

Tunnel 조명을 위한 나트륨등과 형광등의 Life Cycle Cost 비교 연구

이석준\* 이영규\* 김훈\*\*  
 \* 상지대학교 산업공학과 \*\* 강원대학교 전기공학과

A Life Cycle Cost Comparison of Low-Pressure Sodium Lamp and Fluorescent Lamp for Tunnel Lighting

SeokJoon Lee\*, Young-Q Lee\*, Hoon Kim\*\*

\* Dept. of Industrial Eng., Sangji Univ. \*\* Dept. of Electrical Eng., Kangwon National Univ.

Abstract - 현재 우리 나라에서는 도로망의 급속한 확충에 따라 터널의 수가 급속히 증가하고 있다. 터널은 운전자들이 주야간으로 안전하고 쾌적하게 주행할 수 있도록 설계되어야 한다. 이런 관점에서 터널의 조명설계는 매우 중요하다고 할 수 있으며, 터널의 안전성, 쾌적성, 경제성을 확보하기 위한 여러 가지 복합적인 요소들을 고려한 분석이 필요하다. 이 논문에서는 터널조명에 일반적으로 사용되고 있는 저압나트륨등에 대하여 대안으로 대두되고 있는 형광등에 대한 경제성 측면에서의 비교 방법론 연구를 수행한다. 각각의 등에 대하여 동일한 터널 노면기준조도를 구현하기 위한 필요 등의 수를 시뮬레이션을 통하여 결정하고, 이를 기반으로 각 터널 조명에 소요되는 Life Cycle Cost를 기본 Model을 통하여 산정하고 비교하는 방법을 제시한다. 이러한 분석은 터널개발 사업의 정책적 결정에 있어 기초 방법과 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

및 조도 기준을 정한다. 즉, 터널조명은 접속부, 입구부, 기본부, 출구부, 비상용 조명으로 나누어지며 이 중 터널 내부만의 조명은 입구부, 기본부, 출구부 조명이 다. 주간 운행시 운전자의 눈이 야외 휘도에 순응한 상태로 어두운 터널에 접근하기 때문에 터널 내부는 모두 암흑으로 보여 잘 식별이 되지 않으며 주위 휘도에 대하여 순응이 늦어진다. 입구부 조명은 이러한 운전자의 눈을 터널 내부로 순응시키기 위해 설치한 조명으로 입구부 조명은 다시 터널 입구의 휘도 정도에 따라 경계부, 이행부, 완화부 구간을 두고 순차적으로 밝기를 변화시켜 기본부까지로 운전자의 눈을 순응시켜 준다. 기본부 조명은 운전자의 눈이 입구부 조명을 통과하여 순응된 후의 조명 구간이다. 출구부 조명은 터널 내부에 적용된 운전자의 눈이 다시 밝은 출구 쪽을 향할 때 밝은 배경으로 인하여 실루엣 현상이 발생하게 되고 이를 완화시키기 위해 선행차량 및 장애물에 적당한 조명을 하여 주는 구간이다. 이번 연구를 위하여 설정된 터널의 구조는 그림 1과 같다.

1. 서 론

지속적인 경제발전을 토대로 보유차량의 수가 급증하고 국민의 생활 및 의식 수준이 향상됨에 따라 도로 조명시설 또한 증가하고 있다.

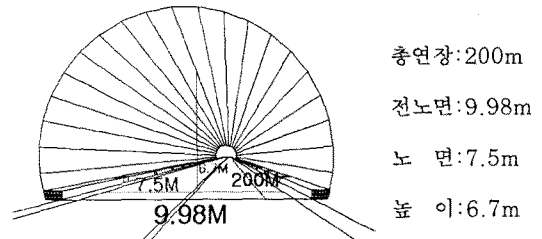
터널은 일반도로와 달리 좁고 어두운 구간을 통과하는 것이기 때문에 시각적으로 안전하고 쾌적하도록 조명시설을 하여야 한다. 이를 위하여 외부의 밝기에 순응된 운전자의 시각이, 급격한 휘도와 조도의 변화에 순응할 수 있도록 순차적으로 변화하는 환경을 조성하여 주어야 한다. 급격한 터널 내외부의 휘도 및 조도의 변화를 완화시켜 줄 수 있는 조명환경의 조성은 고출력의 광원을 사용한 많은 조명을 필요로 하므로 에너지 효율에 대한 고려가 필요하며, 대안적 조명방식에 대한 고려도 필요하다.

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 저압나트륨등에 대하여, 그 대안으로 제시되고 있는 형광등을 사용하였을 때의 전체적 비용을 비교 분석하는 방법론을 제시하였다. 이를 위하여 특정 터널을 컴퓨터 상에서 구현하고, 각 등에 대하여 일정 노면조도를 내는데 필요한 등의 개수를 시뮬레이션을 통하여 추정한다. 추정된 각각의 등에 대하여 터널조명에 필요한 초기투자비용과 일정 기간 동안의 운영유지비용을 추정함으로써 각 조명 대안에 대한 LCC(Life Cycle Cost)를 산정하는 방법을 제시한다.

2. 터널조명과 시뮬레이션

2.1 터널 조명의 구조

터널조명은 터널내부와 외부의 조도 및 휘도차를 운전자가 얼마나 빨리 적응하여 안전한 운행할 수 있는지를 결정하기 때문에 단계별로 나누어 각 단계별 휘도



〈그림1〉 시뮬레이션에 사용된 터널의 구조

2.2 터널 조명의 설계

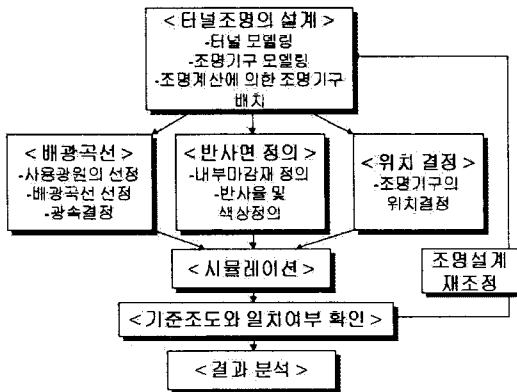
블랙홀 현상과 순응휘도의 늦음 현상을 제거하기 위한 입구부 조명의 밝기는 터널에 접근하는 자동차 운전자의 순응휘도에 따라 결정된다. 운전자의 눈이 터널에 접근할 때 순응하는 휘도를 결정하는 것은 터널의 입구부에서 필요로 하는 휘도가 기초가 된다. 터널의 설계시 입구부 조명은 야외휘도의 개념에 의해 결정되며 설계속도, 터널길이, 노면의 종류에 따라 결정된다. 본 연구의 터널에서는 5000(cd/m<sup>2</sup>)로 야외휘도를 설정하였다. 이에 따라 결정된 각 구간별 노면휘도를 이용하여 소요노면조도를 구한다. 소요노면조도가 구해지면 보수율로 나누어 초기노면조도를 설정하는데 여기서는 소요노면조도를 기준으로 시뮬레이션을 하였다. 각 구간별 소요노면조도는 표1과 같이 구할 수 있다. 단 이 연구에 사용된 터널은 200m로 매우 짧으므로 경계부와 이행부만 구성되고 기본부는 없으며 출구부는 이행부가 대신한다.

〈표1〉 구간별 거리 및 소요노면조도

구 간	거 리(m)	노면휘도 (cd/m <sup>2</sup> )	소요노면조도 (lx)
경계부	69	119	1550
이행부1	30	↓	1400
이행부2	30	구간별 감소	1250
이행부3	30	↓	1100
이행부4	41	59	770

2.3 조명 시뮬레이션

조명 시뮬레이션은 조명설비를 설치하기 이전에 계획한 조도 및 휘도 분포의 타당성을 분석하기 위해 이용될 수 있으며 분석결과를 토대로 시설투자 시 중요한 자료로 사용할 수 있다. 실제 조명환경을 구축하기 이전에 시뮬레이션을 실시하여 봄으로써 조명시설에 대한 효율을 극대화시킬 수 있다. 특히 터널과 같은 대규모의 조명 시설은 한 번 시설을 하면 변경하기가 어려우므로 시뮬레이션을 통하여 설계의 타당성을 검토하여 보는 것이 바람직하다. 이번 연구에서는 그림2와 같은 시뮬레이션을 위한 일반적 과정을 통하여 각 등에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다.



〈그림2〉 터널조명 시뮬레이션 절차

2.3.1 배광곡선

모든 조명기구들은 조명기구 고유의 배광을 가지고 있다. 빛을 사용 용도에 맞게 조정하여 주기 위하여 배광을 조정하여 줄 필요가 있다. 실내의 넓은 공간을 조명하기 위해서는 넓은 공간에 대한 배광이 필요하고 미술관과 같은 곳에서 작품을 조명하기 위해서는 그에 맞는 배광이 필요하다. 배광의 선정은 그 특수 목적에 따라 충분히 고려되어야만 한다.

배광은 일반적으로 배광곡선에 의하여 표현된다. 이번 연구에서 사용한 조명기구들의 제원과 배광곡선은 그림 3에서와 같으며 저압나트륨등의 경우 1개의 조명기구에 1개의 광원이 설치되고, 형광등의 경우 1개의 조명기구에 2개 혹은 3개의 광원이 설치된다.

조명기구	사용광원	광속 (lm)	배광곡선
저압나트륨등	SOX-E 36W	5900	
	SOX-E 91W	17000	
형광등	FL32W/2	6100	
	FL32W/3	8400	

〈그림3〉 각 조명기구의 제원과 배광곡선

2.3.2 반사면의 정의

실내외의 조명에 있어 반사면의 특성은 조명효율 및 심리적 안락감에 많은 영향을 준다. 반사율은 각 물질에 따라 많은 차이를 나타낸다. 빛이 반사면에 비추어졌을 때 반사면의 특성과 물질의 특성에 따라 반사, 투과, 흡수의 현상을 보이게 되며, 또한 물질의 반사특성에 따라 난반사와 정반사 형태의 반사를 하게된다.

이번 연구에서 터널내부의 콘크리트 마감에는 25%의 반사율을 적용하였으며 측벽 백색타일에는 60%의 반사율을 적용하였다.

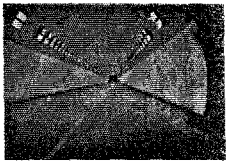
2.3.3 조명기구의 위치결정

터널조명기구는 측벽 상부에 설치되는 것이 일반적이다. 노면의 휘도 및 조도분포를 양호하게 유지하게 위해서는 조명기구의 설치 높이를 높게 하는 것이 바람직하다. 조명기구의 눈부심은 조명기구의 배광과 설치 높이에 의하여 영향을 받는데 설치 높이가 너무 낮으면 측면으로부터의 눈부심이 크게 되는 경향이 있다. 조명기구의 배열은 대칭, 지그재그, 중앙 배열이 있지만 조명기구의 배광, 노면의 휘도분포, 조명기구의 보수 등을 고려하여 최적 배열을 택하여야 한다.

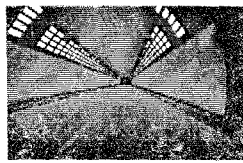
이번 연구에서의 터널은 저압나트륨등의 경우는 노면에서 4.5m의 위치에 설치하고 형광등의 경우는 4.15m에서 5.48m에 위치하였다. 조명기구의 중심축도 저압나트륨등은 노면에서 62°, 형광등인 경우는 50°에서 62°의 각도를 가지게 하였다.

2.4 시뮬레이션 결과

이상에서 설명된 터널 상황에 대하여 시뮬레이션을 실시한 결과 그림4와 표3, 4, 5의 결과를 얻었다. 비슷



저압나트륨등



형광등



저압나트륨등



형광등

〈그림4〉 시뮬레이션 결과(상)/조도분석 결과(하)

〈표3〉 터널구간별 조도분포 시뮬레이션 결과

구간	최대, 최소, 평균	저압나트륨등	형광등
		조도 (lx)	
경계부	Max	1993	1731
	Min	878	1029
	Ave	1583	1559
이행부1	Max	1667	1706
	Min	1121	1250
	Ave	1414	1347
이행부2	Max	1572	1434
	Min	1055	1190
	Ave	1284	1273
이행부3	Max	1513	1318
	Min	799	928
	Ave	1183	1126
이행부4	Max	1183	1039
	Min	428	536
	Ave	777	763

〈표4〉 저압나트륨등 터널의 광원, 조명기구 소요량

저압나트륨등			
구간	광원형식	광원갯수	조명기구수
경계부	SOX-E 91W	94	94
	SOX-E 36W	94	94
이행부1	SOX-E 91W	40	40
	SOX-E 36W	40	40
이행부2	SOX-E 91W	36	36
	SOX-E 36W	36	36
이행부3	SOX-E 91W	34	34
	SOX-E 36W	34	34
이행부4	SOX-E 36W	116	116
	SOX-E 91W	204	204
총 계	SOX-E 91W	204	204
	SOX-E 36W	320	320

한 노면조도를 구현하기 위하여 저압나트륨등의 경우 총 524개, 형광등의 경우 1879개의 등이 필요한 것으로 추정되었다. 총 소비전력으로 보면 형광등이 더 많은 전력을 필요로 하고 있으나, 터널 내부의 균제도와 연색성에서 상대적으로 우수하게 나타나고 있다. 특히 이번 연구에 채용된 형광등기구는 일반 사무실용과 같은 것으로 채택하였기 때문에 노면 조명이 떨어져 소요 등의 수

가 필요 이상으로 많이 산정 되었으며, 터널조명 전용의 새로운 조명기구가 개발되면 소요 등수도 줄어들 것으로 예상된다.

〈표5〉 형광등 터널의 광원, 조명기구 소요량

형 광 등				
구간	광원형식	광원갯수	조명기구수	
경계부	FL32W	810	3구형	234
			2구형	54
이행부1	FL32W	344	3구형	64
			2구형	76
이행부2	FL32W	340	3구형	68
			2구형	68
이행부3	FL32W	304	3구형	76
			2구형	38
이행부4	FL32W	81	3구형	81
			2구형	236
총 계	FL32W	1879	3구형	523
			2구형	236

### 3. LCC 분석

본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 추정된 각 등에 대하여 향후 일정기간 동안 운영하였을 때 소요되는 비용인 LCC를 추정하는 방법론을 제시하고자 한다. LCC는 초기시설비, 일정기간 동안의 운영유지비로 구성되며, 각 항목에 대하여 다음과 같이 주요 비용항목에 대하여서만 간단한 산술을 통하여 추정하고, 폐기비와 같이 각 등에 공통적인 요소는 고려에서 제외한다.

$$LCC = \text{초기시설비} + \text{일정기간 운영유지비}$$

$$\text{초기시설비} = \text{조명기구비} + \text{광원비} + \text{안정기비}$$

$$\text{운영유지비} = \text{전기비} + \text{광원교체비} + \text{청소비}$$

$$\text{전기비} = \text{광원당 전력소비량} \times \text{총광원수}$$

$$\text{광원교체비} = \text{교체광원비} + \text{노무비}$$

$$\text{청소비} = \text{조명기구당 청소단가} \times \text{조명기구수}$$

$$\text{교체광원비} = \text{광원단가} \times \text{교체광원수}$$

$$\text{노무비} = \text{조명기구당 교체단가} \times \text{조명기구수}$$

이러한 LCC 추정을 위해서는 각 항목들을 산정하기 위한 기초 데이터들이 필요하며, 또한 제반 사항에 대한 가정들이 필요하다. 필요한 주요 내용으로 터널 운영기간, 일간 조명시간, 등의 수명, 교체정책(교체 횟수 및 방법-일괄교체/즉시교체), 청소정책(년간 청소 횟수) 등으로 Data의 정확성에 따라 전체 비용에 많은 영향을 미치게 된다. 이와 같이 각 대안에 대하여 전체 LCC를 추정하여 비교분석하고, 각 비용요소들에 대한 민감도 분석(Sensitivity Analysis) 등을 통하여 보다 객관적이고 구체적인 경제성 분석이 이루어지도록 하여야 한다.

### 4. 결 론

이번 연구에서는 터널조명에 있어 저압나트륨등과 형

광등에 대한 경제성 측면에서의 비교 방법론 연구를 수행하였다. 각각의 등에 대하여 동일한 터널 노면조도를 구현하기 위해 필요한 등의 수를 시뮬레이션을 통하여 결정하고, 이를 기반으로 각 터널조명에 소요되는 LCC를 기본 Model을 통하여 산정하는 전체적인 과정을 제시하였다. 그러나 이 논문을 실제 적용하기 위해서는 분석에 필요한 제반 데이터가 충분한 자료와 시간을 통하여 정확하게 준비될 필요가 있으며, 결과적으로 향후 우리나라의 터널개발사업의 정책결정에 있어 필요한 기본적인 자료로 활용될 수 있을 것이다.

또한 저압나트륨등과 형광등의 장점을 동시에 가질 수 있도록 두 등을 함께 적절히 배합하여 설치하는 것도 연구하여 볼 필요가 있을 것이다. 향후 우리나라의 터널 건설사업의 발전을 위하여 이와 관련된 다양한 연구가 필요하다고 하겠다

#### (참 고 문 헌)

- [1] 강래철, 김 훈, "터널조명 시스템의 휘도분포 조사연구", 조명 전기설비 학회지, v8, n6, pp31-3, 1994
- [2] 건설교통부, 한국조명·전기설비학회, 도로터널 조명시설의 설계기준, 1996
- [3] 한국조명·전기설비학회, 고속도로 조명시설 개선방안에 관한 연구, 1997
- [4] Sho'etsu Sakamoto 외2명, "Counter Beam and Pro Beam Lighting Systems for Road Tunnels", 일본 조명학회, v82, n3, pp191-6 1998
- [5] Greg Ward Larson and Rob Shakespeare, "Rendering with Radiance" 1998