

기/술/예/설

도로터널 조명설계 기술해설(1)

1. 국제조명위원회 권고사항 및 각국 설계기준

신용주 <(주)한신콘설턴트 전문/정운대 겸임교수>
이진규 <(주)한신콘설턴트 설계실장>

우리 나라의 차량증가 속도가 엄청나게 빨라지면서 각종 차량도로의 확장, 개선, 신설이 많이 이루어지고 있다. 그리고 지리적, 경제적 여건에 따라 비교적 토지비용이 적게드는 산지를 이용한 도로개설이 증가하다 보니 대부분의 도로개설 및 확장, 개선공사에 터널이 포함되고 있으며 그에 따라 증가되는 교통량에 부합하는 조명시설을 갖추어야 계획된 교통량을 안전하게 수용할 수 있게 되었다. 현재 차량이 통행하는 고속도로 및 고속화도로, 국도에 위치한 여러 터널 중에는 진 출입시 운전자에게 상당한 불안감을 주는 터널이 다수 있음을 우리는 생활에서 느낄 수 있다. 전기분야 설계회사에 근무하면서 정부기관에서 Turn-key Base로 발주하는 도로공사의 터널 부분 설계에 종사하다 보니 한국 산업규격을 비롯한 터널조명에 관한 각종 설계기준 및 설계절차를 접하고 활용하면서 많은 부분이 생략되거나 불충분하게 설명되어 이 부분에 종사하는 여러 전기/조명 기술자들이 확신을 가지고 설계를 추진하거나 좀더 나은 시각 환경과 설비운영 방안을 구성하고자 하는데 부족하다고 생각되어 선진 각국의 설계기준을 제정하는데 밀바탕이 되고 있는 CIE(국제조명위원회) 권고사항을 면밀히 분석 검토하여 도로터널에서의 운전자 시각 환경을 안전과 쾌적함을 최선으로 하고 경

제성을 차선으로 하여 구성하는데 필요한 제반사항을 현재 국내에 알려지지 않은 새로운 사항을 우선적으로 나열해 보고자 한다.

1. 도로터널 환경과 조명설비

도로터널의 시각환경은 여러 가지 고려해야 할 사항들이 많지만 주간의 야외에 위치한 도로의 밝기만큼 기술적 경제적으로 밝게 조명할 수 없다는 점에서 몇 가지 문제점을 안고 있다. 맑은 날 터널 내부와 야외 도로와의 휘도는 약 100배의 차이가 있고 인간의 시각은 급작스런 밝기의 변화에 빠르게 적응할 수 없기 때문에 운전자에게 엄청난 부담을 주게 된다. 인간의 명암에 대한 순응은 암순응의 경우가 명순응보다 30배의 시간이 소요된다. 또한 운전자는 정지한 상태 또는 도보로 걸어가는 상태에서 암순응되는 것이 아니라 빠르게 앞으로 진행하면서 어두움에 적응하여야 하므로 그에 수반하는 각종 문제점이 발생되며 터널의 조명은 입구에서 출구까지 어느 한 곳도 세심한 주의가 필요치 않은 곳이 없다고 볼 수 있다. 또한 터널내부의 일반적 환경 조건은 시설된 조명설비를 당초 설계조건에 부합되게 유지관리하기가 매우 어렵고, 한번 시설된 터널 내부 조명설비는

초기 투자비에 걸맞게 최소한의 Life Cycle 동안 그 역할을 하여야 하므로 초기단계 계획이 매우 중요하다고 할 수 있다.

2. 생리학적 고려사항 (C.I.E. 권고사항)

자동차가 안전하게 운행 될 수 있는 속도는 전적으로 운전자가 처해진 환경에서 운전에 필요한 정보를 얼마나 빨리 얻을 수 있는가에 달려있다. 이러한 정보 수집에 있어서 가장 중요한 것이 시각이다. 시각은 운전자가 가고자 하는 도로에서 목표물과 장애물을 인지하고 구분하는 단 한가지 수단이며, 이러한 시각에 의한 정보 수집의 정도는 오로지 시각 환경에 의존한다. 목표물과 장애물은 적정한 거리 밖에서 시각적으로 인지되어야 필요한 자동차 조작행위가 효과적으로 이루어 질 수 있다. 따라서 터널 조명 설계기준을 논하기 전에 인간의 시각작용 특성을 이해할 필요가 있다.

어떤 주어진 순간에서 인체 망막의 반응은 바로 직전 순간의 빛의 세기에 영향을 받으며 이것을 순응이라 하고 이러한 밝기의 변화에 대해 망막의 감도가 따라서 변한 상태를 순응상태라 한다. 시야 내에 일정한 기울기의 휘도 분포가 있고 인체의 시각이 이에 적응되어 있을 때 그러한 휘도 분포와 동일한 상태를 순응도 라고 한다. 즉 휘도의 변화에 대한 인체 시각의 자율조정 필요시간을 순응시간이라 하며 이러한 시간 종속현상을 순응이라 한다. 적응되어 있는 밝기의 변화에 대해 인체의 시각은 직전과 동일한 수준의 상태로 가기 위해 광 화학적 반응을 나타내며 이러한 반응에는 일정한 시간이 소요되고 인체의 시각이 주어진 순응도에 대해 최대한의 감도에 도달하기까지 시간 지연이 생긴다 이러한 광 화학적 변화는 밝은 상태에서 어두운 상태로, 어두운 상태에서 밝은 상태로 옮겨갈 때 발생하지만 후자의 경우가 전자의 경우보다 약 30배정도 빠르게 작용한다고 실험결과가 나와 있다.

이러한 인체의 시각적 적응지연의 관점에서 볼 때 특히 터널 입구부의 조명은 2가지의 문제가 자연 발생적 순응과정과 밀접하게 관계한다. 첫째는 주어진 순응상태에서 목적물은 순응도에 근접한 휘도일 경우에만 보인다는 것이다. 이러한 유도현상은 야외도로보다 아주 낮은 휘도의 터널입구에서 발생할 수 있는 “BLACK HOLE” 현상으로 설명된다. 즉 터널 입구의 휘도가 야외도로에서 완전히 적응된 순응상태에서의 임계치 이하일 때 터널내부에 대해 운전자는 아무 것도 알 수 없게 된다. 이는 다시 말하면 터널에서 경계부의 휘도는 적응된 야외 휘도에 따라 어떤 수준 이상이어야 한다는 것이다.

둘째로 문제를 야기하는 시각기능은 국부조명에서의 변화에 대한 순응의 복잡성이다. 운전자가 이동중에 밝기가 빠르게 변화하면 순응이라는 인체시각 기능이 즉시 따라가지 못하게 되고, 그에 따라 시각과 시력이 저하하게 된다. 최악의 시환경에서는 잠시동안 아무 것도 볼 수 없는 상태가 될 수 있음을 우리는 여름날 무심코 보안경을 쓰고 터널에 진입할 때 경험해 보곤 한다.

터널입구에서의 운전자 시각의 생리학적 현상을 고려한 조명조건에 대해 CIE(국제조명위원회/ 오스트리아 비엔나 소재)는 다음과 같은 실험결과를 제시하고 있다. 터널 입구부에서 요구되는 최소 조명강도(휘도)를 얻기 위한 목적으로 시행된 실험결과는 터널내부 조명강도(휘도) L_2 와 야외조명강도(휘도) L_1 이 그림1의 곡선을 따라야 한다고 권고하고 있다.

이 관계곡선은 대략 20cm 크기로 배경휘도에 대해 C의 대비를 갖는 정방형 물체를 대략 98[m] 전방에서 0.1초간에 75[%]의 확률로 운전자가 인지할 수 있는 조건에 기초를 두고 있다.

L_3 를 물체의 휘도라 하면 배경 휘도, L_2 와의 대비는 $C = [(L_2 - L_3) \div L_2] \times 100$ [%]로 정의된다. 즉 그림1의 곡선은 목표물이 20%의 휘도 대비를 갖기 위한 여러 가지 야외 휘도 L_1 에 대한 터널 입구부 휘도 L_2 를 나타내고 있다. 즉 목표물의 휘도

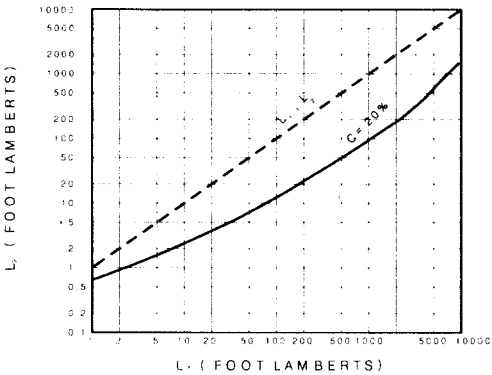


그림 1. 야외휘도-터널 입구부 휘도 관계 곡선

대비가 배경 터널 입구부 휘도 대비 20%를 유지하기 위한 야외 휘도 상태에 따른 배경 터널 입구부 필요 휘도의 값이다. 왜냐하면 그러한 상태에서 98[m] 전방의 운전자가 75%의 확률로 목표물을 인지할 수 있기 때문이다.

이 곡선이 말하는 중요한 의미는 L_2 (배경 터널 입구부 휘도)의 광범위한 부분에서 야외휘도 L_1 대비로 볼 때 L_2 가 10% 이하이어서는 안 된다는 것이다. 즉 $L_2 \geq 0.1L_1$ 이어야 한다는 것이며 이는 좋은 조명의 조건에서 말하는 국부-전반조명간의 관계와 동일하다.

실험결과는 또한 장애물에 대한 인식도가 단지 터널내부를 향해 점차 감쇄 될 수 있는 입구부 조명의 비율뿐만 아니라, 단계적으로 사라지는 시각에서의 잔상에 따른 불명확한 보임에 대해서도 결정하여야 함을 나타내고 있다. 이것을 고려할 때 배경 입구부 휘도 L_2 의 시간 경과에 따른 감쇄율은 75% 이상 운전자의 안전을 확보하기 위해 그림2 에 나타난 기울기 이상이어서는 안된다고 한다.

그림1 과 그림2 는 터널 입구부 조명 수준 결정의 기본이 되며 야외 휘도와와의 관계에서 정해진 최고 휘도는 운전자의 순응 개시 점에서 최소 98[m] 구간 까지 연장되어야 하며, 순응 개시 점은 터널 입구 이거나 일정거리 후방에 위치 할 것이다.

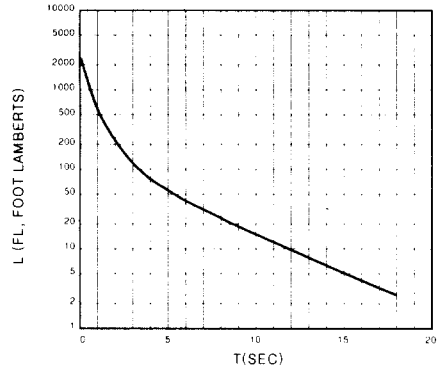


그림 2. 도로터널에서 최적순응을 위한 시간-휘도 관계곡선

3. 일반적 고려사항

가. 기본부 휘도 기준

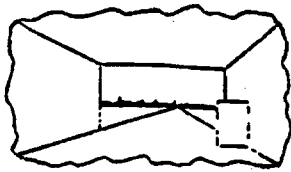
터널내부의 조명수준과 측정 방법에 대한 각 국가별 관련기관별 권장사항은 여러 가지로 나타나고 있다. IES Handbook에 따르면 도로 면에서의 수평면 조도가 최소한 5 footcandle 이상이어야 한다고 제안하면서 600[m]이상의 터널에 대해서는 10 footcandle 까지 높여주는 것이 바람직하다고 말하고 있다. AASHTO에 따르면 대부분의 상황에서 터널 벽의 평균 유지조도가 5 footcandle 이상이어야 한다고 주장한다. 이러한 터널 벽체 조도 값은 터널 벽체의 반사율이 최소 70%이상일 경우를 전제로 하고 있다. 터널 벽체의 반사율이 70%미만일 경우 설계조도는 낮은 반사율을 보상할 수 있는 만큼 증가되어야 한다고 한다. 이 주장은 벽체 휘도가 일정하게 유지되어야 하는 변수임을 암시하고 있다.

국제조명위원회 (CIE)는 장경간 터널의 내부 휘도가 적어도 2~5 cd/m² 이상이어야 한다고 주장한다. 이러한 수치는 도로면에서 측정된 최소 유지 값이다. 또한 벽면의 휘도도 최소한 같은 수준으로 유지되어야 한다고 주장하고 있다. 도표 1 에 터널 벽체 및 천정 반사율 70% 노면반사율 20%의 경우 각종 기관별 권장 조도수준을 나타내고 있다.

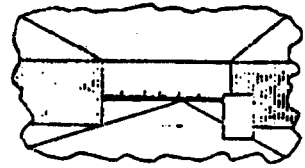
도표 1. 기관별 주간 기본부 권장 유지조도 (lux)

기 관 명	벽 체 조 도	노 면 조 도
I E S	15 - 24	54 - 108
AASHTO	25	54
C I E	14 -23	47 -79
K S	-	57

- * 그림 1, 2 의 경우를 80 [km/h] 기준으로 설명
- * KS의 경우 천장 반사율에 대한 언급 없음
- * 1 [lux] = 0.0929 [footcandle]로 환산
- * KS 는 80 [km] 시 노면 평균 휘도 $\times \frac{\pi}{\text{반사율}}$ 로 환산

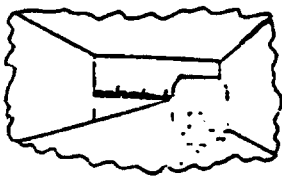


벽면 처리하지 않은 터널 출구부

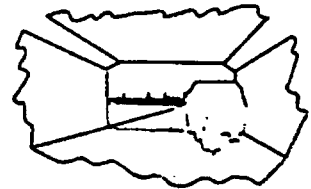


벽면 처리한 터널 출구부

그림 3. 터널 출구부 벽체 마감에 따른 자연 주광 침투효과



부적절한 조명시



적절한 조명시

그림 4. 터널 출구부의 적절한 조명 설치효과

도표 1 에서 볼 때 각 권장수치가 서로 현저히 다르게 나타나지만 주간 기본부 조명에 최대 값을 적용하기 위해서는 전제조건이 있다. 완전한 암순응이 가능하게 충분한 시간 동안 주행할 수 있는 터널의 경우 기본부 조명은 야간의 도로조명 설계기준으로 접근할 수 있을 것이다. 즉 시간대별 조광(부분소등

포함)이 불필요하다는 것이다. 반면에 단지 부분적 암순응 반응이 발생하는 짧은 터널의 경우 상한치를 적용하는 것이 주간 조명으로 유리하다. 다양한 경우에서 경제적 요인과, 적절한 조명기구의 선정이 궁극적 기본부 조명에서 중요한 역할을 하고 있다.

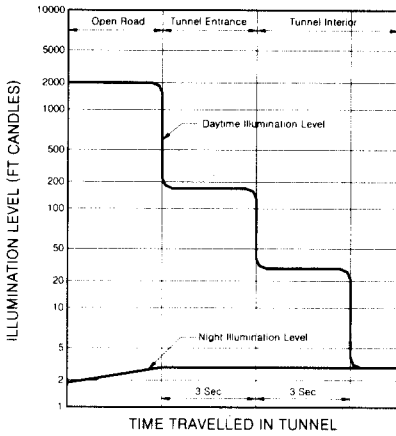


그림 5. 저속도, 적은 교통량 터널 입구부 적용 조도 수준 (캐나다)

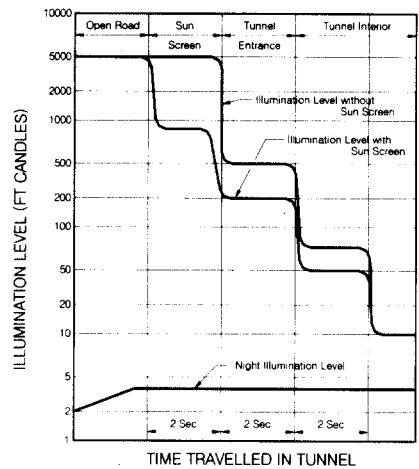


그림 6. 고속도, 대량 교통량 터널 입구부 적용조도 수준 (캐나다)

나. 출구부 조명

주간에 터널 출구부는 운전자에게 “White Hole”로 나타난다. 그리고 모든 장애물은 밝은 출구에 대한 “실루엣”에 의해 구분되고 확실하게 인식된다. 이러한 “실루엣”에 의한 인식성은 높은 반사율의 타일이나 판재를 벽에 설치함으로써 더욱 향상 될 수 있다. 즉 터널 내에 더 많은 주광이 침투하는 것을 허용해 주자는 것이다. 이러한 현상을 그림 3 에 나타낸다.

만일, 출구가 부분적으로 트럭 같은 대형 장애물에 의해 가려져 있을 때는 다른 장애물 인식 요구조건이 발생된다. 이러한 경우에 선행 장애물 보다 작은 물체가 큰 장애물을 따라가고 있다면 작은 물체는 쉽게 식별 될 수가 없다. 즉, 대형 물체가 출구를 가리면서 확실하게 구분되는 반면 뒤따르는 작은 물체는 큰 물체와 같은 정도의 밝기를 갖게되어 “실루엣”이 없으므로 쉽게 식별되지 않는다. 이러한 현상은 출구부 조명을 효과적으로 설치 하므로써 개선되어 질 수 있다. (효과적 출구부 조명 설치방안은 다음에 다시 논하기로 한다)

하루중의 어느 기간 중에 특별한 조건하에서 (터널 입 출구부 방향 등) 태양광이 터널 출구에 직접 도달하여 최악의 운전자 시환경을 조성할 수도 있다.

이러한 경우에 광택면 처리된 벽체와 광택 페인트가 조합하여 거울반사 효과를 유발하면 엄청난 상호반사가 발생되어 운전자가 터널의 윤곽을 분명히 파악하는 것을 방해할 수 있다. 뿐만 아니라 운전자는 불쾌감과 눈부심을 경험하게 될 것이다. 이러한 조건에서 장애물을 “실루엣”에 의해 구분하기는 어렵게 되고 위험한 교통상황이 발생될 것이다. 심지어 ” Sun Screen (조도순응시설)” 도 그러한 상황에 대한 대처방안이 될 수 없을 것이다. 즉 터널 입 출구부의 방향 결정이 얼마나 중요한지를 나타내는 것이며 이러한 경우에는 반사율을 떨어뜨리는 마감재를 선정하여 처리하는 것이 효과적이다.

다. 입구부 조명

도로터널조명에서 가장 심각한 부분이 입구부이다. 그리고 입구부는 경계부와 이행부(Threshold and Transition Zones)로 구분된다. 각 국가별로 권장되는 경계부와 이행부에서의 조도 및 휘도 수준은 매우 다양하다. 그림 5, 그림6, 그림7, 그림8, 그림9는 이러한 다양한 여러 나라의 조도 및 휘도 기준을 나타내고 있다. 그림 10 에서는 이러한 다양한 기준을 비교 할 수 있게 하나로 묶어서 보여주고 있다.

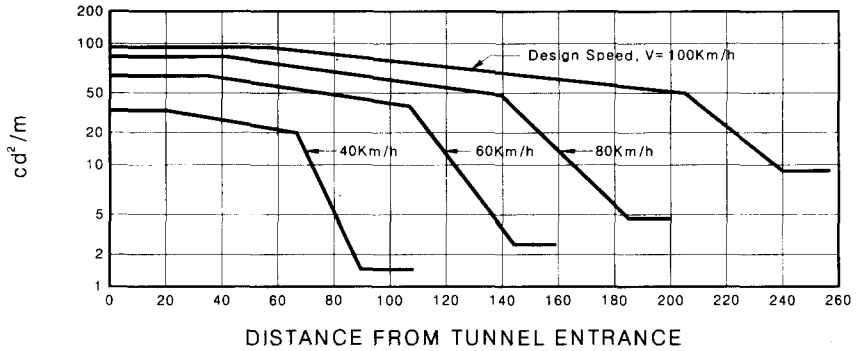


그림 7. 터널입구부 조명곡선 (일본)

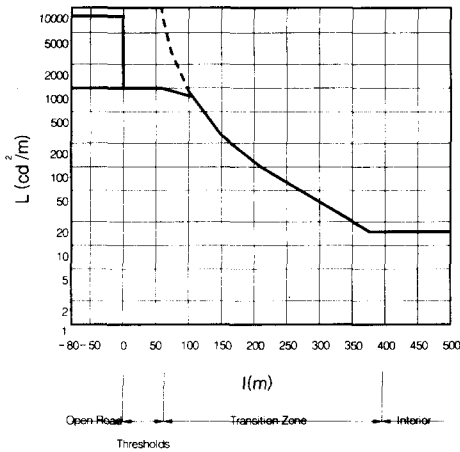


그림 8. CIE 권고 주간 터널 입구부 휘도 수준

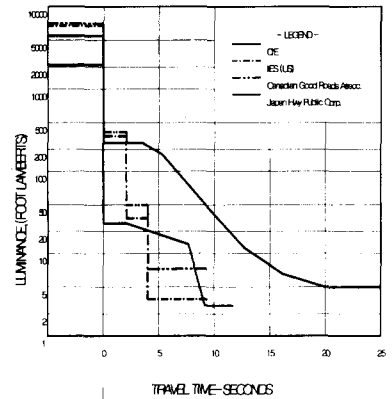


그림 9. 터널 입구부 권고 휘도 수준 비교도

재미있는 것은 일본을 제외하고 모든 나라에서 예상 최대 야외휘도와 도로터널의 초기부 휘도의 비가 일반적으로 유사하다는 것이다. 즉 무슨 이유에서인지 일본의 경우만 이 비례를 지키지 않고 있다. 이는 더 깊은 연구가 있어서 그랬던가 아니면 경제적 사정 때문일 것이다. 대부분의 나라에서 터널 초기부 휘도는 야외휘도의 1/10내지 1/8 범위 내에 있다. 이것은 터널 입구 바로 전단의 휘도 수준의 크기가 주간 동안의 운영에서 대략 200 fl 에서 350 fl 이어야 한다는 것을 의미한다. 이 수치를 MKS 단위계로 바꾸면 대략 967 cd/m^2 에서 1167 cd/m^2 의 범위가 된다. 이런 정도의 휘도 기준을 완전히 인공적으로 형

광램프로 인해 시설하기 위해서는 모든 벽체와 천장이 조명기구로 밝혀서 경제적으로 정당화 될 수 없을 것이다. 이것이 입구부 조명에 형광등 조명기구를 적용할 수 없는 분명한 근거가 된다. 현재 형광등 조명기구를 입구부 조명에 사용하고 있는 국내의 모든 터널은 하루 속히 방전등기구로 적절히 교체되어야 함을 의미한다. 그것은 곧 그러한 터널이 안전이 보장되지 않는 상태에 있다는 것을 의미한다. 반면에 고출력 방전램프를 사용할 경우 기구 수를 줄이면서 원하는 휘도나 조도를 달성할 수 있으나 눈부심과 성장신 반복성(Flicker) 때문에 곤란할 수가 있다.

인공조명으로 이러한 문제점을 개선하는 방안에

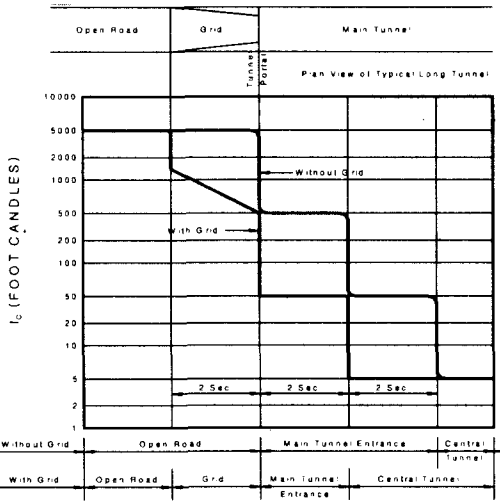


그림 10. 전형적 장경간 터널 주간 조도 분포

대해서는 다음에 논의하기로 하고 우선 선진국에서 이러한 경우를 개선하기 위해서 적용하고 있는 조도 순응구간을 우리 나라에서도 요즈음 근거 없이 그리고 과학적 계산의 배경 없이 부적절 하게 설치하고 있다.

최근의 미국과 유럽에서 터널 조명설계에서 터널 입구에 Grid 를 설치하여 인체시각의 순응을 돕기 위해 자연 주광을 적정량으로 차단하는 방법이 적용되고 있다. 태양 차광판에 대해서는 좀더 심도 있게 언급하겠지만 현재로서는 자연 주광의 감소를 위한 첫 번째 조치로서의 궁극적 해답이라고 증명되어 있지 않은 상태이다.

그림 9에 나타난 각국의 설계기준을 비교해 볼 때 또 하나 매우 중요한 입구부 조명에서의 차이점을 발견할 수 있다. 다시 말하면 야외도로 휘도에서 터널내부 휘도에 순응하는데 필요한 소요 경과시간에서 현저한 차이가 있다는 것이다

그림 2에서 우리는 운전자의 장애물 인지능력이 부정적인 잔상 (afterimage)의 방해를 피하기에 충분하다고 판단되는 부분적 순응을 위한 실험실에서의 연구결과에 기초한 국제조명위원회의 권고 휘도 분포 곡선을 볼 수 있다. 반면에 IES와 CGR (Canadian

Good Roads)의 권고는 야외도로 휘도 에서 터널 내부 휘도에 적응하는데 소요되는 시간을 4초면 충분하다고 주장하고 있다. 그러나 IES와 CGR의 권고에는 4초가 충분하다고 근거를 제시하지 못하고 있으며, 4초가 순응에 충분하다고 입증하기보다는 예외로 IES는 “최고 휘도 에서 최저 휘도 까지 진행하는데 운전자가 필요로 하는 시간은 4 초 이상이어야 한다” 라고 말하고 있다.

이러한 순응시간에 대한 차이에서 터널 조명설계자는 판단하기에 어려운 곤란함에 직면하게 된다. 그런 판단의 곤란 상황은 우리 나라의 설계기준 즉, 건설교통부와 한국도로공사에서 발간한 설계기준서와 한국산업규격에서도 마찬가지다. 아무런 근거 없이 제시된 속도별 각 구간별 거리는 터널 조명설계자가 검토, 분석, 개선할 여지가 없이 적용 할 수밖에 없는 수치를 제시하고 있다.

반면에 운전자의 입장에서 볼 때 가장 안전할 것이라고 생각되는 고전적 접근방법은 비용에서의 문제를 수반할 수도 있다고 대부분의 학자들은 생각하고 있다. 그러나 각 나라별 경제사정과 여건에 따라

경제성은 달리 판단되어지고 검토되어야 하며 터널의 입지에 따른 기후, 천후 조건에 따라 운용방안을 연구개선 할 때 그다지 큰비용의 증가 없이 최선의 안전 대책을 확보 할 수 있다고 생각한다.

4. 결 론

국내에서 한해에 발주되는 터널을 포함한 도로공사의 양이 적지 않고 이 분야에 종사하는 토목, 전기, 기계설비 분야 엔지니어링 전문회사가 다수이며 터널에서 소비하는 전력이 전국적으로 상당한 량에 이르고 있다. 또한 늘어나는 자동차 교통수요에 따라 운전자의 생명과 재산보호 측면에서도 이제는 선진국 수준의 터널설비를 갖추어야 할 시점에 왔다. 도로터널 조명설비는 조명설비 그 자체로서 시설되고 유지되기보다 계획단계에서부터 터널의 형상 구조,

길이, 위치, 마감 등 토목 관련분야와 환기시설유무, 자동제어의 수준 등 기계설비분야, 화재에 대한 대비 교통사고에 대한 대비 등 방재 설비분야, 그리고 운전자 편의시설 및 운영자 편의시설 등 정보통신 관련분야 등과 밀접한 관계를 가지고 있어 각 분야와의 Interface를 고려한 계획, 설계, 시설이 필요하다. 따라서 21세기의 시작점에 살고 있는 우리사회의 일반적인 화두인 통합의 관점에서 연구 개선할 점을 찾아 발전을 도모하여야 한다고 생각한다. 그러한 관점에서 세계 각국의 터널조명 관련기술을 조사 검토하여 우리가 발전적으로 채택하여야 할 부분을 검토 적용하기 위해서는 이 분야에 종사하는 많은 기술자들의 공동 노력이 절실한 시점이다. 이에 우선 터널 조명분야에 대해 현재 필자가 근무하고 있는 조직에서 추진중인 Project에 적용한 신개념 부분을 소개하였다.

참 고 문 헌

- [1] Michael A. Marszalowicz "Tunnel Lighting System"
- [2] Commission Internationale L'Eclairage(CIE).1973 "on International Recommendations for Tunnel Lighting"
- [3] 건설교통부, 한국조명·전기설비학회 "도로터널 조명시설의 설계기준"
- [4] John O. Bickel/T. R. Kuesel " Tunnel Engineering Handbook"
- [5] Mayer "Tunnel Vision Specification Data & Installation Instruction"
- [7] 지철근 " 최신 조명공학"
- [8] 일본 조명학회 " New Edition Lighting Data Book"
- [9] 한국도로공사 "고속도로 조명시설 개선방안에 관한 연구"

◇ 著 者 紹 介 ◇



신 용 주(申容周)

1954년 12월 13일 생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 건축전기설비 기술사. 1996년 한양대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 Project Management Professional (PMI, USA). 1980년~1994년 쌍용양회, 한진건설, 쌍용건설, (주)태영 근무. 1995년~1999년 한국고속철도건설공단 기술관리부장. 1999년~현재 (주)한신콘설탄트 근무. 2000년 청운대학교(충남 홍성) 건축환경설비학과 겸임교수.



이 진 규(李鎭奎)

1962년 3월 12일 생. 동서울대학교 전기공학과 재학. 1980년~1990년 (주)신우전기설계 근무. 1991년~현재 (주)한신콘설탄트 설계실장.