

터널 적용 바형식 반사거울시스템의 채광성능 평가

이범석¹, 주재성², 정인영³, 김민성^{4*}

Evaluation of daylighting performance of bar-type mirror reflector system in tunnel

Beom-Seok Lee, Jae-Sung Joo, In-Young Jeong, Min-Sung Kim

ABSTRACT The basic study was preceded for reducing maintenance and power cost of lighting fixture applying daylighting because most of the tunnel lighting depend on the artificial lighting. This study aims to evaluate the daylighting performance of bar-type mirror reflector system in tunnel. Illuminance and luminance was measured. As a result of horizontal illuminance measurements, it was satisfied in tunnel recommended illuminance (KSA 3703) that total average was 1,170 lx increased 6.5 times more than this system was not used. Also, as a result of evaluating driver's glare on the opposite lane, glare did not occur and the luminance ratio was 3.01 which satisfies the luminance ratio standard 10.

Keywords: Tunnel lighting, mirror reflector system, daylighting performance, illumination, luminance ratio, glare evaluation

요약 대부분의 터널 조명은 인공조명에 의존하고 있어 조명설비의 유지관리비 및 전력비를 절감하기 위해 자연채광을 적용한 기초연구가 선행되었다. 이에 본 연구는 터널 조정 바형식 반사거울시스템의 채광성능(조도, 휘도)을 평가하였다. 수평면 조도를 측정된 결과, 전체 평균 1,170 lx로 미설치 대비 6.5배 이상 증가하여 채광유효구간에서 구간별 터널기준조도(KSA 3703)를 만족시키는 것으로 나타났으며, 터널 밖으로 나오는 반대편 차로 운전자의 휘도를 측정하여 분석한 결과, 전체 평균 3.01로 현행 기준치인 10 이내로 평가되어 눈부심이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

주요어: 터널조명, 반사거울시스템, 채광성능, 조도, 휘도비, 눈부심 평가

접수일(2012.1.13), 수정일(2012.1.21), 게재확정일(2012.1.25)

¹정회원, 썬앤라이트 기술연구소 연구원

²정회원, 썬앤라이트 기술연구소 연구원

³정회원, 경희대학교 겸임교수, 공학박사

⁴비회원, 썬앤라이트 기술연구소 소장

*교신저자: 김민성 (E-mail: mskim@paran.com)

1. 서 론

1.1 연구의 목적

터널 내 조명설비는 터널에 진입하는 운전자의 암순응 시간을 단축시켜 안전한 주행이 가능하도록 터널 내 안전성과 가시성을 향상시켜주는 필수적인 요소로 그 중요도가 매우 높다. 그러나 대부분의 터널 내 조명설비는 인공조명에 의존하고 있어 조명설비의 유지관리비 및 전력비를 절감하기 위하여 입구부의 집중 조명을 축소하는 시각순응시설에 대한 연구가 이루어지고 있다(이은풍, 2006). 이에 본 연구의 기초연구로 터널 입구부에 자연채광을 유입하는 채광시스템인 반사거울시스템의 적용성 연구를 선행하였고, 시뮬레이션 분석 및 기동형식의 반사거울시스템 적용 결과, 벽면에 반사된 빛을 바닥에 재반사하는 기동형식(pole type) 반사거울시스템의 경우, 빛의 밝기가 현저히 저하하여 그 효과가 거의 없는 것으로 분석되었고, 각각의 차로의 바닥에 빛을 반사하는 바형식(bar type) 반사거울시스템의 경우, 터널입구로부터의 이격거리가 가까울수록 채광성능이 높은 것으로 측정되었다(이범석, 2011; 정명순, 2011).

이에 본 연구는 충북 황간면에 위치한 폐터널에 바형식(bar type) 반사거울시스템을 제작·설치하여 터널 입구부의 자연광유입에 대한 시스템의 채광성능을 평가하고 문제점을 분석하여 향후 연구 방향을 제시하는데 그 목적이 있다.

1.2 연구의 내용 및 방법

바형식(bar type) 반사거울시스템의 채광성능을 평가하기 위한 연구의 내용 및 방법은 다음과 같다.

- ① 기존에 개발된 시스템의 문제점을 보완하여 채광성능을 향상시킬 수 있는 2.1 m×2.1 m의 바형식(bar type) 반사거울시스템을 제작하였다.
- ② 반사된 빛의 유입각과 터널의 높이를 고려하여 반사거울시스템을 터널입구로부터 20 m 이격시키고 바닥으로부터 5 m 높이(고속도로 구조물의 최소 높이)에 설치하여 반사된 빛이 터널내 도로면의 타겟점을 비추도록 설치하였다.
- ③ 제작된 반사거울시스템은 충청북도 영동군 황간면에 위치한 2차로 160 m 터널의 입구부에 설치하였으며 2011년 10월 13일 청천공상태의 11시와 14시의 채광성능(수평면 조도, 휘도)을 측정·평가하였다.
- ④ 실험결과를 토대로 향상된 시스템의 문제점을 분석하여 향후 진행해야할 연구과제를 제안하였다.

2. 연구방법론

2.1 반사거울시스템의 설치 형태

반사거울의 설치 형태는 그림 1, 2와 같이 바형식(bar type)과 기둥형식(pole type)으로 구분된다.

우선 바형식의 반사거울시스템은 그림1과 같이 각 차로의 중앙에 위치하여 터널내 각각의 차로 바닥으로 빛을 반사하는 형태이고 기둥형식의 반사거울시스템은 그림 2와 같이 도로의 양쪽 끝에 위치하여 터널안쪽 반대방향 벽면으로 빛을 반사하는 형태이다. 본 연구의 Test bed에 최종 설치될 바형식 반사거울시스템은 그림 1과 같으나, 채광성능을 미리 평가해 보고자 그림 1의 형태가 아닌 그림 4와 같이 2차로의 중앙에만 설치하여 채광성능을 평가해 보았다.

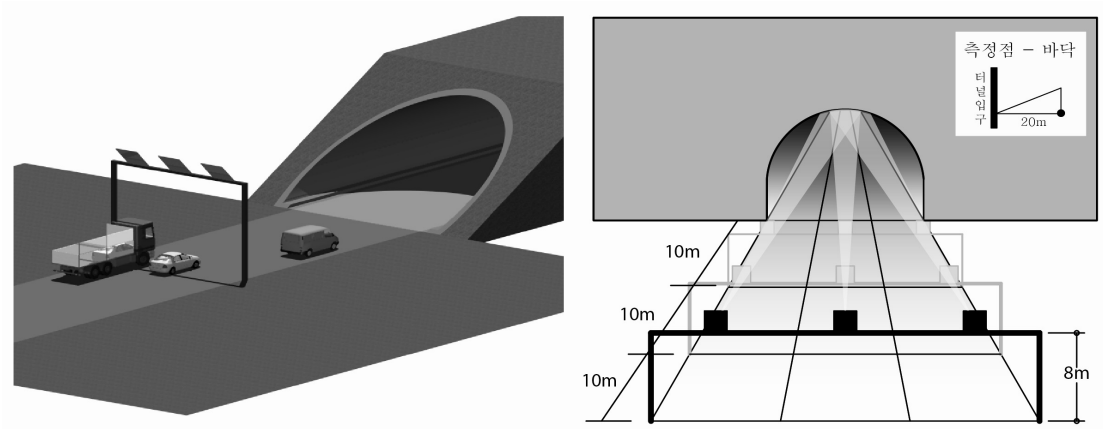


그림 1. 바형식(bar type) 반사거울시스템의 설치 형태

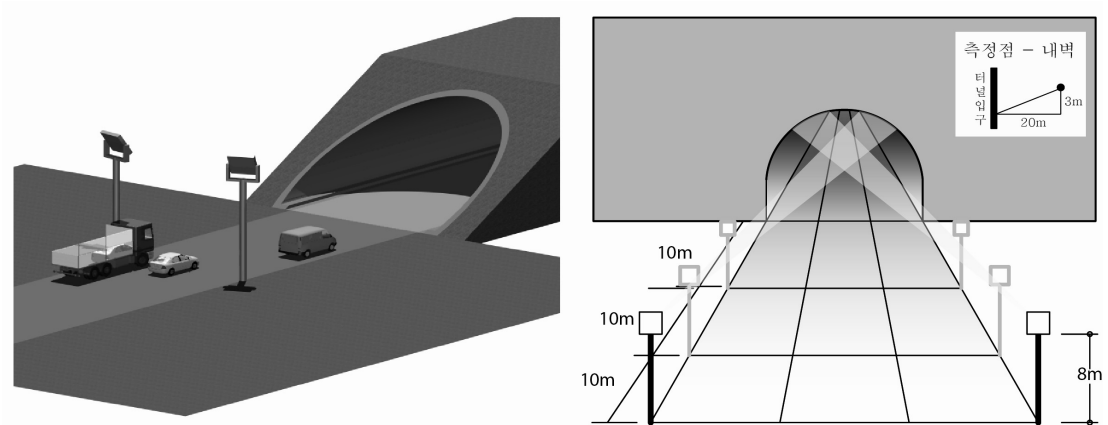


그림 2. 기둥형식(pole type) 반사거울시스템의 설치 형태

2.2 반사거울시스템이 적용될 터널의 형상

반사거울시스템이 적용될 터널은 충북 영동군 황간면에 위치한 현재는 사용하지 않는 남북방향의 2차로 원통절개형 폐터널로 그림 3과 같이 터널폭 9 m(차로폭 3.6 m×2), 높이 6.4 m(터널중앙), 길이 160 m의 형상을 가지고 있다.



그림 3. 반사거울시스템이 설치될 터널의 형상

2.3 적용된 반사거울시스템의 특성 및 설치 형태

2.1 m×2.1 m, 반사율 98%의 독일 Analod사의 MIRO 7 반사필름을 부착하여 정사각형의 1차 반사거울을 제작하였고 태양의 고도에 따라 높이를 조절할 수 있도록 좌·우 각도 ±180, 상·하 각도 ±90, 상하 높이 2~10 m 조절이 가능하도록 설계하였다.

채광성능을 평가하기 위한 반사거울시스템은 그림 4와 같이 2개 차로 중 오른쪽 차로 중앙에 위치하며 높이는 고속도로의 구조물 설치 기준 및 시스템의 구조적인 높이를 고려하여 노면으로부터 반사판 하부까지의 높이 5 m에 고정하였고, 반사된 빛이 터널안의 타겟점(aiming point, 입구로부터 터널 안쪽으로 40 m지점)에 위치하도록 터널입구로부터 20 m 외부로 이격된 곳에 설치하였다.

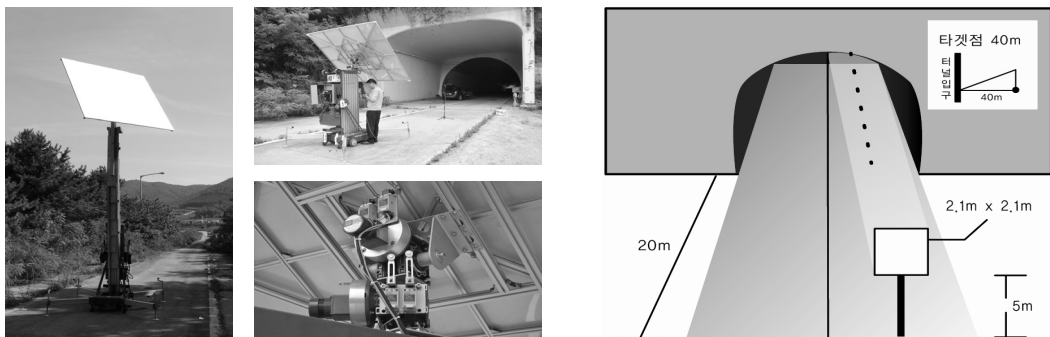


그림 4. 적용된 바형식(bar type) 반사거울시스템의 설치 형태

2.4 채광성능 평가를 위한 시스템 및 측정점의 선정

2.4.1 조도 평가 시스템

터널 내부 수평면 조도 측정을 위한 장비는 그림 5와 같이 모니터링이 가능한 자체 제작한 무선 조도계측 시스템을 사용하였다. 다수의 조도센서가 계측한 데이터를 RF통신으로 USN Bridge를 통해 수신한 후 TCP/IP 통신을 통해 사용자의 PC에서 모니터링을 할 수 있다. 평가프로그램인 KM-WLMS는 Sensor PORT를 이용하여 조도센서와 연결된 각 측정점의 정보를 확인할 수 있으며 측정된 Lux 값들은 엑셀, 그림파일로 출력 및 복사가 가능하다. RIXEN TECH사의 LXT-401A 조도센서는 0~200,000 lux의 측정범위를 갖고 있으며, ±3%의 측정오차를 가진다.



그림 5. 조도 측정 시스템의 구성도

2.4.2 휘도 평가 시스템

터널 내부에서의 휘도 측정을 위한 장비는 그림 6과 같이 Canon사의 550D를 사용한 TechnoTeam사의 LMK mobile을 사용하였다. PC없이 단독으로 쉽고 빠르게 휘도이미지를 기록할 수 있고 기록된 휘도 이미지는 TechnoTeam사에서 제공하는 LabSoft를 이용하여 평균노면휘도, 종합균제도, 차로측균제도 등을 분석할 수 있다. LMK 휘도측정기는 노출시간과 ISO 속도 선택에 따라 0.36 cd/m² ~140 kcd/m²의 측정범위를 갖고 있으며, 2.5%의 보정오차를 가진다.

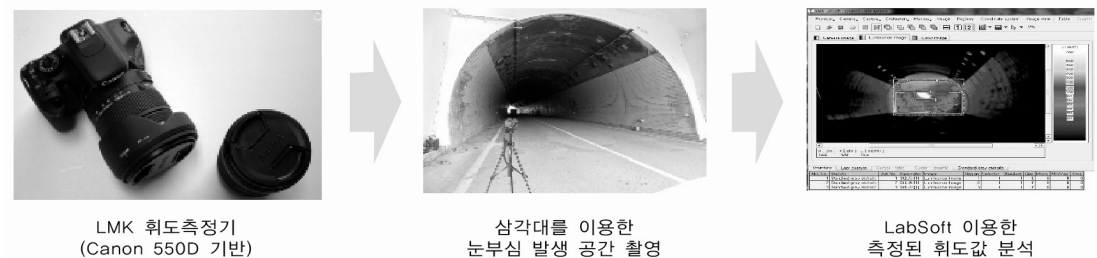


그림 6. 휘도 측정 시스템의 구성도

2.4.3 조도 측정점의 선정

터널 내부 조도측정을 위한 장비는 그림 5와 같이 모니터링이 가능한 자체 제작한 무선 조도 측정 장비를 사용하였다. 조도 측정점은 그림 7과 같이 터널 입구로부터 터널 내부 방향으로 각 차로별 중앙에 4 m 간격으로 60 m까지 15개를 선정하여 2개 차로 총 30개의 조도센서를 지면으로부터 10 cm 높이에 설치하였고 외부조도를 측정하기 위하여 터널 외부에 그늘이 지지 않는 곳에 1개의 조도센서를 설치하였다.

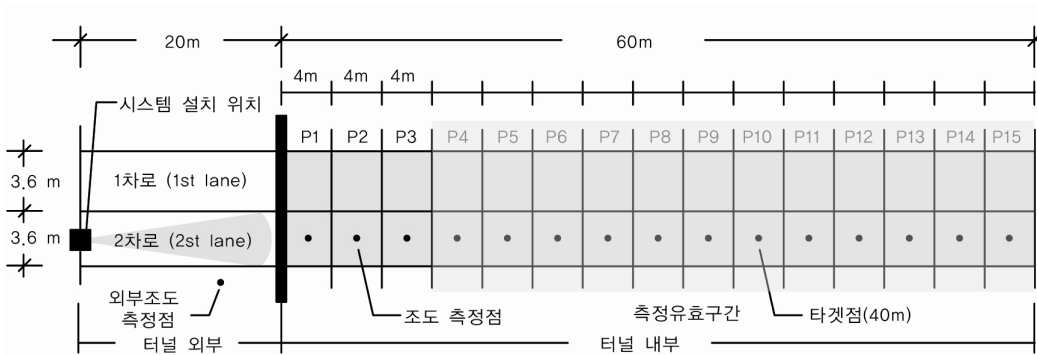


그림 7. 분석대상 터널의 반사거울 설치 위치 및 조도 측정점

2.4.4 휘도 측정점의 선정

터널 외부에 설치된 시스템의 휘도 측정을 위한 장비는 그림 6과 같이 독일 TechnoTeam사의 LMK mobile 550D를 사용하였다. 터널 밖으로 나오는 반대편 차로 운전자의 눈부심을 분석하기 위한 휘도 측정점은 그림 8과 같이 터널 입구로부터 터널 내부 방향으로 20 m, 40 m, 80 m 지점을 선정하여 운전자 눈높이 1.2 m의 차량 내부 운전석에 앉아 휘도를 측정하였다.

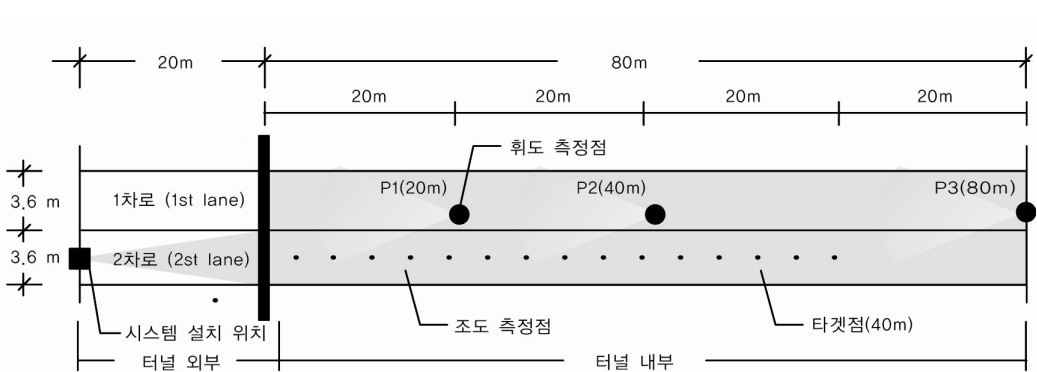


그림 8. 분석대상 터널의 반사거울 설치 위치 및 휘도 측정점

2.5 터널조명기준(KSA 3703)을 적용한 구간별 기준조도 계산

2.5.1 일반조건 및 조명설계 기준(KSA 3703 적용)

본 터널은 Test bed를 위한 연구용으로 적용기준을 완화하여 적용하였으며, 구간별 기준조도 계산을 위한 일반조건 및 조명설계 기준은 다음과 같다.

- ① 터널길이 : 160 m
- ② 설계 속도(Km/h) : 60
- ③ 구배 : 2% 미만
- ④ 통행량 : 보통적용 10,000~20,000대
- ⑤ 보수율 : 0.65
- ⑥ 주간의 자동차 터널도로의 기본부 평균 노면 휘도 : $4.5 L_{th}[\text{cd}/\text{m}^2]$
- ⑦ 경계부 노면 휘도에 대한 조절계수 : 75%
- ⑧ 평균 조도 환산 계수 : $18[\text{lx}/\text{cd}/\text{m}^2]$

2.5.2 구간별 기준조도 계산(경계부의 노면휘도 $75[\text{cd}/\text{m}^2]$)

위의 조명설계기준을 적용하여 경계부를 터널 입구로부터 30 m, 15 m, 15 m의 3개 구역으로 구분하여 총 60 m로 설계하였고, 각 구역에서의 기준조도를 계산한 결과, 표 1과 같이 1구역은 1,020 lx, 2구역은 810 lx, 3구역은 610 lx를 만족시키기 위한 인공조명을 설치해야 하는 것으로 설계되었다.

3. 조도 분석 결과

터널에 적용한 바형식 반사거울시스템의 조도를 측정하기 위하여 그림 7과 같이 터널내외부에 31개의 측정점을 선정하여 타겟점 P10(터널입구로부터 40 m 거리)에 태양광을 반사시켜 청천공상

표 1. 경계부의 구간별 기준조도(lx)

구 분		평균 조도 계산			기준조도[lx]
노면휘도	구 간				
75 [cd/m ²]	경계	1구역	30 m	$75[\text{cd}/\text{m}^2] \times 75[\%] \times 100[\%] \times 18[\text{lx}/\text{cd}/\text{m}^2] = 1,012.0$	1,020
		2구역	15 m	$75[\text{cd}/\text{m}^2] \times 75[\%] \times 80[\%] \times 18[\text{lx}/\text{cd}/\text{m}^2] = 810.0$	810
		3구역	15 m	$75[\text{cd}/\text{m}^2] \times 75[\%] \times 60[\%] \times 18[\text{lx}/\text{cd}/\text{m}^2] = 607.5$	610
기 본 부		$4.5[\text{cd}/\text{m}^2] \times 18[\text{lx}/\text{cd}/\text{m}^2] = 81.0$			80



그림 9. 천공상태 및 조도 측정 사진

태의 11시와 14시의 수평면 조도를 측정하였고, 채광유효구간(기준조도보다 낮은 구간)에서의 채광 성능을 평가하였다. 표 2와 표 3의 측정점 P14, P15 지점에서의 수평면 조도값이 다시 증가하는 이유는 그림 9와 같이 터널 출구에서 주광이 유입되었기 때문으로 판단된다.

3.1 11시의 수평면 조도 측정 결과

11시에 측정된 수평면 조도값은 표 2 및 그림 10과 같다. 반사거울시스템을 설치하지 않을 경우, 채광유효구간(기준조도보다 낮은 구간)은 P5~P15의 20 m 이후 구간으로 측정점의 수평면 조도값이 811 lx~47 lx로 평균 215 lx로 측정되었고, 반사거울시스템을 설치할 경우, 채광유효구간에서의 수평면 조도값이 1,887~1,151 lx로 평균 1,231 lx로 측정되어, 미설치 대비 5.7배 이상 수평면 조도가 상승하였고 P1~P15의 모든 측정점에서 구간별 터널기준조도(KSA 3703)를 만족시키는 것으로 평가되었다.

표 2. 시스템이 적용된 차로의 11시 수평면 조도값(타겟점 : P10, 채광유효구간 : P5~P15)

측 정 점	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	
센서위치	4 m	8 m	12 m	16 m	20 m	24 m	28 m	32 m	36 m	40 m	44 m	48 m	52 m	56 m	60 m	
기준조도	1,020							810			610				외부조도	
설 치 시	15,502	9307	4981	3212	1887	1589	1301	1151	1107	1178	1167	1222	1267	1329	1353	87,908
미설치시	16,110	4643	2621	1229	811	352	342	301	348	302	149	260	47	90	100	85,555

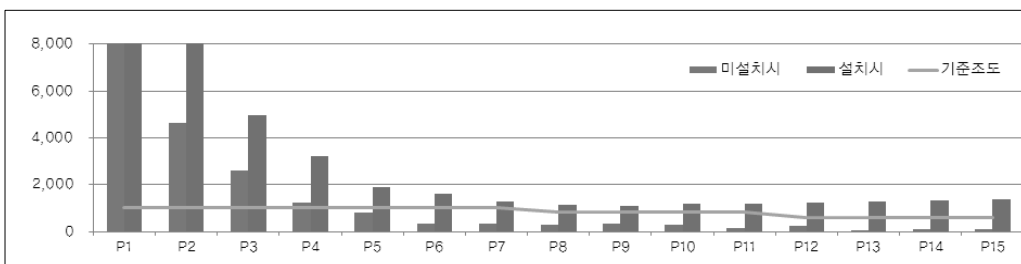


그림 10. 11시의 수평면 조도(시스템 설치시, 기준조도대비)

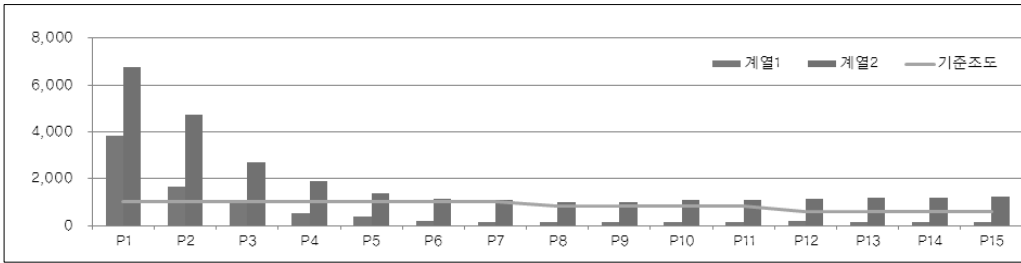


그림 11. 14시의 수평면 조도(시스템 설치시, 기준조도대비)

3.2 14시의 수평면 조도 측정 결과

14시에 측정된 수평면 조도값은 표 3 및 그림 11과 같다. 반사거울시스템 설치하지 않을 경우, 채광유효구간(기준조도보다 낮은 구간)은 P4~P15의 16 m 이후 구간으로 측정점의 수평면 조도값이 543 lx~123 lx로 평균 144 lx로 측정되었고, 반사거울시스템을 설치할 경우, 채광유효구간에서의 수평면 조도값이 1,892~1,006 lx로 평균 1,115 lx로 측정되어, 미설치 대비 7.7배 이상 수평면 조도가 상승하였고 P1~P15의 모든 측정점에서 구간별 터널기준조도(KSA 3703)를 만족시키는 것으로 평가되었다.

표 3. 시스템이 적용된 차로의 14시 수평면 조도값(타겟점 : P10, 채광유효구간 : P4~P15)

측 정 점	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	
센서위치	4 m	8 m	12 m	16 m	20 m	24 m	28 m	32 m	36 m	40 m	44 m	48 m	52 m	56 m	60 m	
기준조도	1,020								810			610			외부조도	
설 치 시	6,763	4,708	2,694	1,892	1,384	1,122	1,085	1,012	1,006	1,092	1,086	1,138	1,167	1,208	1,242	62,940
미설치시	3,822	1,672	1,058	543	377	174	162	123	128	162	135	172	138	139	142	66,399

4. 휘도 분석 결과

현휘란 시야내 과도한 휘도 또는 휘도대비로 인한 시작업 성능의 저하 또는 시각적 불쾌감을 말한다. 관찰자의 시야 내의 평균 휘도에 대하여 대상물체의 휘도대비가 10 이상일 때 과도한 휘도대비로 인하여 불쾌현휘가 발생하며 시야 내 태양이나 광원 등이 직접 노출되어 휘도값이 25,000 cd/m²을 넘었을 경우 휘도대비와 무관하게 불능현휘가 발생한다(Szokolay, 1979; 이범석, 2005).

터널에 적용한 바형식 반사거울시스템의 휘도를 측정하기 위하여 그림 8과 같이 터널 입구로부터 터널 내부 방향으로 20 m, 40 m, 80 m 지점에 측정점을 선정하여 운전자 눈높이 1.2 m의 차량 내부 운전석에 앉아 휘도를 측정하였고, 그림 12와 같이 주변부와 광원부로 구분하여 휘도대비를

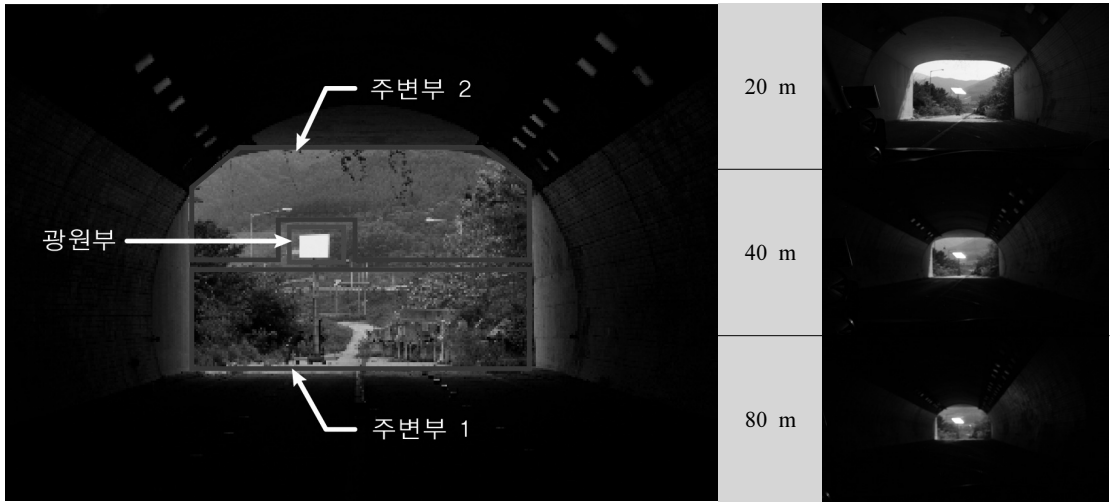


그림 12. 휘도측정부의 구분 및 휘도측정위치

분석하였다. 휘도대비를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\bullet \text{ 휘도대비} = \frac{|L_d - L_b|}{L_b} \quad \begin{array}{l} L_d = \text{광원부의 최대 휘도} \\ L_b = \text{주변부의 최대 휘도} \end{array}$$

4.1 11시의 휘도측정 결과

11시에 측정한 휘도값은 표 4와 같다. 반사거울시스템을 설치할 경우, 최대 휘도는 주변부와 광원부 모두 시스템과 가장 가까운 20 m 지점에서 가장 높았으며 주변부의 최대 휘도는 $9,884 \text{ cd/m}^2$, 광원부의 최대 휘도는 $20,290 \text{ cd/m}^2$ 로 측정위치별 휘도대비를 평가한 결과, 20 m에서 1.05, 30 m에서 4.46, 80 m에서 5.47, 전체 평균 3.66으로 현회 기준치인 10이내로 분석되어 채광학적으로 유효한 것으로 평가되었다.

4.2 14시의 휘도측정 결과

14시에 측정한 휘도값은 표 5와 같다. 반사거울시스템을 설치할 경우, 최대 휘도는 주변부와 광원부 모두 시스템과 가장 가까운 20 m 지점에서 가장 높았으며 주변부의 최대 휘도는 $8,969 \text{ cd/m}^2$, 광원부의 최대 휘도는 $20,260 \text{ cd/m}^2$ 로 측정위치별 휘도대비를 평가한 결과, 20 m에서 1.26, 30 m에서 4.50, 80 m에서 1.31, 전체 평균 2.36으로 현회 기준치인 10이내로 분석되어 채광학적으로 유효한 것으로 평가되었다.

표 4. 11시의 거리별 휘도값 및 휘도분포도

구 분		주변부1	주변부2	광원부	주변부 최대휘도	광원부 최대휘도	휘도대비	휘도분포도
20 m	평균값 (cd/m ²)	871	6,405	6,638	9,884	20,290	1.05	
	최대값 (cd/m ²)	4,009	9,884	20,290				
40 m	평균값 (cd/m ²)	816	1,760	7,537	3,711	20,260	4.46	
	최대값 (cd/m ²)	3,711	2,667	20,260				
80 m	평균값 (cd/m ²)	828	1,344	8,363	3,133	20,260	5.47	
	최대값 (cd/m ²)	3,133	2,043	20,260				

표 5. 14시의 거리별 휘도값 및 휘도분포도

구 분		주변부1	주변부2	광원부	주변부 최대휘도	광원부 최대휘도	휘도대비	휘도분포도
20 m	평균값 (cd/m ²)	812	5,353	6,279	8,969	20,260	1.26	
	최대값 (cd/m ²)	3,613	8,969	20,240				
40 m	평균값 (cd/m ²)	785	1,673	7,110	3,679	20,240	4.50	
	최대값 (cd/m ²)	3,679	2,487	20,260				
80 m	평균값 (cd/m ²)	782	1,382	5,294	8,721	20,150	1.31	
	최대값 (cd/m ²)	8,721	2,085	20,150				

5. 결 론

터널내 적용 가능한 반사거울시스템은 이미 선진국에서 건축물과 터널에 적용하여 그 실용성이 입증된 채광시스템으로 본 연구에서 국내 터널의 적용성을 평가하기 위하여 폐황간 터널에 test bed를 설치하여 국내에서 개발된 바형식(bar-type) 반사거울시스템의 성능을 평가하였으며, 종합적으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

반사거울시스템을 설치할 경우, 11시의 수평면 조도는 평균 1,231 lx로 미설치 대비 5.7배 이상, 14시의 수평면 조도는 평균 1,115 lx로 미설치 대비 7.7배 이상, 전체 평균 1,173 lx로 미설치 대비 6.5배 이상 증가하여 채광유효구간에서 구간별 터널기준조도(KSA 3703)를 만족시키는 것으로 평가되었다. 그러나, 본 연구를 위해 설계된 터널기준조도는 구간별 수평면 조도의 평균값이고 실제 측정된 수평면 조도는 차로의 중간값으로 주변부의 조도값은 더 낮을 것으로 판단되는 바, 추가로 채광유효구간에서의 측정점을 증가시켜 차로 전체의 채광성능을 평가해 보는 구체적인 연구가 필요하다고 하겠다.

반사거울시스템을 설치할 경우, 11시의 휘도대비는 평균 3.66, 14시의 휘도대비는 2.36, 전체 평균 3.01로 현행 기준치인 10 이내이고, 광원부의 최대 휘도값이 20,243 cd/m²로 현행 기준치인 25,000 cd/m² 이내로 평가되어 채광학적으로 유효한 것으로 평가되었다.

본 연구에서 실시한 휘도 측정은 터널 밖으로 나오는 반대편 차로 운전자의 눈부심을 분석하기 위한 휘도 측정으로, 추가로 터널 내부로 진입하는 앞차에 의한 운전자의 눈부심 평가에 대한 연구가 필요하다고 하겠다.

본 연구는 바형식(bar type) 반사거울시스템의 채광성능을 평가하기 위한 기초연구로 터널내 채광성능을 향상시키기 위하여 다음과 같은 지속적인 연구를 수행하고자 한다.

- ① 채광유효구간에서의 측정점을 증가시켜 차로 전체의 채광성능 평가
- ② 터널 내부로 진입하는 앞차에 의한 운전자의 눈부심 평가
- ③ 기후조건변화 및 반사판 오염에 따른 채광성능 평가
- ④ 터널기준조도를 만족하는 LED조명과 연동한 반사거울시스템의 전력요금 절감 정도

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 07-기술혁신-A01)에 의해 이루어졌음에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 이범석 (2005), “태양광 채광시스템에 의한 실내공간의 빛환경 특성”, 한국생태환경건축학회 춘계학술발표회 논문집, 제5권, 제1호, pp. 109-116.
2. 이범석 (2011), “시뮬레이션 분석을 통한 반사거울시스템의 터널 적용성 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, Vol. 13, No. 5, pp. 371-383.
3. 이은풍 (2006), “터널조명시스템에서의 에너지절약을 위한 기법연구”, 한국터널지하공간학회논문집, 제8권, 제4호, pp. 85-98.
4. 정명순 (2011), “터널의 조명환경 개선을 위한 반사거울시스템의 위치 선정에 관한 기초연구”, 한국터널지하공간학회논문집, Vol. 13, No. 5, pp. 385-393.