

일조가 터널에 미치는 영향에 대한 컴퓨터시뮬레이션 연구

이영규* · 서용찬†

*상지대학교 산업공학과, 상지대학교 환경공학과

A Computer Simulation Analysis on the Effect of Daylight to Road Tunnels

Young Q Lee and Yong Chan Seo†

*Department of Industrial Engineering, Sangji University, 660 Usan-dong, Wonju, Korea
†Department of Environmental Engineering, Sangji University, 660 Usan-dong, Wonju, Korea

This paper analyzes the effects of daylight to road tunnels. A tunnel is modeled and simulated for various Luminance levels of daylight. The results showed that daylight affected up to the depth of about 10 or 15 meters from the entrance of the tunnel. This paper is expected to contribute to improving the visibility in tunnels, especially at the entrance zone.

Key words: Tunnel lighting, Daylight, Simulation

1. 서 론

주간에 터널에 진입하는 운전자의 눈은 높은 야외휘도에 순응되어 있는데 어두운 터널로 진입하면서 암순응 과정을 겪게 된다. 이 암순응 과정에는 상당한 시간이 소요되어 이 시간동안 운전자는 전방의 차량이나 장애물의 인지에 상당한 어려움을 가지게 된다.^{1,8,9)} 이러한 주간터널의 터널 입구부에서의 운전자 시인도 감소를 막기 위하여 입구부 조명을 설치 등을 통하여 단계별로 터널 내부의 휘도를 줄여가는 등의 안전조치를 취하고 있다. 이러한 안전조치를 취함에 있어 주간터널의 밝은 일조가 터널의 내부에 어느 정도까지 영향을 미치는가에 대한 정보는 매우 중요하다고 할 것임에도 불구하고 이에 대한 구체적인 연구는 매우 부족하다.

이 연구는 주간터널의 강한 일조가 터널의 내부 어느 깊이 정도까지 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 기본적인 터널을 컴퓨터상에 구현하고 다양한 밝기의 일조의 경우에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션하여 밝으로써 일조가 터널 내부에 미치는 영향을 관찰한다. 이 결과는

터널조명을 설계함에 있어 매우 중요한 기초 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 터널조명의 구성

터널조명은 일반적으로 Fig. 1에서와 같이 입구부 조명, 기본부 조명, 출구부 조명, 접속도로 조명으로 구성된다.^{2,3,11)}

2.1. 입구부 조명

일조가 강한 주간터널에 도로를 주행하는 차량이 터널에 진입하면 운전자의 눈은 야외휘도에 순응되어 있는 상태로 터널에 접근하기 때문에 Fig. 2에서와 같이 터널 내부가 모두 암흑으로 보이는 블랙홀 현상이 발생한다. 운전자가 주간터널의 3,000~6,000(cd/m²)의 밝은 야외도로에서 2~10(cd/m²)의 어두운 터널 내부로 진입함에 따라 선행하는 차량을 포함한 내부의 물체가 일정시간 동안 잘 구분되지 않는다. 입구부조명은 운전자가 일정시간에 걸쳐 서서히 어두움에 순응할 수 있도록 하기

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ycseo@sangji.ac.kr

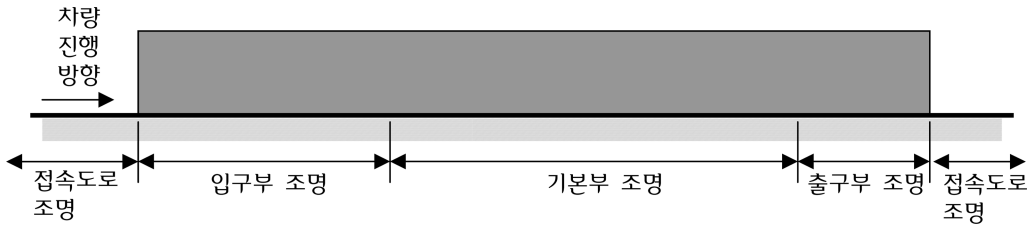


Fig. 1. Tunnel Lighting System.



Fig. 2. Blackhole Phenomenon at the Threshold Zone.

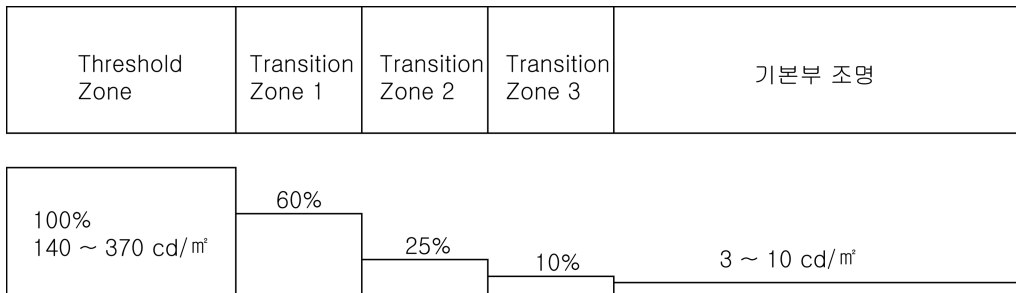


Fig. 3. Reduction Steps at the Transition Zone.

위하여 Fig. 3에서와 같이 단계별로 터널 내부의 휘도를 줄여가게 되는데 크게 나누어 Threshold Zone과 Transition Zone으로 구분한다. Transition Zone은 다시 2~3단계로 구분하여 휘도를 서서히 터널 기본부의 휘도 수준까지 내리게 된다. CIE 88:2004에서 제시하는 Threshold Zone의 최소거리는 터널 설계속도의 정지거리(stopping distance, 운전자가 장애물을 발견하고 안전하게 정지할 수 있는 거리)만큼으로 하고 있다.²⁾

Table 1. Stopping Distance

설계속도(km/h)	정지거리(m)
100	160
80	110
60	75

설계속도에 따른 일반적인 정지거리는 Table 1에서와 같다.^{1,4,12)}

2.2. 기본부 조명

기본부 조명은 조명기구를 일정 간격으로 설치하며 터널에 진입한 운전자가 입구부 조명을 통하여 터널 내부의 휘도에 거의 순응된 후의 조명이다. 기본부 조명은 일반적으로 터널의 측벽이나 천정에 설치되는데 조명기구의 특징과 설치간격 등에 따라 노면과 벽면의 휘도와 휘도균제도(uniformity of luminance)가 결정되며, 잘못 설치될 경우 터널내의 플리커(flicker) 현상이 발생하여 운전자에게 심한 불편감을 동반한 터널조명으로서의 역할을 제대로 할 수가 없게 된다. 기본부에서 노면휘도는 운전자의 눈의 순응휘도, 매연투과율 및

Table 2. Luminance at the Interior Zone

설계속도(km/h)	노면평균휘도(cd/m ²)
100	9.0
80	4.5
60	2.3
40	1.5

경제성 등을 고려하여 Table 2에서와 같도록 일반적으로 하고 있다.^{4,6)}

2.3. 출구부 조명

운전자는 터널 내부의 어두운 곳에 있다가 밝은 곳으로 나올 때 순간적인 눈부심으로 인하여 잘 보이지 않다가 다시 서서히 잘 보이게 되는 명순응 과정을 겪게 된다. 이와 같이 터널의 출구부에서 운전자는 주간에 밝은 터널외부를 배경으로 한 실루엣(silhouette)과 눈부심이 동반되는 화이트홀 현상이 발생하게 되고 이로 인하여 운전자의 심각한 시인도 저하가 순간적으로 발생하게 된다.⁷⁾ Fig. 4에서와 같이 외부의 높은 휘도를 가진 출구의 배경이 강한 광원과 같은 역할을 하게 됨으로써 운전자 전방의 선행차량, 장애물, 터널의 구조물 등이 각각의 구분된 물체가 아닌 하나의 검정 물체 덩어리로 보이게 된다. 이와 같이 선행 차량이나 도로의 장애물 등이 단순히 검정 물체로만 인식됨으로 인하여 이들의 위치나 속도의 변화(속도변화에 의한 차량 원근의 변화, 차선이동변화, 적재물체의 낙하, 적재물체의 원근변화)에 대한 운전자의 판단속도가 매우 느리게 된다. 출구부 조명은 이러한 현상을 방지하기 위하여 설치된다. 터널출구에는 설계속도 80 km/h 이상, 출구 야외휘도 6,000(cd/m²) 이상, 그리고 터널 길이 400 m 이상인 경우 출구부 조명을 설치하는 것이 바람직하다.⁴⁾ 출구부 조명은 원칙적으로 출구부 야외휘도의 1/

10으로 하고, 조명구간은 80 m로 하게 되어 있다. 일조에 의한 야외의 휘도는 아주 커서 맑은 하늘은 8,000~16,000(cd/m²), 직사 일조에 의한 도로면은 3,000~5,000(cd/m²) 정도가 된다.⁷⁾

3. 일조가 터널에 미치는 영향

일조가 터널내부에 미치는 영향을 알아보기 위하여 본 연구에서는 다음 step에 따라 분석을 실시하였다.

- step 1. 분석터널의 설정
- step 2. 시뮬레이션 - 일조의 밝기 변화에 따른 터널 노면의 휘도 측정
- step 3. 일조의 밝기 변화에 따른 터널내부 장애물의 휘도 측정

3.1. 분석터널의 설정

시뮬레이션에 사용된 터널은 Fig. 5에서와 같이 1개 차선의 폭이 3.6 m인 편도 2차선의 터널로 예비차선 1개를 가지고 있으며, 터널의 폭 11.961 m인 터널로 수평이면서 동시에 직선이다.

3.2. 시뮬레이션 결과

조명 시뮬레이션 Program인 Lightscape Software를 이용하여 시뮬레이션을 실시하여 Fig. 6과 Table 3에서와 같은 결과를 얻었다. Table 3을 그래프로 나타내면 Fig. 7과 Fig. 8에서와 같다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

■ Fig. 7에 의하면 터널입구로 입사된 야외의 밝은 일조는 터널입구에서 약 10 m까지는 노면의 휘도에 많은 영향을 미치고 그 이후로는 급격히 약화되어 15 m

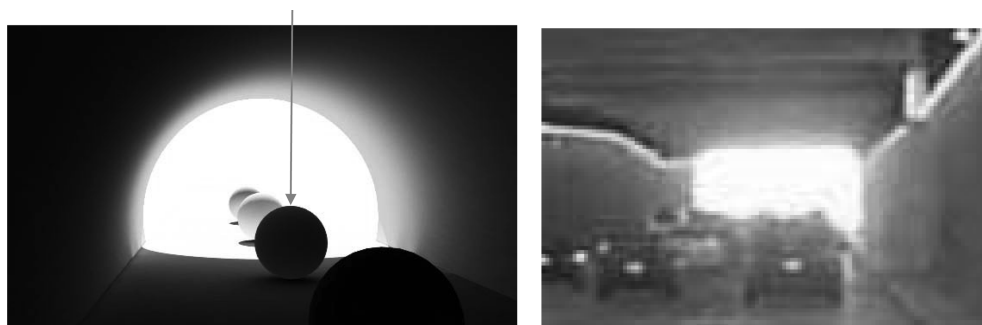


Fig. 4. Whitehole Phenomenon.

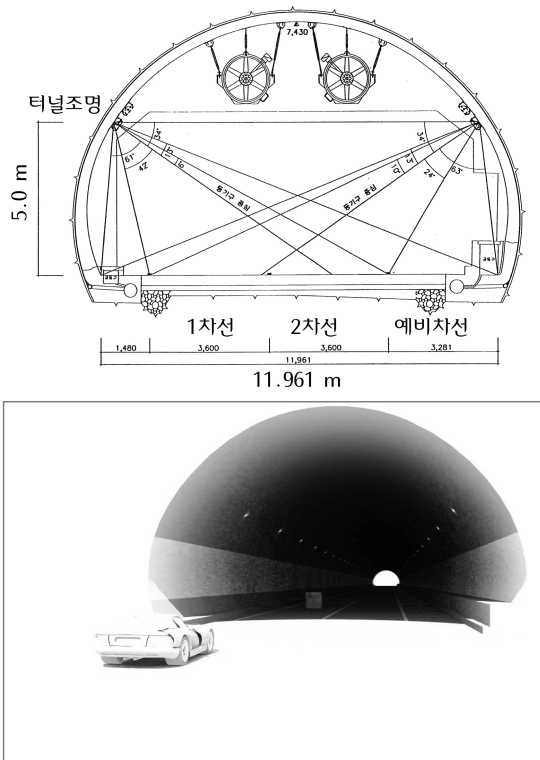


Fig. 5. Tunnel used in the Analysis.

내지 20 m 이후에는 거의 영향을 미치지 않게 됨을 알 수 있다. 이는 터널에 진입한 운전자가 암순응을 하는 과정에서 10 m 내지 15 m 정도까지는 일조의 도움을 받을 수 있으나 그 이후에는 조명시설에 의하여 터널내부의 휘도를 단계적으로 조절하여 주어야 할 필요가 있음을 의미한다. 시속 80 km로 운전하는 경우 초당 약 22 m를 진행하므로 일조의 영향을 받는 15

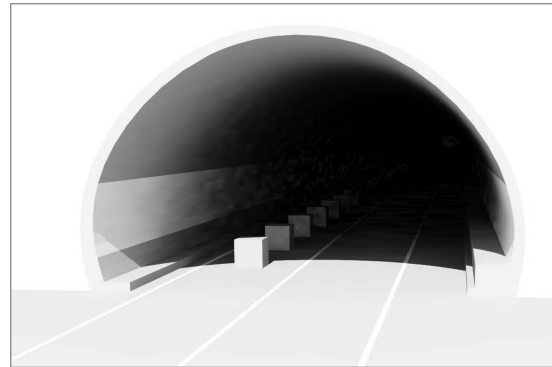


Fig. 6. Simulation Results (Daylight = 4630 cd/m²).

m 내지 20 m는 1초 이내의 거리에 해당한다. 과거 김동조 등의 측정에 의하면¹⁰⁾ 중앙고속도로 원무1터널의 경우 터널입구에서 14 m 정도가 야외휘도의 영향을 받고, 원무2터널의 경우 18.5 m 정도가 야외휘도의 영향을 받는 것으로 밝히고 있다. 이는 실제 측정에 의한 결과가 이 연구에서의 컴퓨터시뮬레이션 결과와 매우 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러므로 터널의 여러 조건을 변화시켜가면서 컴퓨터시뮬레이션함으로써 터널연구에 필요한 다양한 자료를 경제적이고 효율적으로 취득할 수 있을 가능성이 있음을 알 수 있다. 참고적으로 건설교통부 “도로터널 조명시설의 설계기준”에서는 터널입구에서 10m 정도를 일조의 입사거리로 규정하고 있다.

■ 터널입구로 입사된 일조는 터널 내부의 도로면 위에 위치한 물체에 대하여서는 노면과는 조금 다른 영향을 미칠 것으로 예측할 수 있는데, Fig. 8은 터널입구부 여러 지점에 위치한 장애물 Box(1 m × 1 m ×

Table 3. Simulation Results (Altitude of the Sun = 45°)

외부일조 도로면의 휘도 (cd/m ²)	측정	일조로부터의 거리별 측정 휘도(cd/m ²)													
		0m	5m	10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m	45m	50m	55m	60m	
2901	노면	2649	103	37	15	6	6	2	1	0	0	0	0	0	
	Box후면	3169	328	197	71	51	34	20	3	1	0	0	0		
4630	노면	4500	124	49	18	7	6	2	1	0	0	0	0		
	Box후면	5118	365	213	79	55	36	21	3	1	1	0	0		
6356	노면	6319	145	56	21	7	6	2	1	0	0	0	0		
	Box후면	7044	400	227	85	58	37	22	4	1	1	1	0		
8128	노면	8190	166	65	23	8	7	2	1	0	0	0	0		
	Box후면	9025	437	241	92	61	39	23	4	2	1	1	0		

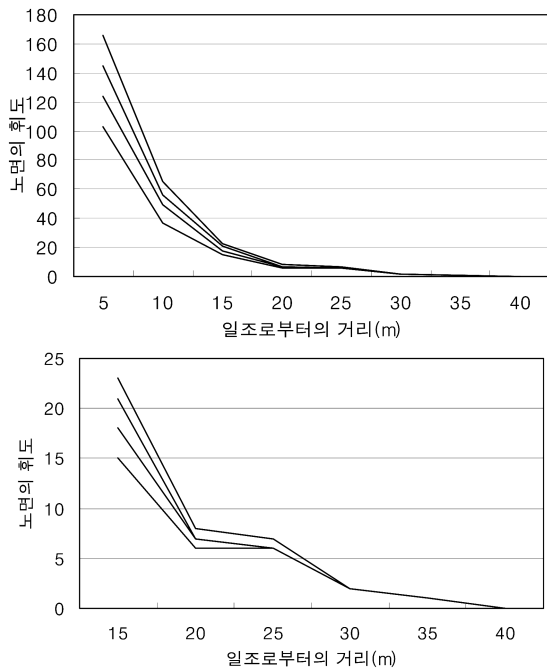


Fig. 7. Luminance Evolution along the Tunnel - Road Surface.

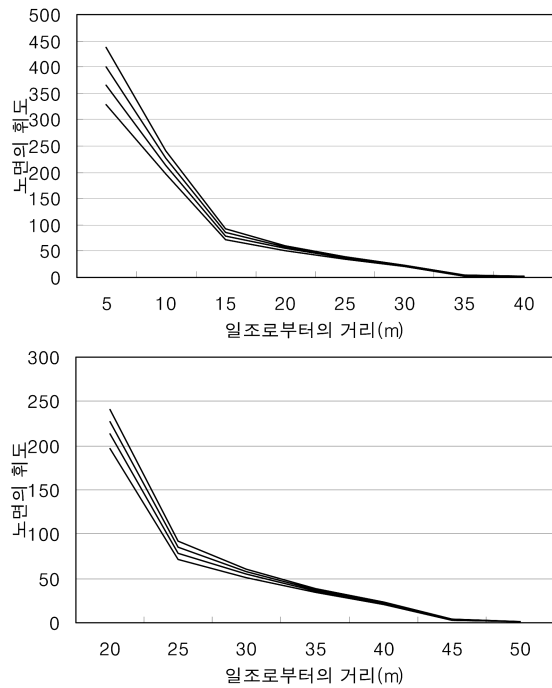


Fig. 8. Luminance Evolution along the Tunnel - Box.

1 m, 반사율 25%)의 휘도를 측정 한 것으로 일조는 터널입구에서 약 20 m까지는 Box의 휘도에 많은 영향을 미치고 그 이후로는 급격히 약화되어 약 30 m 이후에는 거의 영향을 미치지 않게 됨을 알 수 있다. 수평의 노면보다는 수직의 Box가 약 10 m 정도 일조의 영향을 더 받음을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 주간의 강한 일조가 터널의 내부 어느 깊이 정도까지 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 기본적인 터널을 컴퓨터상에 구현하고 다양한 밝기의 일조의 경우에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션하여 분석하였다. 분석결과 야외의 밝은 일조는 터널입구에서 약 10 m까지는 노면의 휘도에 많은 영향을 미치고 그 이후로는 급격히 약화되어 15 m 내지 20 m 이후에는 거의 영향을 미치지 않게 됨을 알 수 있었다. 이 결과는 실측을 통한 과거 연구에서의 결과와 유사함을 알 수 있었다. 또한 터널내부에 위치한 물체에 대하여서는 일조가 터널입구에서 약 20 m까지는 많은 영향을 미치고 그 이후로는 급격히 약화되어 약 30 m 이후에는

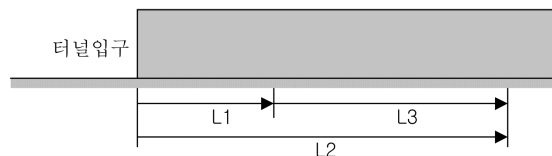


Fig. 9. Daylight in the Tunnel and Dark Adaptation 여기서, L1 = 일조가 영향을 미치는 구간 L2 = 암순응에 필요한 구간 L3 = 블랙홀 현상에 의한 위험구간

거의 영향을 미치지 않게 됨을 알 수 있었다. 이를 통하여 Fig. 9에서와 같이 L1, L2, L3의 관계가 설정되고 각 터널의 제반 여건에 맞는 적절한 조명체계가 구축될 필요성이 있다.

터널조명은 운전자의 안전성과 쾌적성 등을 결정하는 중요한 요소임에도 불구하고 아직까지 많은 터널들이 충분한 연구와 검토 없이 설치되고 있다. 그 원인의 하나가 터널마다 제반 상황적 요소가 다르기 때문에 실측 등을 통한 연구에는 한계가 있기 때문이다. 그러므로 이 논문에서 제시한 컴퓨터시뮬레이션 방법에 의한 연구가 안전하고 쾌적한 터널의 개발에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

1. 김훈, 강래철, “터널조명 시스템의 휘도분포 조사연구”, 조명전기설비학회지, **1994**, 제8권, 제6호, pp. 31-39.
2. CIE Publication No. 88, Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses, **2004**.
3. 이영규, “터널의 가시성 개선을 위한 Counter-beam 효과 연구”, 한국산업정보학회논문집, **2001**, 제6권, 제1호, pp. 77-81.
4. Young-Q Lee, “A Scheme for the Evaluation of Tunnel Lighting Alternatives”, IE Interfaces, **2001**, Vol. 14, No.2, pp. 205-209.
5. 지철근, 이진우, “도로터널 조명시설의 설계기준”, 한국 조명전기설비학회 1996년도 추계 학술발표회논문집, **1996**, pp. 57-60.
6. 최호규 외 7, 조명설비 및 설계, 성안당, **2000**.
7. 이영규, 이승호, “화이트홀 현상이 있는 터널출구에서 운전자 시인도 향상을 위한 프로빔조명에 대한 시뮬레이션 연구”, 한국터널공학회 학술논문집 터널기술, **2007**, Vol.9, No.1, pp. 29-36.
8. Inokuma, “도로터널의 카운터빔조명 실험”, 토목기술자료, **1994**, 제35권 제10호.
9. Sakamoto, Hiram, Takeda (1998) “Counterbeam and Probeam Lighting Systems for Tunnels”, J. of Illum. Eng. Inst. Jpn., **1998**, Vol.82, No.3, pp. 191-196.
10. 김동조, 남동훈, 김훈, “차량 계측 시스템을 이용한 터널의 조도 및 휘도 실측값 분석”, 한국조명전기설비학회 추계학술대회논문집, **2005**, pp. 195-199.
11. 한국산업규격, “터널조명기준 KS A 3703”, **1992**.
12. IESNA, Lighting Handbook, **1993**.