

터널 이용시 광량변화에 따른 운전자 시각순응 소요시간 연구*

오 주 석 박 선 진 이 순 철† 이 종 학 김 종 민 노 관 섭

충북대학교 심리학과

한국건설기술연구원

본 연구에서는 운전중 터널구간 이용시 발생하는 광량변화에 따른 운전자 시각순응에 소요되는 시간을 실험실 조건의 실험을 통해 알아보았다. 연구의 주요문제로 급격한 광량변화를 겪는 조건인 밝은 낮 시간대의 터널통과 상황과 유사한 조명장치를 설치하고, 터널구간 진입시 발생하는 블랙홀 효과와 터널구간 진출시 발생하는 화이트홀 효과에서 운전자의 반응을 살펴보았다. 실험 조건에서는 피험자들에서 컴퓨터 모니터로 자극을 제시하여 이들이 자극에 반응하는 속도가 실험실 내부 조명조건의 변화 이후 어느 시점에서 달라지는지를 측정하였다. 실험중 조명조건은 실제 터널구간 및 터널 외부조건과 유사한 빛 조건을 구현하기 위하여 LED 조명모듈을 이용해 암소시의 평균휘도를 5.26cd/m², 명소시의 평균휘도를 6443.33cd/m²로 제시하였다. 실험에 사용된 자극은 한 자리 숫자로 17인치의 CRT 모니터를 통해 피험자에게 제시되었으며, 매 조명조건 변화시마다 1초씩 한 자리 숫자를 5회 제시하여 각 시점에서 반응속도의 개인내 차이를 비교하고, 이들의 반응속도 변화시점을 통계분석을 통해 알아보았다. 실험의 결과로, 터널 진입시의 블랙홀 효과를 대변하는 암소시 조건과 터널 진출시의 화이트홀 효과를 대변하는 명소시 조건 모두에서 피험자의 시각순응은 조명변화이후 2초에서 3초 사이에 완료되었다. 피험자 연령에 따른 분석결과에서는 광량변화에 따른 각 연령집단의 소요시간 간 주목할 만한 차이가 발생하지 않았으며, 모든 연령의 피험자들이 조명조건 변화 이후 2초에서 3초 사이에 시각순응을 완료하였다. 자극에 대한 단순반응시간은 장노년층 집단이 청년층 및 중년층 집단보다 더 긴 것으로 나타났는데, 이는 노령화에 따른 감각지각 능력 및 신체반응 능력의 저하 때문인 것으로 보인다. 본 실험의 결과가 터널 진입부와 진출부에서 운전자의 안전 확보를 위한 도로구간 설정에 도움이 될 것으로 기대한다.

주요어 : 터널, 시각순응, 블랙홀 효과, 화이트홀 효과, 조명

* 본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구 개발사업(05건설핵심 D05-01)의 지원으로 이루어졌습니다.

† 교신저자 : 이순철, 충북대학교 심리학과, snchul@chungbuk.ac.kr

운전에 관련되는 정보획득의 90% 이상이 시지각 활동에 의해 이뤄지고 있으며, 시각은 다른 감각과 달리 먼 거리의 정보까지도 획득할 수 있어 안전운전과 관련한 가장 중요한 운전능력으로 여겨진다. 따라서 교통 환경의 물리적 변화를 쉽게 식별할 수 있도록 도와주는 빛 자극과 이를 받아들이는 시각기관의 역할은 운전상황에서 매우 중요하다. 운전자의 시지각 기관에 유입되는 빛의 양이 줄어들게 되면, 운전자의 시야범위는 좁아지고 제한된 시각정보만을 처리하게 된다. 차량의 전조등을 켜야만 하는 상황에서는 운전자의 시지각 정보처리 범위가 전조등 범위로 제한되고 그에 따라 운전엔 필요한 정보가 한정된다(이순철, 2000).

시간의 흐름에 따라 자연스럽게 광량이 변화하는 경우 말고도, 터널과 같은 물리적인 교통시설에 의해서도 운전자 시지각에 변화가 생기게 된다. 우리나라는 국토의 70%가 산지로 이루어져 있고, 이 때문에 필연적으로 고속도로에는 터널 시설이 많을 수밖에 없다. 주간엔 운전을 하는 조건에서, 운전자는 터널 유입시와 진출시 모두 급격한 광량(光量)변화 환경에 놓이게 되고, 이 경우 정상시력을 회복하기 위해서는 일정한 시간이 소요되기 때문에 이 시간동안 운전자의 안전을 최대한 확보하고자 터널 시설 개선에 대한 노력들이 이뤄져 왔다. 현재까지 터널구간에서의 안전운전과 관련하여 많은 연구들이 진행되어 왔는데, 그 가운데 특히 터널 유입구간에서의 운전자 시각순응 문제(블랙홀 효과, blackhole effect)와 이를 해결하기 위한 조명설비 관련 연구들을 찾아 볼 수 있다. Eigentler(2006)는 터널 내에서의 주행 안정성을 높이고, 특히 곡선부에서의 주행차로 유지기능을 개선시키고

사고위험성을 줄이기 위해 터널 내부에 조명 시설과 더불어 LED를 이용한 차로구분을 제안하기도 했다.

그러나 터널로 인한 운전자의 시각순응은 터널 유입구간에서만 발생하는 것이 아니라 진출구간에서도 발생하게 된다. 이때는 터널 유입구간과 반대로, 어두운 공간에 적응한 시각기관이 다시 밝은 빛 자극에 적응해야 하는 상황이 발생한다. 이 경우 운전자는 급격한 광량의 변화로 인하여 시각정보 획득에 순간적으로 어려움을 겪는데, 이를 화이트홀 효과(whitehole effect) 혹은 실루엣 현상(silhouette effect)이라고 한다(이미애, 이성기, 한신인, 2002).

이와 같은 화이트홀 현상 때문에 터널 진출구간 직후에는 운전자로 하여금 시력을 회복할 수 있는 일정 간격이 주어져야 하며, 이에 따라 이 구간에서는 도로선형이 유지되어야 하고 터널 진출 직후 인터체인지나 휴게소와 같은 각종 부속 시설물들이 일정 거리를 유지하여 이격되도록 하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 터널 진출 후 운전자의 안전 확보 및 정상주행으로의 회복을 위한 거리 계산에 필요한 운전자의 시각순응시간을 알아보기 위한 실험을 진행하였다.

터널 시설과 관련한 운전자의 시지각 관련 연구

터널 시설과 관련한 운전자의 시지각 특성은 흔히 암순응/명순응 현상으로 대변된다. 여기서 순응이란, 급격한 빛 대비의 변화에 의해 광수용체 세포(추상체와 간상체)가 순간적으로 활성화 되지 못하였다가 점차 정상시력으로 회복되는 현상을 말한다. 터널 내부를

주행하는 것은 마치 야간에 도로를 운전하는 것과 비슷한데, 야간 주행시에 작용하는 위험요소로 섬광(glare)을 들 수 있다. 야간 운전시에 섬광은 낮은 공간 빈도에 대한 간상체의 민감도를 파괴하는 효과를 가져 도로상의 위험요소를 판별하기 어렵게 한다(Wickens, Gordon, & Liu, 2001).

터널 조건에서 이러한 섬광과 비슷한 효과를 내는 것이 터널 진출시 발생하는 화이트홀 현상이다. 화이트홀 현상은 터널 진출부에서 터널 내부의 어두운 조명과 터널 외부의 밝은 자연광의 빛 대비에 의해 차량의 앞에 위치하는 물체의 형태만 검은색으로 보이게 되고, 터널 진출 직후에는 밝은 자연광의 갑작스런 유입으로 시각 기관의 광수용체가 잠시 동안 활성화되지 못하는 현상으로 해석한다(이미애 등, 2002).

현재까지의 국내 터널조명 관련 연구들은 앞서 설명한 화이트홀 효과와는 반대 개념인 블랙홀 효과로 인해 발생하는 도로의 위험요소를 제거하고자 하는 목적으로 이뤄져 왔다. Onaygil(2000)은 터널에서 발생하는 블랙홀 효과에 대한 연구에서 물체를 지각하는데 물체와 배경 간의 휘도대비와 속도가 영향을 미치므로, 터널 경계부에서의 집약적 조명과 터널 입구부에서의 속도규제가 운전자 안전을 위해 중요한 요소로 작용한다고 밝혔다. 이와 비슷한 내용으로 국내에서도 밝은 외부 주행조건에서 어두운 터널로 진입한 직후 발생하는 시지각 능력의 일시적 훼손의 정도를 감소시키고자 터널 입구부의 적정 조명수준이 집중적으로 연구되었는데, 모두 공통적으로 터널 입구부의 조명밝기를 높여 운전자의 시각능력이 어두운 터널 조건에 점차적으로 적응하도록 하며 동시에 운전자들의 터널진입에 대한 심

리적 부담감을 해소시키고자 하는 내용들을 담고 있다(신용균, 이진호, 강수철, 1997; 신용주, 이진규, 2000; 이미애 등, 2002; 한국토지공사, 2003). 이 밖에도, Mühlberger, Wieser와 Pauli(2008)는 터널 내부에서의 적절한 밝기수준 확보가 운전자의 생리학적 긴장반응 해소에 도움을 주며, 이로써 긴급 상황에 적절히 대처하도록 한다는 주장도 했다. 이와 같은 내용에 대한 정책적 근거로, 국제조명위원회 기준(Commission Internationale de L'clairage, 1990)에서는 터널의 조명을 Threshold zone, Transition zone, Interior zone 및 Exit zone의 4개 구간으로 구분하고 있으며, 국내에서는 관련 근거로 한국산업규격 KS A3703 기준(1992)을 마련하고 터널조명 구간을 경계부, 이행부, 완화부, 기본부 및 출구부의 다섯 단계로 나누어 국제조명위원회 기준보다 세분화하여 적용하고 있다. 그러나 이와 같은 관련기준들은 터널 설계시 고려해야 할 광량변화에 따른 운전자 시각순응 소요시간을 명시하지 않고 있다.

신용균 등(1997)의 연구와 김주현, 김호영, 금기정과 김명수(2000)의 연구에 따르면 운전자들은 터널 진입시 주행속도를 감소시켰다가 진출부 직전 구간에 이르러서 주행속도를 터널 진입 전과 동일한 수준으로 올려 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 터널 진출부 구간에서 발생하는 화이트홀 현상에 의해 밝은 낮의 경우 터널 출구부근에서는 모든 장애물이 검은 실루엣으로 보이며, 트럭과 같은 큰 부피의 선행차량이 터널 개구부의 일부를 가리는 경우에는 선행차량을 따라가는 작은 차량이나 혹은 낙하물들이 식별하기 곤란한 상황이 발생하므로(지철근, 이진우, 1997), 이와 같은 터널진출부에서의 가속행동은 터널직후 제시되

는 중요한 정보나 돌발상황에 대해 운전자가 대처하기 어렵게 하는 요소를 가지고 있다.

고령운전자의 특성

지난 2000년도에 우리나라는 전체 인구 가운데 65세 이상 고령자가 차지하는 비율이 7.2%로 고령화 사회에 접어들었으며(통계청, 2004), 이에 따라 고령운전자 및 이들의 교통사고 발생 건수와 사망자 비율은 계속 증가추세에 있다(도로교통안전관리공단, 2004).

고령운전자들의 사고발생 증가 경향의 원인은 이들의 운전행동특성에서 찾아볼 수 있다. 고령운전자의 경우 노화로 인하여 신체능력이 저하하며 작업수행 능력이 감소하는 특징을 보인다. 특히, 교통사고와 관련하여서는 이들의 지각 능력 및 방향감각 능력의 저하가 원인으로 작용하는 것으로 보인다 (박선진, 이순철, 김중희, 김인석, 2006).

고령운전자의 신체기능 저하는 운전행동에 영향을 미쳐 이들로 하여금 더 조심스럽고 신중한 운전을 하도록 한다. 즉, 이들은 다른 연령층의 운전자들에 비해 자신의 운전능력에 대해 확신수준이 낮고, 이로 인해 제한속도가 높은 구간이나, 시야가 제한되고 조명이 낮은 조건에서는 상대적으로 서행운전을 하거나 이러한 조건에서 아예 운전하지 않으려는 보상 운전행동을 보인다(신용균, 이진호, 박지영, 1998; 이순철, 2006). 그러나 이와 같은 신중함에도 불구하고 고령운전자들은 일상 운전행동에서 상대적으로 더 많은 오류행동을 보이며 이와 같은 오류가 사고의 원인으로 작용하고 있다(박선진 등, 2006). 실제로 이순철과 오주석(2007)의 연구결과에 따르면, 운전자의 연령이 증가함에 따라 과속운전이나 음주운전행동

을 감소하는 추세를 보이지만, 급작스런 상황에 대비할 수 있는 상황대처 능력은 저하되는 것으로 나타나고 있다. 또 박선진, 이순철, 엄진섭(2007)은 고령운전자 집단에서 일시적으로 정상운전행동 능력이 감소하고 동시에 오류행동이 증가하는 패턴을 밝혔는데, 이에 대한 원인으로 고령운전자들의 연령증가에 따른 신체기능 저하 및 지각능력과 반응능력의 쇠퇴를 꼽고 있다.

고령운전자의 운전중 오류행동과 관련한 대표적인 신체능력 저하는 시각능력이다. 인간의 시각능력은 30세 이후 매년 0.5%씩 감퇴되어 65세 이상의 경우 일반적인 시각능력의 약 78%만을 가지게 되고, 이에 따라 운전자의 브레이크 반응시간 역시 증가하게 된다. 또, 조도의 변화에 대해 밝은 곳에서 어두운 곳으로 시선을 옮기는 경우 시력 회복에 소요되는 시간을 6초 이상, 반대경우로 어두운 곳에서 밝은 곳으로 시선을 옮기는 경우의 시력 회복 시간을 약 3초로 보는데, 이러한 조도변화에 따른 적응성은 나이에 따라 크게 달라질 수 있다(도철웅, 2005). 이와 같은 내용은 Ball, Beard, Roenker, Miller와 Griggs(1988)의 연구결과에도 밝혀져 있는데, 연령이 증가함에 따라 인간의 가용시각장 범위가 점차 좁아지며 이에 따라 주변시의 기능이 약해진다는 사실이 확인된 바 있다. 또 Dewar(1991)는 교통과 관련한 시각기능이 연령의 증가와 함께 쇠퇴함을 보고하였는데, 노화가 진행되면서 근거리의 사물 식별능력이 떨어지고, 초점의 변경에 시간이 많이 걸리며, 야간시가 급격히 떨어짐을 지적하였다. 또 Staplin, Lococo와 Sim(1987)은 노인들이 젊은층 운전자들보다 중요한 자극에 대한 주의집중에 더 큰 곤란을 겪고 있음을 확인하였다.

즉, 빛 조건 변화에 대해 민감하게 반응할 수 있는 주변시의 기능이 약해짐에 따라 고령 자일수록 급격한 광량변화 조건 하에서 위급 상황에 대처할 수 있는 기능이 약화될 수 있다는 가정도 가능하다. 따라서 본 연구에서는 터널 진출시 운전자에게 요구되는 조도순응시간에 연령이 미치는 영향을 고려하고자 한다.

연구문제

앞서 말한 바와 같이 터널 진출부에서는 운전자들의 시각능력을 일시적으로 방해하는 화이트홀 현상이 발생함에도 불구하고 운전자들의 주행속도가 증가함에 따라 운전자들로 하여금 터널 진출구간에서 안전하게 정상 주행 능력 및 시력기능을 확보할 수 있는 공간을 마련하고자 하는 노력이 필요하다. 특히 현행 규정에 따르면 터널 내부에서는 차로변경 및 앞지르기 행위가 금지되어 있고, 도로안내표지의 설치도 할 수 없기 때문에 터널 진출부로부터 각종 도로안내 표지 및 시설물들을 일정거리 이상으로 이격하고 도로선형을 유지도록 하는 기준마련이 시급하다. 이와 관련하여 본 연구에서는 운전자의 시각순응시간을 터널 진입과 진출 모두의 경우에 대해 실험조건에서 알아보고 관련 지침마련에 도움을 제공하고자 하였다.

방법 및 절차

실험참가자

실험에는 20대에서 70대 사이의 피험자 33명이 참여하였다. 실험내용이 전문적인 운전

표 1. 연령대별 실험 참가자 분포 단위: 명(%)

연령대	20대	30대	40대	50대	60대 이상
N	10(30.4)	8(24.2)	5(15.2)	4(12.0)	6(18.2)

능력을 필요로 하지 않기 때문에 운전수행 여부는 고려하지 않았으며, 운전자 연령에 따른 광량 변화시 시각 반응능력의 차이를 검증하고자 하였으므로, 65세 이상 고령자 6명도 피험자로 포함시켰다. 전체 피험자 33명 가운데 남성은 20명(60.6%), 여성은 13명(39.4%)으로 분포하였다. 피험자의 평균연령은 만 41.82세 ($SD=15.03$)였으며 최소 만 22세에서 최고 만 72세 사이에 분포하였고 세부 연령대별 피험자 분포는 표 1과 같다.

실험도구

본 실험에서 조명조건을 통제하기 위하여 가로 160cm, 세로 165cm, 길이 200cm 크기의 간이 암실을 제작하고 일정수준의 광량을 재현할 수 있는 조명기구를 설치하였다(그림 1). 이러한 조건에서 피험자들로 하여금 컴퓨터 모니터를 통해 제시되는 자극에 대해 키보드로 반응을 하도록 하고 이 반응시간을 1/100



그림 1. 조도순응 소요시간 측정을 위한 실험조건

초 단위로 측정하여 조명 조건별로 비교하였다.

플래시 애니메이션을 이용한 실험자극은 실험을 통제하는 컴퓨터에 별도의 17인치 CRT 모니터와 키보드를 연결하여 피험자에게 제시하였다. 모니터의 해상도는 1024×768(화면주사율 60Hz)이었으며, 피험자와 모니터 간의 거리는 1m로 유지하였다.

조명조건을 통제하기 위한 조명장비는 LED 조명 모듈 6개를 사용하였으며, 실험자의 통제에 따라 5초간 점등 및 소등을 반복하는 타이머 장치를 달아 제작하였다. 조명이 점등 되었을 경우의 밝기수준은 맑은 날 아스팔트 도로포장에 자연광이 반사되는 정도인 6,000cd/m²과 비슷한 수준을 유지하도록 조절하였다. 실험환경이 실제 터널 내부(암소시) 및 외부

(명소시) 조건을 제대로 재현하는지 알아보기 위하여 휘도계를 이용, 어두운 조건과 밝은 조명조건에 대한 평균휘도를 측정하였다. 일반적인 터널의 내부기본 조명준은 시속 80km 주행조건에서 4.5cd/m²이며, 앞에서 언급한 바와 같이 맑은 날 아스팔트 도로포장에 자연광이 반사되는 정도는 6,000cd/m²이다. 본 실험환경에 대한 평균휘도는 어두운 조건에서 5.26cd/m²이고, 밝은 조명조건에서는 6,443.33cd/m²으로 일반적 기준치에 비해 각각 1.17배 및 1.07배 높은 조명수준을 유지해 최대한 현실상황에 근접하도록 하였다(그림 2).

플래시로 제시된 실험자극은 크게 두 가지로, 터널 내부조건을 대변하는 자극(암소시 자극)과 터널 외부조건을 대변하는 자극(명소시 자극)으로 구성하였다. 모든 자극에는 1부터 9

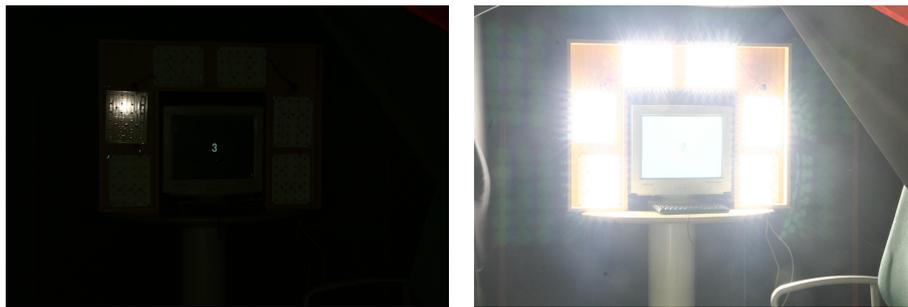


그림 2. 암소시 조건(좌)에서의 자극제시와 명소시 조건(우)에서의 자극제시



그림 3. 암소시 조건에서 제시된 자극(좌) 및 명소시에서 제시된 자극(우)의 예

사이의 한 자리 숫자가 각 1초간 제시되었으며, 암소시 자극의 경우에는 검은 바탕색에 흰 글씨를, 명소시 자극에서는 흰 바탕에 검은 글씨를 제시하였다(그림 3).

실험에서는 먼저 조명이 꺼진 상태에서 암소시 자극 5개를 각 1초씩 총 5초간 제시하고 뒤이어 바로 조명이 점등된 상태에서 명소시 자극 5개를 각 1초씩 5초간 제시하였다. 즉, 피험자들은 명소시 조건에서 5초간 순응한 후 암소시 조건에서 자극에 대해 반응하고, 마찬가지로 암소시 조건에서 5초간 순응한 후 명소시 조건에 대해 반응하였다. 이처럼 암소시 자극 5회와 명소시 자극 5회를 1회귀로 하여 각 피험자에게 총 3회귀(암소시 자극 15개, 명소시 자극 15개)를 실시하였으며, 조명 조건을 번갈아 제시하여 터널 진입 및 진출시와 비슷한 조명 환경을 제공하였다.

절차

실험에 참가한 피험자에게 먼저 키보드 반응에 대한 설명 및 전체 실험과정에 대한 안내를 실시하였다. 이후 실험초기에 피험자의 연령과 성별을 확인 후 기록하고, 피험자에게 실험시작에 대한 동의를 구한 후 바로 실험을 시작하였다. 피험자에게는 정면 모니터에서 한 자리 숫자가 제시되면 가능한 한 빠르고 정확하게 그 숫자가 어떤 숫자인지 소리 내어 읽는 것과 동시에 키보드의 스페이스 바를 눌러 반응을 완료하도록 요구하였다. 피험자의 반응이 확실히 자극을 지각한 상태에서 이루어지는지 확인하기 위해 키보드를 통하여 반응하는 것과 동시에 소리를 내어 제시 자극을 읽도록 하였다.

본 실험에서는 암소시 자극 5개 - 명소시 자

극 5개로 구성된 일련의 실험자극이 총 3회귀(30개 자극) 실시되었으며, 피험자들은 매 1초마다 제시되는 자극에 대해 키보드의 스페이스 바를 통해 반응하였다. 이 반응은 1/100초 단위로 저장되었다. 또 명소시 자극이 제시되는 5초간은 모니터 주위의 LED조명장치가 갑자기 점등 되도록 조작하여 운전자가 터널에서 진출하는 구간에 겪는 화이트홀 효과를 재현하였다.

이와 같은 실험조건과 절차를 이용하여 암소시 조건과 명소시 조건 각각에서 조명변화 이후 자극제시 시점에 따른 피험자들의 반응시간 변화패턴을 살펴보고, 반응시간 변화 양상이 피험자 연령에 따라 차이가 있는지 살펴보았다.

결 과

실험을 통해 획득한 자료로부터 조명수준의 급격한 변화에 대한 피험자들의 반응양상이 어떻게 달라지는지 알아보기 위한 분석을 실시하였다. 분석에서는 암소시 및 명소시 자극에 대해 피험자들이 반응한 값을 각 자극제시 시점(초)별로 평균치를 구하여 사용하였다. 즉, 조명이 변화한 직후 1초부터 5초 사이 매초마다 피험자가 반응한 값의 평균값을 분석대상으로 하였다.

또 피험자의 연령특성에 따라 각 조명조건에서 자극에 대한 반응시간의 변화가 어떻게 나타나는지 알아보고 연령집단 간의 차이가 발생하는 양상을 파악하기 위하여 피험자를 연령기준으로 총 3개 집단(청년층(N=10), 중년층(N=13), 장노년층(N=10))으로 나누어 분석에 사용하였다.

암소시 조건에서의 피험자 시각 순응 소요시간

블랙홀 효과를 재현한 암소시 조건에서의 자극제시 시점별 평균 피험자 반응시간은 표 2와 같이 나타났다.

실험 과정의 암소시 자극제시 시점에 따라 피험자들이 반응한 시간이 어떠한 변화를 보이는지 알아보기 위하여 자극제시 시점과 피험자의 연령대를 독립변인으로 하는 반복측정 변량분석을 실시하였다. 분석 결과, 암소시 조건에서 피험자들의 반응시간에 대한 자극제시 시점($F_{(4, 120)}=58.39, p<.001$)과 연령대의 주효과($F_{(2, 30)}=12.10, p<.001$)가 모두 통계적으로 유

표 2. 암소시 조건에서의 자극제시 시점별 평균반응시간
단위:초(표준편차)

구분	조명변화 후 자극제시 시점				
	1초	2초	3초	4초	5초
청년층	.53(.07)	.44(.08)	.36(.05)	.35(.06)	.35(.05)
중년층	.50(.08)	.44(.11)	.38(.08)	.38(.09)	.38(.09)
장노년층	.66(.14)	.62(.12)	.55(.11)	.51(.13)	.54(.15)
전체	.56(.12)	.49(.13)	.43(.12)	.41(.11)	.42(.13)

의했으며, 독립변인들 간의 상호작용효과는 나타나지 않았다(표 3).

이에 따라 피험자들의 반응시간변화가 자극제시 시점에 따라 변화하는 양상을 보기 위하여 경향분석을 실시하였는데, 분석 결과, 자극제시 시점에 따른 피험자 반응시간의 변화양상은 선형($F_{(1, 30)}=178.58, p<.001$) 및 포물선형($F_{(1, 30)}=33.12, p<.001$)이 모두 통계적으로 유의하여, 단조형으로 감소하는 것이 확인되었다(표 3, 그림 4).

이와 같은 반응시간 변화양상에서 변곡점이 되는 부분을 찾기 위하여 자극제시 시점간 대응비교 t-검정을 실시하였다. 본 연구에서는 시간적 흐름에 따른 차이만을 다루므로, 시간상으로 인접해있는 반응시간 값만을 변인으로 하여 검증하였다. 그 결과, 조명변화 후 1초 시점과 2초에서의 반응이 통계적으로 유의한 차이($t=3.85, p<.01$)를 보였으며, 2초와 3초에서의 차이 역시 통계적으로 유의한 차이($t=6.62, p<.001$)를 보였다. 그러나 이후 3초부터 5초까지의 반응시간은 서로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(표 4).

결과적으로 암소시 조건에서 피험자들의 반

표 3. 암소시 조건에서의 피험자 반응시간에 대한 반복측정 변량분석 및 경향분석 결과

변산원	SS	df	MS	F
연령대	.95	2	.47	12.10***
오차	1.17	30	.04	
자극제시 시점	.51	4	.13	58.39***
Linear	.42	1	.42	178.58***
Quadratic	.08	1	.08	33.12***
자극제시 시점 × 연령대	.03	8	.00	1.57
오차	.26	120	.00	

*** $p<.001$

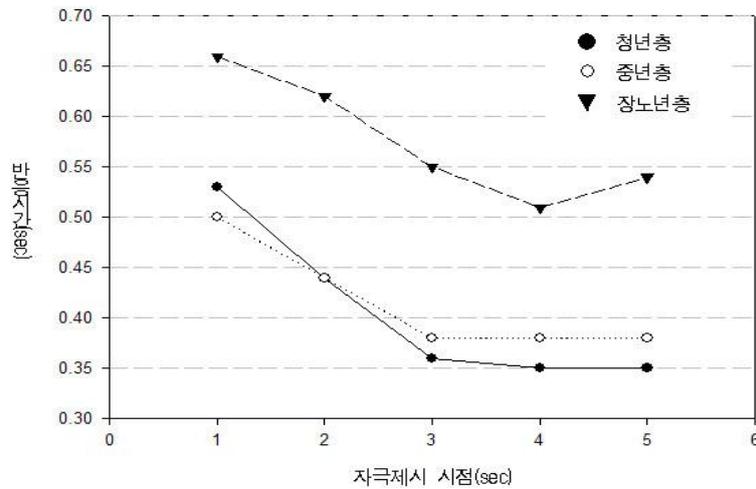


그림 4. 암소시 조건에서 자극제시 시점에 따른 연령집단별 반응시간 변화

표 4. 암소시 조건에서 각 자극제시 시점간의 대응표본 T검정 결과표 단위: 초

대응표본 쌍	Mean of Difference	SD	df	t
1초 - 2초	.06	.09	32	3.845 **
2초 - 3초	.07	.06	32	6.617 ***
3초 - 4초	.01	.04	32	1.366
4초 - 5초	.00	.05	32	-.418

** $p < .01$, *** $p < .001$

응시간 자체는 연령대에 따라 통계적으로 유의한 차이가 검증되었으나(표 3), 이들의 시각 능력 순응시점이나 양상이 통계적 차이를 보이지는 않는 것으로 확인되었다. 즉, 피험자들은 연령에 상관없이 조명이 꺼진 후 2초에서 3초사이 지점까지 순응을 계속하며, 3초가 지난 후에는 순응을 완료하여 자극 제시 시점에 따라 반응시간에 별 차이가 발생하지 않고 있음을 의미한다.

그림 4에서 보는바와 같이 장노년층의 피험자들이 보인 자극에 대한 반응시간은 청년층이나 중년층 피험자들의 반응시간에 비해 현

저하게 늦은 것으로 나타났으나, 본 연구에서는 연령대에 따른 시각능력 순응 소요시간의 차이 및 순응양상의 차이만을 검증하고자 하였고, 연령에 의한 반응시간 차이를 검증하는 것은 연구의 목적이 아니었으므로 이에 대한 사후분석 검증은 별도로 실시하지 않았다.

명소시 조건에서의 피험자 시각 순응 소요시간

앞서 분석한 것과 같은 방법으로 화이트홀 효과를 재현한 명소시 조건에서의 피험자 순응 소요시간을 분석하였다. 명소시 조건에서

표 5. 명소시 조건에서의 자극제시 시점별 평균반응 시간
단위: 초(표준편차)

구분	조명변화 후 자극제시 시점				
	1초	2초	3초	4초	5초
청년층	.42(.10)	.37(.06)	.36(.05)	.34(.05)	.34(.05)
중년층	.48(.09)	.46(.13)	.37(.09)	.35(.09)	.35(.08)
장노년층	.67(.17)	.61(.14)	.53(.12)	.53(.15)	.50(.14)
전체	.52(.16)	.48(.15)	.41(.12)	.40(.13)	.39(.12)

자극제시 시점별 평균 피험자 반응시간은 표 5와 같이 나타났다.

명소시 조명조건에서 조명의 변화 이후 자극제시 시점에 따라 피험자들이 보이는 반응 시간 변화양상을 알아보기 위하여 암소시의 경우와 마찬가지로 자극제시 시점과 피험자의 연령대를 독립변인으로 하는 반복측정변량분석을 실시하였다. 분석 결과, 명소시 조건에서 피험자들의 반응시간에 대한 자극제시 시점 ($F_{(4, 120)}=29.64, p<.001$)과 연령대의 주효과($F_{(2, 30)}=14.20, p<.001$)가 모두 통계적으로 유의했으며, 독립변인들 간의 상호작용효과는 나타나지 않았다(표 6).

명소시 조건에서의 피험자 반응시간변화가 자극제시 시점에 따라 변화하는 양상을 보기 위하여 경향분석을 실시하였으며, 분석 결과, 자극제시 시점에 따른 피험자 반응시간의 변화양상은 선형($F_{(1, 30)}=50.26, p<.001$) 및 포물 선형($F_{(1, 30)}=12.542, p<.01$)이 모두 통계적으로 유의하여, 단조형으로 감소하는 것이 확인되었다(표 6, 그림 5).

이와 같은 단조형의 반응시간 변화양상에서 변곡점이 되는 부분을 찾기 위하여 암소시의 경우와 마찬가지로 방법으로 자극제시 시점간 대응비교 t 검증을 실시하였다. 분석 결과, 조명변화 후 1초에서의 반응과 2초에서의 반응이 통계적으로 유의한 차이($t=3.40, p<.01$)를 보였으며, 2초와 3초에서의 차이 역시 통계적으로 유의한 차이($t=4.54, p<.001$)를 보였다. 그러나 이후 3초부터 5초까지의 반응시간은 서로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(표 7).

즉, 명소시 조건에서도 역시 암소시 조건에서와 마찬가지로 피험자들의 연령에 따른 반응시간 자체의 차이는 통계적으로 그 차이가 검증되었으나, 이들의 시각능력 순응시점이나

표 6. 명소시 조건에서의 피험자 반응시간에 대한 반복측정 변량분석 및 경향분석 결과

변산원	SS	df	MS	F
연령대	1.22	2	.61	14.20***
오차	1.29	30	.04	
자극제시 시점	.40	4	.10	29.64***
Linear	.36	1	.36	50.26***
Quadratic	.03	1	.03	12.54**
자극제시 시점 × 연령대	.05	8	.01	1.68
오차	.41	120	.00	

** $p<.01$, *** $p<.001$

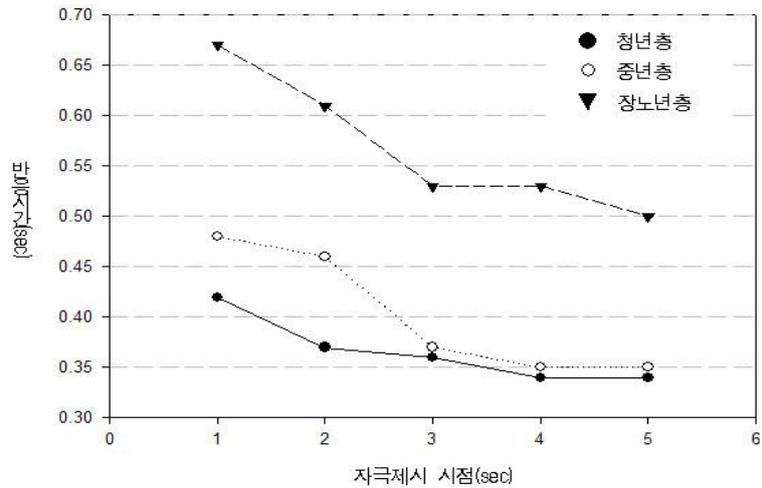


그림 5. 명소시 조건에서 자극제시 시점에 따른 연령집단별 반응시간 변화

표 7. 명소시 조건에서 각 자극제시 시점간의 대응표본 T검정 결과표 단위: 초

대응표본 쌍	Mean of Difference	SD	df	t
1초 - 2초	.04	.07	32	3.40 **
2초 - 3초	.07	.08	32	4.54 ***
3초 - 4초	.01	.07	32	.99
4초 - 5초	.01	.04	32	1.34

** $p < .01$, *** $p < .001$

양상이 연령에 따라 통계적 차이를 보이지는 않는 것으로 확인되었다. 본 결과는 어두운 조건에서 실험조건과 같은 순간적인 빛 자극이 유입되었을 때 피험자들의 시각이 2초에서 3초사이 지점까지 순응을 계속하며, 조명 변화로부터 3초가 지난 후에는 순응을 완료하여 자극 제시 시점에 따라 반응시간에 별 차이가 발생하지 않고 있음을 시사한다.

또한 명소시 조건의 경우에도 암소시 경우와 마찬가지로 장노년층의 피험자들이 기타 연령대의 피험자들보다 늦은 반응시간을 보였으나, 이러한 차이를 살펴보는 것은 본 연구

의 주목적이 아니므로 별도의 사후분석은 하지 않았다.

논 의

전체 분석 결과로부터 암소시 조건에서 피험자들이 제시되는 자극에 대한 반응속도를 회복하는 시점은 조명 변화 이후 2초에서 3초 사이인 것으로 나타났으며, 따라서 터널 진입 조건에서 일반적으로 고려할 암소시 시각순응 시간은 약 3초로 판단할 수 있다. 명소시 조

건의 실험에서도 피험자들이 순간적인 밝은 빛에 적응하는 시점은 암소시의 경우와 마찬가지로 조명 변화 후 2초에서 3초 사이인 것으로 나타났다. 따라서 일반적으로 도로상황에서 고려할 수 있는 명소시 시각순응시간도 약 3초 정도로 판단한다. 피험자들의 시각순응 시점이 실험결과를 통해 2초에서 3초 사이인 것으로 나타나지만, 실제 터널 및 관련시설 설계기준에서 운전자의 안전을 위한 목적으로 조도순응시간을 계산하는 경우는 최대값인 3초를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단한다.

이와 같은 결과는 도철웅(2005)이 제시한 명소시의 조도순응시간인 3초와 거의 일치하는 수치를 보였으나, 암소시의 조도순응시간은 도철웅이 6초를 제안한 것에 반해 본 연구에서는 3초로 더 짧게 나타났다. 이와 같은 차이는 본 실험에서 암소시 조건을 구성함에 있어 완벽한 암흑 상태를 만들지 않고, 일반적인 터널 내부조명조건(규정 4.5cd/m², 실험조건 5.26cd/m²)을 구현했기 때문에 발생한 차이로 이해할 수 있다.

각각의 광량변화 조건에서 피험자들을 연령에 따라 3개 집단으로 구분하여 비교한 결과에서는 연령집단에 따라 조도순응이 완료되는 시점 간에 통계적 차이가 발생하지 않았다. 즉, 모든 연령대의 운전자는 조명이 변화한 후 3초 이내에 시각순응을 완료할 수 있는 것으로 나타났으며, 이는 암소시와 명소시 조건 모두에서 동일하게 나타났다.

비록 사후분석을 통하여 통계적 검증단계를 거치지 않는 않았으나, 피험자 연령대 조건에 의한 반응시간 차이도 통계적으로 유의한 수준인 것으로 나타났다. 분석 결과에서 보듯, 모든 조명변화 조건에서 연령이 증가에 따른 자

극제시 시점에서의 반응속도 증가가 장노년층 피험자들에게서 두드러지게 나타난다. 또 이러한 반응속도의 차이는 조명변화 이후 시간이 지남에 따라 줄어들지 않고 일정하게 유지되는 모습을 보이는데, 이는 조명수준의 변화 때문이라기보다는 연령증가 및 노화에 따른 신체적 능력의 쇠퇴에 기인하는 것으로 판단한다. 갑작스런 조명변화로부터 회복된 이후에 청년층 피험자들은 자극에 대한 반응시간이 평균 0.35초 정도였던 것에 비해 장노년층의 피험자들은 약 0.53초 정도의 반응시간을 보이는 것으로 나타났다.

이와 같은 결과가 터널 진입부 및 진출부의 조명조건 및 도로선형 설계·시공에 유용하게 사용될 것으로 기대한다. 우선 터널 진입부에서 발생하는 블랙홀 효과 감소를 위한 조명설치 구간을 유연하게 조정할 수 있으며, 운전자의 시각순응 소요시간 및 고령자의 인지반응 속도를 고려한 도로선형 유지구간의 산출이 가능하다. 현행 규정상으로 터널구간이 일정 길이 이상이어야 내부 조명설치가 의무화 되는데, 이와 같은 규정에 의해 도심부의 지하차도를 비롯한 길이가 짧은 터널구간에는 조명설치가 되지 않아 광량변화조건에서 갑작스러운 상황에 직면했을 때 운전자가 위험에 처할 가능성이 있다. 또, 터널 진출부에 화이트홀 효과가 발생하는 구간 내에서는 운전자가 시각순응을 완료하고 적절한 인지반응을 할 수 있는 만큼의 여유를 제공하기 위해 터널 진출부 및 연계구간에서는 일정거리동안 도로 선형을 유지하고 운전행동에 영향을 미칠 수 있는 중요한 정보제공 및 도로시설물(나들목, 휴게소 등) 설치를 삼가는 것이 중요하다. 따라서 일괄적인 거리나 도로 선형 판단으로 터널의 조명을 설치하기 보다는 광량

변화 조건에서의 운전자 시지각 특성을 활용하여 운전자의 안전을 도모하는 것이 바람직하다고 판단한다.

본 연구에서는 피험자들의 연령대를 크게 세 집단으로 나누어 연령의 효과를 분석하였다. 이 가운데 65세 이상의 고령자 피험자들의 자료도 상당 비율 연구에 포함이 되어 사실상 고령자들의 광량변화에 대한 시각순응 소요시간을 판별하는 데는 무리가 없을 것으로 판단한다. 그러나 연령이 시각순응에 미치는 영향력과 연령증가에 따른 효과의 변화 등을 좀 더 상세하게 알아보기 위해서는 실험의 표본을 확대하여 실시하는 것이 필수적인 과업일 것이다.

또한 본 연구에서는 간이 암실 조건에서의 광량변화에 대한 시각순응 소요시간 만을 측정할 바, 실제 터널 이용시 운전자의 시각순응에 영향을 미칠 것으로 예상되는 다양한 변인들을 차후의 연구에 포함할 필요가 있다. 터널의 진입 및 진출 구간에서 하늘부분과 입출구, 그리고 산지 등 다양한 전경 및 배경의 요소들이 운전자의 시각장(visual feild)에서 차지하는 비율이나, 광원의 위치, 빛의 유입 각도 등은 시각순응에 영향을 미치는 중요한 요소가 될 것으로 판단한다. 따라서 추후에는 이들 요소의 효과를 다양하게 살펴볼 수 있는 시뮬레이션 실험이 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

김주현, 김호영, 금기정, 김명수 (2000). 고속도로 터널구간에서의 운전자 시각행태 변화에 관한 연구. 대한토목학회논문집, 20, 273-282.

도로교통안전관리공단 (2004). 교통사고 통계 분석.

도철웅 (2005). 교통공학원론. 서울: 청문각.

박선진, 이순철, 김종희, 김인석 (2006). 오류와 착오가 고령운전자의 운전행동에 미치는 영향. 한국심리학회지: 사회문제, 12, 55-79.

박선진, 이순철, 엄진섭 (2007). 운전일탈행동과 정상운전행동이 가해사고에 미치는 영향. 한국심리학회지: 산업및조직, 20, 21-41.

신용균, 이건호, 강수철 (1997). 고속도로 기하구조가 운전자 운전행동에 미치는 영향. 제2회 교통과학연구발표회 논문집, 391-406.

신용균, 이건호, 박지영 (1998). 노년층 운전자의 시지각 및 운전행동. 교통안전연구논집, 17, 153-168.

신용주, 이진규 (2000). 도로터널 조명설계 기술해설(1). 조명·전기설비. 14(4), 75-82.

이미애, 이성기, 한신인 (2002). 고속도로 터널의 시각순응시설. 조명·전기설비. 16(5), 46-51

이순철 (2000). 교통심리학. 서울: 학지사.

이순철 (2006). 고령운전자 교통사고의 심리적 요인. 한국심리학회지: 사회문제, 12, 149-167.

이순철, 오주석 (2007). 운전행동결정요인이 위험운전, 주의행동 및 피로대처에 미치는 영향. 한국심리학회지: 산업및조직, 20, 395-414.

지철근, 이진우 (1997). 도로터널 조명시설의 설계기준. 조명·전기설비. 11(1), 14-23.

통계청 (2004). 고령자 통계.

한국산업규격 (1992). 터널조명기준(KS A 3703).

- 한국토지공사 (2003). 터널·지하차도의 조명 및 방재시설 개선방안 연구.
- Ball, K. K., Beard, B. L., Roenker, D. L., Miller, R. L., & Griggs, D. S. (1988). Age and visual search: Expanding the useful field of view. *Journal of the Optical Society of America*, 5, 2210-2219
- Commission Internationale de L'eclairage (1990). *Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses* (CIE88).
- Dewar, R. E. (1991). The Driver: Improving Performance to Improve Safety. *ITE Journal*, 61(7), 33-37.
- Eigentler, K. (2006). Experiences with LED-based visual guidance systems in tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21, 325.
- Mühlberger, A., Wieser, M. J., & Pauli, P. (2008). Darkness-enhanced startle responses in ecologically valid environments: A virtual tunnel driving experiment. *Biological Psychology*, 77, 47-52.
- Onaygil, S. (2000). Parameters Affecting the Determination of the Tunnel Threshold-Zone Luminance. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 24, 119-126.
- Staplin, L., Lococo, K., & Slim, J. (1987). *Age-Related Diminished Capabilities and Driver Performance*. FHWA, U.S. Department of Transportation.
- Wickens, C. D., Gordon, S. E., & Liu, Y. (2001). 인간공학[*An Introduction to Human Factors Engineering*]. (이재식 역). 서울: 시그마프레스. (원전 1998년에 출판)
- 1차 원고접수 : 2008. 10. 8
2차 원고접수 : 2008. 11. 22
최종게재결정 : 2008. 11. 23

A Study of the Necessary Time for Drivers' Visual Adaptation at the Tunnels

Ju Seok Oh¹⁾ Sun Jin Park¹⁾ Soon Chul Lee¹⁾
Jong Hak Lee²⁾ Jong Min Lee²⁾ Kwan Sub Noh²⁾

¹⁾Dept. of Psychology, Chungbuk National University

²⁾Korea Institute of Construction Technology

We have conducted an laboratory experiment to understand the necessary time for drivers' visual adaptation at the tunnels. For this study, we used some lightning equipments to reproduce the tunnel and roads environment of sunny daylight time, because drivers need the longest necessary time for the visual adaptation under this lightning condition. We reproduced lightning conditions which are kin to 'Black-hole Effects' and 'White-hole Effects', then measured the subjects' reaction patterns to the visual stimulus. As the experimental task, the subject are told to press the spacebar as soon as possible when they saw single digit on the 17" CRT monitor and say which digit it was as correct as possible. The lightning conditions divided into two; 'Brightness' and 'Darkness'. The luminance of brightness condition was 6443.33cd/m² and darkness condition had 5.26cd/m² which are similar to the environments of tunnels' inside and boundary. As the result, we could confirm the subjects' visual adaptation completion between 2 and 3 seconds after the lightning alternation in all conditions. We expected the effects of age on the difference of necessary time for visual adaptation, however, there was no significant difference among three age groups. We also could find the difference of reaction time among the age groups, and elderly subjects showed significantly longer reaction time than any others. This difference could be explained by effects of aging. This experiment's result would be a helpful clue to design tunnels and near roads for drivers' safety.

Key words : Tunnels, Visual Adaptation, Black-hole Effects, White-hole Effects, Lightning