

터널 입구부 카운터빔조명의 효과에 대한 시뮬레이션 연구

이영규¹, 이승호^{2*}

A simulation analysis on the effect of counterbeam lighting for the tunnel entrance zones

Young-Q Lee, Seung-Ho Lee

Abstract Drivers passing through a tunnel face some difficulties caused by the visual differences between outside and inside of the tunnel. The blackhole phenomenon at a tunnel entrance zone severely decreases the driver's visibility during the daytime. A counterbeam lighting is generally recommended for the prevention of it. This paper simulates an entrance zone with a blackhole phenomenon to verify the effect of counterbeam lighting. Even though the tunnel lighting is important, it is not easy to consider many 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 entrance zone.

Keywords: Tunnel lighting, counterbeam, simulation, entrance zone

요 지 터널을 통과하는 운전자는 터널 외부환경과 내부환경의 차이에서 오는 변화에 많은 어려움을 가지게 된다. 특히 주간에는 터널 입구부를 지나는 운전자는 터널 외부의 높은 야외휘도로 인하여 블랙홀 현상을 겪게 되며, 이는 심각한 운전자의 시인도의 감소를 가져오게 된다. 본 논문에서는 운전자가 겪는 블랙홀 현상에 대처하기 위한 방법의 하나인 카운터빔조명의 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, 블랙홀, 카운터빔

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. 주간에는 터널 입구부를 지나는 운전자는 터널 입구의 높은 야외휘도로 인하여 블랙홀(blackhole) 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 다소, 차량의 속도 등의 요인에 의하여 결정된다고 할 수 있다. 블랙홀 현상에 의한 시인도 감소를 예방하기 위하여 터널조명의 설계단계에서 이러한 제반 요

소를 고려하여야 할 것이나, 이러한 제반 요소를 고려한 다양한 설계대안의 검토를 통한 터널조명의 설치에 대다수의 터널에서 이루어지지 않고 있다고 할 것이다. 터널조명에 관한 연구(CIE, 2004; Inokuma, 1994; Sakamoto 등, 1998, 김훈과 장래철, 1994; 지철근과 이진우, 1996) 다수 있으나 실측 등을 통한 연구가 중심이며 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 연구는 매우 적다.

본 논문에서는 주간에는 터널 입구부에서 운전자가 겪는 이러한 블랙홀 현상에 대처하기 위한 방법의 하나인 카운터빔(counterbeam) 조명의 효과를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석한다. 이를 위하여 일상적인 대칭조명과 입구부에서 흔히 사용되는 카운터빔조명을 실제와 같이 컴퓨터에 구현된 터널을 통하여 시뮬레이션 함으로써 운전자의 시인도를 분석한다.

2. 터널 입구부 조명

터널조명은 일반적으로 그림 1에서와 같이 입구부 조

¹상지대학교 산업공학과 교수

²상지대학교 건설시스템공학과 교수

*교신저자: 이승호 (shsh123@hanmail.net)

명, 기본부 조명, 출구부 조명, 접속도로 조명으로 구성된다.

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. 운전자가 주간의 3,000~6000 (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. 입구부 조명은 이와 같이 운전자가 주간에는 터널 진입 초기시점에 겪는 암순응 과정에 도움을 줄 수 있도록 하기 위함이다.

입구부조명은 운전자가 일정 시간에 걸쳐 서서히 어두움에 순응할 수 있도록 하기 위하여 그림 3에서와 같이 단계별로 휘도를 줄여가게 되는데 크게 나누어 경계부(threshold zone), 이행부와 완화부(transition zone)의

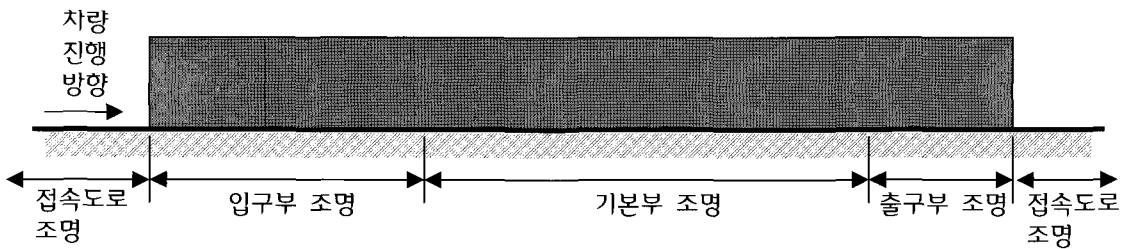


그림 1. 터널조명의 구성

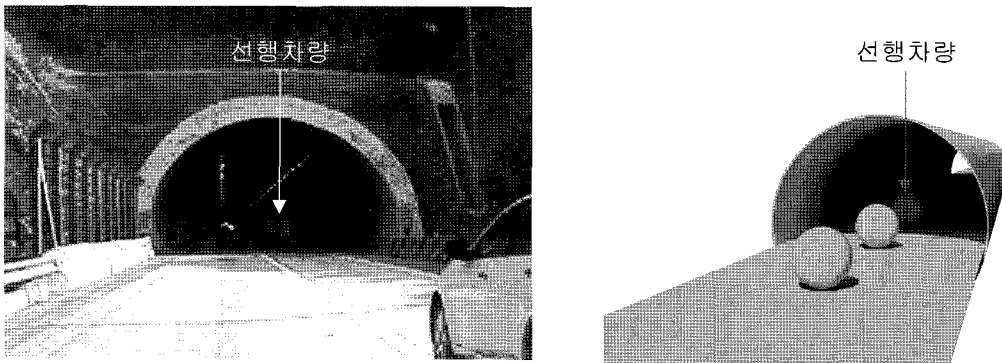


그림 2. 블랙홀 현상에 의한 시인도 저하

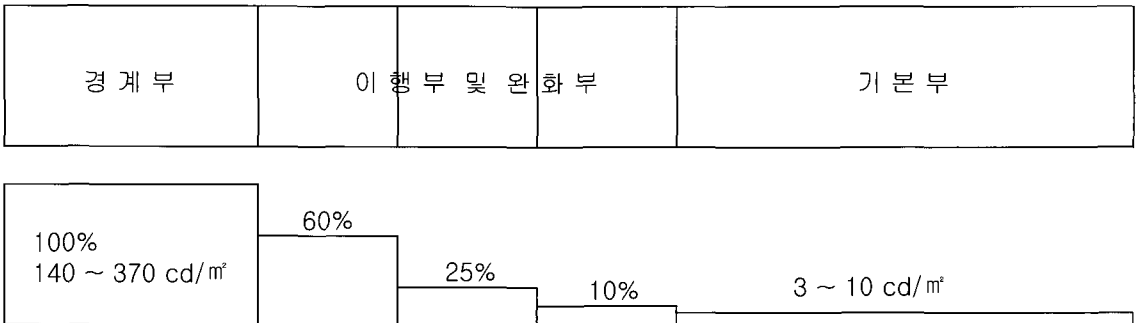


그림 3. 입구부 조명의 단계적 구분

로 구분한다. 이행부와 완화부는 다시 2~3단계로 구분하여 휘도를 서서히 터널 기본부의 휘도 수준까지 내리게 된다. CIE 88:2004(CIE, 2004)에서 제시하는 경계부의 최소거리는 터널 설계속도의 정지거리(stopping distance, 운전자가 장애물을 발견하고 안전하게 정지할 수 있는 거리)만큼으로 하고 있다. 설계속도에 따른 일반적인 정지거리는 표 1에서와 같다.

3. 입구부에서의 대칭조명과 카운터빔조명

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. 대

칭조명은 도로상의 장애물이나 선행차량에 대한 시인성, 벽면휘도 확보 등의 조명환경을 실현시켜 종합적으로 균형이 잡힌 조명방식이라고 할 수 있다.

그러나 야외휘도가 높은 주간엔 터널에 진입하는 운전자는 터널이 검은 굴(블랙홀 현상)로 보이게 되며, 터널 안의 노면과 장애물이 구체적으로 보이지 않게 된다. 일단 터널로 진입한 운전자는 눈이 터널 내부의 낮은 휘도에 순응하는 기간 동안 전방의 장애물과 배경(노면과 벽면 등)의 휘도대비(luminance contrast)를 잘 인식하지 못하여 운전이 어려움을 겪게 된다. 이러한 상황에서 운전자에 중요한 것은 전방 장애물의 존재에 대한 인식이다. 즉, 장애물의 구체적인 정보(형상, 속도, 색깔 등)가 아니라 장애물의 존재를 빠르게 인식하고 이에 대비하는 운전이 필요하다. 이를 위하여 최근에 와서 조명기구의 배광을 차량의 진행방향에 대하여 비대칭으로 한 조명방식이 터널 입구부 조명으로 유럽과 일본을 중심으로 개발되어 소개되고 있는데 그것이 그림 4(2)인 카운터빔 조명 방식이다. 이 방식은 전방 장애물의 시인성을 개선함과 동시에 효율적인 조명에 의하여 비용을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다. 도로면에 입사한 빛이 운전자의 방향에 효율적으로 반사되기 때문에 높은 노면휘도를 얻을 수 있고 전방에 있는 장애물의 후면에는 빛이 조사되지 않기 때문에 노면과 장애물 후면과의 높은 휘도대비가 얻어진다. 즉 전방의 장애물이 실루엣으로 보이게 되어 장애물에 대한 지각(인식)이 쉬워진다.

표 1. 설계속도에 따른 정지거리

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

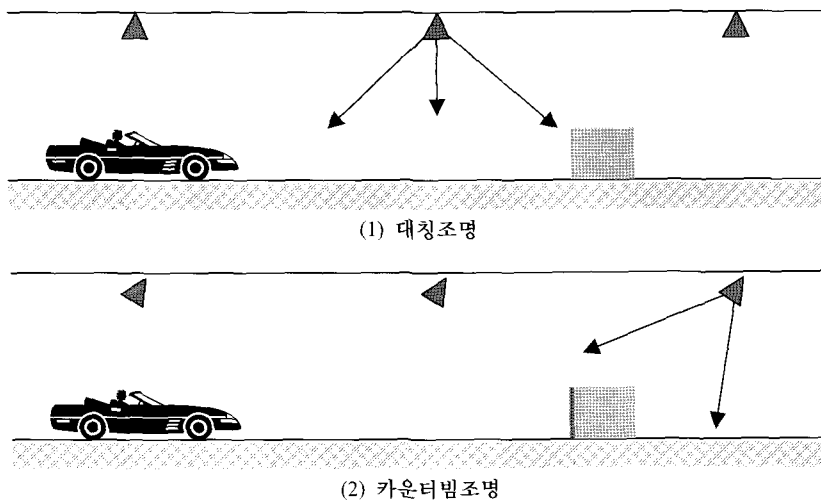


그림 4. 대칭조명과 카운터빔조명

4. 입구부 시인도 분석

터널조명 설계는 매우 많은 요소들을 고려하여 결정되어야 한다. 즉 터널의 조명에 의한 시인성은 해당 터널의 여러 요소들에 의하여 결정된다. 영향을 주는 요소로 차량의 속도, 교통량, 장애물의 크기/형태/색깔, 조명 위치, 조명의 배광 및 설치 각도, 터널의 길이, 터널의 휘어짐, 터널의 경사도 등 매우 다양하여 조명의 설계 요소적 차원에서 보면 모든 터널이 다르다고 할 수 있다. 결국 시인성 개선의 차원에서 보면 모든 터널의 조명은 매번 여러 가지의 다양한 분석을 통하여 최적화를 추구하여야 한다. 그러나 현실적으로 이러한 방법은 경제적, 기술적, 시간적으로 어려움을 가지게 된다. 개념적으로 보다 개선된 시인성과 경제성을 줄 수 있을 것으로 알려져 있는 카운터빔조명의 효과를 평가하기 위하여 일본을 중심으로 실험을 통한 연구가 진행되고 있다. 이들 연구에서는 실험용 터널을 설치하고 그 효과를 실제 측정하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 실험하여야 할 터널의 상황이 매우 다양하게 많으므로 비용과 시간 등의 차원에서 매우 제한적이라고 할 수 있다.

이번 연구는 터널 입구부에서 카운터빔조명에 의한 운전자의 시인도 개선효과의 여부를 알아보는 것이다. 이를 위하여 다음의 경우로 나누어 분석한다.

- 경우 1: 터널 내부로 들어오는 외부의 일조가 없는 경우와 있는 경우
- 경우 2: 조명을 터널 측벽에 설치한 경우와 천정에 설치한 경우
- 경우 3: 장애물 상자가 조명 바로 아래 위치하는 경우와 조명과 조명 사이에 위치하는 경우

이상의 여러 경우를 조합한 상황에서 노면반사율을 25%로 설정하고 분석용 터널을 모델링한 후 터널의 입구부 여러 위치에 장애물 상자(1 m × 1 m × 1 m, 반사율 25%)를 위치한 후, 대칭조명의 경우와 카운터빔조명의 경우에 대하여 시뮬레이션을 실시하여 시인도를 평가하였다. 시인도는 상자의 후면과 배경(주변노면)의 휘도대비(C)를 아래 식을 기준으로 판단하였다.

$$\text{휘도대비 } C = \frac{L_R - L_B}{L_R}$$

여기서 L_R = 배경(도로면)의 휘도, L_B = 장애물(상자) 후면의 휘도이다.

4.1 분석터널의 설정

시뮬레이션에 사용된 터널은 그림 5에서와 같이 1개 차선의 폭이 3.6 m 인 편도2차선의 터널로 예비차선 1개를 가지고 있으며, 터널의 폭 11.961 m 인 터널로 수평이면서 동시에 직선이다.

터널의 조명기구는 측벽 혹은 천정에 10 m의 간격을 두고 설치할 경우 터널의 기본부 조명에 필요한 휘도가 나옴을 기초 시뮬레이션 분석을 통하여 파악하였다. 사용된 조명기구는 Lithonia Lighting사의 TW5 150S 제품으로 16,000 lm인 고압나트륨(HPS) 전구 1개를 가진 기구이다. 이 조명기구는 그림 6에서와 같은 배광곡선과 조명형태를 가지고 있다.

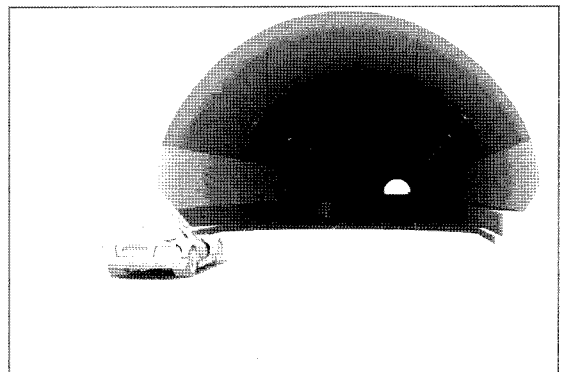
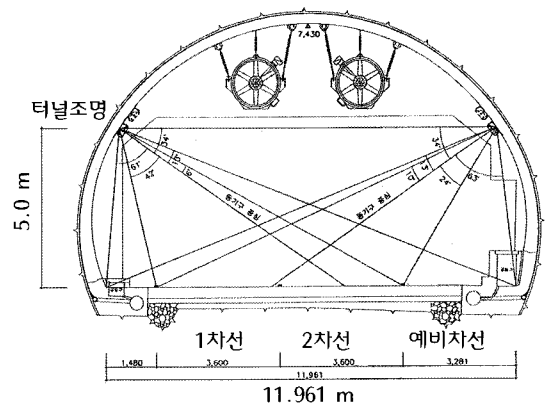


그림 5. 시뮬레이션에 사용된 터널 (조명기구를 측벽에 설치한 경우)

4.2 시뮬레이션 결과

조명 시뮬레이션 프로그램인 Lightscape를 이용하여 설정된 상황에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 먼저

외부 일조가 없는 경우, 즉 외부의 강한 일조가 터널 내부의 도로면과 장애물의 휘도에 영향을 주지 않는 상황에 대하여 시뮬레이션하여 그림 7과 표 2에서와 같은

Filename: LTL13192R.IES
 Test: LTL13192R
 Manufacturer: LITHONIA LIGHTING
 Luminaire catalog: TW5 150S
 Luminaire: TW5 SERIES 150W HPS TYPE 4 VERY SHORT NONCUTOFF DIST.
 Lamp: ONE 150-WATT HIGH PRESSURE SODIUM.

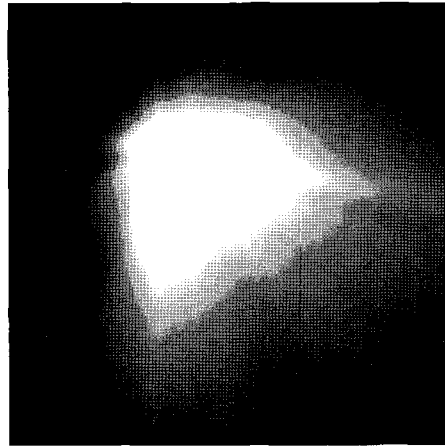
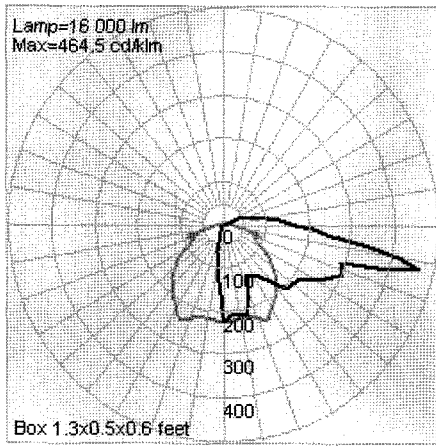
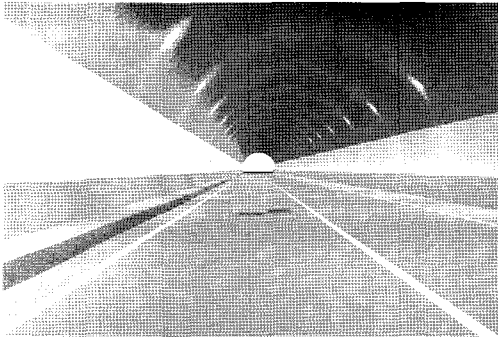


그림 6. 사용된 조명기구의 배광곡선 및 조명형태

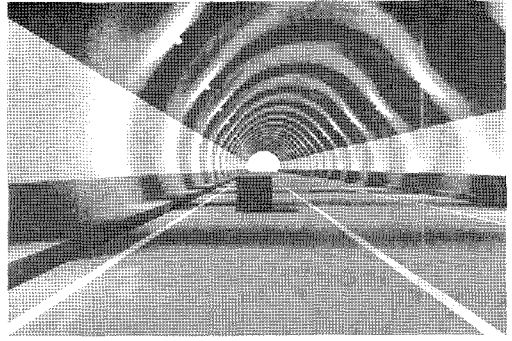
표 2. 시뮬레이션 결과 (외부 일조가 없다고 가정할 때)

조명위치	장애물위치	조명방법	휘도 (cd/m ²)		휘도대비 (C)	상황	
			도로면	상자후면			
측 벽	조명 아래	대 칭	도로면	7.0	-0.20	1	
			상자후면	8.4			
	카운터빔	대 칭	도로면	4.9	0.76	2	
			상자후면	1.2			
	조명과 조명 사이	대 칭	도로면	7.4	-1.24	3	
			상자후면	16.6			
카운터빔	대 칭	도로면	5.2	0.69	4		
		상자후면	1.6				
천 정	조명 아래	대 칭	도로면	10.2	-0.31	5	
			상자후면	13.4			
	카운터빔	대 칭	도로면	6.0	0.88	6	
			상자후면	0.7			
	조명과 조명 사이	대 칭	도로면	10.7	-1.29	7	
			상자후면	24.5			
		카운터빔	대 칭	도로면	6.3	0.78	8
				상자후면	1.4		

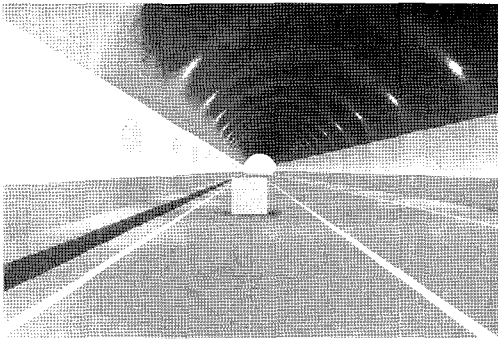
* 휘도대비(C)가 양의 경우에는 배경에 비하여 장애물이 더 어둡게 보이는 경우이고, 음의 경우에는 장애물이 더 밝게 보이는 경우이다.



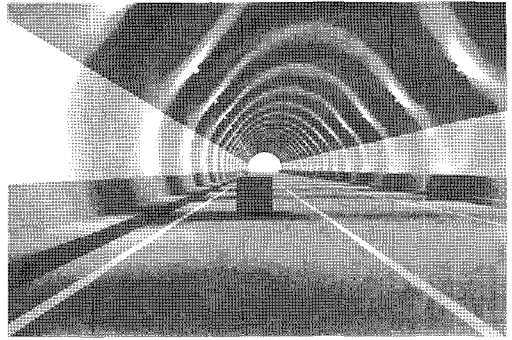
상황 1



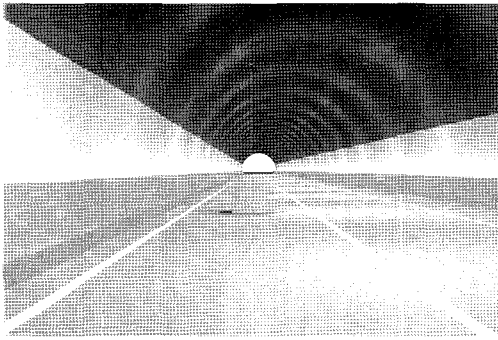
상황 2



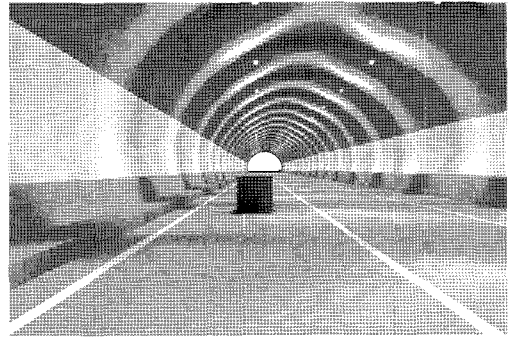
상황 3



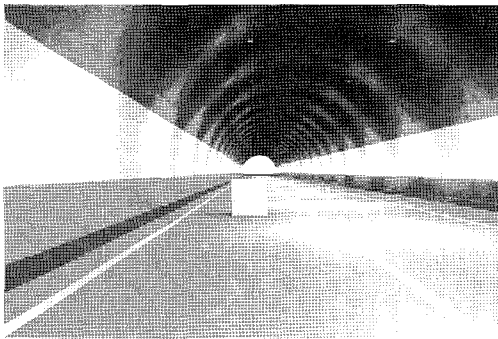
상황 4



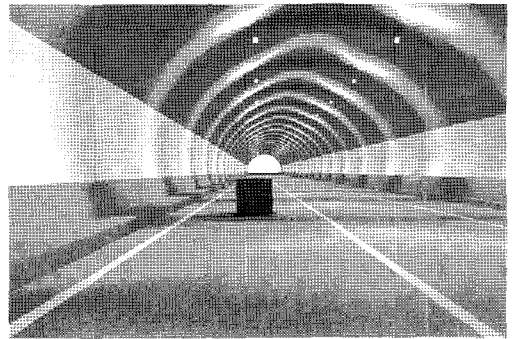
상황 5



상황 6



상황 7



상황 8

그림 7. 시뮬레이션 결과 (외부 일조가 없을 경우)

결과를 얻었다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

■ 만약 장애물(상자)이 조명아래에 위치하는 경우(그림 7과 표 2의 상황 1, 2, 5, 6), 조명위치에 상관없이 대칭조명에 비하여 카운터빔조명이 휘도대비 측면에서 훨씬 개선된 시인성을 제공하여 일반적으로 알려진 카운터빔의 효과를 기대할 수 있다. 그러나 장애물이 조명과 조명 사이에 위치하는 경우(그림 7과 표 2의 상황 3, 4, 7, 8)에는 대칭조명의 휘도대비가 더 높다. 오히려 대칭조명에서 배경에 비하여 장애물이 더 밝게 보여(휘도대비가 높아져) 시인도가 개선된다. 한편 카운트빔조명의 경우(상황 2, 4, 6, 8) 휘도대비가 전체적으로 0.7 ~ 0.8의 안정된 값을 유지하며 카운터빔의 효과를 보인다. 반면 대칭조명의 경우(상황 1, 3, 5, 7) 장애물이 배경보다 더 밝게 보이며 휘도대비는 장애물의 위치에 따라 많은 변화가 있다.

그러나 카운터빔조명의 효과를 기대하는 주간 상황에서는 외부의 강한 일조가 존재하게 되고 그 일조가 터널 내부의 일정 깊이까지 영향을 주게 된다. 외부 일조가 터널 내부에 미치는 영향을 알아보기 위하여 외부 일조가 4550 cd/m² 되는 경우에 대하여 터널조명이 없는 상태에서 터널 내부 여러 위치에서의 노면과 상자 후면의 휘도를 측정된 결과 그림 8과 표 3에서와 같으며, 이를 통하여 강한 외부 일조는 터널 내부 일정깊이(이 분석의 경우, 30 m 내지 40 m)까지만 영향을 미치고 그 이후에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 결국 터널 내부 30 m 내지 40 m 이후에서는 앞에서 분석한 ‘터널 외부의 강한 일조가 터널 내부의 도로면과 장애물의 휘도에 영향을 주지 않는 상황’의 결과를 적용하면 되나 외부 일조의 영향을 많이 받는 터널 입구부 30 m 내지 40 m까지는 새로운 시뮬레이션 분석을 필요로 한다. 그림 9와 표 4는 입구부 40 m까지의 시뮬레이션 결과이다.

다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

■ 외부 일조가 강한 경우 터널조명의 휘도는 외부에서 들어오는 일조의 휘도에 비하여 매우 낮으므로 터널 내부의 일정 깊이(이 분석의 경우, 30 m 내지 40 m)까지는 카운터빔의 효과가 나타나지 않는다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 주간에 터널 입구부에서 운전자가 겪

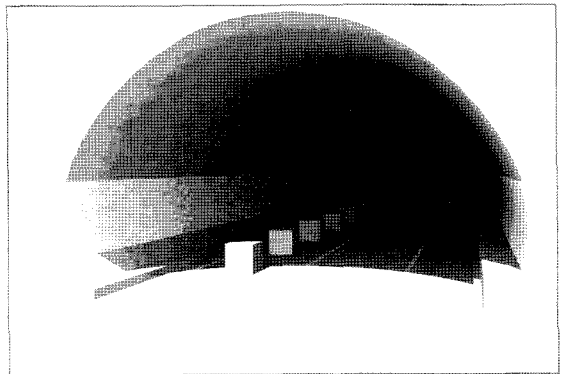


그림 8. 외부 일조의 영향 시뮬레이션 결과

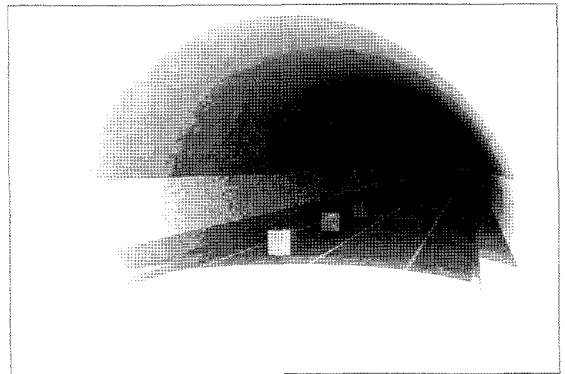


그림 9. 시뮬레이션 결과 (표 4에서 천정/조명아래/대칭의 상황)

표 3. 외부 일조의 영향 시뮬레이션 결과 (외부일조 4550 cd/m², 터널조명 없을 때)

측정	터널입구에서의 거리별 측정휘도 (cd/m ²)									
	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m	35 m	40 m	45 m	50 m
노면	4157	50	29	8	3	2	1	1	0	0
상자후면	4552	257	137	69	53	24	11	2	0	0

표 4. 시뮬레이션 결과 (외부 일조 (4550 cd/m²)가 있을 때, 입구부 40 m까지)

조명 위치	장애물 위치	조명 방법	휘도 (cd/m ²)				
			장애물	10 m	20 m	30 m	40 m
천 정	조명 아래	대칭	도로면	84	25	20	15
			상자후면	293	76	29	8
			휘도대비(C)	-2.5	-2.0	-0.5	0.5
		카운터빔	도로면	73	15	10	6
			상자후면	292	71	26	2
			휘도대비(C)	-3.0	-3.7	-1.6	0.7

조명 위치	장애물 위치	조명 방법	휘도 (cd/m ²)				
			장애물	15 m	25 m	35 m	45 m
천 정	조명과 조명 사이	대칭	도로면	38	16	10	10
			상자후면	151	67	31	6
			휘도대비(C)	-3.0	-3.2	-2.1	0.4
		카운터빔	도로면	28	14	5	4
			상자후면	151	54	26	0
			휘도대비(C)	-4.4	-2.9	-4.2	1.0

는 블랙홀 현상에 대처하기 위한 방법의 하나인 카운터빔조명의 효과를 검증하기 위하여 실제와 유사한 상황을 컴퓨터에 구현하여 시뮬레이션 하였다. 결과를 종합하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

■ 주간 강한 일조에 적응되어 있는 운전자는 터널로 진입한 후 터널 내부의 낮은 휘도에 눈이 미처 적응하지 못하여 운전이 어려움을 겪게 된다. 이러한 상황에서 카운터빔조명은 운전자 전방의 장애물을 실루엣으로 보이게 함으로써 시인도를 개선하여 줄 것으로 기대하고 설치된다. 그러나 시뮬레이션 분석 결과, 터널의 입구부 일정 깊이까지는 외부의 일조가 장애물의 휘도를 높여 카운터빔조명의 효과가 나타나지 않는다. 그러나 외부 일조의 영향을 받지 않는 터널의 일정 깊이 이상에서는 카운터빔의 효과가 나타난다.

■ 결국 터널의 일정 깊이 이후에 대하여서는 카운터빔을 이용하여 주간 운전자의 시인성 개선을 기대할 수 있으나 터널입구부 시작구간은 카운터빔으로는 주간 운전자의 시인성을 개선할 수가 없으므로 다른 적절한 방안을 모색하여야 한다.

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. 이러한 문제점에 대한 대책으로 이 논문에서 제시한 컴퓨터 시뮬레이션 방법에 대한 충분한 연구가 앞으로 있어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김훈, 강래철 (1994), "터널조명 시스템의 휘도분포 조사 연구", 조명전기설비학회지, 제8권, 제6호, pp. 31-39.
2. 이영규, 이승호 (2007), "화이트홀 현상이 있는 터널출구에서 운전자 시인도 향상을 위한 프로빔조명에 대한 시뮬레이션 연구", 한국터널공학회 학술논문집 터널기술, Vol. 9, No. 1, pp. 29-36.
3. 이영규 (2001), "터널의 가시성 개선을 위한 Counter-beam 효과 연구", 한국산업정보학회논문집, 제6권, 제1호, pp. 77-81.
4. 지철근, 이진우 (1996), "도로터널 조명시설의 설계기준", 한국조명전기설비학회 1996년도 추계학술발표회 논문집, pp. 57-60.
5. 최홍규, 강태은, 김정환, 박형민, 원진희, 조계술, 조경남, 최병숙 (2000), 조명설비 및 설계, 성안당.
6. Inokuma (1994), "도로터널의 카운터빔조명 실험", 토목기술자료 제35권 제10호.
7. CIE Publication No. 88 (2004), Guide for the lighting of road tunnels and underpasses.
8. Lee, Y.Q. (2001), "A scheme for the evaluation of tunnel lighting alternatives", IE Interfaces, Vol. 14, No. 2, pp. 205-209.
9. Sakamoto, Hirama, Takeda (1998), "Counterbeam and probeam lighting systems for tunnels", J. of Illum. Eng. Inst. Jpn., Vol. 82, No. 3, pp. 191-196.



이 영 규

상지대학교
산업공학과
교수

E-mail: yqlee@sangji.ac.kr



이 승 호

상지대학교
건설시스템공학과
교수

E-mail: shsh123@hanmail.net