

터널 조명등 교체에 따른 전력사용량 및 조도 개선 효과: 저압나트륨램프 LED로 교체

이규필^{1*} · 김정흠²

¹정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원

²비회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 전임연구원

Effect of tunnel lighting replacement on power usage and illumination improvement: replacing low pressure sodium lamp with 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 etc are mainly used tunnel lighting in Rep. of Korea. Power rates for tunnel lighting are known to account for the highest percentage in the tunnel maintenance costs. Therefore, tunnel lights are being replaced by LED that have advantages such as low power consumption and longevity. To analysis effect of replacement low pressure sodium lamp with LED, illumination and monthly power usage for a year are investigated for 8 tunnels. Power usage for tunnel lighting is decreased by 26.1% to 59.6%, and illumination is increased by 34.1% to 293% replacing low pressure sodium lamp with LED.

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

초 록

국내 터널조명에는 저압나트륨램프, 고압나트륨램프, 형광램프 등이 주요 광원으로 사용되고 있으며, 터널 유지관리 비용 가운데 터널조명을 위한 전력요금은 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 터널조명은 낮은 소비전력, 장수명 등의 장점을 갖는 LED로 교체 중에 있다. 본 연구에서는 터널조명 LED 교체에 따른 효과 분석을 위하여 기존 터널조명이 저압나트륨램프인 8개소 터널에 대하여, LED 교체 전·후 터널 조도측정결과 및 1년간의 월별 전력사용량을 조사하였으며, 분석결과 터널조명

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
22(2)185-196(2020)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2020.22.2.185>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received February 11, 2020

Revised March 17, 2020

Accepted March 20, 2020



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 © 2020, Korean Tunnelling and Underground Space Association

광원을 저압나트륨램프에서 LED로 교체 후 1년간 터널조명용 전력사용량은 26.1~59.6% 감소하였으며, 조도는 34.1~293% 향상된 것으로 나타났다.

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

1. 서론

터널조명은 터널에 접근 진입하여 통과하는 차량 운전자의 시각에 일어나는 복잡한 시각 특성의 변화 및 심리적 반응과 터널 고유의 환경 조건을 고려하여, 주야간 운전자에게 안전하고 쾌적한 운전 환경을 확보해 주는 데 목적이 있다(Lee and Kim, 2019).

이러한 터널조명은 일반 도로의 조명과 달리 주간에도 조명이 필요하다는 점과 주위가 측벽 등으로 제약되어 있으므로 조명학적으로 필요한 밝기를 기본으로 하여 설계속도, 야외 휘도, 교통량, 선형 등을 고려하여 적절하게 계획함으로써 운전자가 진출입 및 주행 시 불편을 느끼지 않도록 하여야 한다. 또한 터널은 밀폐되고 특수한 공간으로 운전자에게 시각적인 정보를 제공하고 안전하게 주행할 수 있도록 충분한 밝기가 제공되어야 한다(Jeong et al., 2011).

도로안전시설 설치 및 관리지침에서는 터널조명은 터널 이용자가 항상 안전하고 불안감 없이 통행할 수 있도록 조명을 하는 데 목적이 있으며, 터널조명의 계획단계에서 입구 부근의 시야상황, 구조, 교통, 환기 등을 고려하도록 규정하고 있다. 또한 터널 내에 설치하는 조명과 터널 전·후의 접속도로에 설치하는 조명으로 구분하며, 그 기능에 적합한 조명을 설치하고, 광원은 효율, 광색, 연색성, 주위온도 특성, 수명 등이 터널조명에 적합한 것을 사용하고, 조명기구는 배광, 눈부심 제어, 조명률, 구조 등이 터널조명에 적합한 것을 사용하도록 규정하고 있다.

터널은 주야간 모두 인공조명을 사용해야하는 특성으로 에너지 소비가 가장 많이 발생하는 도로공간이며, 도로터널 유지 관리비의 약 60%가 인공조명 전기요금으로 사용되고 있다(Lee and Lee, 2013).

국내 터널조명에는 저압나트륨램프, 고압나트륨램프, 발광다이오드(light emitting diode, LED), 형광램프 등이 주요 광원으로 사용되고 있으며, 이 가운데 LED는 접합된 반도체에 전압을 가하는 원리로 빛을 얻는 광원으로, 낮은 소비전력, 장수명 등의 장점이 있으며(Moretti et al., 2016), 공공기관의 에너지의 효율적 이용과 온실가스의 배출 저감을 위하여 터널조명 광원은 LED 제품을 설치하여야 하며, 따라서 저압나트륨램프, 고압나트륨램프, 형광램프 등이 설치 운영 중인 도로터널 조명은 지속적으로 LED로 교체 중에 있다.

따라서 본 연구에서는 터널조명 LED 교체에 따른 효과 분석을 위하여 기존 터널조명이 저압나트륨램프인 ○○터널(상) 등 8개소 터널에 대하여, LED 교체 전·후 터널 조도측정결과 및 1년간의 월별 전력사용량을 조사/분석하였다.

2. 터널조명의 분류

터널을 통과하는 운전자는 터널 외부환경과 내부환경의 차이에서 오는 변화에 많은 어려움을 가지게 된다. 특히 터널을 통과하는 운전자의 시각적 환경변화는 안전하고 쾌적한 운전엔 큰 장애요인이라 할 수 있다(Lee and Lee, 2007).

따라서 터널조명은 접속부, 경계부, 이행부, 기본부 및 출구부 등으로 각 구간별 휘도는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 변화한다(RABT, 2006). 구간별 조명의 설치 목적 및 설치 장소는 다음과 같다.

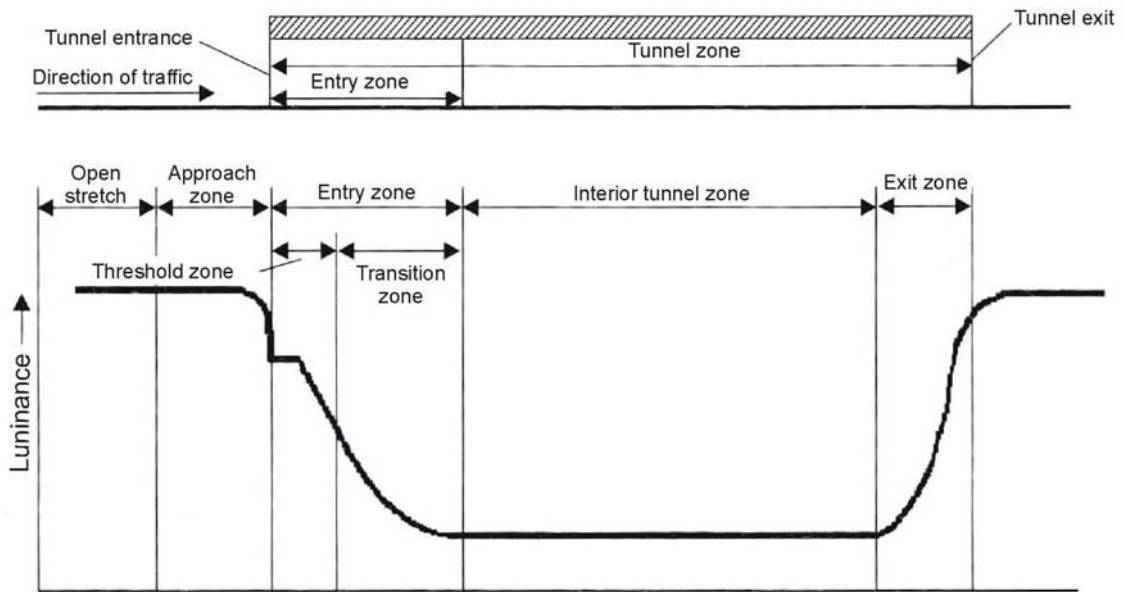


Fig. 1. Luminance reduction curve

(1) 기본부(interior zone)

터널을 주행하는 운전자가 전방의 장애물을 발견하는데 필요한 최소 밝기를 제공하기 위한 기본적인 조명으로 터널 전 구간에 걸쳐 실시한다.

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

터널의 입구부에서 주간에 대단히 높은 야외휘도로부터 암흑에 가까운 터널에 진입할 때, ‘블랙 홀(black hole) 현상’과 ‘암순응 지체현상’이 발생하게 된다. 또한 운전자가 긴 터널을 통과한 후 터널 출구부에 접근하였을 때 발생하는 ‘화이트 홀(white hole) 현상’이 발생하게 된다. 이러한 갑작스런 변화를 방지하기 위하여 완화조명을 터널 입·출구부 내부에 설치해야한다.

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

야간에 터널 진입도로의 낮은 조도로부터 밝은 터널 내로 진입할 때, 그리고 조명 시설이 설치된 터널에서 어두운 접속도로로 나갈 때 일어나는 조도 변화를 최소화하기 위한 것으로 입출구부 접속도로에 조명을 설치해야 한다.

3. 터널 조명등 종류별 조도 및 전력사용량 조사

3.1 조사대상 터널

터널조명을 저압나트륨램프에서 LED로 교체 시 조도개선 효과 및 전력사용량 효과분석을 위하여 본 연구에서는 ○○터널(상) 등 8개소 터널(총 연장 7,311 m)에 대하여, 조명등 교체 전·후 조도측정결과 및 조명등 교체 전·후 각 1년간의 전력사용량을 월단위로 수집·분석 하였다. 대상터널의 연장 등 제원 현황은 Table 1과 같다.

Table 1. List of tunnels to be analyzed

Classification	Length (m)	No. of lanes	Year of completion
○○Tunnel up line	1,960	2	1996
○○Tunnel down line	1,765	2	2000
△△Tunnel up line	440	2	2001
△△Tunnel down line	470	2	2001
□□Tunnel up line	570	2	2004
□□Tunnel down line	480	2	2004
◇◇Tunnel up line	815	2	2004
◇◇Tunnel down line	811	2	2004

3.2 조도측정 결과

과거 도로터널 조명설계시 기본부는 휘도, 경계부는 조도기준이 적용되었으며, 2010년 5월 경계부도 휘도기준으로 변경되었다. 그러나 고가의 휘도측정 장비 운영 등의 문제로 운영관리 현장에서는 조도측정결과를 휘도로 환산하는 방식으로 관리하고 있다. 따라서 본 연구에서는 조도측정 결과 조사를 통하여 LED 조명등 개선 효과를 분석하였다. 조도측정에 사용된 장비는 TES-1330A이며, 측정범위는 최대 20,000 Lux, 정확도는 $\pm 3\% \text{rdg} \pm 0.5\% \text{f.s}$ 이다.

조도측정은 주행차선 및 추월차선 중앙부, 차선 도색 직상부 3개소에서 측정되었으며, 3개소에서 측정된 조도의 평균값을 토대로 분석하였으며, 터널 내 설치된 모든 조명등 점등조건하에서 조도 측정을 실시한 결과는 Tables 2~9와 같다.

Table 2. Average illumination at ○○Tunnel up line

Measurement point (distance from tunnel entrance)		Lamp type	Low pressure sodium lamp (Lx)	LED (Lx)
Threshold zone	48 m		1,137	4,467
Transition zone	216 m		340	545
Interior zone	1,458 m		69	267
Exit zone	1,602 m		514	476

Measurement date: low pressure sodium lamp - 21. Mar. 2015, LED - 10. Sep. 2018

Table 3. Average illumination at ○○Tunnel down line

Measurement point (distance from tunnel entrance)		Lamp type	Low pressure sodium lamp (Lx)	LED (Lx)
Threshold zone	42 m		1,596	3,722
Transition zone	210 m		468	700
Interior zone	1,330 m		66	113
Exit zone	1,407 m		527	492

Measurement date: low pressure sodium lamp - 21. Mar. 2015, LED - 10. Sep. 2018

Table 4. Average illumination at △△Tunnel up line

Measurement point (distance from tunnel entrance)		Lamp type	Low pressure sodium lamp (Lx)	LED (Lx)
Threshold zone	52 m		1,880	3,124
Transition zone	135 m		963	1,015
Interior zone	311 m		175	331
Exit zone	415 m		457	1,587

Measurement date: low pressure sodium lamp - 20. Jun. 2016, LED - 18. Jun. 2018

Table 5. Average illumination at △△Tunnel down line

Measurement point (distance from tunnel entrance)		Lamp type	Low pressure sodium lamp (Lx)	LED (Lx)
Threshold zone	52 m		2,010	3,005
Transition zone	135 m		1,297	1,419
Interior zone	343 m		192	316
Exit zone	447 m		523	1,022

Measurement date: low pressure sodium lamp - 20. Jun. 2016, LED - 18. Jun. 2018

Table 6. Average illumination at □□Tunnel up line

Measurement point (distance from tunnel entrance)		Lamp type	Low pressure sodium lamp (Lx)	LED (Lx)
Threshold zone	30 m		1,617	2,980
Transition zone	235 m		186	288
Interior zone	325 m		246	175
Exit zone	445 m		1,122	555

Measurement date: low pressure sodium lamp - 13. May. 2016, LED - 23. Dec. 2019

Table 7. Average illumination at □□Tunnel down line

Measurement point (distance from tunnel entrance)		Lamp type	Low pressure sodium lamp (Lx)	LED (Lx)
Threshold zone	30 m		1,620	2,815
Transition zone	235 m		119	403
Interior zone	325 m		236	213
Exit zone	445 m		692	558

Measurement date: low pressure sodium lamp - 13. May. 2016, LED - 23. Dec. 2019

Table 8. Average illumination at ◇◇Tunnel up line

Measurement point (distance from tunnel entrance)		Lamp type	Low pressure sodium lamp (Lx)	LED (Lx)
Threshold zone	40 m		1,320	2,348
Transition zone	180 m		352	1,654
Interior zone	715 m		264	354
Exit zone	795 m		1,046	557

Measurement date: low pressure sodium lamp - 13. May. 2013, LED - 23. Dec. 2019

Table 9. Average illumination at ◇◇Tunnel down line

Measurement point (distance from tunnel entrance)		Lamp type	Low pressure sodium lamp (Lx)	LED (Lx)
Threshold zone	40 m		1,310	2,452
Transition zone	180 m		297	1,324
Interior zone	715 m		301	452
Exit zone	795 m		1,677	757

Measurement date: low pressure sodium lamp - 13. May. 2013, LED - 23. Dec. 2019

Tables 2~9에서 보이는 바와 같이 터널조명 광원이 저압나트륨램프인 경우 경계부(threshold zone) 조도는 1,137~2,010 Lx, 이행부(transition zone) 조도는 119~1,297 Lx, 기본부(interior zone) 조도는 69~301 Lx, 출구부(exit zone) 조도는 457~1,677 Lx인 것으로 나타났다.

또한 터널조명 광원이 LED인 경우 경계부(threshold zone) 조도는 2,348~4,467 Lx, 이행부(transition zone) 조도는 403~1,654 Lx, 기본부(interior zone) 조도는 175~452 Lx, 출구부(exit zone) 조도는 476~1,587 Lx인 것으로 나타났다.

3.3 전력사용량

조도측정은 터널 상행, 하행 각각에 대해 수행하였으나, 터널조명에 사용되는 전력은 상행, 하행에 일괄 공급 되므로, 터널의 상행, 하행에 사용된 전력사용을 조사하였다.

터널 내 조도는 기상조건, 일조시간 변화 등 계절적 영향에 따라 달라지므로, 본 연구에서는 LED 조명 교체 전·후 각 1년간 전력사용량을 월별로 조사하였으며, 터널조명 광원 종류 및 각 터널별 1년간 월별 전력사용량은 Table 10과 같다.

Table 10. Power usage for a year (unit: kW)

	○○Tunnel		△△Tunnel		□□Tunnel		◇◇Tunnel	
	Low pressure sodium lamp	LED	Low pressure sodium lamp	LED	Low pressure sodium lamp	LED	Low pressure sodium lamp	LED
Jan.	119,530	90,876	49,558	32,570	63,875	19,685	86,201	49,826
Feb.	118,801	88,505	44,690	31,980	58,032	20,057	86,095	42,605
Mar.	108,579	85,197	41,059	30,029	52,114	18,562	75,706	35,930
Apr.	121,817	95,995	47,640	35,640	60,266	22,837	84,353	33,559
May.	138,539	94,369	53,081	35,527	58,592	26,581	81,149	29,854
Jun.	145,676	98,697	51,794	38,354	53,332	31,145	87,811	31,234
Jul.	139,959	97,008	47,213	37,810	45,217	27,451	75,132	30,367
Aug.	143,534	99,553	46,198	39,206	43,144	31,272	77,770	30,962
Sep.	138,799	96,947	46,565	37,493	45,240	23,162	78,828	30,046
Oct.	124,409	96,866	44,258	33,830	50,428	20,708	82,910	28,111
Nov.	124,954	97,595	45,665	32,928	67,871	19,116	84,979	28,147
Dec.	118,011	91,981	44,570	30,058	65,335	18,590	82,166	26,736
Σ	1,542,608	1,133,589	562,291	415,425	663,446	279,166	983,100	397,377

Table 10에서 보이는 바와 같이 터널조명 광원이 저압나트륨램프인 경우 1년간 전력사용량은 56,291~1,542,608 kW, LED인 경우 1년간 전력사용량은 279,166~1,133,589 kW인 것으로 나타났다.

4. 터널 조명등 LED 교체 효과 분석

4.1 조도개선 효과

터널조명 광원을 저압나트륨램프에서 LED로 교체 시 경계부(threshold zone), 이행부(transition zone), 기본부(interior zone) 및 출구부(exit zone)의 조도향상 비율은 Table 11과 같다.

Table 11. Illumination improvement by the replacement of tunnel lighting

	Threshold zone	Transition zone	Interior zone	Exit zone
○○Tunnel up line	293.0%	60.5%	288.8%	-7.3%
○○Tunnel down line	133.3%	49.6%	72.6%	-6.6%
△△Tunnel up line	66.2%	5.4%	89.1%	247.3%
△△Tunnel down line	49.5%	9.4%	64.6%	95.4%
□□Tunnel up line	84.3%	54.8%	-28.9%	-50.5%
□□Tunnel down line	73.8%	238.7%	-9.7%	-19.4%
◇◇Tunnel up line	77.9%	369.9%	34.1%	-46.7%
◇◇Tunnel down line	87.2%	345.8%	50.2%	-54.9%

Table 11에서 보이는 바와 같이 터널조명 광원을 LED로 교체 후 경계부 조도는 49.5~293%, 이행부 조도는 5.4~369.9%의 비율로 모든 터널에서 향상된 것으로 조사되었다.

□□터널 기본부 조도는 터널조명 광원을 LED로 교체 후 9.7%, 28.9% 감소한 것으로 나타났으나, 다른 6개소 터널에서는 34.1~288.8% 향상된 것으로 조사되었다.

출구부 조도는 △△터널의 경우 95.4%, 247.3% 향상된 것으로 나타났으나, 다른 6개소 터널에서는 6.6~54.9% 감소된 것으로 조사되었다.

□□터널 기본부 조도는 터널조명 광원을 LED로 교체 후 감소하였으며, 이는 Tables 6, 7에서 보이는 바와 같이 터널조명 광원을 LED로 교체 전 □□터널 상행선의 경우 이행부 조도 186 Lx, 기본부 조도 246 Lx, □□터널 하행선의 경우 이행부 조도 119 Lx, 기본부 조도 236 Lx로 이행부의 조도가 기본부의 조도보다 낮은 비정상적 조명 운영에 기인한 것으로 판단된다.

△△터널 출구부 조도는 다른 6개소 터널과 달리 LED 조명 교체 후 95.4%, 247.3% 조도가 향상된 것으로 조사되었다. 이는 ○○터널 등 6개소 터널의 경우 경계부 조도 대비 출구부 조도는 10.3~30.9% 수준인 반면, △△터널의 경우 출구부 조도는 경계부 조도 대비 34.0~50.8% 수준으로 높게 운영하기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 전력사용량 개선 효과

터널조명 광원을 저압나트륨램프에서 LED로 교체 전·후의 1년간 터널조명용 전력사용량은 Table 12 및 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 ○○터널 26.5%, △△터널 26.1%, □□터널 57.9%, ◇◇터널 59.6% 각각 감소한 것으로 나타났으며, 4개 터널의 평균 전력사용량 감소율은 40.7%이다.

Table 12. Reduction rate of power usage for a year

	Low pressure sodium lamp	LED	Reduction rate
○○Tunnel (L: 3,725 m)	1,542,608 kW	1,133,589 kW	26.5%
△△Tunnel (L: 910 m)	562,291 kW	415,425 kW	26.1%
□□Tunnel (L: 1,050 m)	663,446 kW	279,166 kW	57.9%
◇◇Tunnel (L: 1,626 m)	983,100 kW	397,377 kW	59.6%
Total	3,751,445 kW	2,225,557 kW	40.7%

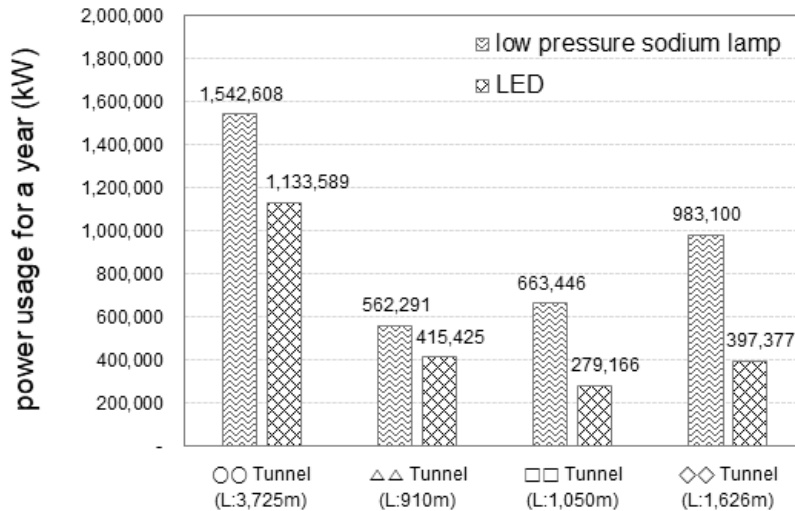


Fig. 2. Power usage for a year

터널 연장 100 m당 전력사용량은 터널조명 광원이 저압나트륨램프인 경우, 4,141~6,319 kW, LED인 경우 2,444~4,565 kW인 것으로 나타났다(Fig. 3).

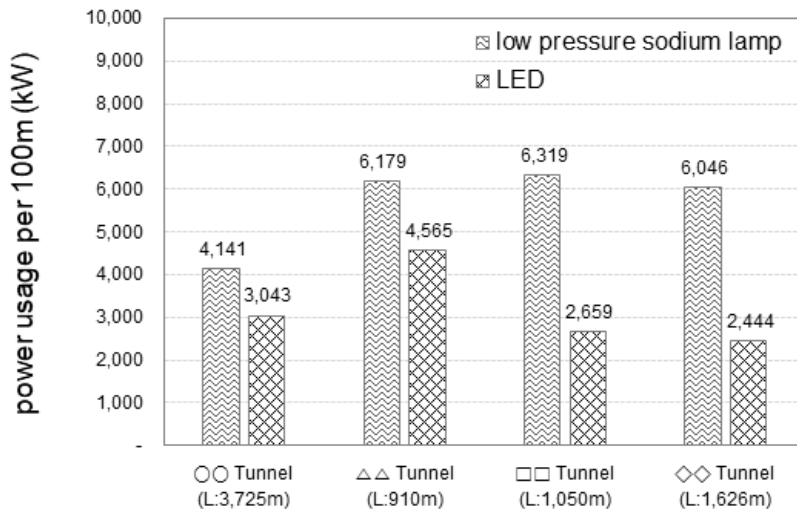


Fig. 3. Power usage per 100 m for a year

○○터널 등 4개 터널의 조명용 월별 전력사용량은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 터널조명 광원이 저압나트륨램프인 경우 6월에 전력사용량 338,616 kW로 가장 많은 전력을 사용한 것으로 나타났으며, 이는 최소 전력사용월 3월 전력사용량 277,458 kW 대비 약 22% 많이 사용하였다.

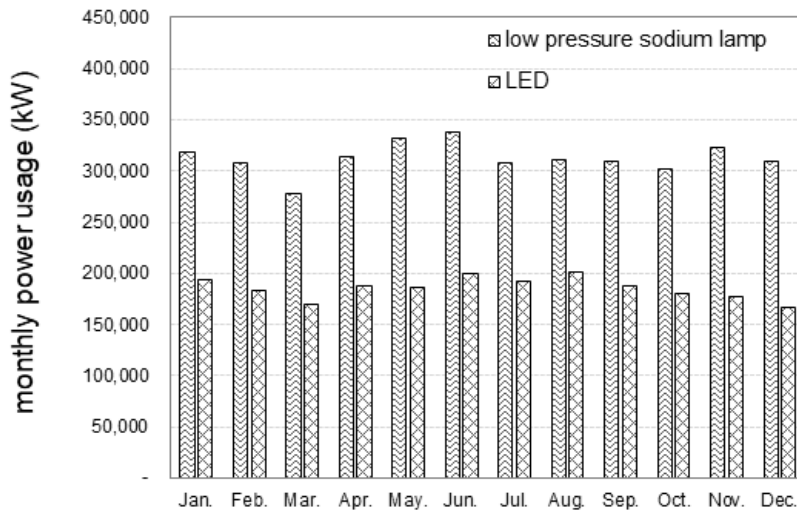


Fig. 4. Monthly power usage

터널조명 광원이 LED인 경우 8월에 전력사용량 200,993 kW로 가장 많은 전력을 사용한 것으로 나타났으며, 이는 최소 전력사용월 12월 전력사용량 167,365 kW 대비 약 20% 많이 사용하였다.

5. 결론

본 연구에서는 터널조명 LED 교체에 따른 효과 분석을 위하여 기존 터널조명이 저압나트륨램프인 ○○터널(상) 등 8개소 터널에 대하여, LED 교체 전·후 터널 조도측정결과 및 1년간 월별 전력사용량을 조사/분석하였으며, 터널조명 LED 교체효과는 다음과 같다.

1. 터널조명 광원을 LED로 교체 후 출구부 조도는 감소하였으나, 경계부, 이행부 및 기본부 조도는 34.1~293% 향상되었으며, 이는 ○○터널(상) 등 8개소 터널 모두 2010년 이전 준공된 터널로 터널조명 광원을 LED로 교체를 위한 설계 시 2010년 개정된 터널조명 설계기준 적용에 기인한 것으로 판단된다.
2. 터널 연장 100 m당 전력사용량은 터널조명 광원이 저압나트륨램프인 경우, 4,141~6,319 kW, LED인 경우 2,444~4,565 kW인 것으로 나타났으며, 터널조명 광원을 저압나트륨램프에서 LED로 교체 후 1년간 터널조명용 전력사용량은 26.1~59.6%, 평균 40.7% 감소하였다.
3. 터널조명을 위한 전력사용량은 기상조건 및 계절별 일조시간 등의 영향으로 동절기 대비 하절기에 약 20% 더 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, Pyeongchang, pp. 416-417.
3. 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.
4. Lee, Y.Q., Lee, S.H. (2007), “A simulation analysis on the probeam lighting for the visibility at a tunnel

- with whitehole phenomenon”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 9, No. 1, pp. 29-36.
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 tunnel”, Edition 2006, pp. 52-53.