터널조명 설계에 대한 KSC 3703 활성화와 에너지 절감 방안 II

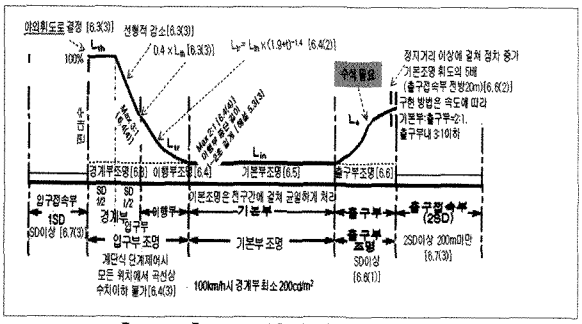
(KSC에 의한 전반적 적용/플리커(Flicker Range) 대책 및 기타 / KSA와 KSC의 차이점 비교/설계 적용)

글 _ 유 철 수 (No. 131590)
한빛디엔에스사 전무 / 협회 교육강사

◆ 9월호부터 연재된 내용입니다.

4. KSC에 의한 전반적 적용

위의 분석 내용 및 외국 설계 사례를 토대로 KSC의 내용을 KSC **그림 22**의 내용을 해당 문장을 삽입하여 이해를 돕고 KSC에 나타난 여러 가지 사항을 그림으로 정리하면 아래와 같다.

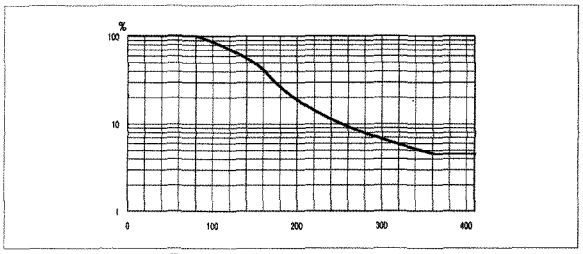


【그림 22】 KSC 적용한 각 부별 해당 사항

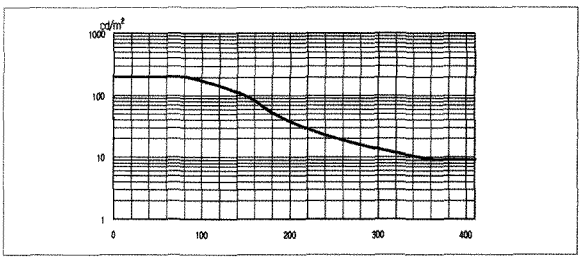
위와 KSC의 내용을 정리하여 아래와 같은 조건으로 설계를 하여 본다.

조건 :

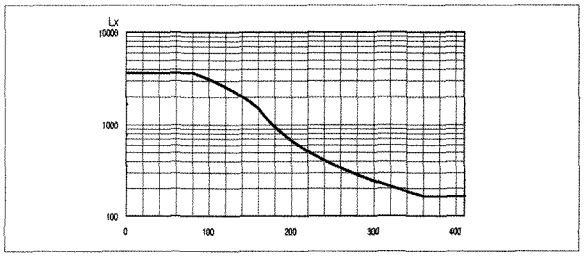
1. 터널 구조에 의한 물리적 조건 : 설계속도 100km/h, 터널 길이 1000m, 노면 재질 아스팔트
2. L_{20} 또는 다른 방법으로 계산 하여야 하나 여기선 계산하여 얻어진 결과에 따라 : 입구부 조명 200cd/m² (= 3600Lx)
3. KSC 표 4의 교통량에 따라 기본부 조명 9cd/m² (= 162Lx)
4. 적용 등기구의 조명률, Flicking Range (2.5~6.9m) 및 등기구 높이와 설치 간격(S≤2.5H)를 감안하여 기본 조명 구간길이는 7.5m로 계산되었다고 가정하였다.



【그림 23】 입구부를 %로 구현



【그림 24】 입구부를 cd/m²로 구현



【그림 25】 입구부를 Lux로 구현

위와 같이 KSC **그림 23** 구현은 휘도%, cd/m², Lx 등 마음대로 구현할 수 있다.

여기서는 KSC 내용대로 '휘도%' 로 구현하여 설계하여 보자.

중요한 것은 기본조명 구간에 의한 기초 구간 갯수별로 조명 구간 길이를 설정 기본 조명은 터널 입구부에서 출구부까지 모두 적용하는 일이다. 또 입구부의 SD 구간 (여기서는 160m) 및 이행부는 앞구간과 다음 구간의 상하단비가 3:1이하(KSC 6.4(4))가 되도록 조정하고, 이행부 끝구간과 기본부간은 2:1이하가 되도록 하며, 기본부의 조명 구간이 손상되지 않는 범위에서 1~2초 길이만큼 길게 (KSC 6.4(4) 및 해설 5.3(3)) 조정하여 구간수 및 구간길이를 정한다.

또한 단계별 조정도 3:1이하가 되도록 설정하여 5단계로 제어시 최종 단계가 기본 조명이 되도록 하려면, 기하급수 개념을 적용하면 아래 표와 같이 KSA처럼 100%, 75%, 50%, 25%, 4.5%가 아닌 100%, 46.1%, 21.2%, 9.8%, 4.5%가 된다.

따라서 단계별 해당 구간에 대한 값은 아래 표와 같이 마찬가지로 계산되며, 이는 L_{th}값과 L_{in}값이 설정되면 거기에 따라 기하급수 개념으로 적용하면 된다.

KSA의 경우 즉 JIS의 경우는 해설집에 5단계 제어시 100%, 75%, 50%, 25% 기본 조명으로 계산하도록 설명되어 있는 데, 이는 일본의 경우는 JIS보다는 일본도로협회에서 경계부의 휘도를 에너지 절약 차원에서 JIS계산량의 약 1/3을 적용하였기에 단순 등차 개념으로 적용토록 한 것으로 판단된다.

또 필요시 터널 입구부에 터널 내부로 향하는 보조 휘도계를 두어 외부에 설치한 휘도계와 조화를 이루도록 할 수 있다.

또한 지금까지는 입구부, 출구부에 설계자에 따라 조명제외 구간을 두는 경우가 있는 데 이는 터널 조명 설계의 취지와는 맞지 않으므로 적절치 못하다고 생각된다.

터널 출구부의 길이가 1SD이상으로 되어 있기 때문에 단계 제어시에는 이행부에서 기본부로 가는 마지막 단계는 2:1을 넘지 않도록 한 것(여기서는 1.7:1로 설정하였다)과 같은 개념으로 기본부에서 출구부로 넘어가는 것도 2:1로 하고 그 후 단계는 3:1이하로 하면 될 것이다.

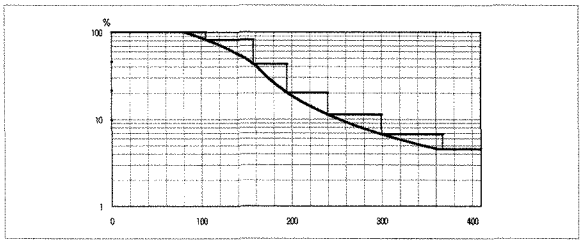
위의 내용을 종합하여 설계 기준을 구현해 보면 **그림 26~그림 34**와 같다.

【표 3】 계산을 위한 내용 정리

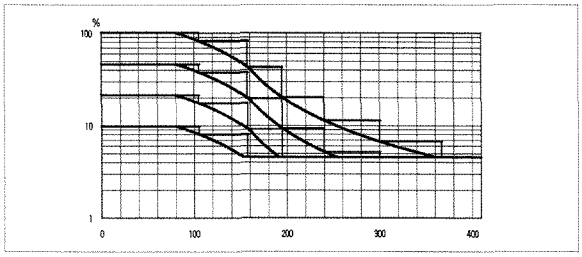
3:1이하가 되도록 길이 조정 / *기하급수 개념으로 계산 적용* / %로 표시

구간수	길이	누적길이	상하단비	1 단계	2 단계	3 단계	4 단계	5 단계
1	14	105	105		100.0%	46.1%	21.2%	9.8%	4.5%
2	7	52.5	157.5	1.23	81.5%	37.5%	17.3%	8.0%	4.5%
3	5	37.5	195	1.91	42.6%	19.6%	9.0%	4.5%	4.5%
4	6	45	240	2.13	20.0%	9.2%	4.5%	4.5%	4.5%
5	8	60	300	1.78	11.2%	5.2%	4.5%	4.5%	4.5%
6	9	67.5	367.5	1.69	6.6%	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%

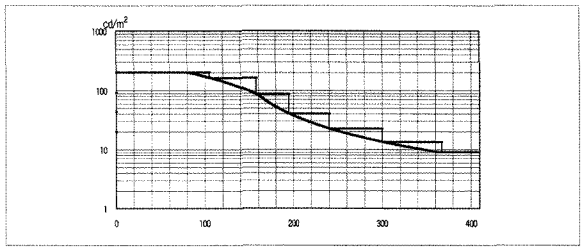
이행부 마지막 구간과 기본부간은 2:1이하가 되도록 조정하여야 함
여기서 1~2초간 길어도 좋다는 내용을 적용하려면
9 (67.5m) → 10 (75m)로 해도 좋겠다.



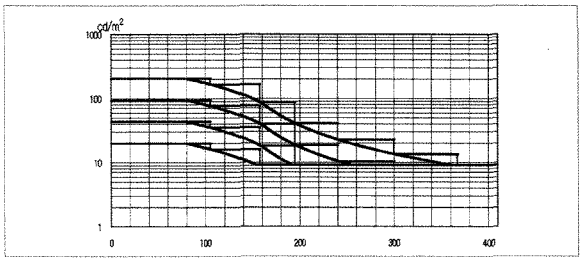
【그림 26】 휘도%에 의한 1단계 설계 기준 표현



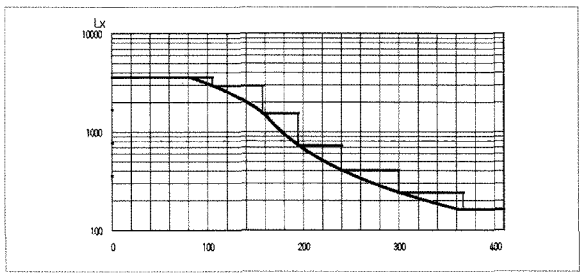
【그림 27】 휘도%에 의한 1 ~ 5단계 설계 기준 표현



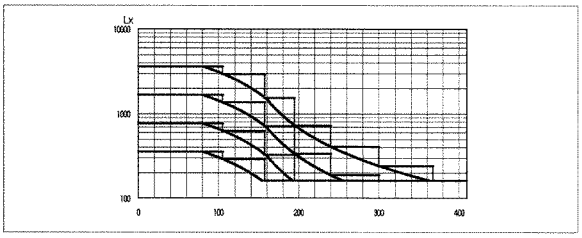
【그림 28】 휘도에 의한 1단계 설계기준 표현



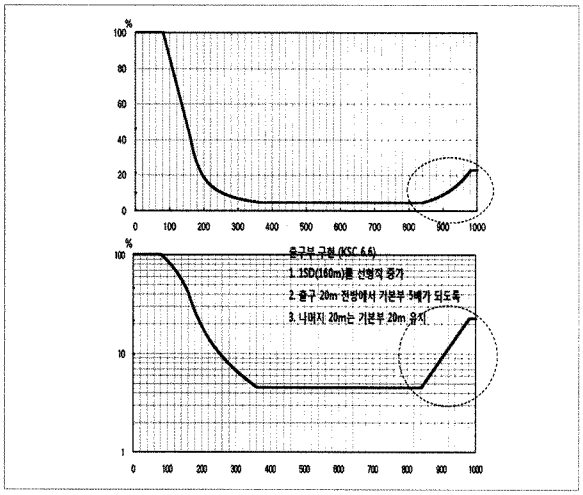
【그림 29】 휘도에 의한 1 ~ 5단계 설계 기준 표현



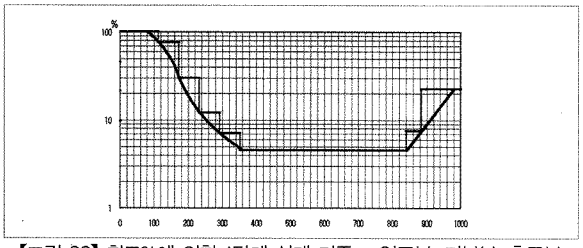
【그림 30】 조도에 의한 1단계 설계기준 표현



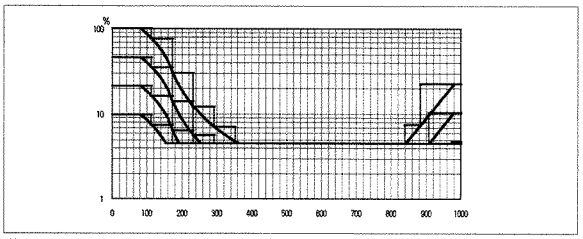
【그림 31】 조도에 의한 1 ~ 5단계 설계 기준 표현



【그림 32】 출구부 설계 기준 구현



【그림 33】 휘도%에 의한 1단계 설계 기준 – 입구부, 기본부, 출구부



【그림 34】 휘도%에 의한 1 ~ 5단계 설계 기준 – 입구부, 기본부, 출구부

5. 플리커(Flicker Range) 대책 및 기타

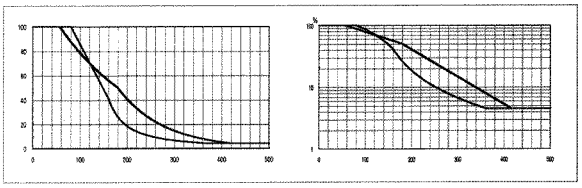
일반적으로 플리커 효과는 주파수가 2.5Hz 이하와 15Hz 이상에서는 무시할 수 있다. 4Hz~11Hz 사이에 있는 주파수가 20초 이상 지속되는 경우, 별개의 대책이 마련되어 있지 않으면, 불안감이 일어날 수 있다. 고압방전등과 같은 소형광원을 사용하는 경우 지속시간이 20초 이상인 설비 상태에서 4~11Hz 내의 주파수 범위는 피할 것을 권장한다. (KSC 6.12(2))

CIE의 경우 일광 차단막(Daylight Screen)을 입구부나 출구부에 설치한 경우는 차단막의 상부는 햇빛이 완전히 차단되지 않도록 할 것이며 $2 <= L_{th}/L_{seq} < 6$이 되도록 하되 되도록 높은 값이 되도록 설계, 설치할 것을 권장하고 있다. (CIE 6.4)

터널의 시작점 또는 터널의 출구 끝점을 차단막을 포함하여 계산하도록 권장하고 있다. (CIE 6.4)

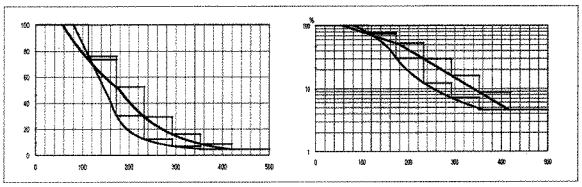
6. KSA와 KSC의 차이점 비교

입구부의 조명을 비교하기 위하여 KSA와 KSC를 위의 설계 조건에서 동시에 구현해 보면 **그림 35 ~ 그림 38**과 같다.



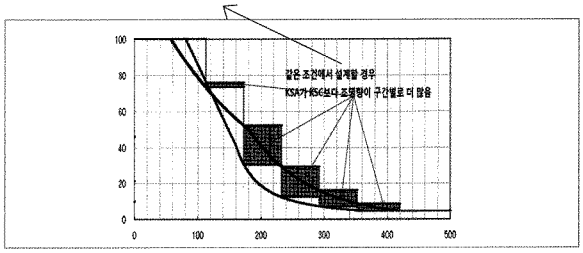
【그림 35】 KSA와 KSC 동시 구현 – 보통 눈금
【그림 36】 KSA와 KSC 동시 구현 – 편대수 눈금

이들을 1단계 제어만 조명량을 비교해 보면 아래와 같다. 입구부의 길이는 361.7m에 해당된다.



【그림 37】 KSA와 KSC 동시 구현 – 보통 눈금 – 1단계 설계 기준
【그림 38】 KSA와 KSC 동시 구현 – 편대수 눈금 – 1단계 설계 기준

아래와 같이 같은 경계부 휘도에 대해 1단계 조명 설계의 휘도량을 비교해 보면 KSC의 경우가 에너지 절약면에서 훨씬 유리하다. 여기서 유의할 것은 그림 36의 상태 즉 편대수 눈금으로의 그래프에서는 면적 대비가 쉽지 않다는 것을 알아야 한다.



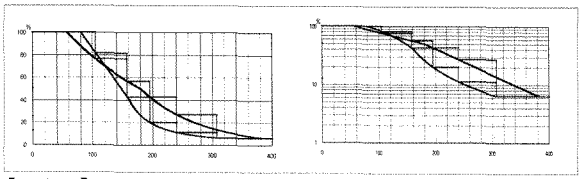
【그림 39】 KSA와 KSC 동시 구현 – 보통 눈금 – 1단계 설계 기준

또 국내에서 KSA 규격 사용했을 많이 사용한 140cd/m²으로 하고 기본 조명은 똑같이 9cd/m²으로 1단계 제어만 같은 방법으로 비교해 보면 이 때는 입구부 길이는 304.4m에 해당된다.

【표 4】 계산을 위한 내용 정리

%로 표시

	구간수	길이	누적길이	상하단비	1 단계	2 단계	3 단계	4 단계	5 단계
1	14	105	105		100.0%	50.4%	25.4%	12.8%	6.4%
2	7	52.5	157.5	1.23	81.5%	41.0%	20.7%	10.4%	6.4%
3	5	37.5	195	1.91	42.6%	21.4%	10.8%	6.4%	6.4%
4	6	45	240	2.13	20.0%	10.1%	6.4%	6.4%	6.4%
5	9	67.5	307.5	1.78	11.2%	6.4%	6.4%	6.4%	6.4%



【그림 40】 KSA와 KSC 동시 구현 140cd/m², 9cd/m² – 보통 눈금 – 1단계 설계 기준

【그림 41】 KSA와 KSC 동시 구현 140cd/m², 9cd/m² – 편대수 눈금 – 1단계 설계 기준

위 두 경우에 대하여 각각의 면적을 비교해 보면 다음과 같다.

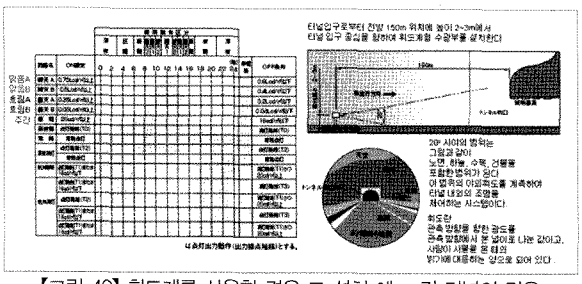
【표 5】 KSA와 KSC 조명량 비교

200cd/m², 9cd/m²			140cd/m², 9cd/m²		
KSC 휘도%	길이 (m)	KSA 휘도%	KSC 휘도%	길이 (m)	KSA 휘도%
100	105	100	100	105	100
81.5	52.5	76.3	81.5	52.5	76.3
42.6	37.5	56.7	42.6	37.5	56.7
20	45	42.9	20	45	42.9
11.2	60	27.1	11.2	67.5	27.1
6.6	67.5	14.7			
36,788	367.5	42,362	25,245	307.5	28,548

여기에서

1. 경계부 휘도 200cd/m²일 때 KSC / KSA = 36788/42362 = 86.3%
2. 경계부 휘도 140cd/m²일 때 KSC / KSA =25245/28548 = 88.4%

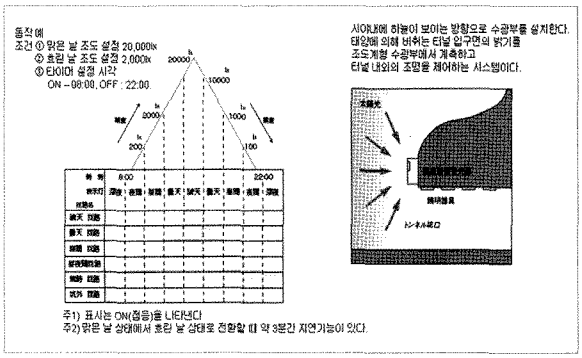
위의 1, 2의 경우와 같이 KSC에 의한 터널 조명 설계가 에너지 절약면에서도 유리함을 알 수 있다.



【그림 42】 휘도계를 사용한 경우 그 설치 예 – 긴 터널의 경우

또 조도계와 휘도계의 설치 위치와 그 제어 예를 일본의 자료에서 입수된 내용을 원어로 싣는다.

긴 터널의 경우는 휘도계로 주간 5단계 제어를, 짧은 터널의 경우는 조도계로 3단계 제어를 하고 있음도 참고가 될 것이다.



【그림 43】 휘도계를 사용한 경우 그 설치 예 – 짧은 터널의 경우

7. 설계 적용

위와 같이 입구부 휘도를 결정하여 설계 속도에 따른 곡선 구현과 설계 기준이 완성되었다면 이제부터는 사용하려는 등기구의 종류 및 설치 위치를 정하여 해당 등기구별 설치 위치에 따른 조명률을 계산하여 시행착오법(Try and Error)을 구현하면 된다.

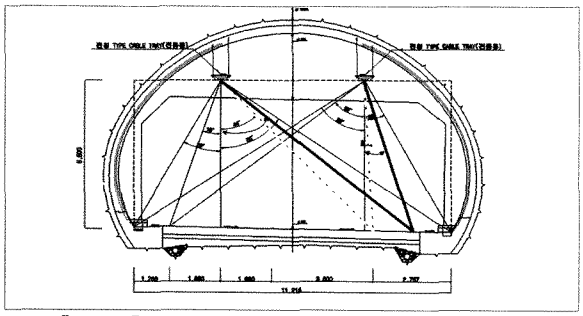
여기에는 기술적으로 반복적으로 시행하여 최적의 해법을 찾아야 하므로 시간이 많이 걸린다. 이를 구현하기 위하여 필자는 시행착오법을 시간을 최소화할 수 있는 방법으로 구현한 것이 있다.

이를 이용하면 약 70%의 시행 착오가 줄어든다고 확신한다. 다음 표에 터널 조명 설계를 하기 위하여 필요한 사항들을 정리하여 설계자가 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.

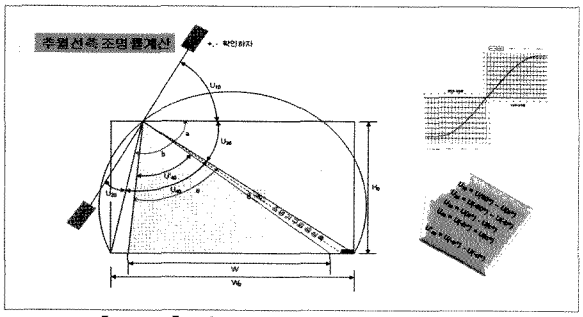
【표 6】 터널 조명 설계에 필요한 사항 정리

▶ 야외휘도 또는 하늘 비율 계산 – 3가지 방법 중	토목 도면 입수하여 조명 설계자가 실시
▶ 교통량 (통행량) – 시간대별	터널 설계 기초 자료에서 확보
▶ 설계 속도	
▶ 터널 형상 도면 (입출구 및 내부)	
▶ 터널 입구부 경사도 (2° 이하 또는 2° 이상) _ 보수율	
▶ 터널 벽면 타일 설치도 (벽면 반사율 계산)	
▶ 적용 등기구 조명률 각도별(0.5° or 1° 간격) DATA	등기구 업체로부터 자료 입수
▶ 등기구 설치 위치 결정 (설치 위치에 따른 조명률 계산)	토목과 협의하여 조명 설계자가 실시
▶ 휘도계 또는 조도계 설치 위치	지점을 관련 토목과 협의하여 조명 설계자가 결정
▶ 적용 휘도 제어정치 또는 조도 제어정치 사양 (주간 5단계 및 Timer (야간, 심야, 비상) 제어 가능 확인)	조명 설계자가 확인

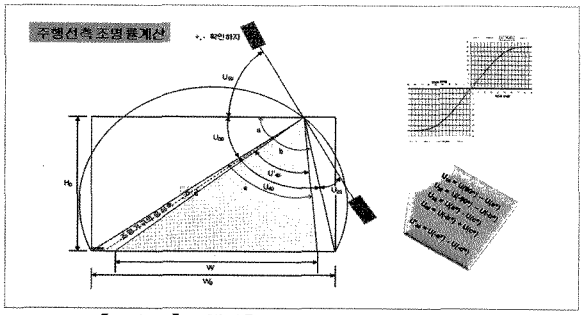
조명률 계산 방법 예시 2열 배열인 경우 주행선측과 추월선측 각각에 대하여 적용 등기구의 직사 조명률에서 계산하는 과정을 보인다.



【그림 44】 터널 형상과 등기구 설치 위치, 설치 각도 표현



【그림 45】 추월선측 차로폭에 대한 조명률 계산



【그림 46】 주행선측 차로폭에 대한 조명률 계산

각 단계별 구간 조명(광속법)을 계산하기 위한 기본 계산식을 필요에 따라 아래와 같이 변형하여 적용하면 쉽게 구현될 것이다.

【표 7】 광속법을 경우에 따라 변형하여 이용

동일 종기구만으로 배열시 (실내조명)	$\frac{F}{S}=\frac{W\cdot E}{N\cdot U\cdot M}=\frac{W\cdot k\cdot L}{N\cdot U\cdot M}$	$\frac{N\cdot F}{S}=\frac{W\cdot E}{U\cdot M}=\frac{W\cdot k\cdot L}{U\cdot M}=\frac{L}{U}\times\frac{k\cdot W}{M}$
수식 변형(변수와 상수)	$N\cdot F=\frac{L}{U}\times\frac{k\cdot W\cdot S}{M}$	$N_i\cdot F_i=\frac{L_k}{U_i}\times\frac{k\cdot W\cdot S}{M}$ 변수계산 도입
수식 변형(변수항, 상수항)	$\frac{N\cdot F\cdot U}{L}=\frac{k\cdot W\cdot S}{M}=$ (일정)	$\sum_i\frac{N_i\cdot F_i\cdot U_i}{L_k}=\frac{k\cdot W\cdot S}{M}=$ (일정)
여러 종류 등기구 배열시	$\sum_i\frac{N_i\cdot F_i\cdot U_i}{L_k}=\frac{k\cdot W\cdot S}{M}=$ (일정)	$\sum_j\sum_i\frac{N_{ij}\cdot F_{ij}\cdot U_{ij}}{L_k}=\frac{k\cdot W\cdot S}{M}=$ (일정)

기타 교통량의 많고 적음, 터널 길이에 따른 계산된 입구부 휘도 적용 비율, 하늘이 보이는 면적과 터널 방위에 따른 입구부 휘도, 설계 속도에 따른 기본부 휘도 등 KSC에 나타난 내용들을 정리하였다. ❖

【표 8】 경계부 노면 휘도 조절 계수

표 2 주기사항 (교통량 : 단위 [차량대수/시간/차로])

통행	적음	보통	많음
일방통행	T ≤ 300	300 < T < 1000	T ≥ 1000
양방통행	T ≤ 100	100 < T < 300	T ≥ 300

표 2 경계부 노면 휘도에 대한 조절계수

터널길이 (L)	교통량[1]	출구부 보임 (기준점으로부터)				출구부 안보임 (기준점으로부터)			
		주광 입사				주광 입사			
		평균		나쁨		평균		나쁨	
		벽면 반사율				벽면 반사율			
		30%초과	30%이하	30%초과	30%이하	30%초과	30%이하	30%초과	30%이하
L < 50m	전부	0%				0%			
50m ≤ L <100m	적음	0%	0%	0%	0%	0%	50%	50%	50%
	보통	25%	25%	25%	25%	25%	50%	50%	50%
	많음	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
100m ≤ L < 200m	적음	50%	50%	50%	50%	50%	100%	100%	100%
	보통	75%	75%	75%	75%	75%	100%	100%	100%
	많음	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
L ≥ 200m	전부	100%				100%			

(주경계부 조명 필요 없음) (주경계부 조명 필요 없음)

주) (1) 교통량 : 단위 [차량대수/시간/차로]
① 일방통행 : 많음(1,000 이상), 보통(1,000 미만~300 초과), 적음(300 이하)
② 양방통행 : 많음(300 이상), 보통(300 미만~100 초과), 적음(100 이하)

【표 9】 터널 방위와 주변 반사에 따른 L_{th}

표 3 주간의 자동차 터널도로의 경계부 평균 노면 휘도 L_{th} [cd/m²]

	20° 원추형 시야 내의 경계부 평균 노면 휘도 L_{th} [cd/m²]											
	R_{sky} > 20%				10% < R_{sky} ≤ 20%				5% < R_{sky} ≤ 10%		R_{sky} ≤ 5%	
	터널 방위[1],[2]								주변 반사[3]			
설계속도	동향	서향	남향	북향	동향	서향	남향	북향	보통	높음	보통	높음
60 km/h	225	225	200	250	175	175	150	200	125	175	75	150
80 km/h	310	310	260	360	250	250	200	300	180	270	150	240
100 km/h	425	425	370	480	340	340	280	400	240	360	200	320

주) (1) 터널 입구의 방위(남향 : 남쪽 입구, 복향 : 북쪽 입구)
(2) 터널 입구의 방위가 동·서쪽의 경우 노면 휘도는 남향과 북향의 중간치를 선택한다.
(3) 터널 입구 주변의 반사에 따르는 영향
① 높음 : 터널 입구 부근의 지물이 흰색, 회색 등의 반사율이 높을 경우를 말하며, 입구 부근에 장기간 적설상태가 계속되는 경우도 여기에 포함된다.
② 보통 : 상기 이외의 경우를 말한다.

【표 10】 설계 속도에 따른 기본부 노면 휘도

표 4 주간의 자동차 터널도로의 기본부 평균 노면 휘도 L_{th} [cd/m²]

설계속도	터널의 교통량		
	적음	보통	많음
60 km/h	3	4.5	6
80 km/h	5	6.5	8
100 km/h	7	9	11

마침 ❖

참고문헌

가. 한국산업규격, 터널 조명기준 KSA3703 (1992)
나. 도로안전관리시설 설치 및 관리지침(건설교통부 1999)
다. 도로설계편람(1999. 12)
라. 조명설비 설치 기준(한국도로공사 2000)
마. 전기실무 지침서(한국도로공사 시설처 2002. 10)
바. 도로터널 조명시설의 설계기준(건설교통부,한국조명전기설비학회1996)
사. 道路照明施設 設置基準 · 同解說(日本道路協會) 昭和 56 (1981)
아. 日本工業規格, トンネル照明基準 JISZ9116 (1990)
자. CIE, Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses, Pub No.88-1990(ISBN 3900734259), 1990
차. 한국산업규격, 터널 조명기준 KSC 3703 (2010)
카. 한국도로공사 전기실무지침서(2008)
타. CIE 88 : 2004