와 형상, 발광주파수에 차이가 있고 동시에 용량의 대소, 온도특성, 광색 등 각각의 특색을 가지고 있기 때문에 광원의 선정에 있어서는 터널의 규모, 교통량, 구조, 통행차량의 종류, 환경, 유지보수의 정도에 따라서 설계자가 선택하도록 규정하고 있다.

터널은 공용 중 상시 인공조명을 사용해야하는 특성으로 에너지 소비가 가장 많이 발생하는 도로 공간이며, 도로터널 유지 관리비의 약 60%가 인공조명 전기요금으로 사용되고 있다(Lee and Lee, 2013).

전류를 가하면 빛을 발생시키는 반도체소자인 발광다이오드(light emitting diode, LED)는 낮은 소비전력, 장수명 등의 장점이 있으며(Moretti et al., 2016), 따라서 터널 조명 전력사용량 감소를 통한 도로터널 유지관리 비용절감 등을 위하여, 고압나트륨램프, 저압나트륨램프, 형광램프, 무전극램프 등 기존 터널조명 광원을 LED램프로 교체 중에 있다.

따라서 본 연구에서는 터널조명 광원을 LED램프로 교체 시 효과 분석을 위하여 기존 터널조명이 고압나트륨램프인 ○○터널(상) 등 10개소 터널에 대하여, LED램프 교체 전·후 1년간의 월별 전력사용량 및 터널 조도측정 결과를 조사/분석하였다.

2. 터널조명의 분류

터널조명은 터널 구간을 접속부, 경계부, 이행부, 기본부 및 출구부 등으로 구분되며, 각 구간별 휘도는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 변화한다(RABT, 2006). 도로안전시설 설치 및 관리지침에서는 터널 내 구간별 조명의

설치 기준 등을 다음과 같이 규정하고 있다.

(1) 기본부(interior zone)

운전자가 전방의 장애물을 발견하는데 필요한 최소 밝기를 제공하기 위한 기본적인 조명으로(Lee and Kim, 2020), 주간의 터널 기본부에서의 평균노면휘도(Lin)는 정지거리(설계속도) 및 교통량 등에 따라 3~11 Lin [cd/m²] 을 확보해야 한다.

(2) 경계부(threshold zone) 및 이행부(transition zone)

입구부 조명은 경계부, 이행부로 구성되며, 터널 입구 부근의 야외휘도, 설계속도, 터널의 길이, 교통량 등을 고려하여야한다.

(3) 터널 입구 접속부(approach zone) 및 출구부(exit zone)

소형의 차량에 적절한 직접조도를 제공하고, 터널을 나온 후 후사경으로 터널 내의 상황을 볼 수 있도록 출구부에도 기본부와 같은 조명을 제공해야 한다.

또한 장대터널의 출구접속부에서 운전자에게 위험할 수 있는 상황이 예상되는 경우 낮 동안의 출구부 조명은 휘도를 정지거리 이상의 구간에 걸쳐 점차 증가시킨다. 휘도는 기본부 휘도에서 시작하여 출구 접속부 전방 20 m 지점의 휘도가 기본부 휘도의 5배가 되도록 단계적으로 상승시킨다.

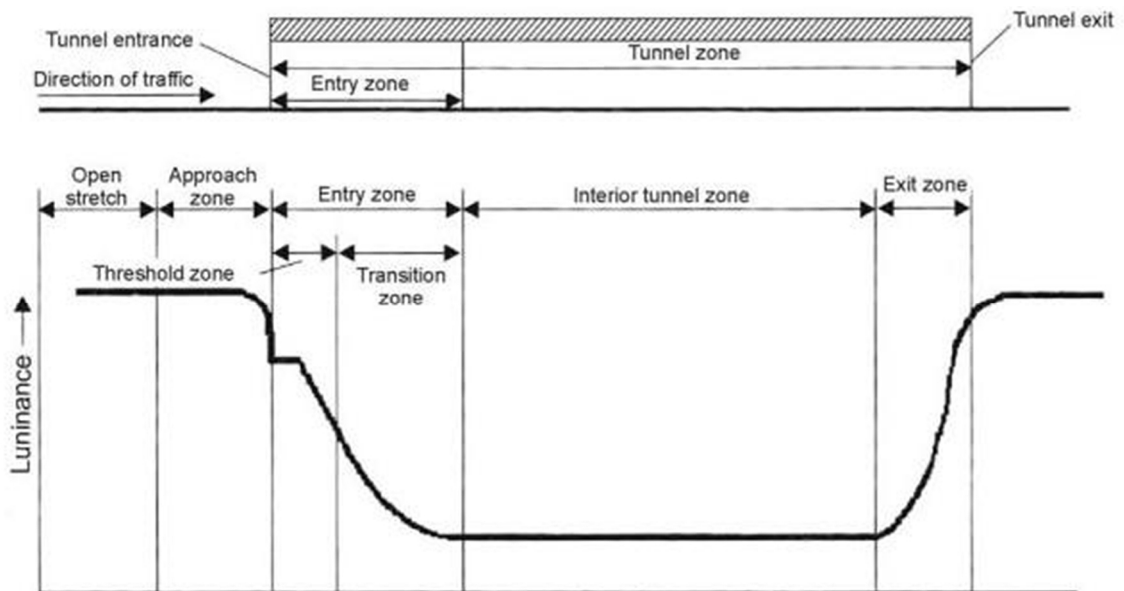


Fig. 1. Luminance reduction curve

3. 고압나트륨램프 및 LED램프 조도 및 전력사용량 조사

3.1 분석대상 터널

터널 조명 광원을 고압나트륨램프에서 LED램프로 교체 시 조도 및 전력사용량 변화를 분석하기 위하여 본 연구에서는 ○○터널(상), (하) 등 10개소 터널(총 연장 9,645 m)의 광원 교체 전·후 조도측정결과 조사하였다.

조도측정은 터널별 상·하행선에서 각각 실시하였으나, 상·하행 터널의 조명을 위한 전력은 일반적으로 하나의 공통 수전설비를 통하여 공급되므로, 상·하행 터널의 전력사용량을 조사하였다. 조도측정결과는 상행, 하행에서 구간별로 측정된 결과의 평균값을 토대로 ○○터널 등 5개소로 분석하였으며, 대상터널의 연장 등 제원 현황은 Table 1과 같다.

Table 1. List of tunnels to be analyzed

Classification	Total length (m)	No. of lanes	Year of completion
○○ Tunnel	1,835	2	2002
△△ Tunnel	1,212	2	2001
□□ Tunnel	2,720	2	2004
◇◇ Tunnel	1,428	2	2007
☆☆ Tunnel	2,450	2	2004

3.2 터널 구간별 조도측정 결과

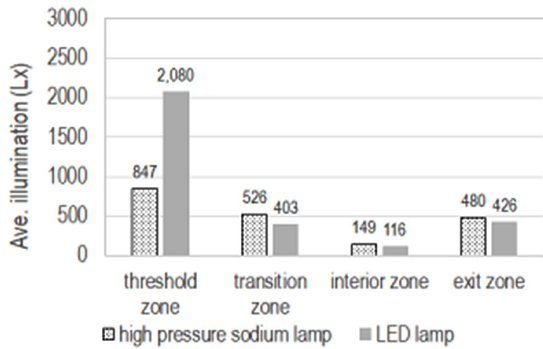
도로터널 조명설계는 조도기준에서 휘도기준으로 변경되었으나, 고가의 휘도측정 장비 구입 및 운영 등의 문제로 현장에서는 계측관리가 용이한 조도측정 장비를 활용하여, 측정된 조도를 휘도로 환산하는 방법으로 관리하고 있다(Lee and Kim, 2020).

따라서 본 연구에서는 고압나트륨램프에서 LED램프로 교체 전·후의 조도측정결과를 조사·분석 하였다. 터널 내 모든 조명등 점등조건하에서 조도 측정을 실시하였다.

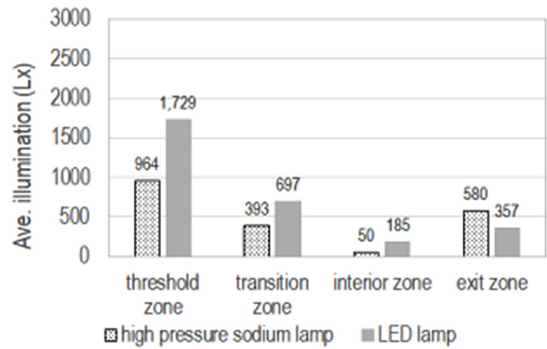
각 터널별로 경계부 3~5개소, 이행부 3~8개소, 기본부 1~10개소, 출구부 1~4개소에서 측정된 조도의 평균값을 토대로 분석하였으며, 측정 결과는 Fig. 2(a)~(e)와 같다.

Fig. 2(a)~(e)와 같이 광원이 고압나트륨램프인 경우 경계부, 이행부 및 기본부 조도는 각각 637~975 Lx, 211~526 Lx, 20~149 Lx이며, 출구부 조도는 459~580 Lx인 것으로 나타났다.

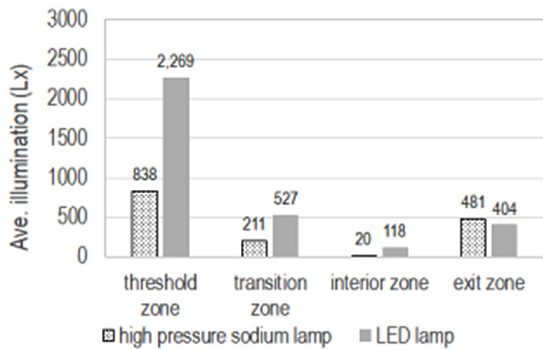
또한 광원이 LED램프인 경우 조도는 경계부 1,729~2,500 Lx, 이행부 403~697 Lx, 기본부 116~186 Lx, 출구부 357~426 Lx인 것으로 나타났다.



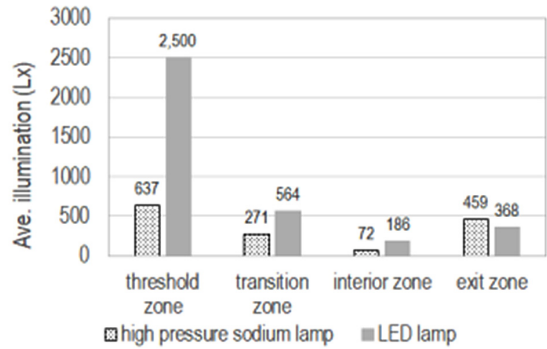
※ Measurement date: high pressure sodium lamp - Jun. 2016
LED lamp - Apr. 2020
(a) ○○ Tunnel



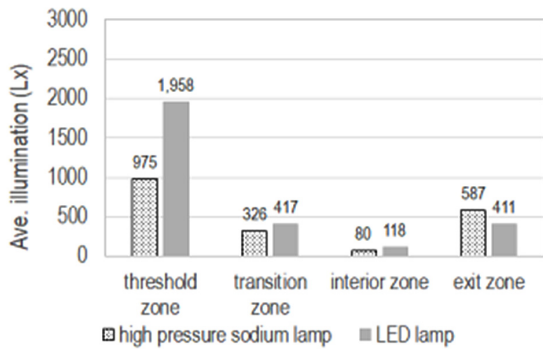
※ Measurement date: high pressure sodium lamp - Jun. 2015
LED lamp - Jun. 2020
(b) △△ Tunnel



※ Measurement date: high pressure sodium lamp - Sep. 2017
LED lamp - Sep. 2019
(c) □□ Tunnel



※ Measurement date: high pressure sodium lamp - Sep. 2017
LED lamp - Dec. 2018
(d) ◇◇ Tunnel



※ Measurement date: high pressure sodium lamp - May. 2017
LED lamp - Apr. 2020
(e) ☆☆ Tunnel

Fig. 2. Average illumination for a part

3.3 조명램프 교체 전후 전력사용량

본 연구에서는 터널조명등 광원교체 효과 분석을 위하여, 고압나트륨램프를 LED램프로 교체 전·후 각 1년간 전력사용량을 조사하였다(Table 2 참조).

Table 2에서 보이는 바와 같이 터널조명 광원이 고압나트륨램프인 경우 1년간 전력사용량은 673,114~969,800 kW (평균 777,671 kW), LED램프인 경우 1년간 전력사용량은 259,750~569,528 kW (평균 411,488 kW)인 것으로 나타났다.

Table 2. Power usage for a year (unit: kW)

	○○ Tunnel		△△ Tunnel		□□ Tunnel		◇◇ Tunnel		☆☆ Tunnel		Average	
	High pressure sodium lamp	LED lamp	High pressure sodium lamp	LED lamp	High pressure sodium lamp	LED lamp	High pressure sodium lamp	LED lamp	High pressure sodium lamp	LED lamp	High pressure sodium lamp	LED lamp
Jan.	56,275	31,390	37,207	21,274	53,760	43,120	47,394	35,247	52,150	19,600	49,357	30,126
Feb.	57,136	31,847	52,474	24,701	63,680	46,256	52,485	37,732	53,200	22,650	55,795	32,637
Mar.	54,778	29,176	56,477	25,246	57,840	43,320	50,040	36,303	57,700	17,250	55,367	30,259
Apr.	60,543	32,504	65,678	31,615	60,960	48,032	57,434	44,226	67,750	24,600	62,473	36,195
May.	78,235	34,813	66,130	32,083	66,240	51,200	59,588	45,770	68,950	25,050	67,829	37,783
Jun.	82,055	36,359	66,622	36,005	86,240	51,520	62,961	49,010	72,150	23,300	74,006	39,239
Jul.	72,773	33,760	62,062	33,367	98,560	51,520	58,035	46,235	68,800	22,350	72,046	37,446
Aug.	74,890	37,976	61,639	35,062	103,360	51,256	63,443	43,747	67,400	25,650	74,146	38,738
Sep.	71,437	33,915	66,494	31,193	93,200	47,664	63,345	40,233	67,050	21,150	72,305	34,831
Oct.	62,293	30,629	62,134	26,662	101,040	45,800	56,405	37,789	62,700	20,250	68,914	32,226
Nov.	64,027	32,340	61,414	26,110	97,600	50,480	53,532	36,273	62,600	19,950	67,835	33,031
Dec.	55,981	28,273	42,638	27,552	87,320	39,360	48,452	31,752	53,600	17,950	57,598	28,977
Σ	790,423	392,982	700,969	350,870	969,800	569,528	673,114	484,317	754,050	259,750	777,671	411,488

4. 광원 교체 효과 분석

4.1 조도변화 분석

고압나트륨램프에서 LED램프로 교체 시 조명 구간별 조도향상 비율은 Table 3과 같다.

Table 3에서 보이는 바와 같이 LED램프로 교체 후 경계부 조도는 79.4~292.5%의 비율로 모든 터널에서 조도가 향상되었으며, 이행부 및 기본부 조도는 ○○터널을 제외하고 이행부 27.9~149.8%, 기본부 47.5~490% 향상된 것으로 조사되었다.

Table 3. Illumination improvement by the replacement of tunnel lighting

	Threshold zone	Transition zone	Interior zone	Exit zone
○○ Tunnel	145.6%	-23.4%	-22.1%	-11.3%
△△ Tunnel	79.4%	77.4%	280%	-38.4%
□□ Tunnel	170.8%	149.8%	490%	-16%
◇◇ Tunnel	292.5%	108.1%	158.3%	-19.8%
☆☆ Tunnel	100.8%	27.9%	47.5%	-30%

출구부 조도는 LED램프로 교체 후 모든 터널에서 11.3~30% 비율로 감소한 것으로 조사되었다.

터널조명등을 저압나트륨램프에서 LED램프로 교체한 경우에도 출구부 조도가 감소한 것으로 나타났으며 (Lee and Kim, 2020), 이는 LED램프 교체 시 휘도기준으로 개정된 터널 조명설계기준 반영에 의한 것으로 판단된다.

4.2 전력사용량 변화 분석

고압나트륨램프에서 LED램프로 터널조명 광원 교체 전·후의 1년간 터널조명용 전력사용량은 Table 4 및 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 ○○터널 50.3%, △△터널 49.9%, □□터널 41.3%, ◇◇터널 28.0%, ☆☆터널 65.6% 각각 감소한 것으로 나타났다.

터널 연장 100 m당 전력사용량은 고압나트륨램프의 경우 30,778~57,836 (kW/year), LED램프의 경우 10,602~33,916 (kW/year)인 것으로 나타났으며(Fig. 4 참조), 평균 전력사용량은 고압나트륨램프 40,315 (kW/year), LED램프 21,332 (kW/year)로 광원을 LED램프로 교체 시 평균 전력사용량 감소율은 47.1%이다.

Table 4. Reduction rate of power usage for a year

	High pressure sodium lamp	LED lamp	Reduction rate
○○ Tunnel (L: 1,835 m)	790,423 kW	392,982 kW	50.3%
△△ Tunnel (L: 1,212 m)	700,969 kW	350,870 kW	49.9%
□□ Tunnel (L: 2,720 m)	969,800 kW	569,528 kW	41.3%
◇◇ Tunnel (L: 1,428 m)	673,114 kW	484,317 kW	28.0%
☆☆ Tunnel (L: 2,450 m)	754,050 kW	259,750 kW	65.6%
Total	3,888,356 kW	2,057,447 kW	47.1%

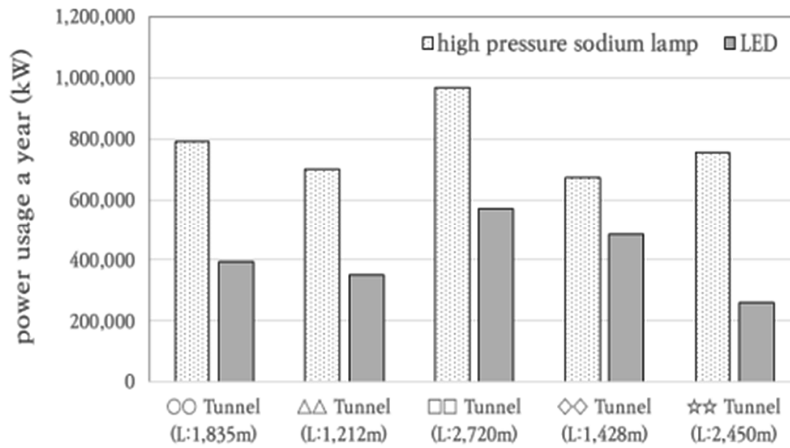


Fig. 3. Power usage a year

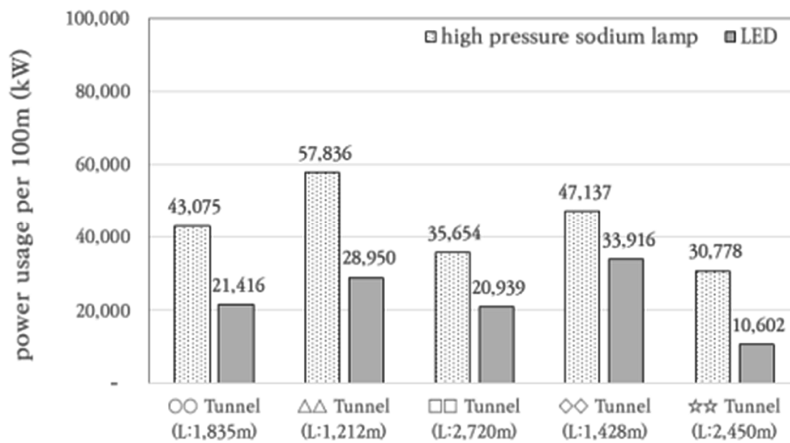


Fig. 4. Power usage per 100 m for a year

Lee and Kim (2020) 연구에 따르면 기존 터널조명 광원이 저압나트륨램프인 터널 8개소에서 광원을 LED램프로 교체 시 평균 전력사용량 감소율은 40.7%로 나타났다. 따라서 기존 터널조명 광원이 고압나트륨램프인 경우 LED램프로 교체 시 평균 전력사용량 감소효과가 더 높은 것으로 판단된다.

월 전력사용량은 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 광원이 고압나트륨램프인 경우 6월 455,509 kW의 최대 전력사용량을 기록하였으며, 이는 최소 전력사용량(1월) 312,164 kW 대비 약 46% 많이 사용한 것으로 나타났다.

광원이 LED램프인 경우 5월에 243,475 kW의 최대 전력사용량을 기록하였으며, 이는 최소 전력사용월 12월 전력사용량 172,701 kW 대비 약 41% 많이 사용한 것으로 나타났다.

OO터널 등 5개 터널의 조명등을 LED램프로 교체 후 하절기(5~10월) 전력사용량은 220,263 kW, 동절기(11~4월) 전력사용량은 191,225 kW로 하절기 전력사용량은 동절기 대비 약 15.2% 높은 것으로 나타났다.

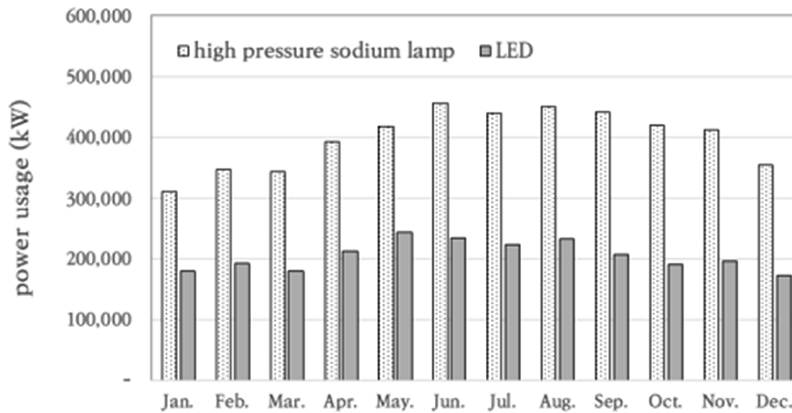


Fig. 5. Monthly power usage

5. 결론

본 연구에서는 LED램프로 터널조명 광원 교체에 따른 조도 및 전력사용량 개선 효과 분석을 위하여, 조명광원을 고압나트륨램프에서 LED램프로 교체한 ○○터널(상) 등 10개소 터널의 광원 교체 전·후 조도 및 전력사용량을 조사/분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. LED램프로 광원 교체 후 경계부 조도는 79.4~292.5%, 이행부 및 기본부 조도는 ○○터널을 제외하고 각각 27.9~149.8%, 47.5~490% 향상되었으나, ○○터널(상) 등 10개소의 출구부 조도는 감소하였다. 이는 분석 대상 10개소 터널 모두 터널조명 설계기준 개정 이전 준공된 터널로 광원 교체 설계 시 개정된 터널조명 설계기준 적용에 기인한 것으로 판단된다.
2. 터널조명 광원을 LED램프로 교체 시 터널 내 조도는 향상되었으나, 터널조명 광원을 고압나트륨램프에서 LED램프로 교체 후 1년간 터널조명용 전력사용량은 평균 47.1% 감소하였으며, 터널 연장 100m당 전력사용량은 터널조명 광원이 고압나트륨램프인 경우 30,778~57,836 kW, LED인 경우 10,602~33,916 kW인 것으로 나타났다.
3. 터널조명 광원을 LED로 교체 시 평균 전력사용량 감소율은 기존 터널조명 광원이 고압나트륨램프인 경우 47.1%, 저압나트륨램프인 경우 40.7%로 기존 터널조명 광원이 고압나트륨램프인 경우 전력사용량 감소효과가 더 높은 것으로 판단된다.
4. 전력사용량은 기상조건 및 계절별 일조시간 등의 영향을 받으며, 터널조명 광원이 LED램프인 경우 최소 전력사용월인 12월 대비 최대 전력사용월 5월에 약 41% 많은 전력을 사용하며, 동절기(11~4월) 대비 하절기(5~10월)에 약 15.2% 많은 전력을 사용하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 “2020년 터널관리시스템 운영”의 일환으로 작성되었습니다.

저자 기여도

이규필은 연구 개념 및 설계, 원고 작성을 하였고, 김정흠은 데이터 수집 및 데이터 분석을 하였다.

References

1. Jeong, M.S., Joo, J.S., Jeong, I.Y., Song, K.D. (2011), “A basic study on the location of mirror reflector system to improve illumination environment”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 5, pp. 385-393.
2. Lee, G.P., Kim, J.H. (2019), “Analysis of tunnel lighting power usage between low-pressure sodium lamp and LED”, *Proceedings of the KSCE 2019 Convention Conference & Civil Expo*, Pyeong Chang, pp. 416-417.
3. Lee, G.P., Kim, J.H. (2020), “Effect of tunnel lighting replacement on power usage and illumination improvement: replacing low pressure sodium lamp with LED”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 22, No. 2, pp. 185-196.
4. Lee, M.A., Lee, D.H. (2013), “A study on effects of landscape design of road tunnel portal to interior lighting of tunnels”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 5, pp. 497-504.
5. Moretti, L., Cantisani, G., Mascio, P.D. (2016), “Management of road tunnels: construction, maintenance and lighting costs”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 51, pp. 84-89.
6. RABT Road and Transportation Research Association Working Group Traffic Routing and Road Safety (2006), “Regulations for the equipment and operation of road tunnels”, Edition 2006, pp. 52-53.