

## 터널용 고효율 조명기구 반사판의 개발

(The Development of a High Efficiency Luminaires Reflector for Tunnel Lighting)

김기훈·황재산·윤미림·김훈

(Gi-Hoon Kim · Jae-San Hwang · Mee-Rim Yun · Hoon Kim)

### 요 약

우리 나라의 터널 조명은 운전자의 시야상태를 저해하는 불균일한 조도 균제도, 터널 내의 플리커 현상, 심한 눈부심 등과 함께 낮은 기구효율, 낮은 조명률, 높은 에너지 소비 등의 문제점을 갖고 있다. 이러한 것들을 개선하기 위해서 터널용 고효율 조명기구의 반사판을 개발하였고, 개발된 조명기구는 기구 자체 효율이 10%이상 상승함으로써 에너지의 절감과 조명효과의 상승을 가져왔으며, 기구 대수의 저감으로 건축비를 축소시켰다. 또한 이것을 이용한 터널조명에서는 평균조도 200[lx]이상, 전반 균제도 0.4이상, 차선축 균제도 0.7이상, 단위 면적당 소비전력 3.7 [W/m<sup>2</sup>]이하의 효과를 얻었다.

### 1. 서 론

현대 사회가 고도의 산업화 및 물질 문명의 사회로 변화함에 따라 자동차에 의한 도로교통은 그 중요성을 더해가고 있으며, 이에 따른 도로망의 확충에 의해 교량, 터널 등의 수도 점차 늘어나고 있다[1]. 터널은 도로 조명과 마찬가지로 조명설비가 필수적이며, 교통사고율로 인한 인명의 피해가 세계 제 1위인 국내에서는 매우 중요하다고 할 것이다. 터널조명은 주간에 조명이 필요하다는 점과 주위가 측벽 등으로 제약되어 있으므로 주행 중 특별한 주의를 요하는 특수성을 가지고 있다. 그러므로 터널에 설치하는 조명시설은 교통량, 차량속도, 아외 휘도 및 선형 등에 의하여 적절한 조명설비를 하여 운전자의 시각장애를 줄이고, 또한 터널 내 도로의 형태를 운전자에게 가능한 한 확실히 파악시켜 효과적이고 원활한 교통운행에 기여하여야 한다. 뿐만 아니라 터널 조명은 교통 안전 시설의 하나로서 교통사고에 의한 인명과 재산의 피해를 감소시킬 수 있도록 하여야 한다.

터널조명의 목적은 이와 같이 주간과 야간에 걸쳐서 터널 내 도로에서 차량의 교통운행이 설계 주행속도로, 안락하고 안전하게 통과하기 위한 것이다[2]. 그러므로 터널조명에서 중점적으로 고려되어야 할 사항은 터널 내 운전환경과 주행하는 운전자의 시야상태 개선을 위해 필요한 조도 및 휘도의 확보가 대단히 중요하며[3], 이것을 만족시키기 위해서는 조명기구의 올바른 반사판의 형상설계가 반드시 필요하다. 그러나 기존의 터널조명은 고효율의 터널조명용 반사판의 형상 설계기술이 부족하여 불 균일한 조도 균제도, 터널 내의 플리커 현

상, 심한 눈부심 등으로 운전자의 시야상태를 저해할 뿐만 아니라 낮은 기구효율로 인한 낮은 조명률과 높은 에너지의 소비 등으로 적지 않은 문제점을 가지고 있다. 이에 따라서 본 논문에서는 터널용 조명시설에 적합하고 기존 터널조명에서의 문제점들을 해결하기 위한 반사판의 형상 설계기술을 적용하여 고효율, 고성능의 터널용 조명기구의 반사판을 개발하였다.

### 2. 터널 조명분석 및 요건설정

반사판 형상의 설계 절차는, 다음과 같이

- 1) 터널 및 기존 조명기구의 요건 설정
- 2) 조명기구 Cut-Off Angle 및 끝점의 좌표 결정
- 3) 목표 배광의 결정
- 4) 목표 배광을 만족하는 반사판 형상의 설계
- 5) 조명기구의 터널 설치 simulation 및 광학적 성능 평가
- 6) 실제 Sample 제작 및 광학적 성능 측정

의 순서로 한다.

#### 2.1 터널 조명의 요건선정

기존 터널조명의 문제점은 도로 길이 방향과 도로 폭 방향에 있어서의 균일하지 않은 조도 균제도와, 벽면의 플리커 현상, 심한 눈부심, 낮은 기구 효율과 낮은 조명률 그로 인한 높은 에너지의 소비 등을 들 수 있다. 그림 1은 기존 터널에 있어서 문제시 되고있는 벽면의 플리커 현상과 불 균일한 균제도를 나타내고 있다.

이것을 해결하기 위해서는 터널의 구조, 표면 반사율,

조명기구 틀의 형태와 크기, 설치 방법 등을 고려하여 터널 내 도로의 각 부분이 요구하는 조도와 휘도 균제도를 만족시킬 수 있도록 적절히 설계하여야 한다.



그림 1. 기존의 터널조명의 문제점  
Fig. 1. A Problem of Tunnel Lighting at Present

터널의 구조는 3차로의 경우만을 예를 들면, 그림 2와 같이 semi-circular 형으로서 차선 폭은 3.6[m], 갓길을 포함한 전체 도로 폭은 14.122[m], 터널의 높이는 8.4[m], 이고 조명기구의 설치높이는 6.5[m]이며, 설치방법은 2차로의 경우만을 벽부형으로 하고, 3, 4차로 및 2차로 확폭은 그림 5와 같은 천장형의 2열 배치로 하였다. 바닥에서 2m 높이까지의 벽면 휘도는 노면 휘도의 1.5배 이상이 되도록 하였고, 평균조도는 보수율을 감안하지 않고 설계 시공사의 효율저하를 고려하여 250[lx] 이상을 목표로 하였다, 평균 휘도는 2 [cd/m<sup>2</sup>] 이상[4], 전반 균제도와 차선축 균제도는 터널조명에 있어서 특별히 규정된 사항은 없으나 CIE 도로조명 기준의 권고 사항에 따라서 각각 0.4, 0.7 이상이 되도록 하였으며, 조명기구의 광학적 효율은 90[%] 이상이 되도록 터널조명의 요건을 설정하였다.

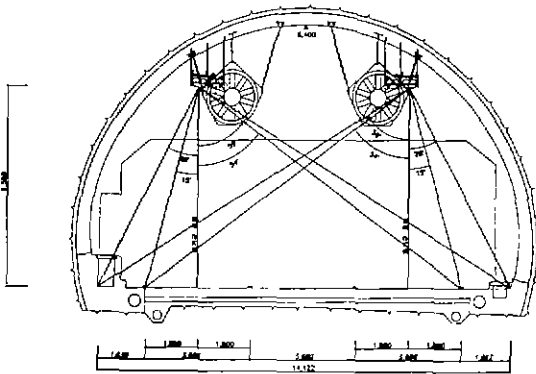


그림 2. 3차로 터널의 구조와 조명기구 취부 위치  
Fig. 2. Tunnel Construction for 3 Lane and Mounted Position of Luminaires

## 2.2 Cut-Off Angle의 결정

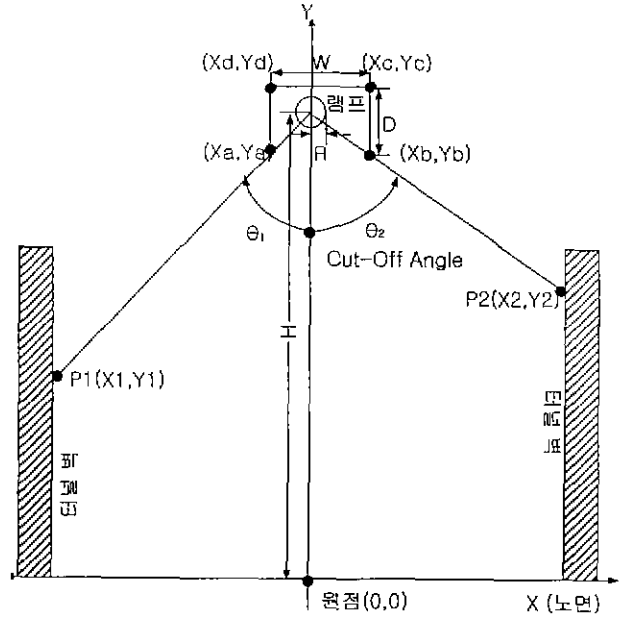


그림 3. Cut-Off Angle의 결정을 위한 좌표계  
Fig. 3. Coordinate System for Determination of Cut-Off Angle

그림 3은 조명기구의 Cut-Off Angle을 결정하기 위한 좌표계를 나타내고 있다. (Xa, Ya), (Xb, Yb), (Xc, Yc), (Xd, Yd)는 각각 조명기구 모서리 점의 좌표이고,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 가 각각 Cut-Off Angle을 의미한다. 이때 조명기구의 높이는 D, 조명기구의 폭은 W, 램프의 설치높이는 H, 램프의 반경은 R이다. 그리고  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 의 연장선이 좌 우측의 터널 벽과 만나는 점의 좌표를 각각 P1(X1, Y1), P2(X2, Y2)라고 하면,

$$X_c - X_a = W \quad (1)$$

$$Y_c - Y_a = D \quad (2)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{X_a}{H - Y_a} \quad (3)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{X_c}{H - Y_a} \quad (4)$$

이다. 그러므로 주어진 4개의 식으로부터 Cut-Off Angle  $\theta_1, \theta_2$ 와 조명기구 각 모서리의 끝점의 좌표값을 각각 알 수 있다.

즉

$$X_a = X_d = \frac{W}{\frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} - 1} \quad (5)$$

$$X_b = X_c = \frac{W}{1 - \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2}} \quad (6)$$

$$Y_a = Y_b = H - \frac{X_a}{\tan \theta_1} \quad (7)$$

$$Y_c = Y_d = Y_a + D \quad (8)$$

이 된다.

여기서  $|H - Y_a|$ 와  $|Y_c - H|$ 의 값은 램프 반경 R 보다는 커야만 한다.

### 3. 반사판 형상 설계

#### 3.1 목표 배광의 결정

주어진 조명기구의 4가지 끝점의 좌표와 Cut-off Angle이 설정되면 목표 배광을 결정한다. 목표 배광이란 설계하여야 할 반사판이 주어진 Cut-Off Angle의 범위 내에서 터널조명의 요건을 만족시키기 위해 빛을 보내야 하는 배광의 형태를 미리 결정하는 것을 말한다. 이것은 Cut-Off Angle의 범위 내에서 각각의 주어진 방향에 대하여 원하는 조도를 입력하였을 때 거리의 역제곱 법칙에 의해서 광도를 계산하는 것으로 목표 배광을 결정할 수 있다. 그림 4는 이와 같은 목표 배광의 계산과정을 워크시트로 프로그래밍 하여 얻은 3차로용 터널에 대한 목표 배광 곡선도 이다.

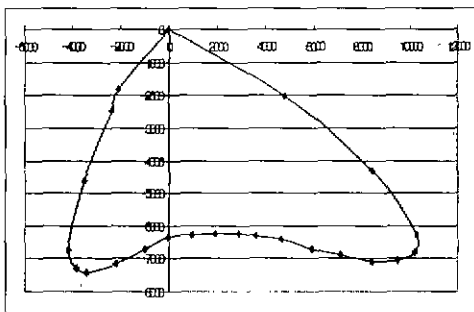


그림 4. 3차로용 터널의 목표 배광 곡선  
Fig. 4. An Intentional Lighting Distribution Curve of 3 Lane Tunnel

#### 3.2 반사판 형상의 설계

반사판 형상은 이와 같이 결정된 목표 배광을 만족시킬 수 있도록 설계되어야 한다. 반사판의 형상 설계법은 근접 작업용 반사판 설계법과 원격 작업용 반사판 설계법 두 가지가 있으며, 터널조명 설계는 후자에 속하므로 원격 작업용 반사판 설계법[5]으로 행한다.

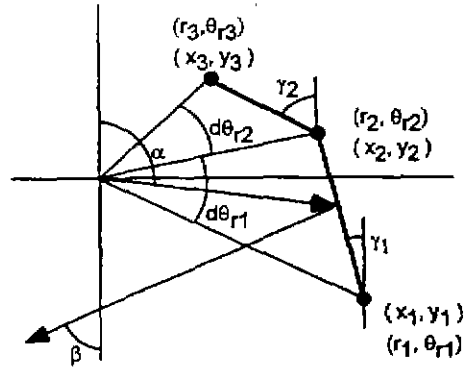


그림 5. 반사판의 기울기 및 좌표 결정  
Fig. 5. Slope of Reflectors and determination of Coordinate

반사판의 기울기 및 좌표를 구하는 방법은 그림 5에서와 같이 반사빔이 정해진 반사판의 변화각  $d\theta_{r1}$ 의 중심에서 원하는 목표 배광의 방향  $\theta_1$ 로 향하도록 하면,

$$\gamma_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta_{r2} + \frac{d\theta_{r1}}{2} \quad (10)$$

$$\beta = \theta_1 \quad (11)$$

$$\tan \gamma_1 = \frac{r_1 \cos \theta_{r1} - r_2 \cos \theta_{r2}}{-r_1 \sin \theta_{r1} + r_2 \sin \theta_{r2}} \quad (12)$$

따라서,

$$r_2 = r_1 \cdot \frac{\cos \theta_{r1} + \tan \gamma_1 \cdot \sin \theta_{r1}}{\cos \theta_{r2} + \tan \gamma_1 \cdot \sin \theta_{r2}} \quad (13)$$

그러므로

$$\begin{aligned} x_2 &= r_2 \cos \theta_{r2} \\ y_2 &= r_2 \sin \theta_{r2} \end{aligned} \quad (14)$$

가 된다.

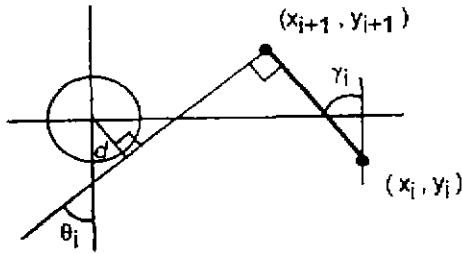


그림 6. 반사빔과 광원의 마주침  
Fig. 6. Encountering Reflected Beam with Source

위의 과정을 통하여 구한 좌표에서 반사빔 기울기에 수직인 직선이 광원과 만나는 가를 확인하고 그림 6과 같이 광원의 중심에서 반사빔에 직각인 직선에 수선을 그어 이의 거리  $d$ 가 광원의 반경보다 작으면 안 된다.

$$d = (x_{i+1} - y_{i+1} \cdot \tan \theta_i) \times \cos \theta_i \quad (15)$$

여기서  $d$ 가 램프 반경보다 크면 반사빔이 광원으로 되돌아가지 않으므로 좌표  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ 는 허용이 되나 램프 반경보다 작으면 다음의 과정을 통하여 새로운 좌표를 결정한다.

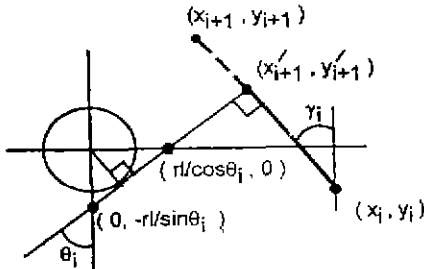


그림 7. 새로운 반사빔 좌표의 결정  
Fig. 7. New Determination of Reflector Coordinate

반사빔이 광원과 만나게 되면 반사빔 기울기에 수직인 선을 광원과 접하도록 하여 그때 반사빔과의 교점  $(x'_{i+1}, y'_{i+1})$ 을 새로운 좌표로 결정한다. 그 값은 그림 7에서 보는 바와 같이 다음과 같다

$$x'_{i+1} = \frac{\left( \frac{y_i x_{i+1} - y_{i+1} x_i}{x_{i+1} - x_i} + \frac{r}{\sin \theta_i} \right)}{\left( \frac{1}{\tan \theta_i} - \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right)} \quad (10)$$

$$y'_{i+1} = \frac{x'_{i+1}}{\tan \theta_i} - \frac{r}{\sin \theta_i} \quad (11)$$

위와 같은 과정을 반복하여 주어진 목표 배광을 만족시키는 터널용 반사판의 좌표를 구하고 그것에 따라 반사판 형상을 설계하였다.

그림 8과 9는 반사판 형상을 설계한 것 중 4차로의 형광등용 반사판의 좌표와 형상을 나타내고 있고 그림 10과 11은 3차로의 HPS용 반사판의 좌표와 형상을 보여준다.

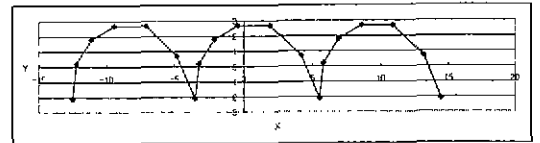


그림 8. 4차로 터널용 형광등기구 반사판의 좌표  
Fig. 8. Coordinate of Reflector for Fluorescent Luminaires of 4 Lane Tunnel

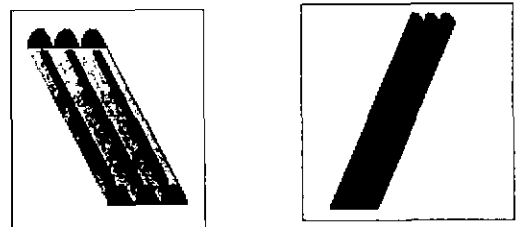


그림 9. 4차로 터널용 형광등기구 반사판의 형상  
Fig. 9. Shape of Reflector for Fluorescent Luminaires of 4 Lane Tunnel

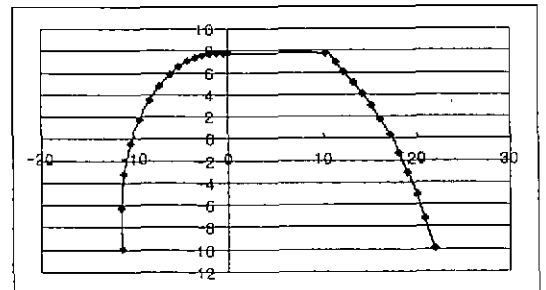


그림 10. 3차로 터널용 HPS 조명기구 반사판의 좌표  
Fig. 10. Coordinate of Reflector for HPS Luminaires of 3 Lane Tunnel

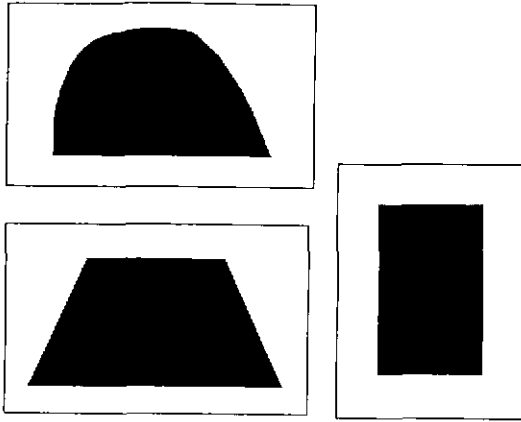


그림 11. 3차로 터널용 HPS 조명기구 반사판의 형상  
Fig. 11. Shape of Reflector for HPS  
Luminaires of 3 Lane Tunnel

### 3.3 터널 설치 simulation 및 광학 성능 예측

설계한 반사판의 형상을 가지고 Photopia, Tunnel-Lite, Lightscape 등의 조명관련 소프트웨어로 시뮬레이션 하여 설계한 반사판의 광학 성능을 예측한다. 시뮬레이션 한 결과 값이 반사판의 효율이나, 평균조도, 균제도에 있어서 최초에 설정한 요건을 만족시키지 못하는 경우에는 설계한 반사판의 형상을 다시 수정 보완하여야 한다. 그림 12와 13은 Photopia를 이용하여 시뮬레이션 한 결과로서, 3차로의 형광등기구용과 HPS용으로 설계한 반사판의 실제 배광곡선을 나타내고 있다. 또한 반사판의 광학적 효율은 모두 90%이상의 좋은 결과를 가져 왔으며, Tunnel-Lite를 이용한 터널 내 평균 조도와 균제도 값은 최초의 설정한 요건들을 모두 만족시켰다

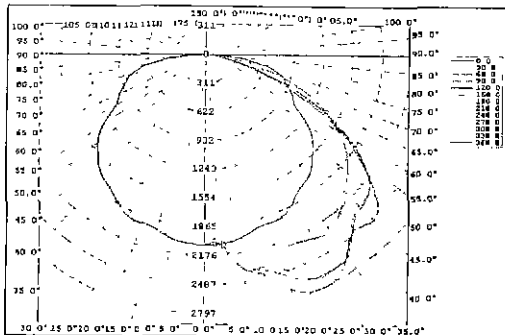


그림 12 3차로 형광등용 반사판의 실제 배광곡선  
Fig. 12. Real Lighting Distribution Curve  
of Reflector for Fluorescent of 3 Lane  
Tunnel

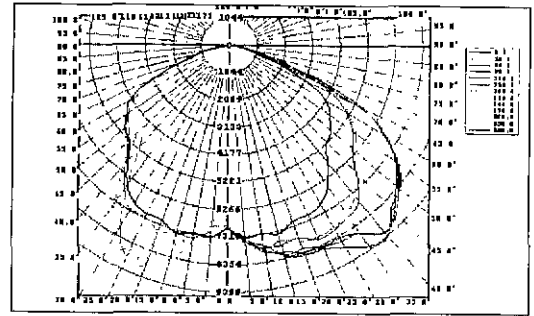


그림 13 3차로 HPS용 반사판의 실제 배광곡선  
Fig. 13. Real Lighting Distribution Curve  
of Reflector for HPS of 3 Lane Tunnel

그림 12와 13을 보면 그림 4에서의 목표 배광 곡선과 그 형태가 거의 일치함을 보여주고 있다.

그림 14는 개발한 반사판을 Lightscape를 사용하여 가상 터널에 설치하고 터널 내 조명 상황을 시뮬레이션 한 것이다. 터널조명의 문제점을 나타내는 그림 1과 비교하면 플리커 현상이 제거되었고, 균제도가 매우 좋아졌음을 알 수 있다.

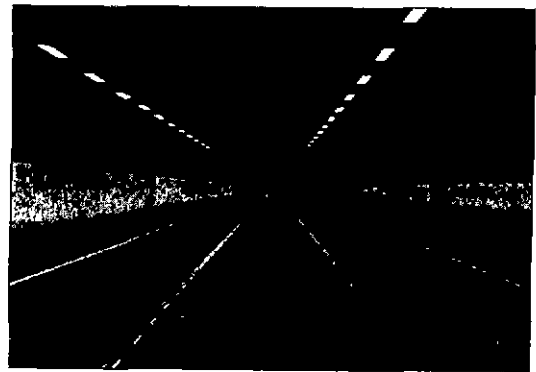


그림 14. Lightscape로 렌더링 한 형광등기구용 반사판의 터널 조명 상황  
Fig. 14. Situation of Tunnel Lighting Rendering  
with Lightscape for Fluorescent  
Reflector

### 3.4 Sample 제작 및 광학 성능 측정

이와 같은 과정으로 개발한 반사판 형상을 실제 샘플로 제작하여 광학 성능을 측정하여 보면, 설계한 반사판 보다는 그 성능이 균제도나 평균조도 값에서 조금 떨어지긴 하였으나 처음에 선정된 요건들은 모두 만족시켰다.

#### 4. 결 론

터널 조명용 반사판 형상의 개발로 기존의 터널조명이 갖고 있던 불 균일한 조도 균제도, 터널 내의 플리커 현상, 심한 눈부심, 낮은 기구효율로 인한 낮은 조명률, 높은 에너지의 소비 등과 같은 문제점들을 어느 정도 해결하였고, 기구자체 효율이 10%이상 상승함으로써 에너지 절감과 조명효과의 상승을 가져왔으며, 뿐만 아니라 기구대수의 저감으로 건축비를 축소시킬 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 강래철, "휘도 측정에 의한 터널 조명 실태조사와 개선방안" 강원대학교, p1, 1994, 2
- [2] 지철근, 이진우, "고속도로 터널조명 시설", 조명전기설비학회지, vol.12, No.1, p.28~p.29, 1998, 3.
- [3] 도로터널 조명시설 설계기준 연구, 한국건설기술원, 1995
- [4] 정인식, "도로 터널의 조명 설비에 관한 검토와 개선 방안", p27~p29, 1996, 8
- [5] WILLIAM B. ELMER, "The Optical Design of Reflectors", TLA Lighting Consultants, Inc, Salem, p.54~p75, 1989.