

# 퍼지추론을 적용한 터널 조명제어시스템

## Tunnel Lighting Control System using Fuzzy Reasoning

이 정 은\* · 최 흥 규†  
 (Jung-Eun Lee · Hong-Kyoo Choi)

**Abstract** - Tunnel lighting is composed of entrance zone, interior zone and exit zone by KS C 3703. We have to consider adaptation at entrance zone and exit zone lighting to prevent deteriorate visibility like black hole and white hole phenomenon. So External luminance, vehicle velocity and traffic volume should be considered in threshold zone lighting and vehicle speed and traffic volume should be considered in interior zone lighting. But existing tunnel lighting system is not good at visibility and economic because that is only controlled by external luminance. So in this paper, We improve visibility and economic of tunnel lighting system using fuzzy reasoning according to external luminance, vehicle velocity, traffic volume.

**Key Words** : Tunnel light, Threshold zone, Fuzzy logic control system

### 1. 서 론

터널설비에서 조명은 안전시설 중 가장 기본적인면서 중요한 설비로 터널에 진입하고 통과하는 운전자에게 안전하고 쾌적한 운전환경을 확보해 주는데 목적이 있다[1][2]. 터널은 밝기가 급변하는 장소로 터널 진출입시 시각적인 환경 변화에 의해 블랙홀 및 화이트홀 현상이 발생하고, 이는 운전자의 시인성 감소를 가져오게 된다. 이러한 시인성의 감소는 터널의 지형학적인 배치, 태양의 움직임 및 기후변화에 따른 야외휘도의 변화, 차량 속도, 교통량 등의 요인에 의하여 결정된다[3].

이를 위해 한국산업규격 『KS C 3703 터널조명기준』에서는 터널에서 요구되는 조명환경을 입구부, 기본부, 출구부로 구분하여 운전자가 자연스럽게 터널 밖의 휘도와 터널 내의 휘도에 적응하도록 규정하고 있다[4]. 하지만 이는 초기 설계조건에 대해 조명기준표로 규정되어 있으므로 현장의 변화에 대해 정확성이 많이 떨어지는 실정이다.

현재 터널에 설치된 조명시스템의 경우 야외휘도에 의해 단계별로 제어가 이루어지고 있는 곳도 있지만 위에서 언급한 요인들을 적용하여 터널 내부의 조명을 제어하는 것이 안전성과 에너지 절감을 위하여 더 효과적인 설비라 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 퍼지추론을 적용하여 터널 야외 휘도, 차량 속도, 교통량의 변화에 따라 터널 내부의 밝기를 조정하는 터널 조명시스템 제어 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였으며 단계적 제어방식과 비교·분석하였다.

### 2. 터널조명기준

터널 내에 설치하는 조명은 일반적으로 그림 1과 같이 입구부 조명, 기본부 조명, 출구부 조명으로 구성된다[4].

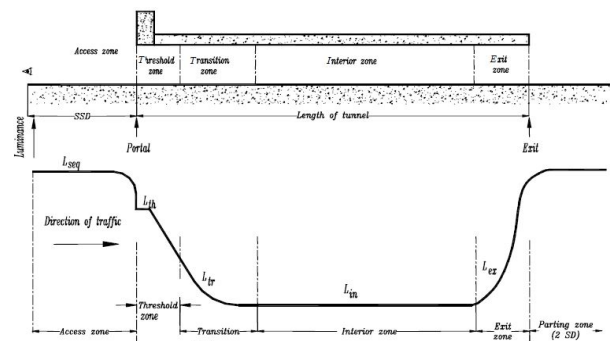


그림 1 터널 조명의 구성(일방 교통 터널의 세로 단면도)  
 Fig. 1 The configuration of tunnel lighting(Typical longitudinal section of a one way tunnel)

1) 입구부 조명 : 주간에 터널 입구부근에서의 시각적 문제를 해결함을 목적으로 기본 조명에 부가하여 설치하는 조명으로 경계부(Threshold zone)와 이행부(Transition zone)로 구성된다.

2) 기본부 조명(Interior zone) : 주야간에 터널 내에서의 운전자의 시각 인지성을 확보하기 위해 터널 전체길이에 걸쳐서 거의 균일한 휘도를 확보하는 조명을 말한다.

3) 출구부 조명(Exit zone) : 주간에 터널 출구를 통해 보이는 야외의 높은 휘도의 눈부심에 의하여 일어나는 시각적 문제를 해결하기 위하여 기본조명에 부가하여 설치하는 조명을 말한다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Hong-ik University, Korea  
 E-mail : hkchoi@hongik.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Hong-ik University, Korea  
 Received : June 30 2014; Accepted : July 14, 2014

2.1 터널의 경계부 휘도 기준

2.2.1 국내 기준(KS C 3703)

한국산업표준(KS C 3703 : 2010)에서는 설계속도와 20° 원추형 시야 내의 하늘 비율, 주변반사 등을 고려하여 경계부 평균휘도  $L_{th}$ 를 선정할 수 있도록 표 1과 같이 규정하였다. 평균휘도에 터널길이, 교통량, 벽면 반사율 등에 따른 조절계수를 곱하는 방식으로 경계부 휘도를 산출할 수 있다 [4].

기준에서는 20° 원추형 시야 내의 하늘의 비율을 4단계로 구분하고 있지만, 국내 고속도로 터널의 경우 산악지대에 형성되어 20° 시야 내에 하늘이 접하는 비율이 거의 없고, 터널길이가 200 [m]이상이면 조절계수도 100 [%]이므로 필요한 부분만 표 1에 나타내었다.

표 1 터널의 경계부 평균 노면휘도  $L_{th}$ [cd/m<sup>2</sup>]

Table 1 Average luminance of threshold zone in tunnel

20° 원추형 시야 내의 하늘의 비율		10 % 이하 ~ 5 % 초과	5 % 이하 ~ 0 %		
시야 내의 밝기 상황		주변 반사			
		보통	높음	보통	높음
설계속도 [km/h]	60	125	175	75	150
	80	180	270	150	240
	100	240	360	200	320

2.2.2 국외 기준(CIE 88)

국제조명위원회(CIE)에서는 경계부 휘도를 광막휘도법 또는 L20법을 사용하여 결정하도록 권고하고 있다. 광막휘도법은 터널 진출입시 눈이 순응해야 하는 터널 주변 휘도의 총량인 광막휘도를 광학적 방법으로 측정하여 수직적 방법을 통해 경계부 휘도 값을 예측할 수 있고, L20법은 터널 입구 접속부에서 20°의 원추 시야 내에서 측정된 평균휘도로 정의하며 식 (1)과 같이 계산할 수 있다. 식 (1)에서 정지거리가 100 [m]이상일 때,  $\tau$ 값이 10 [%]이하이고  $L_{th}$ 가 다른 휘도값에 비해 낮으면 우측 항은 무시할 수 있다. 평균휘도를 구한 후 속도별  $L_{th}/L_{20}$ 의 비율인  $k$ 값을 적용하여 식 (2)와 같이 경계부 휘도를 결정할 수 있다. CIE 88에서 규정한  $k$ 값은 표 2에 나타내었다[5][6].

$$L_{20} = \gamma \cdot L_c + \rho \cdot L_r + \epsilon \cdot L_e + \tau \cdot L_{th} \tag{1}$$

단,  $\gamma + \rho + \epsilon + \tau = 1$

여기서,  $L_c$  : 하늘의 휘도,  $L_r$  : 도로의 휘도

$L_e$  : 주변 휘도,  $L_{th}$  : 경계부 휘도

$\gamma$  : 20° 시야 내 천공 비율,  $\rho$  : 도로 비율

$\epsilon$  : 주변 비율,  $\tau$  : 터널 입구 비율

$$L_{th} = k \cdot L_{20} \tag{2}$$

표 2 속도별  $L_{th}/L_{20}$  비율  $k$

Table 2  $k$  is  $L_{th}/L_{20}$  ratio for various speeds

Speed [km/h]	$k = L_{th}/L_{20}$
<= 60	0.05
80	0.06
120	0.1

2.1 터널의 경계부 휘도 기준

한국산업표준(KS C 3703 : 2010)에서는 주간 자동차 터널도로의 기본부 평균노면휘도  $L_{tn}$ 을 정지거리 및 설계속도, 교통량에 따라 표 3과 같이 규정하고 있다. 여기서 교통량의 단위는 [차량 대수/시간/차로]이고 분류한 기준은 표 4에 나타내었다[4].

표 3 터널의 기본부 평균 노면휘도  $L_{tn}$ [cd/m<sup>2</sup>]

Table 3 Average luminance of interior zone in tunnel

정지거리[m] (설계속도 [km/h])	터널의 교통량		
	적음	보통	많음
160 (100)	7	9	11
100 (80)	5	6.5	8
80 (60)	3	4.5	6

표 4 교통량의 분류

Table 4 Classification of traffic volume

구분	적음	보통	많음
일방통행	300 이하	300 초과 ~ 1,000 미만	1,000 이상
양방통행	100 이하	100 초과 ~ 300 미만	300 이상

3. 퍼지제어를 이용한 터널 조명

터널 내부 조명을 야외휘도와 교통 상황에 따라 제어하면 보다 안전하고 편안한 운전 조건을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 에너지 절감 효과도 줄 수 있다. 그러나 밝기에 대한 느낌은 객관적이기 때문에 야외휘도와 교통 상황에 따라 적정 수준의 내부휘도를 계산하기에는 어려움이 있다[9]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 병렬형, 논리형, 언어적 제어의 특징을 가지고 있는 퍼지 추론방식을 적용하였다. 퍼지 추론방식은 불확실하거나 애매한 상황을 잘 처리할 수 있고, 시스템 설계시 수학적 모델을 필요로 하지 않은 장점이 있다[7][8].

3.1 터널 조명 시스템 구성

그림 2는 터널 조명 시스템의 구성도로 L20법으로 야외 휘도를 측정하기 위한 터널 외부 휘도감지기, 차량 속도와 교통량을 측정하기 위한 교통정보 관리시스템 TMS(Traffic

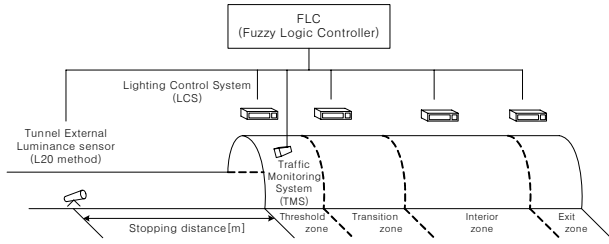


그림 2 터널 조명시스템 구성도  
Fig. 2 The configuration of the tunnel lighting system

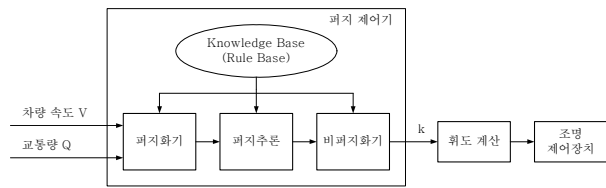


그림 3 터널 조명의 퍼지제어시스템  
Fig. 3 Fuzzy Logic control system of tunnel lighting

Monitoring System), 램프의 광속을 제어하기 위한 조명 제어장치(Lighting Control System)로 구성된다. 터널 외부 휘도감지기는 터널의 설계속도에 따른 정지거리에 위치시키고, 교통관제 시스템(TMS)은 정해진 시간동안 차량 속도와 교통량의 평균값을 출력한다. 제한한 조명제어시스템은 야외 휘도와 실시간 교통상황 변화에 대해 원활하게 제어하기 위해 LED 디밍시스템이 함께 구성되어야 한다.

터널 조명제어를 위한 퍼지시스템은 그림 3에 나타내었다. 차량 속도  $V$ 와 교통량  $Q$ 를 입력변수로 받아 IF-THEN 형식의 규칙베이스에 의해 추론과정을 수행하고, 비퍼지화 단계를 거쳐 차량 속도와 교통량의 변화에 따른 계수  $k$ 를 출력하도록 구성하였다.

경계부 휘도는 초기 설계시 L20법으로 측정된 야외휘도와 실시간으로 측정되는 야외휘도의 비율, 계수  $k$ 에 의해 초기 설정된 경계부 휘도값을 기준으로 제어되고, 기본부 휘도는 눈이 순응된 상태이기 때문에 야외휘도를 고려하지 않아도 되므로 초기 설정된 기본부 휘도값을 기준으로  $k$ 에 의해서만 제어된다.

### 3.2 퍼지추론 알고리즘 구성

소속함수의 형태로는 삼각함수(Triangular MF)로 선정하였고, 퍼지 언어변수는 PB(Positive Big), PM(Positive Medium), PS(Positive Small), ZE(Zero), NS(Negative Small), NM(Negative Medium), NB(Negative Big)을 사용하였다.

#### 3.2.1 입력변수

입력 변수 속도  $V$ 와 교통량  $Q$ 는 NB, NS, ZE, PS, PB 5개의 퍼지 집합으로 나누고 그림 4, 그림 5에 소속함수를 나타내었다.

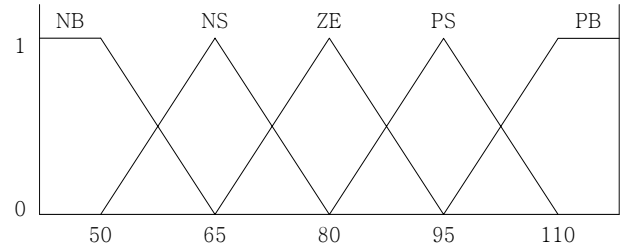


그림 4 속도의 소속함수( $V$ )  
Fig. 4 Membership function of vehicle velocity( $V$ )

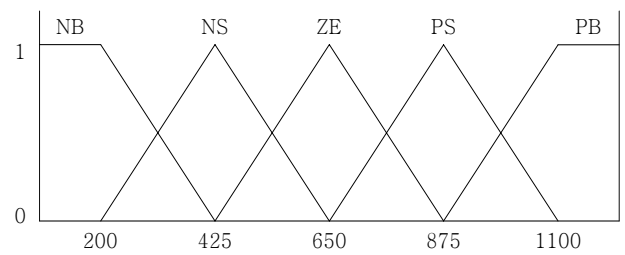


그림 5 교통량의 소속함수( $Q$ )  
Fig. 5 Membership function of traffic volume( $Q$ )

#### 3.2.2 출력변수

출력변수는 차량 속도와 교통량의 변화에 따른 계수  $k$ 로 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB 7개의 퍼지 집합으로 나누고 소속함수를 그림 6에 나타내었다.

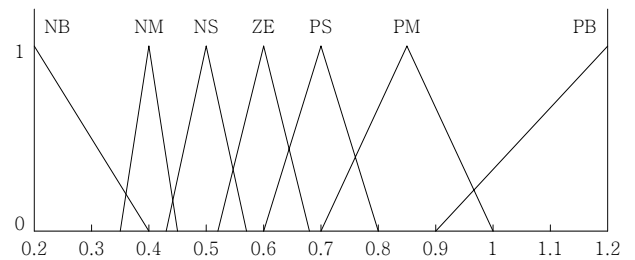


그림 6  $k$ 의 소속함수  
Fig. 6 Membership function of  $k$

#### 3.2.3 퍼지 추론

퍼지추론방법으로는 Mamdani method를 사용하였으며 퍼지 규칙 베이스는 25가지로 설정하여 표 5에 나타내었다. 차량 속도와 교통량의 변화에 따른 계수  $k$ 값이 경계부 휘도와 기본부 휘도를 결정하는데 영향을 미치므로 CIE 88에서 규정하는 속도별  $L_{th}/L_{20}$  비율과 KS C 3703에서 규정한 기본부 휘도를 바탕으로 오차가 가장 적은 소속함수와 퍼지 규칙 베이스를 선정하였다. 비퍼지화단계에서는 무게중심법을 사용하였으며 퍼지제어의 결과를 MATLAB으로 시뮬레이션하여 3차원 표면 그래프로 그림 7에 나타내었다.

표 5 퍼지 규칙 베이스

Table 5 Fuzzy rule base

교통량(Q) 속도(V)	NB	NS	ZE	PS	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB
PS	ZE	ZE	PS	PM	PM
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
NS	NM	NM	NS	ZE	ZE
NB	NB	NM	NS	ZE	ZE
IF V is NB and Q is NB then k is NB IF V is NB and Q is NS then k is NM IF V is NB and Q is ZE then k is NS					

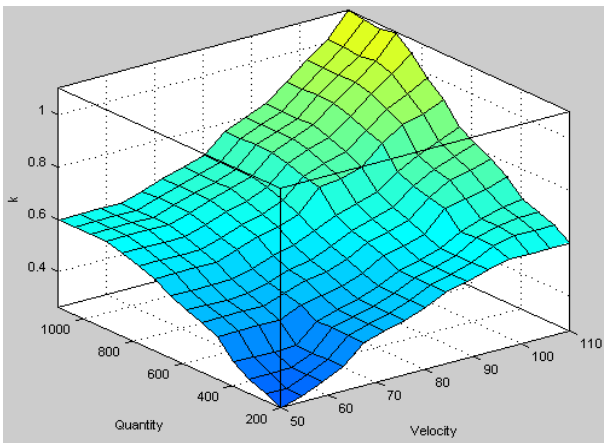


그림 7 퍼지제어의 3차원 표면 그래프  
Fig. 7 3D surface of fuzzy control

#### 4. 시뮬레이션

##### 4.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션을 위한 터널 제원은 표 6과 같다. 이를 바탕으로 KS C 3703에 의해 설계하면 경계부 휘도는 표 1에 의해 200 [cd/m<sup>2</sup>]로 선정하고, 기본부 휘도는 표 3에 의해 11 [cd/m<sup>2</sup>]으로 선정할 수 있다. 퍼지추론을 적용한 터널 조명 제어시스템을 시뮬레이션 할 경우 계수 k값을 적용하기 위해 기준값이 필요하다. 하지만 표 1에 의한 경계부 휘도 값은 교통량이 반영이 되지 않았기 때문에 안전성을 우선시하여 교통량을 650 [대/시/차로], 즉 교통량 퍼지집합 ZE로 설정하여 기준값으로 선정하였다. 기본부 휘도는 경제성을 우선시하여 터널의 제원대로 속도 100 [km/h], 교통량 많음 (1,000 [대/시/차로])일 경우를 기준값으로 선정하여 시뮬레이션 하였다.

##### 4.2 터널 내부 휘도분포

야외 휘도, 차량 속도, 교통량의 변화에 따른 터널 내부

표 6 시뮬레이션을 위한 터널 제원

Table 6 Specification of tunnel for simulation

구분	터널 제원
설계 속도 [km/h]	100
교통량 [대/시/차로]	1,000 (많음)
터널 길이 [km]	1
통행방식	편도 2차로
20° 원추형 시야 내의 하늘의 비율 [%]	0
주변 반사	보통
L20법으로 측정된 야외휘도의 최대값 [cd/m <sup>2</sup> ]	3,000

휘도변화를 MATLAB Simulink를 이용하여 확인하였다. 시뮬레이션 결과는 터널 경계부부터 기본부까지만 휘도분포곡선으로 나타내었다.

야외휘도 변화에 따른 터널 내부 휘도 분포를 나타내기 위해 교통량과 차량속도를 1,000 [대/시/차로], 100 [km/h]로 고정시키고 야외휘도를 1,000 [cd/m<sup>2</sup>]부터 3,000 [cd/m<sup>2</sup>]까지 500 [cd/m<sup>2</sup>]씩 변화시켜 그림 8에 나타내었다.

경계부 휘도는 야외 휘도 변화에 대해 비례하고 기본부 휘도는 야외 휘도에 영향을 받지 않으므로 일정하게 나타났다.

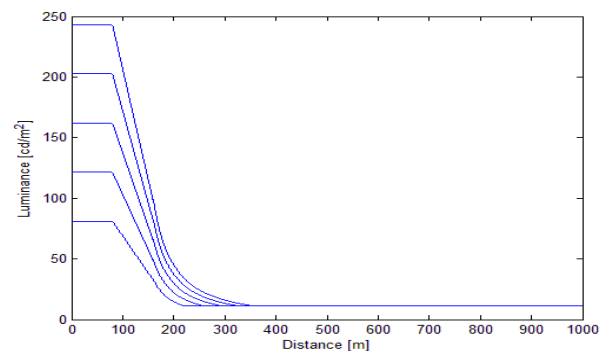


그림 8 야외 휘도 변화에 따른 터널 내 휘도 분포  
Fig. 8 Luminance distribution graph in tunnel according to changing external luminance

교통량 변화에 따른 터널 내부휘도 분포를 나타내기 위해 야외 휘도와 차량 속도를 3,000 [cd/m<sup>2</sup>], 100 [km/h]로 고정시키고 교통량을 200 [대/시/차로]부터 1,000 [대/시/차로]까지 200 [대/시/차로]씩 변화시켜 그림 9에 나타내었다.

경계부 휘도는 교통량이 보통인 600 [대/시/차로]를 기준으로 증가율과 감소율이 비슷하게 나타났고, 기본부 휘도는 표 3에서 교통량에 따라 규정된 휘도의 변화율과 유사하게 나타났다.

속도 변화에 따른 터널 내부휘도 분포를 나타내기 위해 야외 휘도와 교통량을 3,000 [cd/m<sup>2</sup>], 1,000 [대/시/차로]로 고정시키고 속도를 60 [km/h]부터 100 [km/h]까지 10 [km/h]씩 변화시켜 그림 10에 나타내었다.

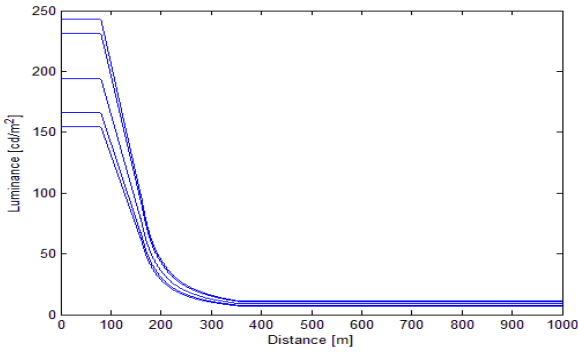


그림 9 교통량 변화에 따른 터널 내 휘도 분포  
 Fig. 9 Luminance distribution graph in tunnel according to changing traffic volume

경계부 휘도는 속도변화에 따라 표 2에 나타난  $k$ 값의 비율로 변화하였고, 기본부 휘도는 표 3에서 속도에 따라 규정된 휘도의 변화율과 유사하게 나타났다. 또한 속도 변화는 경계부 구간 길이에 영향을 미치므로 속도가 빠를수록 경계부 구간의 길이가 길어지는 것을 확인할 수 있다.

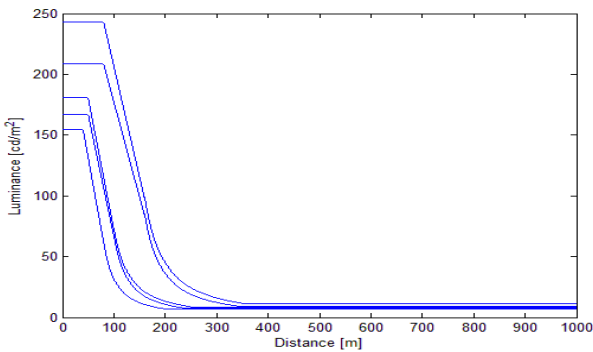


그림 10 속도 변화에 따른 터널 내 휘도 분포  
 Fig. 10 Luminance distribution graph in tunnel according to changing vehicle velocity

### 4.3 기존방식과 퍼지추론을 적용한 제어방식 비교

본 논문에서 제안한 터널조명과 기존의 터널조명을 비교하기 위해 야외휘도, 차량 속도, 교통량이 변화하는 상황을 가정하였다.

#### 4.3.1 야외휘도 변화

야외휘도의 변화만을 고려하기 위해 다음과 같은 조건에서 시뮬레이션 하였다. 속도와 교통량은 100 [km/h], 1,000 [대/시/차로]로 고정시키고 오전 6시부터 오후 6시까지 L20 범으로 측정되는 야외 휘도값을 가정하여 변화 곡선을 그림 11에 나타내었다.

야외휘도의 변화에 따라 퍼지제어를 적용하여 경계부 휘도값을 산출하여 나타내고, 단계별 제어는 맑음, 흐림, 일출 또는 일몰 3단계로 나누어서 나타내었다. 퍼지제어를 적용한 경계부 휘도는 야외휘도 변화에 따라 부드럽게 제어되는

것을 확인할 수 있다.

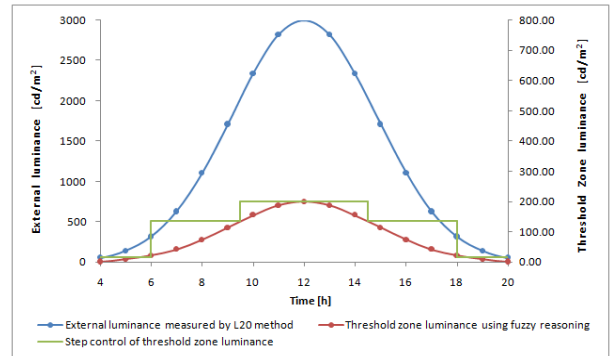


그림 11 야외 휘도 변화에 따른 경계부 휘도 비교  
 Fig. 11 Comparison of threshold zone luminance according to changing external luminance

#### 4.3.2 교통상황 변화

차량 속도와 교통량의 변화를 고려하기 위해 야외휘도는 3,000 [cd/m²]로 고정시키고 표 7과 같이 6가지 상황을 가정하였다.

표 7 교통상황 조건  
 Table 7 Traffic conditions

Case	교통상황	
	속도 [km/h], 교통량 [대/시/차로]	
Case 1	60	300
Case 2	80	300
Case 3	80	650
Case 4	100	300
Case 5	100	650
Case 6	100	1,000

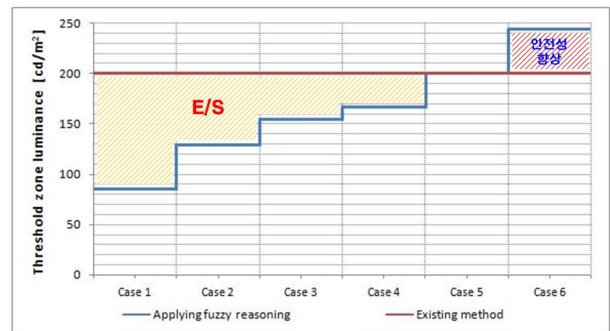


그림 12 교통상황 변화에 따른 경계부 휘도 비교  
 Fig. 12 Comparison of threshold zone luminance according to traffic conditions

그림 12와 그림 13은 속도와 교통량 변화에 따른 경계부 휘도와 기본부 휘도를 나타낸 것이다. 기존 터널조명제어방식은 속도 및 교통량에 의해 휘도가 변화하지 않으므로 경

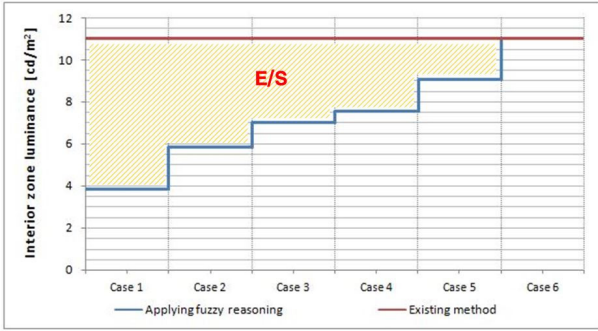


그림 13 교통상황 변화에 따른 기본부 휘도 비교

Fig. 13 Comparison of interior zone luminance according to traffic conditions

계부는 200 [cd/m<sup>2</sup>], 기본부는 11 [cd/m<sup>2</sup>]를 유지하고 있다. 그러나 퍼지추론을 적용할 경우 각 교통상황에 따라 터널 내부조명을 제어하여 에너지를 절약하거나, 운전자의 안전성이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

터널 조명은 일반 도로조명과 달리 운전자의 안전한 시야 확보를 위해 주간에도 조명이 필요하며 순응에 필요한 밝기의 대부분을 인공조명에 의존하고 있어 에너지 소비가 크다. 터널에서는 에너지 절약도 중요한 문제이지만 무엇보다도 운전자의 안전성과 편안함이 보장되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 퍼지추론을 적용하여 CIE 88 및 KS C 3703의 규정에 따라 운전자의 시각적 쾌적성을 유지하는 범위 내에서 터널 야외 휘도, 차량 속도, 교통량의 변화에 따라 터널 내부의 밝기를 조정하는 터널 조명시스템 제어 방법을 제안하였다.

현재 터널에 설계되는 조명은 년 중 발생할 수 있는 최고 야외휘도, 설계 최고 속도 및 교통량에 의해 휘도값을 산출하여 적용하고, 야외휘도에 대해서는 단계적 제어를 하고 있지만 교통상황에 대해서는 터널 내부 밝기가 제어되지 않는 실정이다. 제안된 방법을 사용하여 터널 내부 밝기의 최고 값을 기준으로 제어할 경우는 에너지를 절감할 수 있고, 내부밝기의 최고 값이 아닌 다른 값을 기준으로 제어할 경우는 에너지 절감비율은 감소하지만 운전자의 안전성을 향상시킬 수 있다.

### References

[1] The installation and management guideline in Road Safety facility(Lighting system), Ministry of Land, 2012, 11.  
 [2] Wan-Mo Han · Woo-Jin Jang · In-Hwan Lee, "The Study of the Most Suitable Location of Luminaire for Road Tunnel Lighting System", Journal of KIEE. Vol. 18, No. 4, pp. 1-7, July 2004.  
 [3] Young-Q Lee, Seung-Ho Lee, "A simulation analysis on the effect of counterbeam lighting for the tunnel

entrance zones", Tunneling Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 377-385, December 2007.

[4] KS C 3703 : 2010 Recommendation for lighting of traffic tunnels  
 [5] CIE 88 : 2004(2nd edition), Guide for the lighting of road tunnels and underpasses, 2004.  
 [6] Jong-Sung Han · Min-Wook Lee · Hoon Kim, "Measurement and Analysis of Adaptation Luminance in the Threshold Zone of the Road Tunnel", Journal of KIEE. Vol. 26, No. 1, pp. 1-7, January 2012.  
 [7] Z. Zenn Bien, Fuzzy-Logic control, Hongrunc publishing company, 1997.  
 [8] Witold Pedrycz, Fuzzy Control and Fuzzy systems, Research studies press Ltd., 2nd Edition, 1993.  
 [9] Tianshu Huang, Fan Luo and Kui Zhang, "Application of Fuzzy Control to A Road Tunnel Lighting System", ITS Telecommunications Proceedings, 2006 6th International Conference on, pp 136-139

## 저 자 소 개



### 이 정 은 (李政垠)

1983년 5월 7일생. 2008년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



### 최 홍 규 (崔洪圭)

1950년 1월 7일생. 1975년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977년 연세대학교 전기공학과 졸업(석사). 1993년 홍익대학교 전자정보통신공학과 졸업(박사). 현재 홍익대학교 전자·전기공학과 교수.