

## 터널의 조도 순응 시설 소개



**이은풍**  
(주)미동엔지니어링  
사장



**이제혁**  
(주)미동엔지니어링  
과장

### 1. 서론

사물을 눈으로 인식하기 위해서는 적절한 밝기가 필요하고 밝을수록 시력이 높아진다. 인식에 필요한 밝기는 한낮의 수만 룩스(lx)에서 새벽녘의 수 룩스(lx)에 이르기까지 변화의 폭이 대단히 넓은데도 인식력에 별반 차이가 없는 것은 사람의 눈이 밝음에 따라 자동조절 기능이 있기 때문이다. 이를 순응이라 한다. 그러나 사람의 눈은 급격한 명암의 변화에 즉각 순응할 수 없는 결점이 있다. 이러한 현상의 전형이 극장에 들어갔을 때 어느 정도 시간이 지난 후에 사물을 구분할 수 있는 현상이다. 사람의 눈은 명순응보다는 암순응에 시간이 많이 소요된다. 이러한 순응이 가장 문제가 되는 상황은 운전 중에 어두운 터널에 진입하는 경우인데 이 경우에는 움직이며 전방을 주시하는 관계로 조명의 측면에서는 순응현상 외에 또 다른 해결해야 할 문제점이 있다.

이를 해결하기 위하여 터널 입구부에 대량의 인공조명

을 시설하는데 이는 많은 시설비와 전력비를 필요로 하고 있어 공사비 및 유지관리비용을 절감할 수 있는 대안들에 대한 연구가 진행되고 있다. 최근 툰키나 대안설계시 구조물을 이용한 조도순응시설을 설치하여 자연광을 적절히 제어함으로써 순응 현상을 해소하는 방안이 제안되고 있다. 본고에서는 이러한 조도순응시설의 기술적 문제점과 타당성을 살펴보고자 한다.

### 2. 빛과 자연광에 대한 이해

조도순응 시설을 이해하기 위해서는 사물 인식에 절대적으로 필요한 빛의 성질과 자연광의 성질을 이해하는 것이 필요하다. 빛은 태양으로부터 얻어지는 자연광과 각종 광원으로부터 얻어지는 인공광으로 구분할 수 있는데, 파장으로 결정되는 빛의 색상에 차이가 있을 뿐 기타의 성질은 동일하다. 다만 자연광은 태양으로부터 얻어지며,

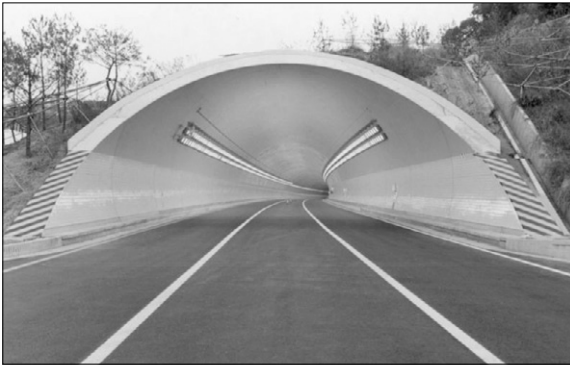


그림 1. 터널 입구부 전경



그림 2. 캐노피가 설치된 터널

표 1. 여러 가지 밝음 사례

장소	조도(lx)	장소	조도(lx)
직사일광의 지면 위(여름)	100,000	맑은 날의 북쪽의 창가	2,000
약간 흐린 날 지면 위(여름)	30,000~50,000	밝은 방(맑은 날)	200~500
몹시 흐린 날 지면 위(여름)	10,000~20,000	독서에 적당한 밝음	200~500
청공광 지면 위(여름)	10,000	1cd 점광원부터 1m	1.0
만월의 지면 위(여름)	0.2	1cd 점광원부터 1km	$10^{-6}$

인공광은 에너지를 공급하여야 얻어 진다.

빛의 양은 밝음의 정도로 표현할 수 있는데, 보임의 능력은 밝을수록 높아지지만 정비례하지는 않는다. 통상 사물을 인식하는데 필요한 밝기는 대략 10(lx)~1000(lx) 정도의 범위 안에 있으며 실내조명의 밝기는 300(lx)~500(lx)가 대부분이다. 정밀한 관측을 위해서는 1000(lx) 이상을 필요로 하는 경우도 있다. 태양의 직사광선은 100,000(lx)~120,000(lx) 정도로 사물을 관찰하는 측면에서는 너무 밝아 오히려 눈부심과 같은 부작용을 주기도 한다. 맑은 하늘 보름달이 뜨는 밤의 조도는 0.2(lx) 정도이다.

빛을 이해하기 위해서는 기본적인 용어와 물리적 양의 단위를 알아둘 필요가 있는데 가장 기본적인 것을 살펴보자.

**광속(光束, luminous flux)** : 광원에서 방사되는 광량을 눈의 감도를 기준하여 크기를 정의하는 기준이며 단위는 루우멘(lumen, lm)로 표기하고, 단위 시간당에 방사

하는 복사에너지(광량)를 말한다.

**광도(光度, luminous intensity)** : 광원의 밝기를 나타내는 단위로 발광원이 점광원이거나 점광원으로 가정하여 조사방향의 밝기를 정의하는 것으로 단위는 캔들(candle, cd)로 표기한다.

**조도(照度, illumination)** : 밝기를 나타내는 단위의 하나로 어떤 면에 조사되는 광속의 밀도를 말하며 단위로는

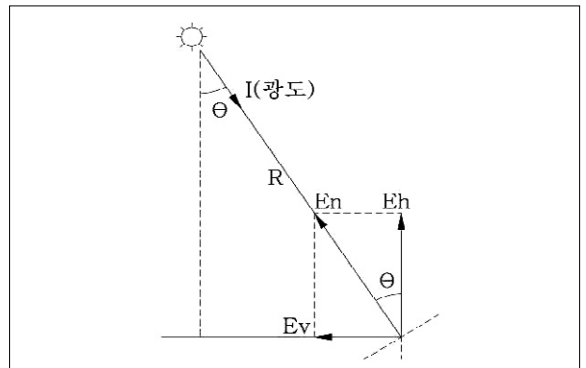


그림 3. 법선조도, 수평면조도, 수직면조도

룩스(lm/m<sup>2</sup>, lx)로 표기한다.

조도의 단위가 단위면적당 입사광속이므로 광속의 입사각에 따라 크기가 다르게 되는데 이를 구분하기 위하여 법선조도, 수평면조도, 수직면조도로 구분하기도 한다(그림 3).

$$E_n(\text{법선조도}) = \frac{I}{R^2} \text{ [ lx ]}$$

$$E_h(\text{수평면조도}) = E_n \cos\theta \text{ [ lx ]}$$

$$E_v(\text{수직면조도}) = E_n \cos\theta \text{ [ lx ]}$$

**휘도(輝度, luminance)** : 광원 또는 물체의 밝기를 나타내는 것으로 광도의 밀도를 말하며 단위로는 스틸부(stilb; sb)나 니트(nit; nt)로 표시한다

$$1(\text{sb})=1(\text{cd}/\text{cm}^2) \quad 1(\text{nt})=1(\text{cd}/\text{m}^2)$$

- 휘도의 예

- 투과체 입사조도 1,000(lx)
- 투과율 60%, 반사율 40%, 흡수율 0%
- A면의 휘도  $B=600/\pi(\text{cd}/\text{m}^2)=191(\text{nt})$
- B면의 휘도  $B=400/\pi(\text{cd}/\text{m}^2)=127(\text{nt})$

밝음을 표현할 때 종종 조도로 표현하기도 하고 휘도로 표현하기도 하는데 조도와 휘도의 개념을 올바르게 이해할

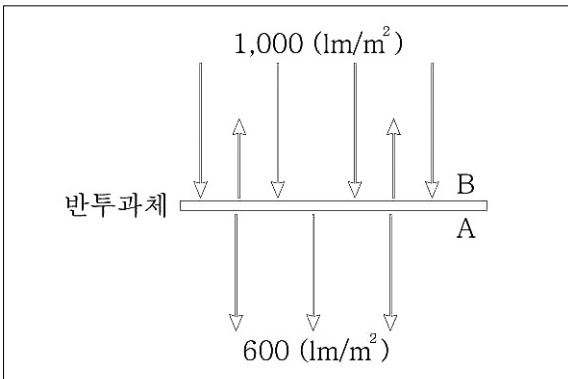


그림 4. 휘도와 조도의 상관관계

필요가 있다.

조도는 피조면(皮照面)에 입사되는 광속의 크기를 말하며 휘도란 발광체 또는 반사체에서 발산되는 광속의 크기를 말한다. 밝음 아래에서 이루어지는 사물의 식별은 물체의 휘도의 차이로 식별되므로(휘도가 같으면 동일하게 보임) 밝음의 정도를 휘도로 표기하는 것이 이상적이나 일반적 경우에는 각종 물체의 반사율이 다르므로 휘도 또한 다르게 되므로 어느 물체를 기준한 휘도로 표기할 수가 없다. 그래서 조도로 표기하는 것이 일반적이다.

그러나 도로에서는 주시면이 노면인 포장면이 단일한 물체이므로 휘도로 표기하는 것이 가능하다. 그래서 도로 조명에서는 휘도로 표기하고 있다. 만약에 도로조명에서 밝기를 조도로 표기한다면 어두운 아스팔트 포장시에나 상대적으로 밝은 콘크리트 포장시의 조도가 같게 되어 불합리하다.

빛에는 여러 성질이 있으나 밝음과 관계있는 중요한 것만을 살펴보면 다음과 같다.

- 직진성이다
- 물체에 닿으면 흡수, 투과, 반사 작용을 한다.
- 색을 가지고 있다.

빛이 동일한 물질을 통과할 때는 직진성을 갖는 것은 누구나 경험을 통하여 알고 있다. 다만 이중의 물체를 통과할 때는 약간의 굴절을 갖지만 특수한 목적 외에는 유념할 필요가 없다.

그러나 빛이 물체에 닿으면 흡수와 투과, 반사 작용을 한다는 원리는 잘 이해하기 어렵다. 빛은 검은 물체에 닿으면 빛의 대부분은 물체에 흡수되고 반사하지 않는다. 그러나 눈(雪)과 같이 흰 물체에 닿으면 빛의 대부분을 반사한다. 또한 유리에서는 빛의 거의 전부를 투과시키며 우유 빛 그로부터는 일부를 투과시키고 일부를 반사시킨다. 만약에 빛이 직진성만 있고 반사가 없다면 광원이 보이지 않는 곳은 암흑으로 존재할 것이다. 빛의 반사작용으로 인하여 빛이 직접 도달하지 않는 음지나 창이 있는 실내에서도 어느 정도 밝기를 유지할 수 있다. 실내에

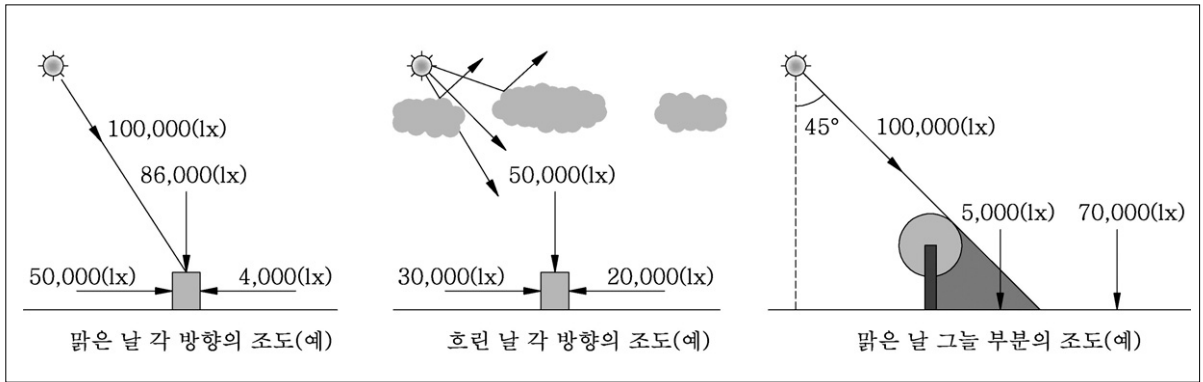


그림 5. 일기 상황별 조도의 변화(개략치)

서 조명의 효율을 높게 하기 위해서 벽면을 밝은 색으로 마감하는 것이 반사의 원리를 응용한 예이다.

자연광인 태양광은 색상이 없으나 조명등에서 나오는 불빛은 광원에 따라서 색상을 가지고 있다. 백열등은 약한 붉은 색이며 가로등은 대부분 황색을 띄고 있고 공원등은 약한 청색을 띄고 있다. 광고에 쓰이는 네온싸인은 다양한 색상을 가지고 있다.

빛은 파장에 따라 색상을 가지고 있는데 태양광은 모든 파장이 고르게 혼합되어 백색에 가까우나 기타 인공광은 광원의 특성에 따라 특정한 파장대역이 많이 방출됨으로서 특정색이 강하게 나타난다. 사람은 오래전부터 태양광에 순응되어 왔으므로 태양광이 가장 이상적인 빛이다.

일광은 점광원으로 볼 수 있는 태양으로부터 오는데 태양은 일중에도 궤도를 가지고 움직이고 있으며 빛을 전파하는 대기는 청명한 날도 있고 구름 낀 날도 있어 지면에 도달하는 빛의 양은 수시로 변하고 있다.

쉽게 생각하여 구름한 점 없는 청명한 날이 가장 밝을 것으로 알고 있으나 실제로는 구름이 적당히 낀 날이 훨씬 밝다. 지면위의 광의 분포도 방향에 따라 상당히 다르게 되는데 맑은 날은 태양의 방향과 반대 방향은 수십 배의 조도 차가 있으나 흐린 날은 방향에 따른 조도 차이가 크지 않다(그림 5).

### 3. 순응 현상 과 터널 조명 이론

일광의 조도 변화를 보면 해뜰력의 1(lx) 내외에서 한낮에는 100,000(lx) 이르도록 변화의 폭이 상당히 크다. 인간은 이러한 변화에 적응하여 1(lx)에서도 어느 정도 사물 인식이 가능하도록 진화되어 왔다. 물론 밝기의 크기에 따라 시력의 차이는 있다. 이는 인간의 눈이 카메라의 조리개와 같이 광의 변화에 따라 자동 조절되는 기능을 갖고 있기 때문이다. 이를 학문적으로는 순응이라 하는데 밝음에서 어둠으로의 순응을 암순응이라 하고, 어둠에서 밝음으로의 순응을 명순응이라 한다.

일상에서 경험할 수 있는 것은 극장에 들어가서 한참 후에나 제대로 볼 수 있는데 이것이 암순응 현상이다. 실제에서 명순응은 순식간에 이루어지므로 별반 문제가 되지 않는데 암순응은 적응시간이 길어 문제를 야기시킨다. 이의 대표적인 곳이 터널에 진입할 때인데, 이를 해결하기 위해서 터널 입구부에 대단히 높은 인공조명으로 해결하고 있다.

터널조명은 일반조명과과는 상당히 다른 이론적 접근이 필요하다. 앞에서 언급된 순응을 해결하는 문제와 또 하나 다른 점은, 관측점이 관측자가 있는 주위가 아니고 전방 관측점(제동거리 전방)이라는 점과 관측자가 빠르게 이동하면서 관측한다는 점이 일반조명과 크게 다른 점이

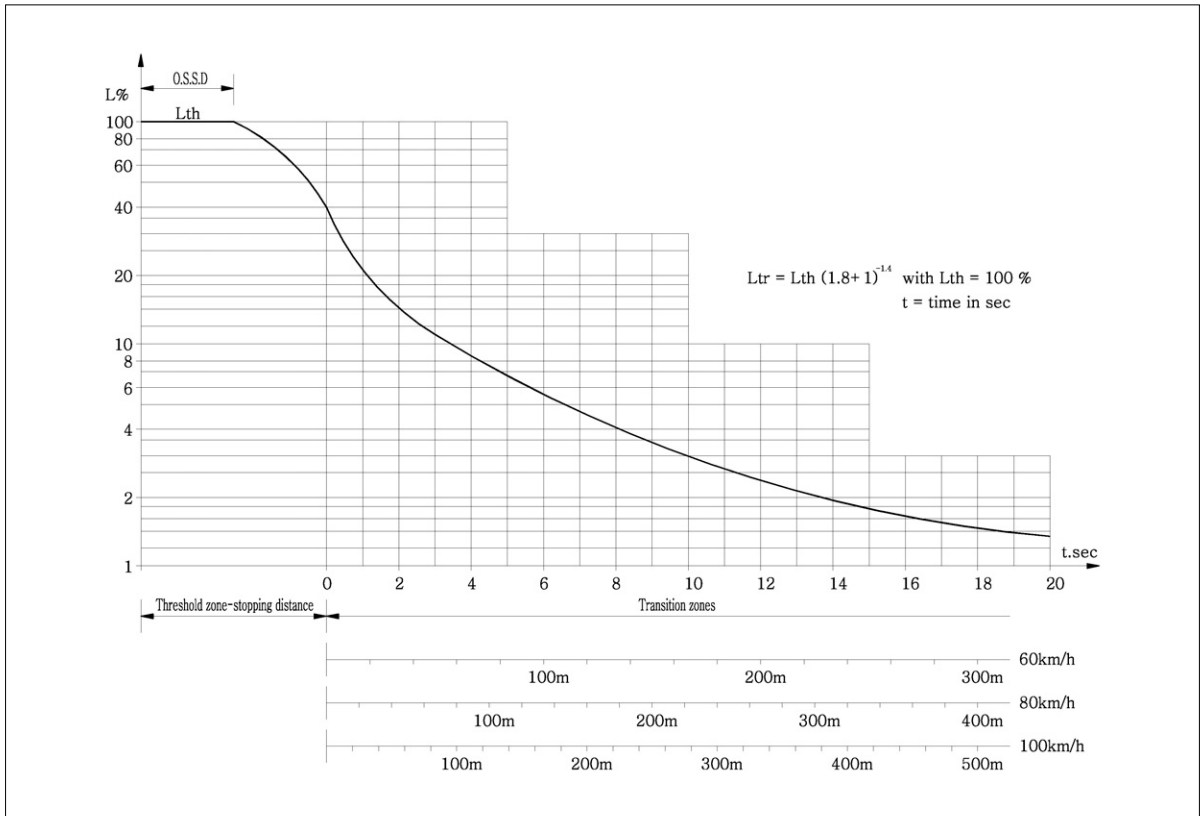


그림 6. 조도순응곡선(CIE)

다. 터널 조명이론은 이러한 모든 것을 해결하는 것으로 다수의 실험에 근거를 둔 이론이다.

터널조명이론은 이론 정립의 난해함과 실제 대중적 학문이 아니므로 전 세계적으로 보고된 연구 논문이 다양하지 못하다. 보고된 연구보고서에서 세계적으로 인정받아 실제로 활용되고 있는 보고서는 국제 조명위원회("CIE" international commission on illumination)에서 1990년도에 채택한 보고서로서 전 세계의 국가가 이를 근간으로 하여 자기나라의 특성에 맞게 약간의 수정을 가하여 각국의 기준으로 채택하고 있다.

터널조명의 원리는 밝은 야외에 적응된 상태에서 어두운 터널 안을 주시할 때, 보이지 않음(블랙홀 현상)을 보일 수 있도록 휘도를 높이고 터널에 진입하면서 눈의 순

응정도에 따라서 점차 조명을 감소하는 원리가 근간이다. 이상적 터널 조명은 터널입구부의 조명의 밝기를 야외휘도에 근접시켜서 점차적으로 감소하는 것이나, 야외 휘도는 상당히 높아 인공조명으로 그를 유지하는 것은 비경제적이므로 보임에 크게 장애를 주지 않는 범위에서 가능한 낮게 유지할 필요가 있다. 입구조명은 가능한 낮게 하는 것은 순응을 좀 더 빠르게 이루어지도록 하는 기능도 갖고 있다.

터널 입구의 밝기는 야외휘도의 크기에 일정 비례하고 조명의 거리와 감소형태는 교통속도에 영향을 받게 된다. 이를 그래프로 표현하면 (그림 6)과 같다.

터널입구의 일정거리(0.5SD, SD:제동거리)는 경계부 구간으로 일정 휘도를 유지하다 점점 감소시켜 나가도록

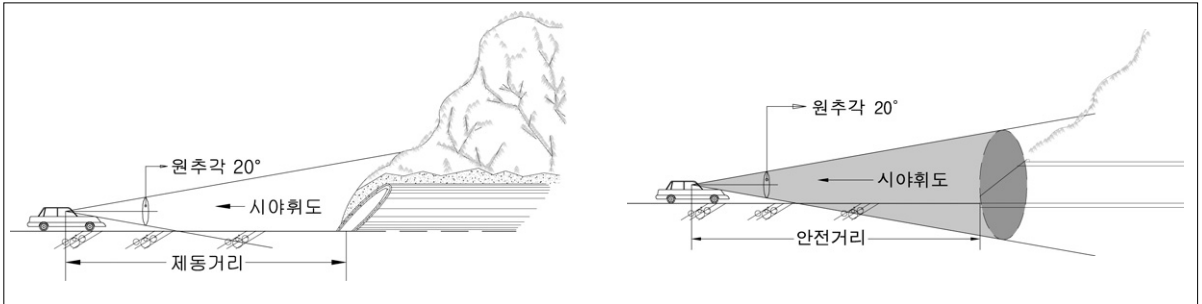


그림 7. 운전자의 시야휘도 원리

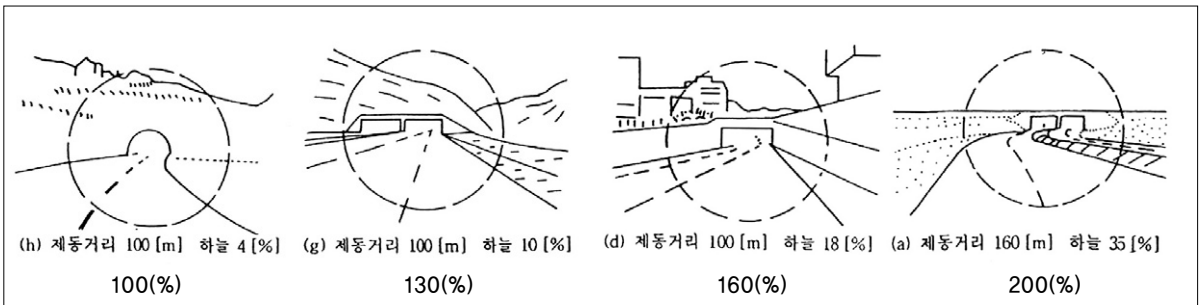


그림 8. 터널환경에 따른 시야휘도의 변화(방위에 따라서도 차이가 있음)

표 2. 설계속도와 비례계수 “K”와의 관계

설계속도(km/h)	대칭조명	카운터빔
100	0.1	0.07
80	0.06	0.05
60	0.05	0.04

• 경계부 휘도 = 야외휘도 × K

되어 있다. 감소 구간은 이행부, 완화부 구간으로 운전자가 터널에 접근하고 진행함에 따라 눈의 순응이 점차 이루어지고 그에 비례하여 밝기를 감소시켜 나가는 구간이다. 경계부 구간의 휘도는 야외휘도(정확한 표현은 야외 시야휘도)에 비례하여야 하는데 이때의 비례계수 K값은 (표 2)와 같다.

일광에 의한 야외휘도는 시각과 날씨에 따라 변화가 심하고 터널의 방위와 지형, 주위여건 등에 따라서도 다르게 된다. 입구조명의 시설은 년 중 발생할 수 있는 최고의 휘도를 산출하여 적용하는데, 이는 대단히 높아서 흐린

날에는 불필요하게 높게 되어 전력을 낭비하게 된다.

여기서 시야휘도의 개념에 대해서 알아보자.

시야휘도란 운전자가 전면을 주시하고 운전할 때, 운전자의 눈에 영향을 주는 휘도를 말하며, 이 휘도를 얻기 위해서는 시야 휘도 측정을 위하여 특별히 고안된 휘도계로 직접 측정하는 것이 가장 바람직하나, 실제에서는 년중 최대 휘도의 발현 시점을 설정하기 어렵고, 설계당시에는 터널 주변의 형상이 이루어지지 않은 점 등으로 실측에 어려움이 있어 계산으로 도출하는 방법을 채택하고 있다.

터널의 시야휘도는 터널 입구로부터 제동거리 전방에서 운전자의 주시선을 기준으로 원추각 20° 내의 휘도의 평균치로 하고 있다.

휘도계는 이 값을 직접 측정하도록 고안된 것이며 계산의 방법도 이 범위의 휘도값을 계산하도록 한 것이다. 이는 일반적으로 말하는 야외휘도와는 상당한 차이가 있다 (그림 7, 그림 8).

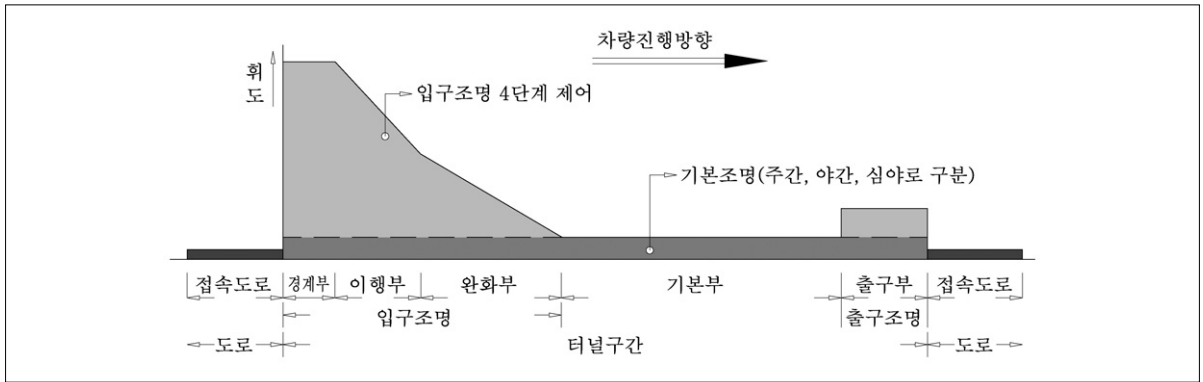


그림 9. 터널의 조도(휘도) 분포

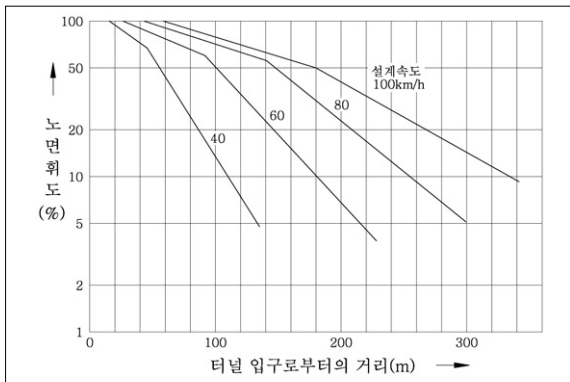


그림 10. 터널입구의 노면휘도(KSA 3703)

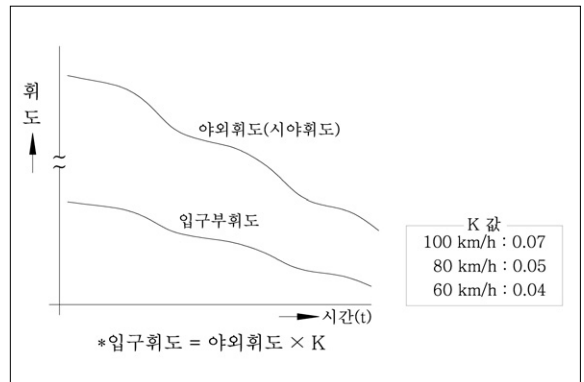


그림 11. 외부휘도 와 내부휘도 비

#### 4. 구조물을 이용한 순응시설의 원리

터널입구 조명은 그의 특수성으로 인하여 대단히 높은 조명시설이 필요하고 이를 유지하기 위한 막대한 전력이 소요됨은 앞서 언급하였는데, 이러한 문제점을 해결하고자 최근 턴키나 대안설계시 구조물을 이용한 순응시설로 대체하는 시도가 다수 있었다. 구조물을 이용한 순응시설은 원리를 정확히 이해하지 못하고 설계할 경우 그 효과를 기대하기 어려울 수 있다. 구조물을 통한 순응시설의 설계는 대단히 어렵고 완전한 시설은 만들 수 없는 것도 사실이나, 순응을 위한 조명이 정밀한 제어를 요하지는

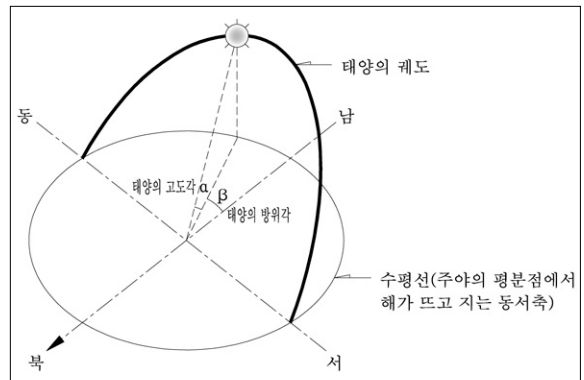


그림 12. 태양의 궤도

않으므로 어느 정도 실효성 있는 시설은 가능하다. 구조물을 통한 순응시설의 설계가 어려운 것은 태양이 변화하는 궤도로 움직이며(그림 12), 강렬한 직사광을 갖고 있기

때문이다. 그러므로 자연광의 성질을 정확히 이해하고 순응시설을 설계하여야 한다.

구조물을 이용한 순응시설의 원리는 야외의 높은 휘도를 갖는 자연광을 구조물로 차폐하여 터널 입구를 적당히 어둡게 하는 원리이다. 터널 입구를 어둡게 하는 것은 어두운 터널 내부에 진입할 때 순응이 빨리 이루어지도록 하기 위함이다. 그래서 충분히 어둡게 하지 않으면 효과가 없게 된다. 순응시설은 시설비용이 많이 소요되고 또한 터널을 연장하는 효과도 있으므로 되도록 짧게 하여야 하는데, 그러기 위해서는 순응구간의 휘도를 가능한 터널 입구 조명곡선과 근접하게 할 필요가 있다. 순응구간 초입부의 휘도는 야외휘도(야외 시야휘도)에 비례하여야 하는데 비례계수("K")로 약 0.04~0.1배(설계 속도에 따라 다름) 정도를 택하고 있다(표 2). 입구부가 밝게 되면 순응시간이 길어져, 결과적으로 순응시설 또한 길어져 비경제적이 된다.

앞 절의 터널조명 이론에서 입구조명 거리가 교통 속도와 야외휘도의 크기에 따라서 정해지는데 대략 100km/h에서 360~400m 정도가 필요하게 된다(그림 10).

이 거리는 입구의 밝기를 기준과 같이 할 경우이고 입구부 밝으면 더 길어야 한다. 그러나, 구조물을 이렇게 길게 하는 것은 비경제적이므로 높은 밝기를 요하는 경계부 정도만 대상으로 하고, 그 외 구간은 인공조명으로 해결하는 것이 바람직하다.

경계부 구간만 대상으로 하여도 설계속도 100km/h에서 60m, 80km/h에서 50m 정도가 필요하다.

또 하나의 중요한 과제는 내부의 밝기(휘도)가 외부의 야외휘도(시야휘도)의 변화에 비례적으로 변화되어야 한다는 것이다(그림 11). 외부가 밝은 날엔 밝게, 흐린 날의 경우와 같이 외부가 어두울 경우엔 내부가 어둡게 유지되어야 한다.

순응시설 내부의 밝기는 외부 자연광의 유입에 의한 것이므로 빛이 들어오는 개구부 또는 투과체의 형상이나, 전체 구조물의 형태 등에 따라서 다르게 되는데, 문제는 외부에서 투입되는 빛의 양이 방향에 따라서 다르고, 시각과 날

씨에 따라서도 각각 다르다는 것이다.

이는 태양광이 집중광이며, 일주하는 특성으로 인한 것이다. 결론적으로, 순응시설의 원리는 터널 입구조명 곡선과 같이 야외휘도에 일정비율로 내부휘도를 감소시킬 수 있어야 하며, 야외휘도의 변화에 비례하여 내부휘도도 자동으로 변화되도록 하여야 한다. 기타 간과할 수 없는 것은 직사광이 곧바로 내부에 조사되는 것은 방지되어야 한다.

직사광은 그 자체로 휘도가 상당히 높아 국부적으로 그늘이 발생하고 눈부심도 유발하므로 피해야 한다. 이러한 조건의 구조물을 만들기 위해서는 터널입구의 방위나 지형적 여건에 따라서 각기 달라져야 하므로 하나의 모델로서 되는 것이 아니다.

## 5. 순응시설의 적정성과 해결해야 할 문제

앞에서 순응시설의 원리에 대하여 이해하였듯이 불규칙하게 움직이는 태양광을 제어하는 문제는 대단히 복잡하고 어려울 수 밖에 없다. 이를 해결하여 순응시설로서 가치를 얻기 위해서 다음이 해결되어야 한다.

- 1) 야외휘도의 변화에 대하여 내부 노면휘도의 변화가 가능한 일정한 비율을 유지해야 한다.
- 2) 어떠한 시각에도 태양의 직사광이 노면에 조사되는 것은 억제되어야 한다.
- 3) 구조적으로 터널을 연장시키는 구조는 피하여야 한다.
- 4) 광 투과체를 사용시 재질의 변화나, 오염으로 인해 투과율이 변하지 않아야 한다.
- 5) 경제성이 있어야 한다.

상기의 조건 중에서 가장 조건충족이 어려운 것은 야외 휘도(정확한 표현은 시야휘도)의 변화에 비례하여 내부



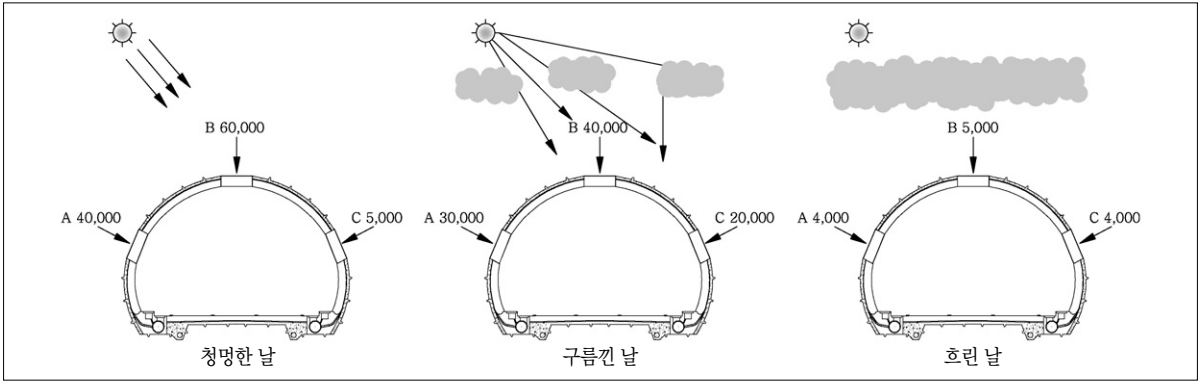


그림 13. 순응시설내 입사광의 변화

표 3. 입구부 휘도의 허용 범위

설계속도	K(KS 기준)	허용범위
100 km/h	0.07	0.042~0.14
80 km/h	0.05	0.03~0.01
60 km/h	0.04	0.024~0.08

• K = 순응시설 내부휘도/외부 시야휘도

휘도를 변화시키는 것이다(그림 13).

이상적인 것은 변화의 비율이 일정하면 좋으나, 그런 구조를 만드는 것은 불가능하다. 이는 태양의 직사광의 영향 때문이다. 직사광의 범선조도는 100,000(lx) 이상이나 직사광의 반대방향의 조도는 불과 4,000~5,000 정도로 20여배의 차이가 나며 그나마도 태양의 궤도가 시각과 계절에 따라서 다르게 변화되고 흐린 날에는 방향에 관계없이 하늘의 휘도가 거의 일정하다보니 일정 개구부나 투과체를 통하여 내부로 빛을 도입하여 내부의 휘도를 유지하는 방법에는 그때 그때의 날씨와 시각에 따라 상당히 다르게 된다. 그러나 다행하게도 우리의 눈은 밝음의 변화에 그렇게 민감하지 않고 조명의 변화에 어느 정도 자동으로 대응하는 기능이 있다. 따라서 내·외부의 휘도의 비율의 폭을 어느 정도 넓게 설정해도 무난하다. 그러나 그 범위를 어떻게 설정하는 것이 이상적인가 하는 것이 과제이다. 이는 사람의 시력이 생리적인 기능으로 많은 사람의 체험에 의존 할 수밖에 없으며 주관적이라는

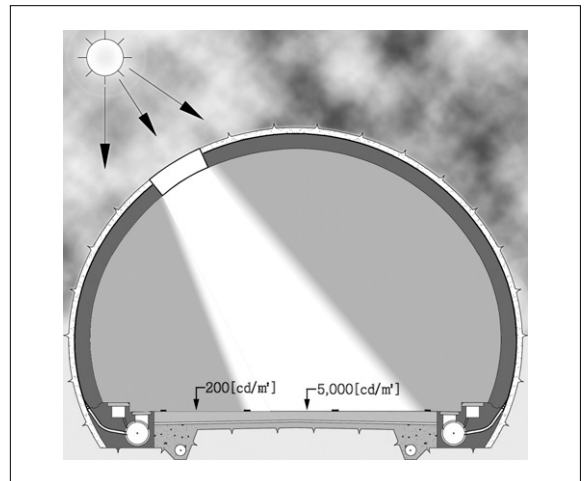


그림 14. 터널내 직사광에 의한 휘도의 분포

점이 설정에 어려운 과제이다. 본인의 경험으로 볼때 기준의 60%~200% 범위가 무난할 것으로 보인다(표 3).

순응시설에서 특별히 유념해야 되는 것은 태양의 직사광선이 직접 노면에 조사되는 것은 방지되어야 한다. 직사광선은 태양의 고도와 각도에 따라 다소의 차이는 있지만 조도에서 100,000(lx)를 넘으며 자체의 휘도가 30,000(cd/m²)이 넘고 조사노면의 휘도가 5,000~10,000(cd/m²)에 이르므로 빛을 감소시켜야 하는 순응시설의 효과를 얻을 수 없으며 눈부심을 유발하는 등의 부작용을 주게 된다(그림 14).

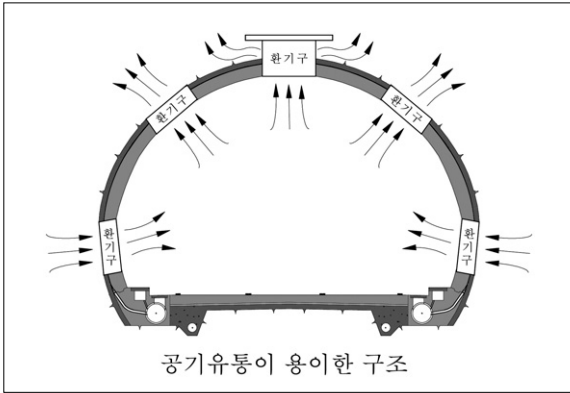


그림 15. 환기와 매연을 고려한 구조

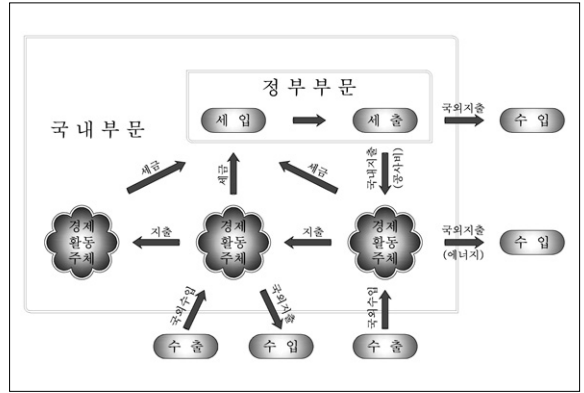


그림 16. 정부재정의 흐름

순응 시설의 구조는 터널의 형태를 가질 수밖에 없는데 터널과 동일한 구조라면 터널을 연장하는 결과로, 이 경우에는 환기 및 제연의 용량이 증가하게 되고, 또한 터널의 연장에 따라 시설하게 되는 각종 방재 설비들의 시설기준이 한 단계 상승할 수 있는 문제점이 있다.

환기와 제연에 크게 문제되지 않는 단 터널에서는 크게 관계가 없지만 가능한 터널과 유사한 밀폐형 구조는 탈피하는 것이 좋다(그림 15).

순응시설에서 내부로 빛을 도입하는 부분은 개구로 하든가 아니면 광 투과체가 사용되는데 광 투과체를 사용 시에는 투과체가 세월이 경과함에 따라 열화에 따른 투과율의 변화가 없어야 하며 먼지나 오염물질이 쌓임으로서 광 투과기능을 상실하는 구조는 피하여야 한다. 구조상 상부에 투과체를 사용할 경우 오염물질의 퇴적으로 인하여 기능을 유지할 수 없는 경우가 발생할 수 있다.

순응시설의 목적이 순응 효과를 얻기 위함이지만 이 기능은 기존에는 인공조명을 통하여 이루어 왔으므로 경제적 가치 분석은 인공조명과 비교하여 얻을 수 있다. 다음 절에서 상세히 분석하여 보겠으나 이제까지의 가치 평가의 잣대가 상당히 잘못되어 왔다는 것이다.

순응시설의 가치는 에너지의 절약에 있는데 단순히 전기료의 산술적 계산으로만 비교하여 왔다. 이에 큰 모순이 있었다. 결론만 말하면 순응시설을 제대로만 시설한

다며 경제적 가치가 충분히 있다.

## 6. 순응시설의 경제적 가치 분석

순응시설의 경제적 가치는 인공조명을 대체함으로써 얻어지는 전력비의 절감을 시설비와 대비함으로써 판단할 수 있다. 시설비와 전력비(한전의 전기요금)를 단순 비교하여 시설의 경제성을 판단할 경우 비경제적인 시설로 평가 될 수밖에 없을 것이다. 단순하게 생각하면 시설비와 전력비를 단순 비교하는 방법이 타당성이 있는 것 같으나 터널은 국가 시설물로서 국가단위의 입장에서 판단하여야 한다.

이를 이해하기 위해서는 정부의 예산과 세금, 세입과 세출의 의미를 올바르게 이해할 필요가 있다. 정부는 경제활동주체로부터 연간 단위로 세금을 징수하여 이를 전부 경제활동 주체에게 여러 목적으로 지출하는 분배기능만을 가지고 있다. 경제활동 주체에 지출된 돈은 또 다른 경제활동 주체에 여러 단계로 유통되면서 경제활동을 조장하여 이윤을 창출하고 다시 일정금액이 세금으로 정부에 환수되게 된다. 정부에서 지출된 재정은 유통의 과정에서 일부는 자본재나 소비재의 수입대금으로 해외로 지출되기도 한다. 이런 측면에서 국내에 지출된 예산은 국가의

표 4. 대체 에너지 전력구매비(태양광)

구분	전력평균요금	대체에너지 전력구매가
국내	75.44원	716원
독일	90원	600원

입장에서는 단지 자금의 이동에 불과하며 해외로 지출된 자본과 국내자원의 소비에 사용된 자금이 손실로 분류될 뿐이다(그림 16). 그러나 여기서 비교의 대상인 전력요금은 어떠한가. 전기는 그 자체가 최종소비재이며 생산비용은 상당부분 에너지 수입비용으로 외국에 지출되고 생산과 소비과정에서 돈으로 평가할 수 없을 만큼 자연 환경을 파괴하는 주범이기도하다. 그러나 전기는 경제활동과 산업생산의 기초 소비재이므로 생산의 경쟁력 제고나 경제의 활성화 등의 목적으로 최소 요금으로 공급하고 있다. 이러한 측면에서 시설비와 전력 요금을 단순비교하는 것은 부적절하다.

그러면 공사비와 전력비와의 비교시의 전력요금은 어느 기준에서 책정하는 것이 합리적인가. 합리적 기준을 도출하기는 쉽지 않으나, 다행히도 국내외에 근거화할 수 있는 사례가 있다. 대체에너지 보급에 적극적인 독일에서 민간이 대체에너지로 생산한 전기를 정부가 고가로 매입하고 있으며 국내에서도 고가로 매입하고 있다. 매입단가

는 태양광의 경우 독일에서는 평균전력요금의 7배 정도이며 국내의 경우는 9배에 달한다(표 4). 에너지의 절약은 대체에너지 생산과 다름이 없으므로 이 기준을 참고할 필요가 있다. 상기의 경우는 정책적 배려로 과도한 면도 있으나, 여러 면을 고려한다하여도 평균전력요금의 3배 정도를 기준 하는데 무리가 없다고 본다. 이러한 기준으로 평가할 때 순용시설은 종래의 분석과 달리 시설가치가 상당히 높다. 다음은 경제부 구간을 순용시설로 하였을 때의 비교표이다. 비교결과 설계속도가 높을수록 가치가 크며 표에는 제시되지 않았으나, 시야휘도가 높은 오픈구조의 도시형 터널의 경우에 상대적으로 가치가 더욱 상승하게 된다(표 5).

## 7. 자연을 이용한 순용시설

터널입구부의 설계는 토목구조나 미관적인 측면에서 설계되고 있으나 조도순용의 측면도 고려해 볼 만하다. 조도순용에 도움이 되는 구조는 시야휘도를 낮추는 것이 목적이므로 입구부가 태양의 직사광이 가능한 적게 들어오도록 하는 구조가 바람직하고 주변이 반사율이 적은 환경을 조성하는 것도 좋은 방법이다. 입구부가 안쪽으로

표 5. 순용시설의 경제적 가치 비교

### • 순용시설 시설비용

설계속도	시설거리	시설수명	시설비	유지보수비용	30년비용
100 km/h	60m × 2	60년	12억원	0.12억원/년	9.6억원
80 km/h	50m × 2	60년	12억원	0.1억원/년	8.0억원

※ 보수비용은 연간 시설비의1%

### • 순용시설시 전력 및 조명시설 절감비용

설계속도	시설비용(억원)			전력요금(억원)				합계(억원)
	조명시설비	유지보수비(30년기준)	30년비용	시설용량(kW)	년간사용량(kWh)	단가(원)	30년요금	30년비용
100 km/h	1.8	1.2	3.0	100	300,000	225	20.2	23
80 km/h	1.1	0.7	1.8	60	180,000	225	12.2	14

※ 전력단가는 국내판매 단가의 3배로 책정



그림 17. 동서배치 터널에서 복측을 오픈구조로 한 순응 구조물

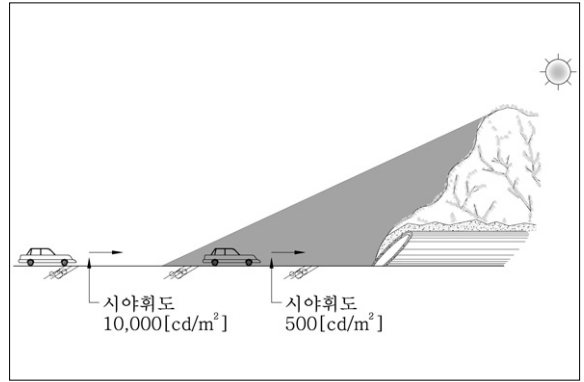


그림 18. 그늘의 휘도 비교

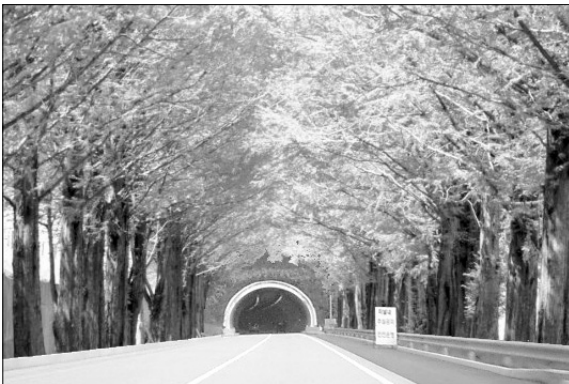


그림 19. 수목이 무성한 터널 입구

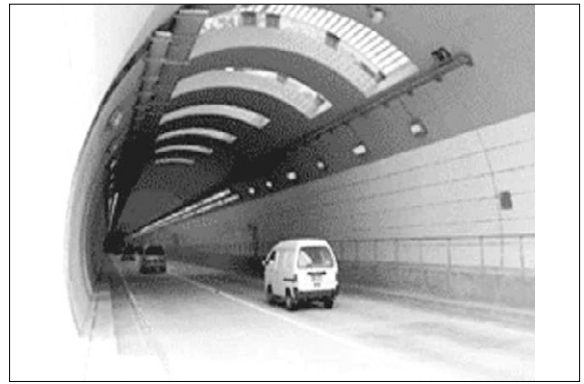


그림 20. 둔내 터널

깊숙이 배치되면 일중 태양의 직사광이 투사되는 시간이 짧고 그늘의 시간이 길어짐으로 입구조명을 상당히 절약할 수 있다. 참고로 그늘 상태의 휘도는 직사광 상태에 비하여 20분의 1 정도로 낮다(그림 18).

수목을 통한 순응시설도 고려해 볼 만하다. 이 방법은 거의 모든 터널에 적용 가능하고 효과도 크다. 수목은 그 자체로 반사율이 낮아 시야휘도를 낮출 수 있을 뿐 아니라 노면에 그늘을 형성함으로써 시야휘도를 낮추는 효과가 상당히 크다.

효과를 높이기 위해서는 키가 큰 수목이 좋으며 겨울철에도 효과를 얻기 위해서 사계절 푸르름을 유지하는 침엽수 계통이 좋다. 터널 입구부는 대부분 고산지대로 나무가 잘 자랄 수 있는 토양이 부족하나, 순응시설 구간만이

라도 보강하여 수목에 의한 순응효과를 얻을 수 있도록 하는 것이 충분한 가치가 있다고 본다(그림 19).

## 8. 인접터널 간 연결 캐노피와 터널조명

단거리로 인접한 터널 사이를 캐노피로 연결하는 경우에는 조명을 고려하여 캐노피의 구조를 특별히 고려하여야 한다.

터널 사이를 캐노피로 연결하는 목적은 터널사이 구간이 눈이나 결빙으로 인한 사고 예방이 주 목적인데, 터널이 단거리로 인접해 있다는 것은 깊은 산악지로 기후환경이 열악할 것이 예상되며, 오지로 사고시의 대처도 용이



그림 21. 터널과 터널 연결 캐노피

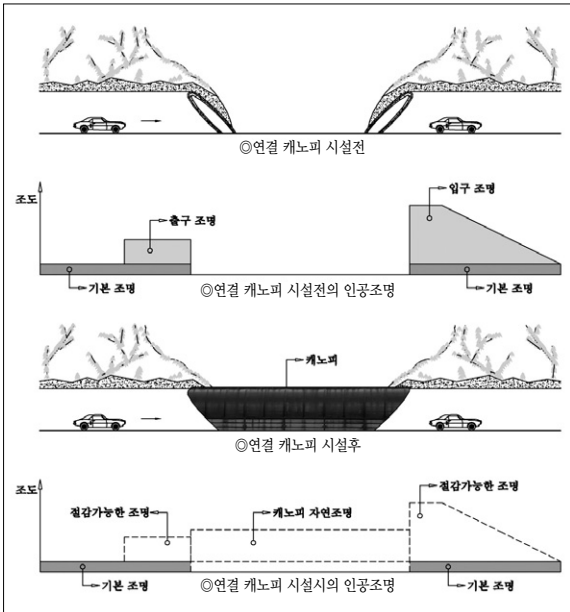


그림 22. 연결 캐노피의 조도

하지 않으므로 사고 예방시설로서 바람직할 것이다. 그러나 캐노피로 터널을 연결해도 환기나 제연의 필요성이 없는 단(短)터널은 두 터널을 완전한 한 개의 터널 구조로 연결하여도 무방하겠으나, 두 터널을 연결하여 장터널이 되는 경우에는 하나의 터널로 되는 밀폐구조는 적극 피해야 한다(그림 21).

장대터널에서는 재해의 위험이 거리의 자승으로 증가

하므로 방재에서 불리하고 환기용량의 증가나 기타 방재 시설의 설비비가 대폭 상승하기 때문이다. 따라서 연결 캐노피의 구조는 이런 것을 감안하여 검토되어야 한다.

인접터널을 캐노피 구조로 연결하는 부분에서의 조명은, 주간에 캐노피에 입사되는 광을 적절히 제어함으로써 입구조명과 출구조명을 야간조명만으로 가능하게 하여 조명 전력비를 대폭 절감할 수 있다. 이러한 것을 종합하여 구조에 반영되어야 할 사항은 다음과 같다(그림 22).

- 1) 눈, 비가 노면에 직접 낙하되지 않는 구조
- 2) 내부에 공기의 유통이 원활하여 터널 환기에 영향이 적은 구조
- 3) 사고시 대피나 방재활동을 할 수 있도록 터널보다 한차선 넓은 노폭의 구조
- 4) 노면에 직사광이 입사되지 않으며 어느 정도의 주간 휘도를 유지할 수 있는 구조

상기의 조건에서 1), 2), 3)의 조건충족이 충분이 가능하며, 2), 3)항은 연결되는 각 터널이 각자 독립 터널임을 주장할 수 있는 근거가 될 수 있으며, 여기서는 4)의 조명의 조건에 대하여만 살펴보자. 앞의 순용시설이 구조물을 이용하여 조명전력비를 절감하기 위한 시설로서 구조물 설계가 대단히 어렵고 기대되는 이익이 별로 크지 않으나, 그에 비하면 연결캐노피는 입사광의 제어를 정밀하게 하지 않아도 되므로 디자인이 쉽고 얻어지는 전력 절감효과도 크다(표 6).

그림에서와 같이 연결캐노피를 제대로만 시설하면 입출구 조명 전체를 절감할 수 있다. 조명의 측면에서는 주간기본조도 정도를 유지하면 되지만, 캐노피 구간은 터널의 연장이 아니므로 운전자에게는 야외와 같은 분위기를 줄 필요가 있으므로 밝게 할 필요가 있다. 그러나 너무 밝으면 운전자에 명순응을 일으켜 터널의 입출구 조명을 시설해야 되므로 조명 절감의 효과를 얻을 수 없다.

연결 캐노피의 구조 설계에 고려하여 할 것은 앞의 순

표 6. 연결캐노피의 가치 분석

※ 조건 : 2차선, 캐노피구간 100m 왕복, 시설수명 60년, 조명시설 수명 30년

설계속도	캐노피 설비비(억)			조명 절감 비용(30년기준)			
	초기시설비 (사용년한60년)	유지보수비 (30년기준)	계 (30년기준)	초기시설비	유지보수비	전력비	계
100 km/h	20	6	16	1.8	1.2	20.2	23
80 km/h	20	6	16	1.1	0.7	12.2	14

※ 전력단가는 국내전력요금의 3배기준

표 7. 캐노피 구간의 허용 조도치

설계속도	주간기본조도	캐노피구간조도	야간조도
100 km/h	100~120(lx)	100~1,000(lx)	15~30(lx)
80 km/h	80~90(lx)	80~800(lx)	15~30(lx)
60 km/h	50~60(lx)	50~500(lx)	15~30(lx)

응시설에서와 같이 개구부를 통한 야외 광을 도입하여 소기의 휘도를 유지해야 하는데, 야외휘도가 다양하게 변화되므로 야외휘도의 변화에 따른 내부휘도의 변화폭을 설정하여 설계해야 하고 직사일광도 고려해야 한다. 물론 환기의 기능도 같이 고려해야 한다.

다행히 순응시설과 달리 휘도의 변화폭이 상당히 커도 큰 문제가 되지 않음으로 구조물 설계가 순응시설보다 훨씬 수월하다. 캐노피 구간의 휘도는 운전자에게 명순응을 일으킴으로써 캐노피구간의 거리와 설계속도에 영향을 받게 된다. 캐노피 구간이 길면 휘도가 낮아야 되고 또한 설계속도가 높으면 휘도를 높게 할 수 있다. 휘도 설정을 얼마로 해야 최적인가는 별도로 연구해야 할 과제이지만 대체로 주간 기본조도의 1~10배 사이는 허용할 수 있을 것으로 본다(표 7).

## 9. 결론

날로 치솟는 에너지 가격과 청정 환경의 가치가 금전적으로 평가할 수 없을 정도로 높게 요구되는 이 시점에서

에너지의 절약이야말로 모든 엔지니어들이 항상 염두에 두고 모든 시설에 반영하여야 할 과제이다. 이제까지는 에너지의 문제가 잘못된 인식과 평가방법으로 인하여 우선 순위에서 밀려 왔으나 이제는 에너지 절약을 최우선 순위에 두어야한다. 터널(지하차도 포함)은 전력 다소비 시설로 현재 전국적으로 500여 개소가 넘으며 금후에도 계속적으로 증가하고 있다. 따라서 순응시설과 같이 전력 에너지를 절감할 수 있는 방안에 대한 적극적인 연구검토가 필요할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. 최신조명공학 : 지철근 (1999. 01.)
2. Lighting Hand Book(8th Edition) : Illuminating Engineering Society of North America
3. CIE(international commission on illumination) Report (1990.)
4. KSC 3703 (터널 조명 기준)