

# 화이트홀 현상이 있는 터널출구에서 운전자 시인도 향상을 위한 프로빔조명에 대한 시뮬레이션 연구

이영규<sup>1</sup>, 이승호<sup>2\*</sup>

## A simulation analysis on the probeam lighting for the visibility at a tunnel with whitehole phenomenon

Young-Q Lee · Seung-Ho Lee

**Abstract** Despite the role of tunnels in today's roadway environment, the studies on tunnel lighting is still scant. Drivers passing through a tunnel face some difficulties caused by the visual differences between outside and inside of the tunnel. The whitehole phenomenon at a tunnel exit-zone severely decreases the driver's visibility in the daytime. A probeam lighting is generally recommended for the prevention of it. This paper simulates an exit-zone with a whitehole phenomenon to verify the effect of probeam lighting. Even though the tunnel lighting is important, it is not easy to consider enough number of lighting alternatives at the stage of tunnel design due to the complexity of tunnel conditions. This paper is expected to contribute improving the visibility in tunnels, especially at the exit-zone.

**Keywords :** Tunnel lighting, visibility, simulation, whitehole, probeam

요 지 현대 도로에서 터널의 중요성은 점차 증가하고 있다. 터널을 통과하는 운전자는 터널 외부환경과 내부환경의 차이에서 오는 변화에 많은 어려움을 가지게 된다. 주간에 터널 출구부를 지나는 운전자는 터널 출구의 높은 야외휘도로 인하여 화이트홀 현상을 겪게 되며, 이는 심각한 운전자의 시인도의 감소를 가져오게 된다. 본 논문에서는 운전자가 겪는 화이트홀 현상에 대처하기 위한 방법의 하나인 프로빔조명의 효과를 검증하기 위하여 실제와 유사한 상황을 컴퓨터에 구현하여 시뮬레이션 하였다. 터널의 조명을 설계함에 있어 특정 터널이 가지고 있는 제반 요소들을 고려한 다양한 상황에서의 운전자 시인도를 분석하고 보다 좋은 운전환경을 위한 터널조명을 만들기 위한 노력이 필요하다. 본 연구에서의 시뮬레이션에 의한 분석은 터널조명 초기 설계단계에서 비교적 단기간에 다양한 조명대안들에 대한 비교, 분석을 가능하게 하는 하나의 접근법이 될 것이다.

주요어 : 터널조명, 시인도, 시뮬레이션, 화이트홀, 프로빔

### 1. 서 론

터널을 통과하는 운전자는 터널 외부환경과 내부환경의 차이에서 오는 변화에 많은 어려움을 가지게 된다. 특히 터널을 통과하는 운전자의 시각적인 환경변화는 안전하고 쾌적한 운전에 큰 장애요인이라고 할 수 있다. 주간에 터널 출구부를 지나는 운전자는 터널 출구의 높은 야외휘도로 인하여 화이트홀 현상을 겪게 되며, 이는 심각한 운전자의 시인도(visibility)의 감소를 가져오게 된다. 이러한 시인도의 감소는 그 터널의 지형학적인 배치, 태양의 움직임에 따른 야외휘도의 변화, 차량의 다

소, 차량의 속도 등의 요인에 의하여 결정된다고 할 수 있다. 화이트홀 현상에 의한 시인도 감소를 예방하기 위하여 터널조명의 설계단계에서 이러한 제반 요소를 고려하여야 할 것이나, 이러한 제반 요소를 고려한 다양한 설계대안의 검토를 통한 터널조명의 설치는 대다수의 터널에서 이루어지지 않고 있다고 할 것이다. CIE (2004), Sakamoto(1995), 김훈(1994), 지철근(1996), 이영규(2001)를 포함한 다수의 연구자에 의한 터널조명에 관한 일반적 연구는 다수가 있다. 특히 CIE(2004), Sakamoto(1995)에서는 프로빔조명에 대한 연구가 수행되었으나 연구방법이 컴퓨터 시뮬레이션이 아닌 실측을 통하여 이루어 졌기 때문에 그 연구에 한계가 있었다.

본 논문에서는 주간에 터널 출구부에서 운전자가 겪는 이러한 화이트홀 현상에 대처하기 위한 방법의 하나

<sup>1</sup>상지대학교 산업공학과 교수

<sup>2</sup>정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

\*교신저자 : 이승호 (shsh123@hanmail.net)

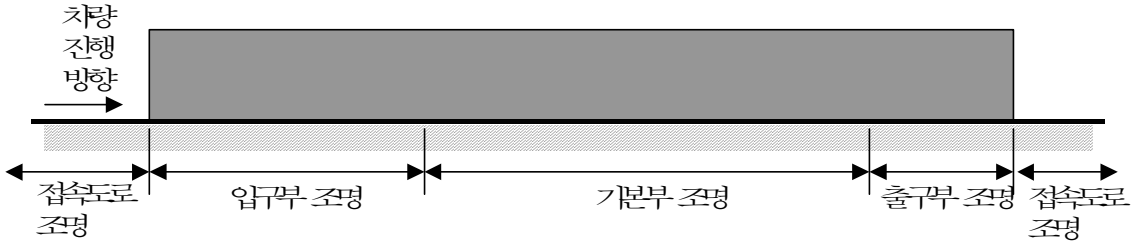


그림 1. 터널조명의 구성

인 프로빔조명의 효과를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증한다. 이를 위하여 일상적인 대칭조명과 출구부에서 흔히 사용되는 프로빔조명을 실제와 같이 컴퓨터에 구현된 터널을 통하여 시뮬레이션 함으로써 운전자가 겪는 전방 상황에 대한 휘도상의 변화를 분석한다.

## 2. 터널조명의 구성

터널조명은 일반적으로 그림 1에서와 같이 입구부 조명, 기본부 조명, 출구부 조명, 접근도로 조명으로 구성된다.

### 2.1 입구부 조명

일조가 강한 주간에는 도로를 주행하는 차량이 터널에 진입하면 운전자의 눈은 야외휘도에 순응되어 있는 상태로 터널에 접근하기 때문에 그림 2에서와 같이 터널 내부가 모두 암흑으로 보이는 블랙홀 현상이 발생한다. 이로 인하여 선행하는 차량을 포함한 내부의 물체가 잘 구분되지 않는다. 휘도는 광원에서 발생된 빛이 직접 눈에 들어오거나 물체의 표면에 반사된 뒤에 눈으로 들어오는 빛이 얼마나 밝은 것인가를 나타내는 것으로 운전자의 시인도에 커다란 영향을 미친다. 휘도의 단위는 단위 면적당 칸델라( $cd/m^2$ ,  $cd/cm^2$ )로 표시하는데 태양은  $160,000(cd/cm^2)$ , 투명전구(100W)는  $600(cd/cm^2)$ , 형광램프(40W) 주광색은  $0.35(cd/cm^2)$ , 달의 표면은  $0.3(cd/cm^2)$  정도가 된다. 입구부 조명은 운전자가 초기 터널 진입시점에 겪는 암순응 과정에 도움을 줄 수 있도록 하기 위함이다.

### 2.2 기본부 조명

기본부 조명은 조명기구를 일정 간격으로 설치하며

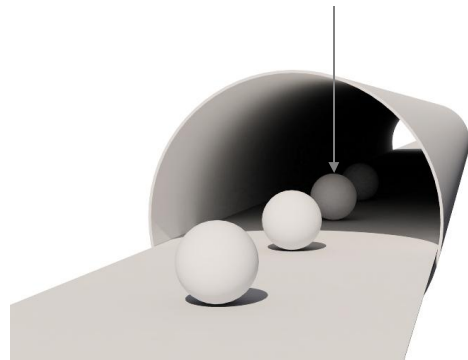


그림 2. 블랙홀 현상에 의한 시인도 저하

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 경제성 등을 고려하여 표 1에서와 같도록 일반적으로 하고 있다.

### 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 주간에는 밝은 터널외부를 배경으로 한 실루엣(silhouette)과 눈부심이 동반되는 화이트홀 현상이 발생하게 되고 이로 인하여 운전자의 심각한 시인도 저하가 순간적으로 발생하게

표 1. 기본부의 노면휘도

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



그림 3. 화이트홀 현상에 의한 시인도 저하

된다. 그림 3에서와 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 차량원근의 변화, 차선이동변화, 적재물체의 낙하, 적재물체의 원근변화)에 대한 운전자의 판단속도가 매우 느리게 된다. 출구부 조명은 이러한 현상을 방지하기 위하여 설치된다. 터널출구에는 설계속도 80km/h 이상, 출구 야외휘도 6,000(cd/m<sup>2</sup>)

이상, 그리고 터널 길이 400m 이상인 경우 출구부 조명을 설치하는 것이 바람직하다. 출구부 조명은 원칙적으로 출구부 야외휘도의 1/10으로 하고, 조명구간은 80m로 하게 되어 있다. 일조에 의한 야외의 휘도는 아주 커서 맑은 하늘은 8,000~16,000(cd/m<sup>2</sup>), 직사 일조에 의한 도로면은 3,000~5,000(cd/m<sup>2</sup>) 정도가 된다.

### 3. 출구부에서의 대칭조명과 프로빔조명

현재 대다수의 터널의 조명방식은 그림 4(1)에서와 같이 횡단방향 대칭으로 빛을 조사하는 이른바 대칭(symmetric)조명 방식이다. 즉, 차량의 진행방향에 대하여 조명기구의 배광(photometric distribution)은 기구중심으로 내린 수직선의 전후에 대칭하고 그 것이 터널의 측벽 혹은 천정에 설치된다. 조명기구의 배광 중에서 운전자와 마주하는 부분은 주로 노면휘도를 확보하는데 사용되며, 차량 진행방향 부분은 도로상의 장애물이나 선행하는 차량의 후면을 밝게 하는데 주로 사용된다. 대칭조명은 도로상의 장애물이나 선행차량에 대한 시인성, 벽면휘도 확보 등의 조명환경을 실현시켜 종합적으로 균형이 잡힌 조명방식이라고 할 수 있다.

인간의 눈은 물체를 보기 위해 망막에 상을 맺는데 필요한 빛 이외의 다른 빛의 영향으로 보이지 않게 되거나, 보기 어렵게 되거나, 볼 때 불쾌감을 느끼게 되는 현상을 겪는데 이를 총칭하여 눈부심(glare)이라 한다. 즉 시야내의 어떤 광도로 인하여 불쾌감, 고통, 눈의 피로 또는 시력의 일시적인 감퇴를 초래하는 현상을 말하며 눈부심은 다음과 같은 경우에 주로 발생한다.

- ① 주위가 어둡고 눈이 순응되어 있는 휘도가 낮을 때
- ② 광원의 휘도가 높을 때
- ③ 광원이 시선에 가까울 때
- ④ 광원의 겉보기 면적이 클 때와, 광원의 수가 많을 때

터널출구가 주간 일조에 의하여 강하게 노출되어 있는 상황, 즉 출구 주변이 자연물이나 인공구조물 등에 의하여 가리지 않고 또한 일조가 직접 조사되는 방향으로 출구가 향하고 있는 경우 등에서는 출구로 향하는 운전자에게 대칭조명은 터널출구의 야외휘도에 의하여 터널조명으로서의 제 기능을 다 하지 못하게 된다. 프로

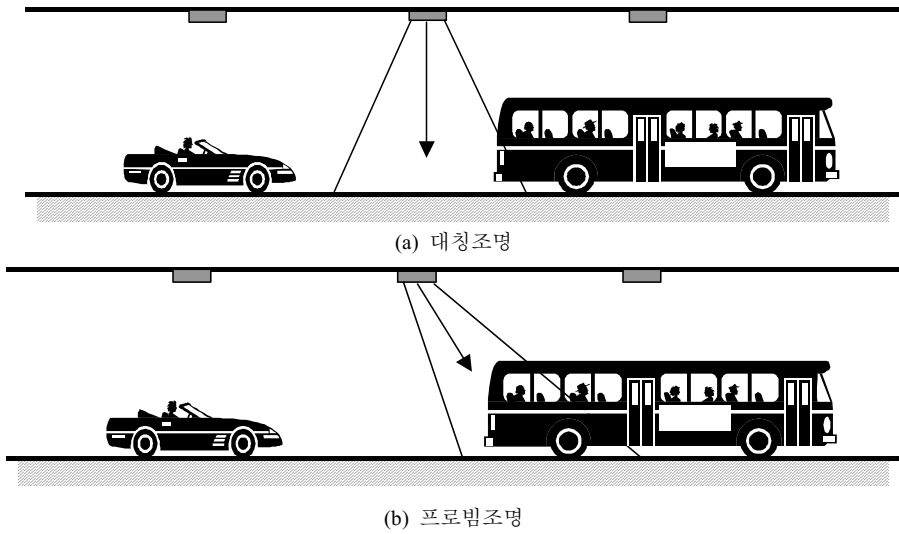


그림 4. 대칭조명과 프로빔조명

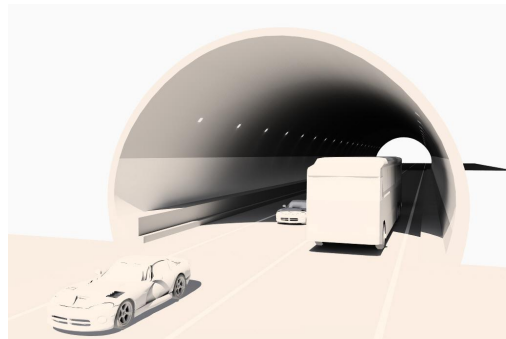
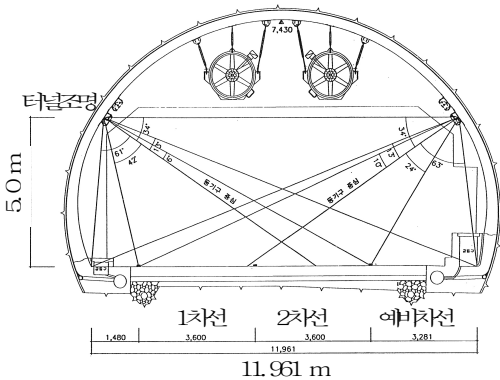


그림 5. 시물레이션에 사용된 터널

빔조명은 교통량이 비교적 많고 설계속도가 높은 터널에서 그림 4(b)에서와 같이 선행차를 따라 가면서 주행하는 운전자에 대하여 주행방향에 빛을 비추어 선행차량의 후면을 밝혀 선행차량을 포함한 장애물 등을 쉽게 볼 수 있게 하는 조명방식이다.

#### 4. 시물레이션에 의한 출구부 시인도 분석

##### 4.1 사용된 터널의 구조 및 조명

터널 출구부에서 프로빔조명에 의한 운전자의 시인도 개선효과를 컴퓨터 시물레이션을 통하여 검증하여 본다.

시물레이션에 사용된 터널은 그림 5에서와 같이 1개 차선의 폭이 3.6m인 편도2차선의 터널로 예비차선을 가지고 있으며, 터널 전체의 폭이 11.961m이다. 터널 출구부가 전체적으로 수평이면서 동시에 직선의 형태이고 출구가 남측을 향하고 있다.

터널의 조명기구는 기본적으로 5.0m의 높이에 5.0m의 간격을 두고 설치한다. 사용된 조명기구는 Lithonia Lighting사의 TW5 150S 제품으로 16,000lm인 고압나트륨(HPS) Lamp 1개를 가진 터널벽 부착형이다. 이 조명기구는 그림 6에서와 같은 배광곡선과 조명형태를 가지고 있다.

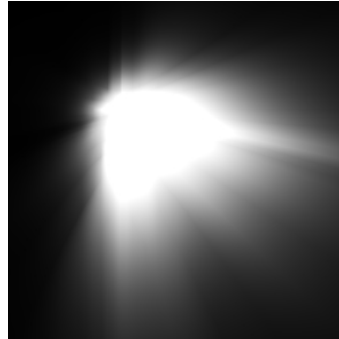
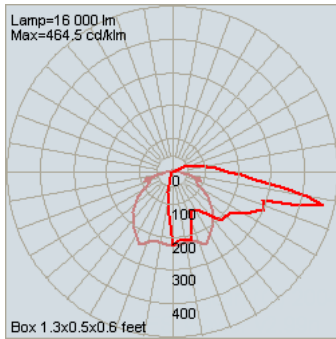


그림 6. 사용된 조명기구의 배광곡선 및 조명형태



(a) 조명상황 1: 대칭조명, 조명기구 1개



(b) 조명상황 2: 프로빔조명, 조명기구 1개



(c) 조명상황 3: 대칭조명, 조명기구 3개



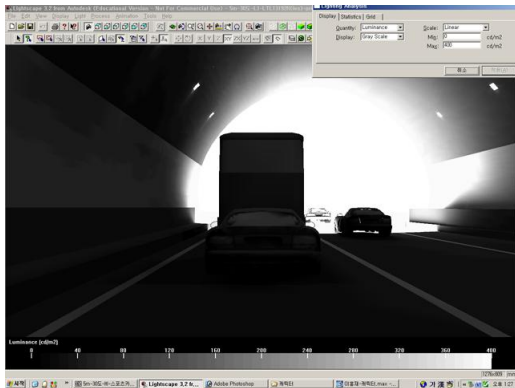
(d) 조명상황 4: 프로빔조명, 조명기구 3개

그림 7. 시뮬레이션 상황

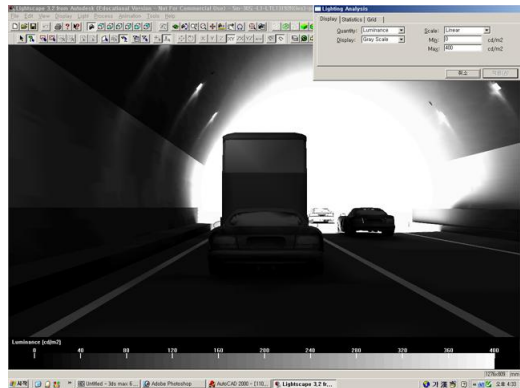
#### 4.2 출구부 시뮬레이션

터널 출구부에서의 운전자 시인도에 관한 시뮬레이션을 하기 위하여 특정 상황을 연출하였다. 그림 7에서

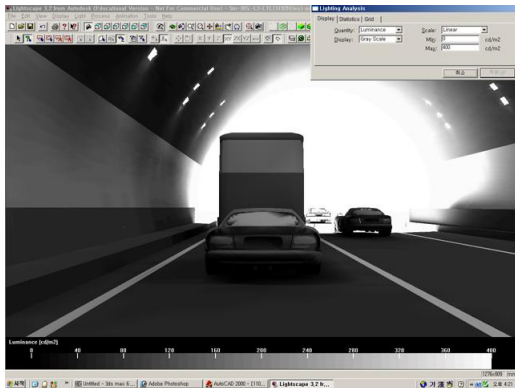
와 같이 대형 Bus가 터널출구를 빠져 나가기 시작하였으며 그 뒤를 승용차가 약 5m의 간격을 두고 따라가고 있다. 이 시뮬레이션에서의 관측자(운전자)는 버스 뒤 승용차의 후방 5m 지점에 승용차의 높이(지상 1.2m)에



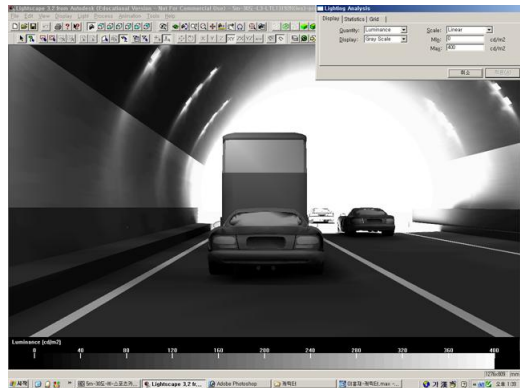
(a) 조명상황 1: 대칭조명, 조명기구 1개



(b) 조명상황 2: 프로빔조명, 조명기구 1개



(c) 조명상황 3: 대칭조명, 조명기구 3개



(d) 조명상황 4: 프로빔조명, 조명기구 3개

그림 8. 시뮬레이션 결과

위치하고 있다. 남측을 향하고 있는 터널출구에는 태양이 고도 45도로 정남에서 일조를 하고 있다. 대칭조명과 프로빔조명에 대하여 다음 4가지 조명상황(그림 7)을 설정하였다.

- 조명상황 1(대칭조명, 조명기구 1개씩): 5.0m 간격으로 1개씩 양측 벽면에 가까운 차선의 중앙을 향하여 아래로 조명되게 설치
- 조명상황 2(프로빔조명, 조명기구 1개씩): 5.0m 간격으로 1개씩 양측 벽면에 가까운 차선의 중앙을 향하면서 출구 방향으로 60도 회전하여 조명하도록 설치
- 조명상황 3(대칭조명, 조명기구 3개씩): 5.0m 간격으로 3개씩 양측 벽면에 가까운 차선의 중앙을 향하여 아래로 조명되게 설치

- 조명상황 4(프로빔조명, 조명기구 3개씩): 5.0m 간격으로 3개씩 양측 벽면에 가까운 차선의 중앙을 향하면서 출구 방향으로 60도 회전하여 조명하도록 설치

조명 시뮬레이션 program인 Lightscape를 이용하여 연출된 상황에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션을 통하여 그림 8과 표 2에서와 같은 결과를 얻었다. 일반적으로 터널에서 흔히 채택하고 있는 조명상황 1의 경우, 수천  $cd/m^2$  이상의 출구 아외휘도에 비하여 반사율이 높은 버스유리(B1), 승용차의 유리(C1), 벽의 타일(W1)만이 50 ~ 70( $cd/m^2$ )의 휘도를 보이고 나머지 부분들은 전체적으로 20 ~ 30( $cd/m^2$ )의 휘도를 가지고 있다. 결과적으로 관측지점의 운전자에게는 출구의 높은 아외휘도로 인한 강한 눈부심과 실루엣 현상으로 터널

표 2. 시뮬레이션 결과에 의한 휘도



측정위치	휘도(cd/m <sup>2</sup> )			
	조명상황 1	조명상황 2	조명상황 3	조명상황 4
B1	50	85	145	240
B2	22	36	71	118
C1	71	80	210	225
C2	33	42	100	132
W1	50	39	130	90
W2	22	16	59	42
R1	16	21	54	62
R2	24	21	61	56

내부의 선행 차량들과 터널의 노면, 벽면이 전체적으로 하나의 검정 물체로만 인식되게 되어 선행차량의 유무, 속도변화에 의한 원근의 변화, 방향의 변화, 장애물의 낙하 등 안전운전에 필요한 정보의 신속한 취득에 어려움이 발생하게 된다. 조명상황 2의 경우, 프로빔조명으로 인하여 선행차량들에 대한 휘도가 증가하여 선행차량에 대한 운전자의 시인도는 개선되었으나 벽면의 휘도가 감소하여 터널 출구부에서 필요한 명순응이 늦어지게 된다. 조명상황 1과 2는 모두 출구부 조명으로는 전체적인 조도가 부족하다고 할 수 있다. 조도를 올리기 위하여 조명기구를 3개로 할 경우인 조명상황 3과 4에서는 버스과 승용차를 포함한 전방의 물체들이 충분히 분리되어 인식할 수 있는 휘도를 가지게 됨으로써 전방상황의 변화 특히, 근접한 승용차의 속도변화에 의한 원근의 변화와 방향 등의 변화를 매우 빠르게 인식할 수 있게 된다. 또한 벽면과 출구부 전체에 걸친 노면과 벽면의 충분한 휘도로 인하여 출구부를 통과하면서 운전자의 눈이 명순응을 빠르게 하게 되어 출구의 눈부심이 상당히 완화되게 된다. 특히 조명상황 4의 경우, 조명상황 3과 동일한 조명기구임에도 불구하고 프로빔조명인 이유로 선행차량의 후면휘도가 매우 증가하여 운전자의 시인도를 개선시키는 효과가 분명히 나타나고 있다.

### 5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 주간에 터널 출구부에서 운전자가 겪는 화이트홀 현상에 대처하기 위한 방법의 하나인 프로

빔조명의 효과를 검증하기 위하여 다음의 연구를 수행하였다.

1. 실제 터널과 유사한 구조와 조명을 가진 터널을 컴퓨터에 구현한 후,
2. 버스과 승용차가 터널의 출구부를 통과하는 상황을 연출하여,
3. 대칭조명과 프로빔조명, 조명기구 1개와 3개인 경우(조명상황)에 대하여 조명 시뮬레이션을 실시하였다.
4. 각 조명상황에서 후행하는 차량의 관점에서 선행하는 차량의 후면휘도를 측정하여 비교, 분석함으로써 프로빔조명의 효과를 판단하였다.

현대 도로에서 터널의 중요성은 점차 증가하고 있다. 특히 터널에서의 안전함과 쾌적함은 매우 중요함에도 불구하고 터널조명, 특히 출구부 조명에 대한 연구는 부족하다고 할 것이다. 터널의 조명을 설계함에 있어 일상적인 기준에 따라 조명을 설치할 것이 아니라 특정 터널이 가지고 있는 제반 요소들을 고려한 다양한 상황에서의 운전자 시인도를 분석하고 보다 좋은 운전환경을 위한 터널조명을 만들기 위한 노력이 필요하다. 본 연구에서의 시뮬레이션에 의한 분석은 터널조명 초기 설계단계에서 비교적 단기간에 다양한 조명대안들을 검토, 비교할 수 있게 하는 하나의 방안이 될 것이다.

---

## 참고문헌

1. 김훈, 강래철(1994), “터널조명 시스템의 휘도분포 조사연구”, 조명전기설비학회지, 제8권, 제6호, pp. 31-39.
2. 이영규(2001), “터널의 가시성 개선을 위한 Counter-beam 효과 연구”, 한국산업정보학회논문집, 제6권, 제1호, pp. 77-81.
3. 지철근, 이진우(1996), "도로터널 조명시설의 설계 기준", 한국조명전기설비학회 1996년도 추계학술 발표회논문집 , pp.57-60.
4. 최호규 외 7(2000), 조명설비 및 설계, 성안당.
5. 한국산업규격(1992), KS A 3703 터널조명기준.
6. CIE(2004), Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses: CIE Publication No. 88:2004.
7. Sakamoto, S., Hiram, M., and Takeda, H.(1995), "Counter-beam and Pro-beam Lighting Systems for Tunnels", J. of Illum. Eng. Inst., Vol. 82, No. 3, pp. 191-196.
8. Lee, Young-Q(2001), "A Scheme for the Evaluation of Tunnel Lighting Alternatives", IE Interfaces, Vol. 14, No.2, pp. 205-209.



이 영 규

상지대학교 산업공학과 교수

E-mail :

---



이 승 호

정회원, 상지대학교  
건설시스템공학과 교수

E-mail : shsh123@hanmail.net

---