

터널조명 시스템의 성능 평가 시뮬레이션

(Simulation for the Performance Evaluation of Tunnel Lighting Systems)

김형권* · 한중성** · 정현일*** · 김 훈**

(Hyeong-Kwon Kim* · Jong-Sung Han** · Hyeon-Il Jung*** · Hoon Kim**)

(*태양전자, **강원대학교 전기전자공학부, ***한국도로공사)

요 약

국내의 터널조명 기법들을 조사, 분석한 것을 바탕으로 향후 터널조명 시스템 적용과 개발 가능성 연구, 분석을 위한 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 Lightscape를 이용하였으며, 터널 내 노면 조도, 조도균제도 그리고 단위면적당 소비전력량에 대하여 비교, 분석하였다.

1. 서 론

현재 고속도로의 터널에 설치된 조명시스템은 사용하는 광원, 조명기구, 조명설비의 설치 및 운용 방식에 따라 그 종류가 매우 다양하다. 터널의 사용형태, 차량의 소통량과 이동 속도, 주변 환경 등에 따라 조명의 요구사항이 다르며, 조명 환경도 달라지기 때문에 이에 부합하는 조명설계와 운영 방식의 변화가 요망된다.

특히 에너지 절감의 측면에서 이를 가능케 하는 터널조명 기법들에 대한 조사 및 성능 규정이 필요하다. 광학적 효율이 높고, 적절한 배광을 지닌 조명기구를 이용하여 최적의 조명환경을 구현할 수 있도록 배치한다면 기준에 부합하는 노면 휘도와 조도를 얻을 수 있고 기구의 대수를 줄일 수 있으므로 에너지 절감 효과를 거둘 수 있다.

본 연구에서는 해외 터널조명 추세 조사, 에너지 절감 기법 및 시스템 조사 분석을 토대로 합리적이며 에너지 절감이 가능한 터널조명 시스템을 제시하고자 Lightscape 프로그램으로 시뮬레이션을 행하였다. 그리고 터널의 노면 조도, 조도균제도, 단위면적당 소비전력 등의 몇 가지 기준과 평가 지표를 중심으로 여러 가지 터널조명 시스템을 비교, 분석하여 보았다.

2. 터널조명 시스템 시뮬레이션

2.1 설계 조건

실질적인 분석이 가능하도록 고속도로용 단방향 2차로 확폭터널의 설계도를 바탕으로 AutoCAD 프로그램을 사용하여 그림 1과 같은 터널조명을 설계하였으며, 설계조건을 다음과 같다.

- 1) 터널 재원
 - 터널길이 : 300m(기본부)
 - 터널 폭 : 11.96m
- 2) 터널내부의 마감재 반사율
 - 천정 : 반사율 25%
 - 벽부 : 반사율 60%(평균반사율 42.5%)
 - 노면 : 반사율 10%
- 3) 설계속도 : 100km/h

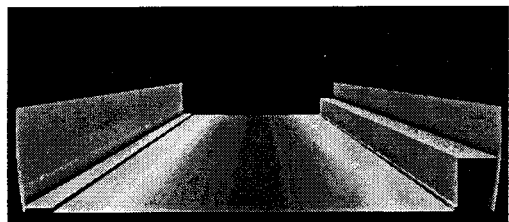
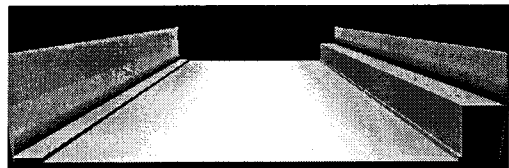


그림 1. 터널 시뮬레이션 단면도

2.2 설계 기준

1) 광원

- 저압나트륨램프 91W, 131W
- 고압나트륨램프 150W, 250W
- 형광램프 32W*3(주간), 32W*1(야간)
- 무전극방전램프 100W, 200W
- 콤팩트 메탈할라이드램프 70W, 140W

2) 보수율 : M=0.6

3) 기본부조명의 노면휘도

- 주간 : 9cd/m²
- 야간 : 2cd/m²

4) 조명기구 배열과 사용 램프

- 중앙배열, 천정 대칭배열 : 저압나트륨, 고압나트륨, 형광램프, 무전극방전램프
- 천정편측배열(진행방향 우측) : 콤팩트 메탈할라이드램프

2.3 조명계산

1) 조명률 계산 : 노면의 평균조도를 설정한 후 모든 조명기구를 6m 높이에 동일하게 설치하고 시뮬레이션에서 계산된 실설계시 노면의 초기 목표조도를 만족하는 값을 찾아내었다.

- 노면의 평균조도 계산식

$$E = \frac{L \times k}{M} \quad [\text{lux}]$$

여기서 E : 노면의 초기 목표조도

L : 설계속도에 따른 노면 설정휘도

k : 조도 환산계수

M : 보수율

- 설정휘도 : 9cd/m² (주간), 2cd/m² (야간)
- 조도환산계수 : 콘크리트 13 lx/cd/m²
아스팔트 18 lx/cd/m²

- 보수율 : 0.6

- 조명률 : $U = (E \times A) / (N \times F \times M)$

(U: 조명률, E: 조도, A: 면적, N: 조명기구 수, F: 조명기구 출력광속)

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

설계된 터널의 광학적 특성을 검증하기 위한 시뮬레이션 대상은 평균 노면 휘도를 9cd/m², 2cd/m²으로 설계한 터널의 기본부를 사용 광원에 따라 입력전력, 조명기구 설치간격, 배열방식에 따라 중앙배열, 대칭배열, 편측배열로 나누었다. 또한 길이 300m, 넓이 11.961m 높이 7.43m의 터널구조 6m 높이에 기구를 설치하여 터널 기본부의 노면이 콘크리트 재질일 때와 아스팔트 재질일 때의 차이를 조도환산계수를 적용하여 시뮬레이션 하였다.

표 1은 콘크리트 노면에서 주간 기본부 터널조명의 중앙배열에 대한 조명기구별 시뮬레이션 결과이다. 이 시뮬레이션 결과는 노면의 확폭을 포함한 상황과 차도면 만을 고려한 상황으로 구분하여 비교했다. 그 결과 단위면적당 소비전력량(W/m²)은 형광램프가 높게 나타났고, 저압나트륨램프와 고압나트륨램프가 낮은 특성을 보였다. 노면의 전반 균제도는 형광램프가 확폭을 고려했을 때와 차도만 고려했을 때 모두 가장 우수한 특성을 보였으며, 무전극방전램프도 좋은 특성을 보였다. 전반 균제도는 모든 조명기구가 국내 최소허용 기준치 0.4를 만족했고 연간비용에서는 고압나트륨 HPS 250W가 가장 비용이 적게 드는 것으로 나타났다 [1,2].

표 1. 콘크리트 주간 기본부 중앙배열 결과

광원	LPS 91W		LPS 131W		HPS 150W		HPS 250W		F/L 32W*3		무전극 100W		무전극 200W	
	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도
노면조도 계산범위														
평균조도 (lx)	194	210	196	213	197	213	193	210	194	204	197	210	194	207
최대조도 (lx)	263	263	265	265	263	263	301	301	229	229	235	235	232	232
최소조도 (lx)	83.6	105	88.8	111	109	125	100	120	121	151	112	136	112	135
전반균제도	0.43	0.50	0.45	0.52	0.56	0.59	0.52	0.58	0.62	0.74	0.57	0.65	0.58	0.65
조명기구 설치간격 (m)	2.6		3.8		3.9		6.2		2.9		1.7		3.2	
단위면적당 소비전력 (W/m ²)	3.32		3.28		3.61		3.66		3.30		5.82		5.71	

표 2는 콘크리트 노면에서 주간의 기본부 터널조명의 대칭배열에 대한 조명기구별 시뮬레이션

결과를 보인 것이다. 단위면적당 소비전력량(W/m²)은 형광램프가 높게 나타났고, 저압나트륨램프와 고압나트륨램프가 낮은 특성을 보였다. 노면의 전반 균제도는 형광램프와 무전극방전램프가 우수한 특성을 보였으며, 저압나트륨도 우수한 특성을 보였으며 중앙배열과 비교했을 때 전반균제도는 모두 상승했다. 연간비용에서는 고압나트륨 HPS 250W가 가장 비용이 적게 들었다.

표 2. 콘크리트 주간 기본부 대칭배열 결과

광원	LPS 91W		LPS 131W		HPS 150W		HPS 250W		F/L 32W*3		무전극 100W		무전극 200W	
	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도
노면조도 계산범위														
평균조도 (lx)	194	201	195	200	195	205	196	207	198	208	199	208	194	202
최대조도 (lx)	222	221	227	226	232	231	379	379	231	231	230	230	225	225
최소조도 (lx)	114	142	122	132	116	133	100	114	141	153	132	170	148	165
전반균제도	0.59	0.71	0.63	0.76	0.60	0.65	0.51	0.55	0.71	0.73	0.76	0.82	0.76	0.81
조명기구 설치간격 [m]	5.2		7.3		7.7		12		5		3		5.7	
단위면적당 소비전력 (W/m ²)	3.52		3.49		3.65		3.73		3.81		6.58		6.44	

표 3은 야간 콘크리트 노면에서 기본부 터널조명의 중앙배열에 대한 조명기구별 시뮬레이션 결과이다.

표 3. 콘크리트 야간 기본부 중앙배열 결과

광원	LPS 91W		LPS 131W		HPS 150W		HPS 250W		F/L 32W*1		무전극 100W		무전극 200W	
	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도
노면조도 계산범위														
평균조도 (lx)	48	52	40	43	40	43	48.9	53.2	58.4	61.2	39.5	42.2	48.4	51.6
최대조도 (lx)	100	100	129	129	129	132	206	206	68	68	51	51	80	80
최소조도 (lx)	18	21	8.2	9.4	8.0	8.7	5.8	6.1	36.3	45.3	22.3	26.6	23.0	26.1
전반균제도	0.37	0.42	0.20	0.21	0.20	0.20	0.12	0.11	0.62	0.74	0.56	0.63	0.48	0.51
조명기구 설치간격 [m]	10.4		19.0		19.5		24.8		2.9		8.5		12.8	
단위면적당 소비전력 (W/m ²)	0.88		0.66		0.75		0.97		1.45		1.18		1.46	

단위면적당 소비전력량(W/m²)은 저압나트륨 131W급이 가장 낮은 소비량을 나타냈고, 형광램프와 무전극방전램프가 다른 램프들에 비해 높았다. 노면의 전반 균제도는 형광램프가 우수한 특성을 보였으며, 저압나트륨램프, 고압나트륨램프는 전반균제도 특성이 매우 나쁜 결과를 보였다. 연간비용에서는 고압나트륨 HPS 250W가 가장 비용이 적게 들었으며 형광램프가 상대적으로 높은 값을 나타냈다.

표 4는 주간과 야간에 아스팔트 노면에 대해 CMH 70W, 150W를 사용한 편측배열 대한 시뮬레이션 결과를 보인 것이다.

표 4. 아스팔트 주간 및 야간 편측배열 결과

조명시간	주 간				야 간			
	CMH 70		CMH 150		CMH 70		CMH 150	
광원								
노면조도 계산범위	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도	확폭	차도
평균조도 (lx)	280.1	289.1	271.0	281.4	56.2	58.0	67.5	70.3
최대조도 (lx)	359.0	355.2	344.4	344.3	71.9	71.7	93.9	93.9
최소조도 (lx)	199.7	233.1	190.5	217.9	40.1	46.7	31.6	38.6
전반균제도	0.71	0.81	0.70	0.77	0.71	0.81	0.47	0.55
조명기구 설치간격 [m]	1.2		2.8		6.0		11.2	
단위면적당 소비전력 (W/m ²)	6.13		5.06		1.23		1.26	

표 4에서 보이는 바와 같이 단위면적당 소비전력(W/m²)은 주간의 경우 고압나트륨램프, 형광램프와 유사한 값을 보였으며, 야간의 경우도 고압나트륨과 유사한 단위면적당 소비전력을 나타내었다. CMH 70W와 CMH 150W 모두 주간과 야간에 대해 모두 최소허용 전반균제도 0.4를 만족했으며 CMH 150W의 경우, 연간비용 특성은 고압나트륨램프 대칭형 배열과 유사하게 다른 광원들에 비교했을 때 저렴한 결과를 나타냈다.

4. 결 론

에너지 절감은 곧바로 비용 절감과 직결되는 문제이기 때문에 매우 중요하다. 국내외적으로 에너지 절감을 위해서 연구를 추진하고 시행되고 있는 기법들이 많다. 많은 관심을 두고 있는 에너지 절감 측면에서 이를 가능케 하는 기법들에 대한 조사 및 성능 규정이 필요하다.

본 연구에서는 국내의 터널조명 기법들을 조사, 분석한 것을 바탕으로 향후 터널조명 시스템 적용과 개발 가능성 연구, 분석을 위한 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 Lightscape를 이용하였으며, 현재 터널조명용으로 널리 사용되는 광원을 대상으로 노면 재질(콘크리트, 아스팔트), 조명기구 간격, 조명방식(중앙배열, 대칭배열, 편측배열)에 따른 주간 및 야간의 터널 내 노면 조도, 조도균제도 그리고 단위면적당 소비전력량에 대하여 비교, 분석하였다.

본 연구는 한국도로공사의 학술연구 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 한국표준협회, KS 도로조명기준, KS A 3703, 1991
- [2] 건설교통부, 도로터널 조명시설의 설계기준