

# 터널 입구에서의 블랙홀 현상 완화를 위한 카메라 기반의 전면유리 투과율 제어 방법

## A Windshield Transparency Control Method Using an Automobile Camera for Alleviating Black-Hole Phenomenon at the Tunnel Entrance

이 중 현\* · 이 동 욱†  
(Jung-Hyun Lee · Dong-Wook Lee)

**Abstract** - Blackout effect occurs when a driver misadapts to the changed lighting conditions upon entering a tunnel. This could lead to a decrease in visibility especially in the daylight, depending on the difference in the degree of brightness between inside and outside the tunnel. To alleviate such a problem, we decrease windshield transparency before the driver arrives at the tunnel entrance. Controlled amount of light inside the car can allow the drivers to adjust to the dark prior to entering. The windshield transparency coefficient is to be determined by the arrival time at the tunnel and difference in the level of brightness between inside and outside the tunnel. Navigation, road sign detection, and tunnel entrance detection provide the arrival time. We also designed an opto-electronic conversion function to estimate the level of brightness. The black-hole phenomenon alleviation method is verified by field experiments using an automobile camera and a navigation. The result shows that the adjusted windshield transparency is able to provide an environment with a comfortable level of brightness with which the drivers can enter tunnels without the visibility problem.

**Key Words** : Black-hole phenomenon, Windshield transparency, Tunnel entrance

### 1. 서 론

사람의 눈이 인지할 수 있는 가장 어두운 밝기와 가장 밝은 밝기의 비율은 약 1:10억이다. 하지만 일시적으로는 약 1:1000 비율의 명암만 인지한다. 1:10억 비율 중에서 일시적으로 인지하고 있는 범위의 밝기를 순응 휘도(adaptation luminance)라 한다. 이러한 눈의 작용으로 인하여 밝기가 급변할 때 변화된 빛에 적응하는 시간이 필요하다. 감소되는 밝기에 눈이 적응하는 것을 암순응이라고 하며 밝아질 경우에는 명순응이라 한다. 완벽하게 암순응을 하는 시간은 약 20~30분이 걸리며 명순응은 약 5분이 걸린다[1]. 암순응을 위한 시간은 명순응보다 길기 때문에 사람은 암순응에 더 취약하다. 1937년에 Hecht 등은 시간에 따른 암순응의 과정을 암순응 곡선으로 설명했다[2]. 박재규 외 2명(2009)은 암순응이 발생할 수 있는 다양한 공간에 적절한 조명의 조도를 결정하기 위해서 조도에 따른 인간의 암순응 시간을 측정했다[3]. 암순응 곡선과 조도에 따른 암순응 시간 측정 실험 결과를 통해서 밝기의 차이가 클수록 암순응 시간이 증가하는 것을 알 수 있다.

암순응 작용으로 인하여 주간에 어두운 터널로 들어갈 경우에는 시인도(visibility)가 급감되며, 이를 블랙홀 현상(black-hole phenomenon)이라고 한다. Crawford(1947)는 운전자가 터널에 진입할 때 운전자의 시력 민감도를 측정하는 연구를 통해서 약 1초 이내 동안 시력 민감도가 크게 소실된다고 하였다[4]. 이러한 이유로 국내 터널 조명 규격에서는 터널의 입구부 조명을 가장 밝게 설치하여 블랙홀 현상을 최소화 하도록 제안한다[5]. 국내뿐만 아니라 국제 터널 조명 규격에서도 블랙홀 현상 완화를 위해서 터널 입구부가 가장 밝고 터널 중심부로 갈수록 밝기가 서서히 어두워지는 환경을 제공하는 조명 설치 방법이 명시되어 있다[6]. 블랙홀 현상 완화를 위한 조명을 설치했음에도 불구하고 조명 밝기의 한계로 인해서 터널 내부와 외부 밝기 차이는 분명하게 존재한다. 실험에 따르면 대낮에 터널 외부와 터널 입구부 밝기 차이는 약 10배 이상이다[7]. 즉, 현재 적용되고 있는 터널 조명 설치 방법은 조명의 에너지 소비와 밝기 간의 trade-off와 터널 내에만 설치 가능한 환경적 제약에 의해서 블랙홀 현상 완화에 한계가 있다. 본 논문에서는 이러한 터널 조명 규격의 한계점을 해결하고자 차량이 터널에 진입하기 전에 유리의 투영도를 감소시켜서 운전자가 미리 터널 내부의 밝기에 순응하게 하여 터널 진입 시에 발생하는 암순응 시간을 최소화한다.

운전자가 적응하고 있는 밝기, 즉 순응 휘도를 터널에 진입하기 전에 미리 낮추기 위해서 투영도가 조절되는 유리를 사용한다. 투영도가 조절되는 유리는 이미 개발이 완료되어 '스마트 유리'라

† Corresponding Author : Dept. of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University, Korea.  
E-mail: dlee@dongguk.edu

\* Dept. of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University, Korea.

Received : April 13, 2016; Accepted : July 24, 2016

는 이름으로 다양한 분야에 적용되고 있다. 투영 조절 가능한 유리를 개발하는 대표적인 회사인 이스라엘의 Gauzy는 차량용뿐만 아니라 보안용 실내외 인테리어 등 다양한 분야에 적용 가능한 제품을 제공한다[8]. 또한 독일의 자동차 부품 제조 회사인 Continental은 차량 후면부에 투영도가 조절되는 유리를 설치하여 후방 차량에 의한 눈부심 방지에 관한 연구를 수행하고 있다[9]. 우리는 운전자의 암순응 블랙홀 현상 완화를 위해 차량 전면부에 설치된 유리의 투영도를 운전자의 환경에 따라 적합하게 조절한다. 투영도 조절을 위해서 터널까지의 거리, 터널 도착 예정 시간, 터널 내부 밝기, 그리고 운전자의 순응 휘도를 이용한다.

터널까지의 거리 정보는 널리 보급화 된 GPS 기반의 내비게이션으로 충분히 예측 가능하다. GPS 음영 지역과 같이 내비게이션을 사용할 수 없는 경우에는 표지판 인식을 통해서 터널까지의 거리를 알 수 있다. 차량 카메라를 이용한 표지판 인식 연구는 지속적으로 진행되고 있으며, 표지판 인식 기반의 도로표지 데이터베이스 구축에 관한 연구도 진행되었다[10]. 터널까지의 거리 안내 표지판은 법적으로 설치 의무이기 때문에 표지판 인식 연구결과만으로도 충분히 터널까지의 거리를 알 수 있다. 본 논문에서는 표지판이 없는 예외적인 상황에서도 원근법 기반의 영상처리를 통해 터널까지의 거리를 계산한다. 원근법에 의해서 차량이 터널에 가까워질수록 영상 내의 터널은 점점 커지는 것처럼 촬영된다. 터널이 커지는 비율과 차량 속도 간의 관계를 통해서 터널까지의 거리를 예측한다. 터널이 커지는 비율을 계산하기 위해서는 터널 입구 검출 알고리즘이 필요하다. 다양한 모양의 터널 입구를 검출할 수 있는 연구가 진행되었으며[11], 이러한 연구결과를 이용하여 터널 입구를 검출할 수 있다.

운전자의 순응 휘도는 운전자가 보고 있는 피사체의 밝기를 휘도계로 측정하여 얻을 수 있다. 하지만 휘도계는 고가의 장비이고 측정 시간이 길기 때문에 본 논문에서는 휘도계를 사용하지 않고 카메라 파라미터와 영상 분석만을 통해서 운전자의 순응 휘도를 예측한다. 카메라 파라미터로부터 영상의 휘도 범위를 유추할 수 있으며, 이 범위는 각각의 픽셀에 8비트로 저장된다. Opto Electronic Conversion Function(OECF)은 8비트 픽셀과 휘도 간의 관계를 나타내고 이를 통해서 노면의 평균 밝기를 예측할 수 있다. 여기서 노면의 평균 밝기를 예측하는 이유는 운전자가 노면의 장애물을 인식하여 안전을 도모할 수 있도록 하기 위함이며, 이러한 이유로 투영도 조절 가능한 유리를 통해서 촬영된 영상의 노면 평균 밝기를 운전자의 순응 휘도라 가정했다. 하지만 터널 내부의 밝기 정보는 차량과의 거리가 멀기 때문에 OECF로 예측하기에는 어렵다. 그래서 우리는 국내 조명 설치 규격에서 제안하는 터널 내부의 밝기 정보를 이용했다.

제안하는 방법을 검증하기 위해서 내비게이션과 차량용 카메라를 이용한 실험을 수행했다. 우리는 실험을 통해서 제안하는 방법이 차량의 속도와 평균 노면 휘도가 변경되어도 적절하게 우리의 투과율을 계산할 수 있고, 계산된 투과율을 전면부 유리에 적용했을 경우에는 주간에 터널로 진입하더라도 차량 내부의 밝기는 급변하지 않음을 확인했다. 차량 내부의 밝기가 급변하지 않았기 때문에 블랙홀 현상은 발생하지 않거나 완화되어 나타날 수 있다.

## 2. 블랙홀 현상과 국내 터널 조명 규격

블랙홀 현상은 차량이 터널에 진입할 때 급감하는 밝기에 의해서 운전자의 시인도(visibility)가 감소되는 현상이다. 그림 1은 1937년에 Hecht 등이 암순응에 따른 시간을 설명하기 위한 암순응 곡선이다[2]. 암순응 곡선은 휘도 변화율에 따른 필요 순응 시간을 나타낸다. 휘도의 변화가 클수록 암순응에 필요한 시간은 증가하며, 이는 휘도의 변화율에 비례하여 블랙홀 현상이 길어질 수 있음을 의미한다.

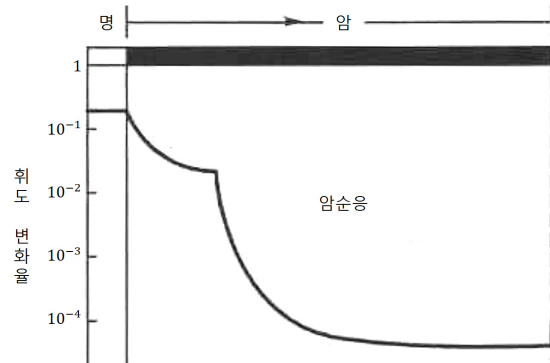


그림 1 암순응 곡선  
Fig. 1 Dark adaptation curve

주간에 터널로 진입할 경우에 발생하는 암순응에 의한 블랙홀 현상을 최소화하기 위해서 국내의 터널 조명 규격에서는 터널의 입구부에 밝은 조명을 설치하여 터널 외부와 내부의 밝기 차이를 감소시키는 방법을 제안한다[5]. 그림 2는 국내 터널 조명 규격에서 제안하는 터널 조명의 구성이다. 터널은 터널 입구에서부터 경계부, 이행부, 기본부, 그리고 출구부로 나뉜다. 터널 입구 접속부의 휘도  $I_{seq}$ 와 터널 경계부의 휘도  $I_{th}$ 는 터널 외부와 내부의 밝기 차이로 인하여 큰 차이가 있다. 국내 터널 조명 기준은 터널 주변의 환경, 터널의 길이, 방향 등을 고려하여 경계부의 노면 휘도  $I_{seq}$ 가 최대  $480\text{cd/m}^2$ 이 되도록 입구부 조명을 설치할 것을 제안한다. 터널 이행부는 조명의 밝기를 경계부 밝기에서부터 기본부 밝기까지 천천히 감소시키는 구간이며 암순응 곡선에 벗어나지 않도록 설계되어 있다. 기본부는 터널 내부에서 가장 어두운 곳으로 명순응이 이미 완료되었기 때문에 최소한의 밝기만 유지할 수 있는 조명이 설치된다. 출구부 휘도는 기본부 휘도에서 시작하여 출구 접속부 전방 20m 지점의 휘도가 기본부 휘도의 5배 되도록 단계적으로 상승시킨다. 이처럼 터널을 구간별로 구분하여 밝기를 다르게 하는 것은 운전자의 암순응과 명순응에 의해서 발생하는 블랙홀, 화이트홀 현상을 최소화하기 위함이다. 하지만 주간에 터널 외부 밝기는 터널 조명에 비해서 매우 밝기 때문에 블랙홀 현상이 발생할 수밖에 없다. 그러므로 우리는 블랙홀 현상을 더욱 완화시키기 위해서 운전자가 미리 경계부의 밝기에 적응할 수 있도록 전면부 유리 투영도를 조절한다.

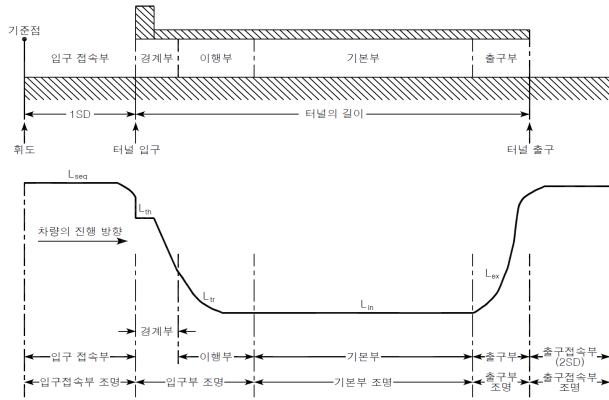


그림 2 국내 터널 조명 규격  
Fig. 2 Korean tunnel lighting standard

### 3. 전면유리 투과율 조절 방법

터널 진입 시에 발생하는 블랙홀 현상을 완화시키기 위한 유리의 투영도 조절 방법은 그림 3과 같다. 우선, 터널 외부 휘도를 계산하기 위해서 카메라에 유입되는 빛의 양과 영상 간의 관계를 나타내는 Opto Electronic Conversion Function(OECF)을 이용한다. 다음은 내비게이션이나 표지판 인식 알고리즘으로부터 터널까지의 거리를 계산한다. 하지만 본 논문에서는 내비게이션과 표지판 인식 알고리즘이 적용될 수 없는 상황에서도 터널까지의 거리를 계산하기 위해서 터널 입구 검출 알고리즘을 사용한다. 마지막으로 터널 외부 휘도값과 터널까지의 거리값을 이용하여 투영도 조절 계수를 계산한다. 계산된 계수에 따라서 터널에 진입하기 전에 미리 전면부 유리의 빛 차단율이 증가하게 된다. 또한 차량이 터널에 도착할 경우 운전자가 외부 휘도에 영향을 받지 않기 때문에 차단율은 초기화된다.

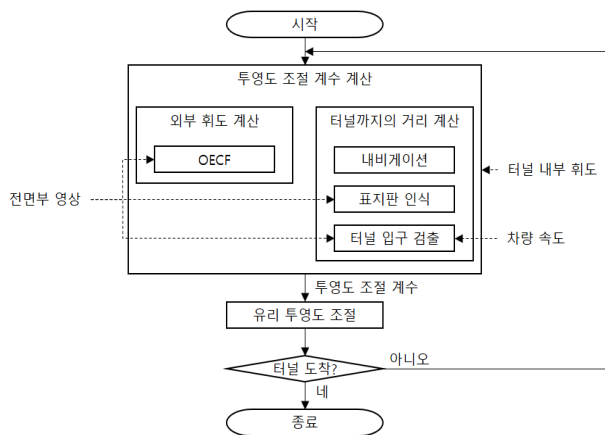


그림 3 블랙홀 현상 완화를 위한 전면유리 투영도 조절 방법  
Fig. 3 A windshield transparency control method for alleviating black-hole phenomenon

### 3.1 터널 내부와 외부 휘도 계산 방법

터널 내부 휘도와 외부 휘도는 휘도계로 측정 가능하지만 휘도계는 고가의 장비이고 측정 시간이 느리기 때문에 제안하는 방법에는 적절하지 않다. 본 논문에서는 카메라의 자동 노출계를 이용하여 계산한 노출 스탑(exposure stop)으로부터 터널 외부 휘도를 예측했다. 노출 스탑은 카메라에 유입되는 빛의 양이 2배 증가할 때마다 1씩 증가한다. 이러한 카메라의 특징을 이용하여 노출 스탑마다의 피사체 밝기를 추측할 수 있다. 정확한 밝기를 계산하기 위해서 국제 표준화 기구와 국제 조명 위원회에서 제안하는 ISO14524를 통해 OECF를 모델링했다. OECF를 모델링하기 위해서 그림 4의 OECF 테스트 사진을 출력하여 뒤에 조명을 설치하고 앞에는 카메라를 설치한다. 조명을 켜고 자동 노출 모드로 사진을 촬영한다. 각기 다른 네모칸마다의 휘도값을 휘도계로 측정하고 여기에 상응하는 노출 스탑과 픽셀값을 확인한다. 조명의 밝기를 변경해가면서 실험을 반복하면 모든 노출 스탑의 8비트 픽셀값과 실제 휘도값과의 관계를 알 수 있다. 노출 스탑의 8비트 픽셀값과 실제 휘도값과의 관계를 Look-Up Table(LUT)로 작성하여 영상으로부터 피사체의 휘도값을 예측할 수 있다.

국내 터널 조명 규격은 노면 휘도를 기준으로 조명의 규격을 결정한다. 운전자의 안전을 위해 운전자가 노면의 장애물을 쉽게 파악해야하기 때문이다. 동일한 기준으로 터널 외부 휘도를 그림 5처럼 터널까지의 평균 노면 휘도로 가정하였다. 평균 노면 휘도는 모델링된 OECF로 작성한 LUT를 이용하여 구할 수 있다.

터널 내부 휘도를 터널 외부 휘도 측정 방법과 동일하게 측정할 경우에 터널과의 거리가 멀어질수록 오차율이 증가한다. 본 논문에서는 터널 내부 휘도값의 정확도를 향상시키기 위해서 터널 외부 휘도 측정 방법을 사용하지 않고 국내 터널 조명 기준을 참고하였다. 국내 터널 조명 기준은 터널의 입구부 휘도를 표 1처럼 터널 주변의 지형이나 차량 속도와 같은 요소들로 결정한다. 이러한 다양한 요소들을 실시간으로 확인하기에는 매우 어렵기 때문에 본 논문에서는 터널 내부 휘도를 국내 터널 조명 규격에서 제안하는 노면 휘도의 최고값인  $480\text{cd/m}^2$ 으로 설정했다. 운전자의 순응 휘도와 터널 입구부의 휘도가 결정되면 감소시켜야 할 총 휘도값을 계산할 수 있다.

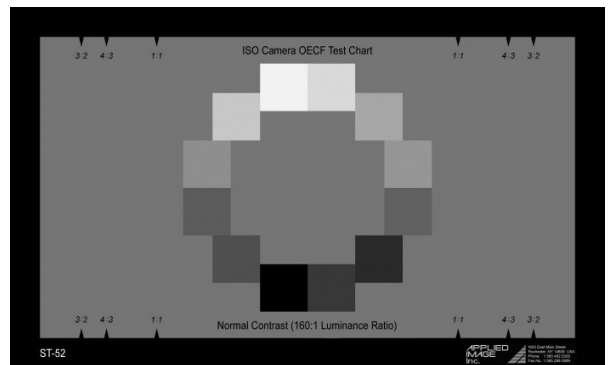
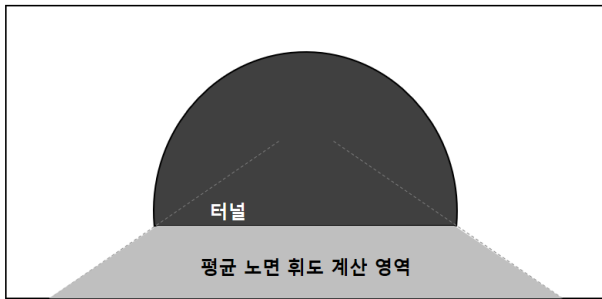


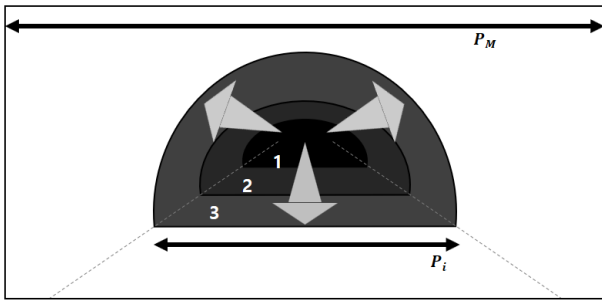
그림 4 ISO14524 OECF 테스트 사진  
Fig. 4 ISO14524 OECF test chart

**표 1** 국내 터널 조명 규격의 터널 입구부 평균 노면 휘도  
**Table 1** Average road luminance of tunnel entrances in Korean tunnel lighting standard

20 원추형 시야 내의 하늘의 비율	시야 내의 밝기 상황		설계속도 (km/h)		
			60	80	100
20%초과	터널 방위	남향	200	260	370
		북향	250	360	480
20%이하 ~10%초과	터널 방위	남향	150	200	280
		북향	200	300	400
10%이하 ~5%초과	주변 반사	보통	125	180	240
		높음	175	270	360
5%이하 ~0%	주변 반사	보통	75	150	200
		높음	150	240	320



**그림 5** 평균 노면 휘도 계산 영역  
**Fig. 5** Computation region of the average road luminance



**그림 6** 원근법에 의하여 증가되는 터널 입구의 크기  
**Fig. 6** Increase in size of the tunnel entrance by distance

### 3.2 터널까지의 거리 계산 방법

차량과 터널까지의 거리를 알고 차량의 속도를 알면 터널 도착 시간을 계산할 수 있다. 터널 도착 시간과 감소시켜야 할 휘도값으로부터 시간당 휘도 감소량을 계산할 수 있으며, 휘도 감소량으로부터 유리 투영도 조절 계수를 얻을 수 있다. 터널까지

의 거리는 내비게이션이나 표지판 인식 알고리즘으로 쉽게 얻을 수 있지만 내비게이션이 동작할 수 없는 상황이거나 표지판이 없을 경우에는 터널 입구 검출을 통해서 계산될 수 있다. 검출된 터널 입구는 원근법에 의하여 점점 커지는 것처럼 촬영된다. 그림 6은 원근법에 의하여 증가되는 터널을 나타낸 것이다. 우리는  $i$ 번째 프레임의 수평축 터널 픽셀의 개수  $P_i$ 와 영상의 수평축 픽셀의 개수  $P_M$ 이 같아질 때 차량이 터널 입구에 도착했다고 가정했다. 이러한 원근법의 원리를 이용하여 터널까지의 거리를 예측한 후에 투영도 조절 계수를 유도한다.

$i$ 번째 프레임의 수평축 터널 픽셀 개수와 이전 프레임의 수평축 터널 픽셀 개수의 차이  $\Delta P_i$ 는 식 (1)을 통해서 구할 수 있다.

$$\Delta P_i = P_i - P_{i-1} \quad (1)$$

차량이 터널에 도착하기까지 필요한 카메라의 프레임 개수  $N_i$ 는 식 (2)와 같고, 차량이 터널에 도착하는 시간  $T_i$ 는 식(3)과 같이 유도될 수 있다. 여기서  $F$ 는 카메라의 프레임 레이트이다.

$$N_i = \frac{P_M - P_i}{\Delta P_i} \quad (2)$$

$$T_i = N_i \times \frac{1}{F} \quad (3)$$

차량의 속도  $v_i$ 와 터널에 도착하는 시간을 알면 식 (4)와 같이 터널까지의 거리  $d_i$ 를 계산할 수 있다.

$$d_i = v_i \times T_i \quad (4)$$

터널 외부 휘도, 내부 휘도, 그리고 터널까지의 거리가 계산되면 투영도 조절 계수 계산을 수행한다.

### 3.3 투영도 조절 계수 계산 방법

표지판 인식이나 내비게이션으로 터널까지의 거리  $d_i$ 가 측정되면 터널에 도착하기까지의 필요한 카메라의 프레임 개수  $N_i$ 는 식 (5)와 같이 유도할 수 있다.

$$N_i = \frac{d_i}{v_i} F \quad (5)$$

현재 운전자가 순응하고 있는 휘도를  $L_i$ , 터널 내부의 휘도를  $L_M$ 이라 하면 카메라 프레임당 감소되어야 할 휘도  $\Delta L_i$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta L_i = \frac{L_i - L_M}{N_i} \quad (6)$$

그러므로  $i$ 번째 프레임에서 차단율  $B_i$ 는 식 (7)과 같이 표현된다. 여기서  $\Delta B_i$ 는 증가되어야 할 차단율이며, 초기치  $B_{i=0}$ 는 터널이 검출되었을 때이며 0이다.

$$B_i = B_{i-1} + \Delta B_i \tag{7}$$

$$\Delta B_i = \frac{\Delta L_i}{L_i} \tag{8}$$

차단율이 계산되면 각 프레임마다 전면부 유리의 투영도  $c_i$ 를 식 (12)와 같이 유도될 수 있다.

$$c_i = 1 - (B_{i-1} + \Delta B_i) \tag{9}$$

$$c_i = c_{i-1} - \Delta B_i \tag{10}$$

$$c_i = c_{i-1} - \frac{L_i - L_M}{L_i} \frac{d_i}{v_i} F \tag{11}$$

$$c_i = c_{i-1} - \frac{L_i - L_M}{L_i} \frac{P_M - P_i}{P_i - P_{i-1}} \tag{12}$$

우리는 식 (12)로부터 유리의 투영도 조절 계수를 얻을 수 있다. 계산된 계수를 이용하여 유리의 빛 차단율을 제어한다.

### 3.4 전면부 유리의 투영도 조절

투영도 조절 계수를 얻으면 차량 전면부 유리의 빛 차단율을 미리 조절하여 터널 진입시에 발생할 수 있는 블랙홀 현상을 완화시킬 수 있다. 차량 전면부 유리의 빛 차단율을 변경하기 위해서는 인위적으로 투과율을 조절할 수 있는 유리가 필요하다. 투과율이 조절 가능한 유리는 Electro-Chromic(EC), Suspended Particle Device(SPD), 그리고 Polymer Dispersed Liquid Crystal(PDLC)이 있으며 이미 상용화 되었거나 상용화 이전의 단계까지 기술이 개발되어 있다[12]. EC 유리는 전압에 비례하여 변색되는 물질을 사용하여 투영도를 조절하고, SPD나 PDLC 유리는 그림 7처럼 전압에 따라 고분자들의 위치가 변화되는 방식을 이용하여 투영도를 조절한다. 그러므로 본 논문에서는 그림 8과 같이 디지털 아날로그 변환기(DAC)를 이용하여 투영도 조절 계수를 스마트 유리 제어에 필요한 전압으로 변환한다. Micro

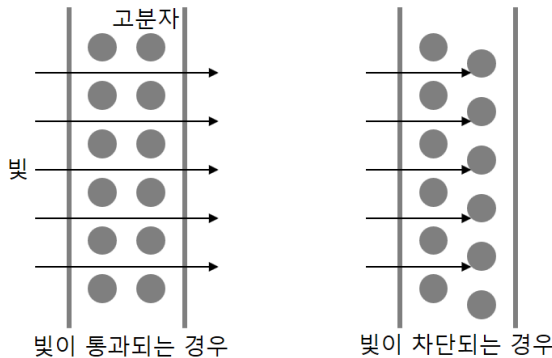


그림 7 고분자를 이용한 투과율 조절  
Fig. 7 Transmittance control using polymer

Controller Unit(MCU)에서 계산된 투영도 계수를 전압으로 변환하는 함수는 스마트 유리 제조사에서 제공되며 DAC에 적용된다. DAC를 통해서 전압이 제어되면 스마트 유리는 터널에 진입하기 전에 미리 빛 차단율을 증가시켜서 블랙홀 현상을 완화시킬 수 있다.

## 4. 실험

제안하는 방법을 검증하기 위해서 서울 동호로에 있는 장충체육관 사거리에서부터 금호터널까지의 차량 주행 영상을 촬영했다. 우리는 SKtelecom Inc.에서 제공하는 T map 내비게이션을 이용하여 블랙박스 영상, 터널까지의 거리, 그리고 차량 속도 데이터를 측정했다. OECF 모델링에 필요한 카메라 노출 스탭은 Canon 6D 카메라의 자동 노출 방식으로부터 측정됐다. 촬영 시간은 2016년 3월 29일 오전 9시경이며 구름이 약간 낀 날씨였다. 촬영된 블랙박스 영상의 해상도는 1280×720이고 프레임 속도는 30fps이다. 알고리즘의 처리 속도를 위해서 영상의 프레임 속도를 1fps로 샘플링(sampling)했으며 나머지 측정 데이터들의 샘플링 간격도 1초로 측정했다. 그림 9는 금호터널에 진입하기 직전의 블랙박스 영상이고, 그림 10은 블랙박스 영상과 동일 시간의 내비게이션 영상이다.

내비게이션으로부터 측정된 터널까지의 거리는 그림 11과 같

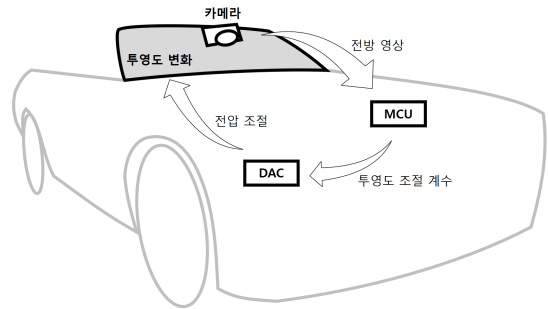


그림 8 전면 유리 투영도 조절 방법  
Fig. 8 A windshield transparency control method



그림 9 금호터널 입구 영상  
Fig. 9 Image of Geumho tunnel entrance



그림 10 금호터널 입구에서의 내비게이션 영상  
 Fig. 10 Navigation image at Geumho tunnel entrance

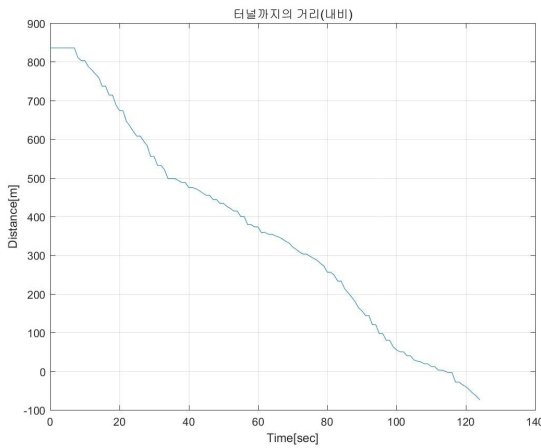


그림 11 터널까지의 거리  
 Fig. 11 Distance to the tunnel

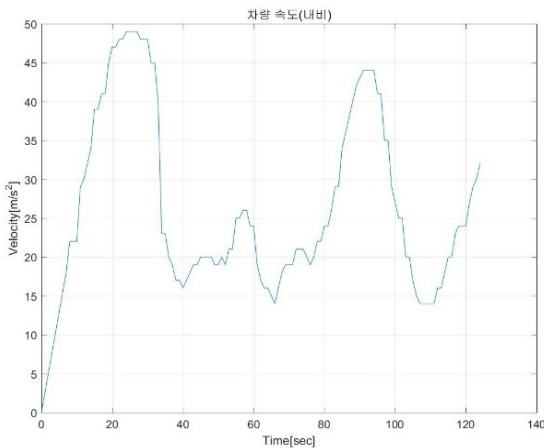


그림 12 차량 속도  
 Fig. 12 Vehicle velocity

으며 차량 속도는 그림 12와 같다. 측정이 시작된 후 약 118초 후에 터널에 진입하였다. 그림 11에서 118초 이후의 음수값은 터널에 진입한 후에 이동한 거리를 의미한다. 그림 12에서는 교통 혼잡으로 인하여 차량 속도가 매우 불규칙한 것을 확인할 수 있다.

내비게이션으로 터널까지의 거리와 차량 속도를 측정하는 동안 카메라 노출 계수인 조리개(aperture), 셔터 속도(shutter speed), 그리고 ISO 감도는 그림 13과 같다. 조리개 수치는 밝기와 반비례하고 셔터 속도와 ISO 감소 수치는 밝기와 비례하기 때문에 터널에 진입하는 약 118초경 조리개 수치는 감소하고 셔터 속도와 ISO 감도는 증가한다. 그림 13의 노출 스태프를 계산하기 위해서는 먼저 Canon Inc.에서 제공하는 그림 14의 차트를 이용하여 노출값(exposure value)을 계산한다. 그림 14에서의 노출값은 ISO 감도를 고려하지 않은 수치임으로 우리는 ISO 감도

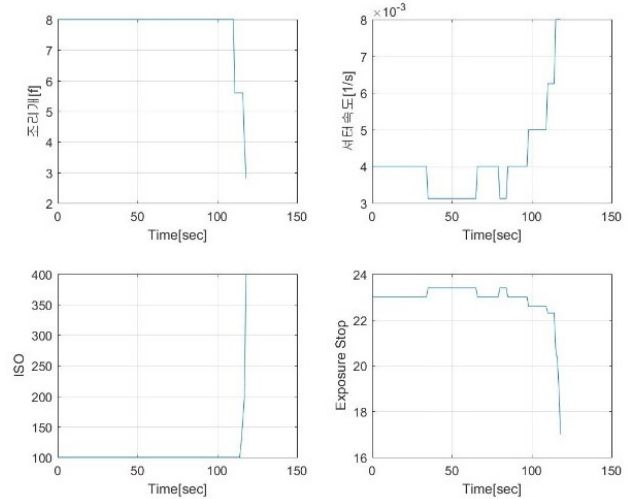


그림 13 카메라 노출 계수와 노출 스태프  
 Fig. 13 Exposure variables and exposure stop of camera

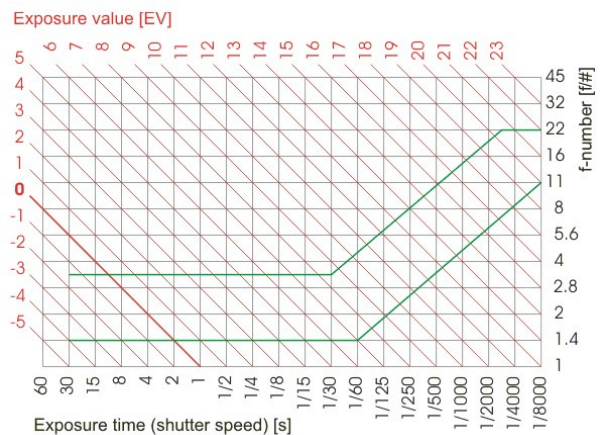


그림 14 노출값 차트  
 Fig. 14 Exposure value chart

를 고려한 노출 스태프를 계산했다. 노출값 1이 증가하는 것은 빛의 유입량이 2배 증가함을 의미하기 때문에 우리는 ISO 감도 100을 기준으로 감도가 2배 증가할 때마다 계산된 노출값에 1을 더해서 노출 스태프를 계산했다.

측정된 터널까지의 거리, 차량 속도, 그리고 계산된 노출 스태프를 제안하는 방법에 적용하여 유리의 투영도를 조절하면 운전자가 느끼는 휘도는 그림 15처럼 된다. 그림 15는 OECF를 이용하여 휘도를 계산한 것으로 유리의 투영도가 조절되지 않을 경우에는 터널에 진입하는 118초쯤에 급감한다. 급감하는 밝기는 블랙홀 현상을 유발할 수 있지만 본 논문에서 제안하는 방법을 적용하였을 경우에는 휘도가 상대적으로 천천히 감소되기 때문에 블랙홀 현상이 발생하지 않거나 완화되어 발생할 것이다. 그러므로 제안하는 방법은 국내 터널 조명 규격에서 제안하는 방법보다 운전자가 더 쉽게 암순응을 할 수 있도록 도와줄 수 있다.

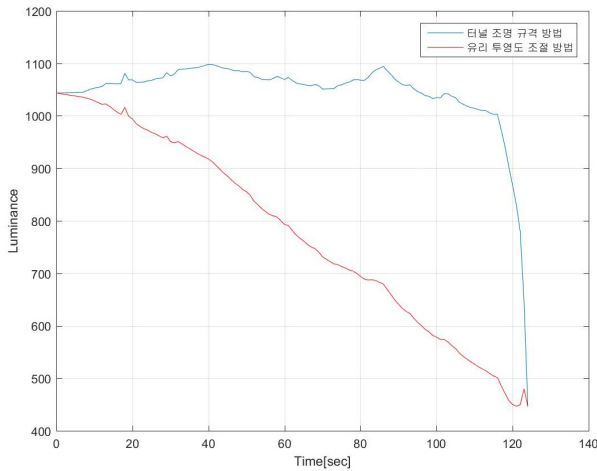


그림 15 평균 노면 휘도 비교  
 Fig. 15 Comparison of average road luminance

### 5. 결 론

운전자가 밝은 대낮에 터널로 진입할 경우 갑자기 어두워지는 밝기 때문에 순간 시력을 잃게 된다. 이러한 블랙홀 현상 문제를 해결하기 위해서 국내 및 국제 터널 규격은 터널 입구부에 가장 밝은 조명이 설치되도록 제안한다. 하지만 조명이 설치되어있음에도 불구하고 터널 야외 휘도와 내부 휘도가 최대 10배 이상 차이가 나기 때문에 블랙홀 현상 문제는 완벽하게 해결되지 않는다. 본 논문에서는 터널 조명으로 블랙홀 현상을 완화시키는 방법의 한계를 극복하고자 투영도 조절 가능한 유리와 그 유리의 투영도 조절 방법을 제안했다. 터널에 진입하기 전에 미리 터널과의 거리를 예측하고, 가변되는 차량 속도와 외부 휘도에 따라 유리의 투영도를 계산하고 조절했다. 그 결과 블랙홀 현상 완화를 위한 터널 조명이 설치되어있음에도 불구하고 급격히 변하던 밝기의 변화는 제안하는 방법을 통해서 완화되었다. 제안하는 방

법은 지속적으로 업데이트 하는 실시간 방식이기 때문에 차량의 속도나 외부 밝기가 다른 요소에 의해서 급변하더라도 그에 알맞은 투영도를 적절히 계산할 수 있는 장점이 있다. 또한 터널 진입 시에 발생하는 암순응 문제의 해결을 통해 운전자의 안전을 도모할 수 있다. 이 방법은 블랙홀 현상 완화뿐만 아니라 터널 출구에서 발생하는 화이트홀 현상에도 적용 가능하며, 차량의 전면부 유리에 국한하지 않고 스마트 안경과 같이 다양한 분야에 적용될 수 있다.

### References

- [1] S. Reception, "Human Vision: Structure and Function of the Human Eye Vol. 27," Encyclopedia Britannica, 1987.
- [2] G. A. Gescheider, Psychophysics: Method, Theory, and Application, 2nd Edition, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 1985.
- [3] J. K. Park, S. H. Park, and H. S. Oh, "Effects of Illumination and Target Size on Time-To-Detect while Recovering Dark Adaptation," Journal of the Ergonomics Society of Korea Vol. 28, No. 4, pp. 71-76, 2009.
- [4] B. H. Crawford, "Visual adaptation in relation to brief conditioning stimuli," Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences Vol. 134, No. 875, pp. 283-302, 1947.
- [5] Ministry of Knowledge Economy, KS Tunnel lighting standards (KSC3703), 2010.
- [6] CIE:88-2004, Guide for the lighting of road tunnels and underpasses 2nd Edition, 2004.
- [7] J. S. Han, J. S. Kil, and H. Kim, "Measurement and Analysis for Adaptation Luminance on the Tunnel Road," The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 5, pp. 168-169, 2011.
- [8] <http://www.gauzy.com>
- [9] <http://www.continental-corporation.com/>
- [10] E. M. Kim, D. Y. Cho, K. S. Chong, and S. H. Kim, "Efficient Methods for Road Sign Database Construction," Journal of Korean Society for Geospatial Information System, Vol. 19, No. 3, pp. 91-98, 2011.
- [11] Nøkleholm, Christoffer, Road Tunnel Entrance Recognition System, 2009.
- [12] H. J. Ryu, S. M. Cho, C. S. Ah, T. Y. Kim et al, "Trends and Market Outlook in Electrochromic Technology," Electronics and Telecommunications Trends, Vol. 30, No. 6, pp. 12-20, 2015.

---

저 자 소 개



**이 중 현(Jung-Hyun Lee)**

2009년 8월 동국대 전기공학과 (공학사)  
2012년 8월 동국대 전자전기공학과 (박사  
수료)  
2015년 9월~현재 동국대학교  
산업기술연구원 전임연구원



**이 동 욱(Dong-Wook Lee)**

1983년 2월 서울대 전기공학과 (공학사)  
1985년 2월 서울대 전기공학과 (공학석사)  
1992년 6월 Georgia Institute of  
Technology (공학박사)  
1992년 8월 ~ 1993년 8월 (주)삼성 SDS  
선임연구원  
1993년 9월 ~ 현재 동국대학교 전자전기공  
학부 정교수