

터널도로의 입구부 야외휘도 측정 및 분석

(Measurement and Analysis for Luminance in the Access Zone of Tunnel Road)

오석식* · 한종성 · 김 훈

(Seok-Sik Oh* · Jong-Sung Han · Hoon Kim)

(강원대학교 IT특성화대학 전기전자전공)

요 약

터널 경계구역 내의 필수 조명기준은 가시기준, 즉 충분한 물체의 대비에 의해 결정된다. 본 연구에서는 터널도로를 대상으로 주간의 터널 입구부의 배경을 디지털 카메라로 측정하고, 그 이미지를 감지대비법의 일종인 광막휘도법(Veiling Luminance Method)과 기존 20° 시야의 L20법에 적용하여 터널의 경계부 평균휘도를 산출하였으며, 그 결과를 비교, 분석하였다.

1. 서 론

주간 터널조명은 인간의 시각체계 특성상 그 설계가 매우 중요하다. 운전자는 설계 속도로 운행하면서 터널 내의 경계구역보다 상대적으로 밝은 상태에서 적어도 정지거리 바깥에서 상대적으로 어두운 경계구역 내에 있는 도로 이용자나 물체의 존재를 식별해 내야 한다. 운전자는 자기가 감지한 경계구역 내의 도로 이용자나 물체의 대비(물체와 배경간의 휘도의 차)가 실험 조건하에서 얻어진 기준인 최소요구 감지대비보다 적어도 같거나 높을 때에만 정지거리 이전에 그 장애물을 식별할 수 있다[1].

따라서 경계구역에서 요구되는 조명기준은 가시기준, 즉 충분한 대비에 의해 결정된다. 이에 선진 각국에서는 그동안의 실험적 연구 결과를 바탕으로 감지대비법(Perceived Contrast Method)을 적용한 경계부 휘도 산출법을 최근의 터널설계에 반영하고 있으나, 국내에서는 지금까지 이에 대한 연구나 설계사례가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 일반 터널도로를 대상으로 주간의 터널 입구부를 정지거리에서 디지털 카메라로 촬영한 후, 그 이미지를 감지대비법의 일종인 광막휘도법과 기존 20° 시야의

L20법에 적용하여 터널 경계부 휘도를 산출하고 그 결과를 비교, 분석하였다.

2. 터널 경계부 평균휘도 산출 방법

2.1 광막휘도법(Veiling Luminance method)

광막휘도법은 Photometric과 수식적 방법을 이용하여 터널의 경계부 휘도 값을 정확히 예측할 수 있다. 광막휘도는 터널 진출입 시 눈이 순응해야 하는 터널 주변 휘도의 총량을 의미하며, 빛의 산란으로 인해 시야에 생기는 광막의 밝기로서 휘도를 표시하는 등가광막휘도(L_{seq})는 글레어 측정기나 글레어 렌즈가 장착된 특수 휘도계로 직접 측정할 수 있으며, Holladay-Stiles 공식에 근거한 그래픽 방법으로 구할 수 있다[1,2].

후자의 그래픽 방법은 터널 입구부를 카메라로 촬영한 후, 촬영한 이미지는 Polar Diagram을 이용하여 PC 작업으로 등가광막휘도를 구한다. 그리고 계산식에 의해 경계부 노면평균휘도(L_{th})를 산출한다. PC 상에서 Polar Diagram을 이미지 위에 포개어 놓고 다이어그램의 중심원(터널 중심과 일치)을 2°에 맞추면서 상하로 조정하여 이미지와 일치시킨다. 다이어그램 내 시야계의 각 섹션의 평균휘도를 더하면 전체 등가광막휘도를

아래 식으로 구할 수 있다.

$$L_{seq} = 5.1 \times 10^{-4} \sum L_{ije} \quad (1)$$

$$L_{ije} = (\tau_{ws} \times L_{ij}) + L_{ws} \quad (2)$$

여기서,

L_{seq} : 전체 등가광막휘도(cd/m²)

L_{ije} : 시야계의 각 섹션들의 평균휘도(cd/m²)

L_{ij} : 각 섹션의 평균휘도(cd/m²)

L_{ws} : 차량 앞창에서의 평균휘도(cd/m²)

τ_{ws} : 차량 앞창의 투과율(0.8로 가정)

그리고 경계부 평균휘도(L_{th})는 아래의 식(3)으로 구해진다.

$$L_{th} = \frac{L_m}{\frac{1}{C_m} \left(\frac{\rho}{\pi q_c} - 1 \right) - 1} \quad (3)$$

$$L_m = \frac{(\tau_{ws} \times L_{atm}) + L_{ws} + L_{seq}}{\tau_{ws} \times \tau_{atm}} \quad (4)$$

여기서, 최소요구 감지대비(C_m)는 28%, 목표 반사율 ρ 는 0.2가 권장되며, 대기중의 투과율 τ_{atm} 는 현장 데이터가 없는 경우 1.0으로 가정한다. 그리고 L_{ws} 는 차량 앞창에서의 광막휘도로서 광막 수준에 따라 표본값(높음 200cd/m², 중간 100cd/m², 낮음 50cd/m²)을 사용하고, L_{atm} 은 대기의 광막휘도로서 광막 수준에 따라 표본값(높음 300cd/m², 중간 200cd/m², 낮음 100cd/m²)을 사용한다. 또한 표준 휘대비계수 ρ_c 는 대칭 조명시스템의 경우 0.2, 카운터빔 조명시스템의 경우는 0.6으로 놓고 경계부 평균휘도를 구한다.

2.2 L20 방법

L20 방법은 터널 입구접속부의 야외휘도 L_{20} 의 계산이 비교적 간단하고 개구 각도 20°의 휘도계로 간편하게 측정할 수 있다.

또한 정지거리에서 터널 입구를 찍은 카메라 이미지로 터널을 포함한 터널 주변의 배경에 대한 비율을 평가하여 계산식으로 입구접속부의 평균 야외휘도(L_{20})와 경계부 평균휘도를 구할 수 있다[2,3].

야외휘도 L_{20} 은 관측자가 기준점에 위치하여 20°(2×10°)의 각도로 터널 입구 높이의 1/4에 해당하는 지점에서 터널 입구의 중심을 향해 측정된 값으로서, 경계부 휘도를 산출하는 근거로 사용되며, 아래의 공식으로 구한다.

$$L_{20} = (\gamma \times L_c) + (\rho \times L_r) + (\epsilon \times L_e) + (\tau \times L_{th}) \quad (5)$$

단, $\gamma + \rho + \epsilon + \tau = 1$

여기서, L_c : 하늘의 휘도, L_r : 도로의 휘도, L_e : 주변 휘도, L_{th} : 경계부 휘도, γ : 20° 시야 내 천공 비율, ρ : 20° 시야 내 도로 비율, ϵ : 20° 시야 내 주변 비율, τ : 터널입구의 비율

식 (5)에서 정지거리가 100m 이상일 때, τ 값이 10% 이하이고 L_{th} 가 다른 휘도 값에 비해 낮으면 제일 우측 항은 무시해도 된다. 그리고 주변의 L 값이 없을 때 L_c , L_r , L_e 값들은 표 1의 데이터를 이용할 수 있다.

표 1. 터널입구에서의 휘도(단위: kcd/m²)

운전 방향	L_c (하늘)	L_r (도로)	L_e (주변 환경)		
			암벽	건물	초목지
북	8	3	3	8	2
동-서	12	4	2	6	2
남	16	5	1	4	2

식 (5)에 의해 계산된 L_{20} 에 속도별 L_{th}/L_{20} 비율 k (60 km/h 미만 또는 60 km/h: 0.05, 80 km/h: 0.06, 120 km/h: 0.10)를 곱하면, 식 (6)과 같이 경계부 휘도(L_{th})를 구할 수 있다.

$$L_{th} = k \times L_{20} \quad (6)$$

3. 측정방법

터널 경계부 조명수준의 산출 근거가 되는

입구부의 광막휘도 및 야외휘도의 실태 파악을 위해 설계속도 80km/h의 일반 터널도로를 대상으로 터널 입구부를 카메라로 측정하였다. 측정대상 터널들의 특징은 표 2와 같다.

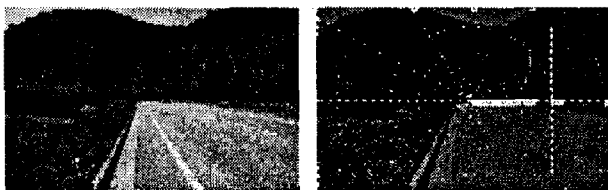
표 2. 측정대상 터널의 특징

터널명	의암A	의암B	장전A	장전B	대성A	대성B
입구방향	동	서	남	북	동남	북서
길이	306m	209m	414m	546m	110m	110m
폭	10m	10m	10m	10m	20m	20m
차로	2차	2차	2차	2차	양방향	양방향
광원	HPS	HPS	HPS	HPS	LED	LED

측정 카메라는 터널 입구로부터 터널의 설계속도에 의한 정지거리에 설치하였는데 측정대상 터널들의 설계속도가 80km/h이므로 정지거리는 CIE 기준에 따라 100m로 하였다. 카메라 대물렌즈의 시선 축은 주행 차선 축 위 1.5m 높이에 위치시키고 차선의 중심을 향하도록 하였다[1]. 또한 시야각과 공간의 면적 비율을 파악하기 위해 터널 입구에 4m 폴을 세워 기준으로 삼았다. 측정은 표 4의 대상터널만 정오 시간에 동남 및 북서 방향에서 각 1회 측정하였으며, 의암터널과 장전터널은 터널입구 방향에 따라 오전, 정오 및 오후 시간 때에 각 3회씩 측정하였다.

측정 및 데이터 분석을 위해 독일 Techno Team사의 LMK Mobile Advanced System을 사용하였다. 이 시스템은 카메라로 촬영한 터널 입구부의 이미지를 PC에서 프로그램 작업을 통하여 휘도로 환산시킨다.

그림 1은 정지거리에서 카메라로 찍은 원래의 터널 입구부 이미지와 프로그램 상에서 56.8°의 시야각을 갖는 Polar Diagram을 겹친 이미지를 보인 것이다.



(a) 터널 측정사진 (b) Polar Diagram을 겹친 사진
그림 1. 측정 사진과 Polar Diagram 이미지

4. 측정 결과 및 분석

표 3은 터널 입구부를 카메라로 촬영한 후, 그 이미지를 Polar Diagram을 이용하여 다이어그램의 각 섹션별로 구한 광막휘도 값과 식 (1)과 식 (2)를 적용하여 산출한 등가 광막휘도(L_{seq}) 값을 보인 것이다.

그리고 표 4는 3가지 터널에 대한 시간대별 광막휘도와 경계부 휘도의 산출 결과를 나타낸 것이다.

표 3. 광막휘도 평가를 위한 L_{ije} 매트릭스

의암터널 서쪽 입구(오전)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	sum
1	190	190	258	288	320	417	2008	472	-	4148
2	229	175	200	355	347	357	325	269	2393	4655
3	339	247	202	461	560	681	218	286	517	3516
4	209	203	620	1831	2344	2532	411	2419	2375	12949
5	1420	4281	5922	5472	4922	4833	2571	3639	3038	36102
6	5398	6144	5221	4626	4279	3996	4018	3216	-	36903
7	6080	5896	4888	4628	4596	4487	3741	5218	-	39536
8	2856	5376	5192	4851	4824	5995	5864	2790	2351	40103
9	235	733	2708	3969	3603	1058	3628	1122	1147	18208
10	229	226	326	379	463	573	932	524	738	4392
11	313	354	289	262	192	303	410	346	3419	5892
12	384	198	342	306	339	349	293	624	-	2838
L_{ije}								209246 cd/m ²		
L_{seq}								107 cd/m ²		

표 4. 광막휘도법에 의해 산출된 L_{seq} 및 L_{th}

터널명	터널입구	하늘비율	측정시간	L_{seq}	L_{th}
					대칭조명
의암A	동	3.2%	09:50	108	320
			14:00	105	318
			17:45	13	238
의암B	서	4.4%	10:20	107	320
			14:20	105	316
			18:00	14	239
장전A	북	16.4%	11:10	103	316
			13:05	119	330
			16:40	51	271
장전B	남	4.96%	11:35	149	356
			13:20	150	357
			17:00	30	253
대성A	북서	20.4%	15:20	58	277
대성B	남동	21.4%	15:35	103	316

표 4에서 보이는 바와 같이 시야 내 하늘의 비율이 적은 의암터널과 장전B 터널에서는 오전과 정오 시간 때에 광막휘도의 변화

가 거의 없으나, 오후 늦은 시간에는 크게 감소한다. 그리고 동-서 방향인 의암터널의 경우 터널방위에 의한 광막휘도의 변화가 거의 없으나, 장전터널과 대성터널은 50%의 차이를 보이고 있다.

표 5는 표 4에 나타낸 정오 시간 때에 측정된 데이터를 사용하여 L20법으로 야외휘도 및 경계부 휘도를 산출한 결과를 나타낸 것이다. 20도 시야 내의 도로 및 하늘의 비율, 주변환경의 비율의 산출은 전술한 광막휘도법의 이미지 처리법을 그대로 이용하였으며, 터널입구부 이미지도 그대로 사용하였다. 다만 소프트웨어 작업 과정에서 다이어그램의 시야 각도를 20도로 조절하여 20도 범위 내의 이미지 상에서 각 면적의 픽셀 수를 계산하여 산출하였다.

표 5에서 알 수 있는 바와 같이 정오 무렵의 야외휘도는 2500~3000cd/m² 범위이고, 3가지 터널 모두 56.8°의 시야각을 갖는 광막휘도법과 비교하여 20° 시야에서는 하늘의 비율이 거의 없는 것으로 나타났다. 그리고 L20법으로 구한 경계부 평균휘도는 표 4의 광막휘도법의 결과와 비교하여 거의 절반 수준의 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 주로 시야각의 차이와 계산법의 차이에서 기인한 것으로 생각된다.

표 5. L20법으로 산출된 L₂₀ 및 L_{th} (cd/m²)

터널명	의암A	의암B	장전A	장전B	대성A	대성B
입구	동	서	북	남	북서	남동
L _c	12000	12000	1600	8000	16000	8000
L _r	4000	4000	5000	3000	5000	3000
L _e	2000	2000	2000	2000	2000	2000
γ (%)	0	0	0	0	2.72	3.387
ρ (%)	30.02	38.76	39.93	41.36	34.97	40.03
ε (%)	65.21	55.54	54.382	51.632	56.38	46.75
L ₂₀	2505	2661	3084	2273	2920	2407
L _{th}	150.3	159.68	185.03	136.41	175.18	144.40

5. 결론

본 연구에서는 최근 선진국에서 권장되고

있는 광막휘도법과 기존의 L20법으로 경계부 휘도를 산출하는 방법을 살펴보고, 설계 속도 80km/h인 일반 터널도로를 대상으로 주간의 터널 입구부를 카메라로 측정 후, PC 작업을 통해 얻은 이미지 정보를 광막휘도법과 20° 시야의 L20법에 적용하여 터널 경계부 휘도를 산출하고 그 결과를 비교, 분석하였다.

광막휘도법으로 산출한 경계부 평균휘도는 L20법의 결과와 비교하여 2배 수준의 큰 차이를 보였다. 하늘이나 그 주변의 비율이 크면 클수록 광막휘도 또는 야외휘도 값이 증가하므로 이러한 결과는 주로 시야각의 차이와 계산법의 차이에서 기인한 것으로 생각된다.

터널의 경계부 조명은 터널조명에서 가장 중요하며, 터널 이용자의 안전과 직결되므로, 사람의 가시기준을 바탕으로 만들어지고, 좀 더 엄격한 계산이 요구되는 광막휘도법의 적용이 시급하다고 생각한다.

본 연구에서 측정대상으로 삼은 터널의 수가 적고 측정 기간이 짧았기 때문에 두 가지 측정 방법에 대한 정확한 비교와 제 특성들을 파악하기에는 무리가 있다. 향후 장기적인 관점에서 다양한 터널을 대상으로 지속적인 연구가 필요하다.

본 연구는 지식경제부의 에너지자원인력 양성사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) CIE 88-2004(2nd edition): Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses, 2004
- (2) IESNA RP-22-05: IESNA Recommended Practice for Tunnel Lighting, 2005
- (3) CIE 88-1990: Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses, 1990