

2D와 3D 디스플레이로 구현된 운전 시뮬레이션에서 운전자의 종적 차량통제 수행, 주관적 피로감 및 지각된 현실감의 차이*

Differences in Driver's Longitudinal Vehicle Control, Subjective Fatigue, and Perceived Fidelity in 2D and 3D Display Driving Simulation

박동진 · 이재식†

Dong-Jin Park · Jaesik Lee†

부산대학교 심리학과

Department of Psychology · Pusan National University

Abstract

In this study, drivers' longitudinal car control, subjective fatigue, and perceived fidelity were compared between 2D and 3D display driving simulation. The results can be summarized as followings. First, in all target speed conditions, the drivers tended to drove faster in 2D display condition than 3D display condition. Second, speed deviation from target speed increased as target speed decreased. Third, distances between the lead vehicle and the driver's vehicle were significantly reduced in the 3D display condition when the speeds of the lead vehicle were relatively fast(i. e., over 80km/h). Fourth, although the perceived fidelity was not significantly different between the two display conditions, subjective fatigue was higher in the 3D display condition than in the 2D display condition.

Key words: 2D vs. 3D driving simulation, speed maintenance, car following, subjective fatigue, perceived fidelity

요약

본 연구에서는 2D 화면과 3D화면으로 각각 제시된 운전 시뮬레이션 환경에서 운전자의 종적 차량통제, 주관적 피로감 및 지각된 현실감에서의 차이를 비교하였다. 본 연구의 결과들을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 실험참가자들은 미리 정해진 네 가지 수준의 목표속도(60, 80, 100 및 120km/h)를 유지할 때 3D 조건보다는 2D 조건에서, 그리고 목표속도가 낮을수록 목표속도에 비해 더 빠르게 운전하였고, 이러한 경향은 목표속도 조건과 상관없이 일정하였다. 둘째, 선행차량과의 차간거리 유지수행에 대한 분석 결과, 2D 조건에 비해 3D 조건에서 실험참가자들은 선행차량과 더 근접한 차간거리를 유지하며 주행하였는데, 특히 선행차량의 주행속도가 비교적 느렸던 조건(즉, 60km/h)에 비해 비교적 빨랐던 조건(즉, 80 및 100km/h)에서 이러한 경향이 두드러졌다. 셋째, 속도 유지 과제와 선행차량과의 차간거리 유지수행 모두에서 2D 조건에 비해 3D 조건에서 실험참가자들이 경험하는 피로감의 수준이 더 높았으나 주관적 현실감에 대한 평가에서는 두 가지 과제 모두에서 2D와 3D 조건에 따라 유의한 차이가 관찰되지 않았다.

주제어: 2D vs. 3D 운전 시뮬레이션, 속도 유지, 차량추종, 주관적 피로감, 지각된 현실감

* 이 논문은 한국연구재단의 일반공동연구지원에 의해 연구되었음(NRF-2013S1A5A2A03045179).

† 교신저자 : 이재식, 부산대학교 심리학과 교수, (609-735) 부산광역시 금정구 부산대학교63번길 2 (장전동)

Tel : 051-510-2131

E-mail : jslee100@pusan.ac.kr

1. 서론

운전자의 운전수행을 측정하고 비교하고자 하는 연구뿐만 아니라 자동차의 기계적/역학적 최적 설계를 위해 많이 사용하고 있는 방법 중 하나는 운전 시뮬레이션이다. 운전 영역에서 운전 시뮬레이션이 많이 사용되는 가장 큰 이유 중 하나는 이 방법이 다른 방법들이 갖지 못하는 장점을 많이 갖고 있기 때문이다. 운전자 행동 연구를 위해 주로 사용되는 다른 방법들에 비해 운전 시뮬레이션은 실험 조건에서의 변인들에 대한 통제성(controllability)과 실험장면의 현실성(fidelity)을 모두 확보하는 것이 가능하기 때문이다.

이러한 장점들 때문에 운전 시뮬레이션이 운전자의 운전수행 분석에 많이 사용되는 수단이 될 수 있다는 것과 관련하여 제기되는 이론적/실제적 문제 중 하나는 운전 시뮬레이터의 현실감을 높이기 위해 어떠한 변인이 고려되어야 하고, 또 이러한 변인들이 어떠한 방식으로 운전시뮬레이터에 구현되어야 하는가이다. 최근 들어 영상기술의 발달과 함께 TV나 영화를 비롯한 몇 영역에서 3차원(3-dimensional, 이하 '3D'로 표기함) 디스플레이의 활용이 증가하고 있다. 3D 디스플레이를 사용하고자 하는 가장 주된 목적 중 하나는 2차원(2-dimensional, 이하 '2D'로 표기함) 디스플레이를 통해서 구현할 수 없는 양안시차(binocular disparity) 정보를 제공하여 시청자 혹은 관찰자들에 추가적 공간감과 영상이 주는 현실감을 높이고자 하는 것이다(Park, Li, & Kim, 2013). 이러한 기술적 적용은 운전 시뮬레이션의 영역에도 가능할 것이다(Arjona & Menéndez, 2004).

그러나 3D 디스플레이를 제공하는 운전 시뮬레이션이 2D 환경에 비해 운전자의 운전수행 측정치뿐만 아니라 시각피로감 등과 같은 운전 시뮬레이션에서 기본적으로 고려되어야 하는 요인들에서 어떠한 차이를 보이는지에 대해서는 아직 많은 분석이 이루어지지 않은 상태이다. 본 연구의 목적은 2D와 3D 디스플레이로 각각 제시된 운전 시뮬레이션 환경에서 운전자들의 속도 유지와 선행 차량과의 거리유지 수행, 그리고 운전자들이 경험하는 피로감과 현실감을 상대적으로 비교하는 것이다.

아래에서는 2D와 3D 디스플레이가 갖는 특징 및 시각피로감의 문제, 그리고 본 연구에서 살펴보고자 하는 운전자의 종적 차량통제(속도 유지와 차간거리 유지)가

2D 혹은 3D 환경과 어떠한 관련성을 갖는지 기존 연구들의 개관에 기초하여 기술하였고, 특히 각각의 측면에 대해 본 연구의 목적을 좀 더 세부적으로 기술하였다.

1-1. 2D와 3D 디스플레이

우리는 3D 공간에서 깊이를 지각하고 이를 통해 공간에 대한 적절한 정보처리와 공간 항행을 수행할 수 있다. 실제 3D 공간에서의 깊이지각은 안구의 수렴(convergence)이나 조절(accommodation) 과정 혹은 두 눈 사이의 거리에 의한 양안시차(binocular disparity) 등의 정보에 의해 가능하다. 그러나 3D 정보는 비단 3D 공간에서만 구현 가능한 것은 아니다. 즉, 2D 환경에서도 사람들은 공간적 깊이감을 경험할 수 있는데, 이것은 주로 몇 가지의 지각적 단서들을 자동적이고 하향적 방식으로 처리함으로써 가능하다. 그러한 지각적 단서들은 회화적 단서(pictorial cue)라고 불리기도 하는데, 여기에는 대상들의 중첩, 상대적 크기나 높이, 직선조망, 결기울기, 음영 등이 포함된다. 즉, 이러한 단서들을 사용하면 2D 디스플레이 상에서 입체감을 경험할 수 있게 되는 것이다. 그러나 회화적 단서들을 통한 2D 평면에서의 깊이지각은 우리가 그러한 단서들을 통해 깊이가 있을 것으로 해석한 결과일 뿐 실제로 깊이가 존재하는 것은 당연히 아니다.

최근의 발달된 영상기술의 적용을 통해 2D 디스플레이 상에서 3D 영상을 경험할 수 있게 되었다. 2D 평면에서 실제와 같은 깊이감을 지각하기 위해 필수적으로 사용되어야 하는 기술은 우리의 두 망막에 맺히는 이미지를 두 안구 사이의 거리만큼 분리하여 제시함으로써 양안시차를 인위적으로 제공하는 것이다. 즉, 동일한 디스플레이 상에서 두 안구에 서로 다른 영상을 제공하는 것이다(Park et al., 2013). 이러한 방식으로 구현되는 3D 영상은 3D TV나 영화를 시청하는데 많이 적용되고 있다.

3D 디스플레이를 이용한 시뮬레이션 환경에서 오퍼레이터의 수행을 평가하거나 이들의 수행을 보조하고자 하는 시도는 일반인을 대상으로 한 운전 영역보다는 군사용, 원격조작 영역 혹은 위험물 취급 등의 목적을 갖는 영역에서 먼저 시작되었고(Schuemie et al., 2001), 이에 대한 연구는 지금도 활발하게 진행되고 있

다(Chen, Oden, & Drexler, 2010). 예를 들어, 군사용 목적으로 3D 디스플레이를 이용한 시뮬레이션이 주목을 받기 시작한 것은 2D 환경에서의 유인차량에 대한 간접-시각 운전(indirect-vision driving: 즉, 실제 환경에서의 차량에 대한 직접적 통제가 아닌 2D 단말기에서 제공되는 간접적 시각정보를 통한 차량 통제)에서 오퍼레이터들의 수행 효율성이 매우 감소한다는 발견이 있는 이후였다(GDLS, 2007). 이에 따라 실제 환경에 대한 3차원적 공간정보의 제공이 가능한 3D 디스플레이가 활용되기 시작하였는데, 그 결과 2D 환경에 비해 3D 환경에서는 오퍼레이터들이 환경 정보를 더 빠르고 정확하게 탐지하거나 지각하고, 거리를 더 정확하게 추정하며, 대상에 대한 더 높은 재인 수행을 보인다는 것이 발견되었다(e. g., Singer et al., 1995). 이와 유사하게 로봇에 대한 원격조작 수행을 2D와 3D 디스플레이 환경에서 각각 비교한 Chen 등(2010)의 연구에서도 2D 환경에 비해 3D 환경이 참가자들의 전반적 조종, 장애물 회피, 지형 탐색, 거리 및 깊이 지각 등의 측면에서 상대적으로 우수한 수행을 가져온다는 것이 관찰되었다.

위에서도 지적하였듯이, 3D 환경을 지원하는 운전 시뮬레이션을 통해 일반 운전자의 운전수행을 직접 비교한 연구는 매우 적다. 이러한 소수의 연구 중 2D와 3D 운전 시뮬레이션 환경에서 운전자들이 미리 정해진 지점에 얼마나 정확하게 차량을 정지시킬 수 있는지 비교한 Kim 등(2005)의 연구에서는 2D 환경에 비해 3D 환경에서 운전자들의 차량정지 수행이 상대적으로 더 우수하다는 것을 발견하였다. 특히, 이 연구에서 실험참가자들은 2D 환경에 비해 3D 환경에서 정지 지점과 좀 더 가까운 지점에서부터 감속하기 시작하고, 이후 가속과 감속 반응을 반복하는 경향이 더 컸는데, 이것은 실제 운전상황과 더 유사한 방식으로 차량 정지 책략을 사용한 것이다.

그러나 이 연구는 결과를 일반화하여 해석하기에는 실험참가자의 수가 너무 제한적(4명)이었고, 운전수행 측정치 또한 차량의 정지거리 수행만을 측정하였다는 한계가 있다. 이러한 문제와 관련하여 본 연구에서는 비교적 충분한 수의 실험참가자를 통해 운전자의 운전수행을 평가하는데 중요하게 사용되는 측정치인 속도 유지와 차간거리 유지 수행을 모두 측정하여 2D와 3D 환경에 따른 운전자의 수행을 비교하고자 한다. 특히 속도 유지와 차

간거리 유지는 실제 3D 환경에서 운전자에게 제공되는 깊이단서들의 변화에 의존하기 때문에 운전장면에 대한 깊이단서들이 차별적으로 제공되는 본 실험의 목적에 잘 부합하는 종속 측정치가 될 수 있을 것이다.

1.2. 속도 유지와 차간거리 유지

본 연구에서 2D와 3D 조건에 따른 운전자의 운전수행을 비교하기 위해 운전자의 속도 유지 과제와 선행차량과의 차간거리 유지 과제를 선택한 것은 실제적 측면과 이론적 측면 두 가지를 모두 고려한 것이다. 먼저 실제적인 측면에서 보면 운전자의 목표속도 유지 과제와 선행차량과의 차간거리 유지 과제 수행을 평가하고 분석하는 것은 운전자의 운전수행을 이해하는데 기본적으로 충족되어야 하는 조건이기 때문이다. 운전자들이 운전 중에 수행하여야 하는 일차적 과제에는 차선의 방향에 맞추어 차선을 벗어나지 않고 주행하는 횡적(lateral) 차량통제 과제와 적절한 주행속도를 유지하거나 선행차량과의 거리를 유지하는 종적(longitudinal) 차량통제 과제로 구분될 수 있다(Wickens et al., 2004). 이 중에서 과속운전이나 선행차량과의 적절한 차간거리 유지 실패 등으로 대표되는 종적 차량통제에서의 실패는 대부분의 경우 심각한 결과를 가져오는 사고로 이어질 수 있다. 과속운전이나 선행차량과의 안전거리 유지 실패로 인해 발생하는 대표적인 사고가 바로 추돌 사고이다. 이재식(2000)에 따르면 우리나라에서 추돌사고가 자동차 사고에서 차지하는 비율은 22~28% 정도이고, 미국은 대략 30% 정도이며, 일본의 경우 교통사고 유형 중 가장 높은 비율을 차지하는 것이 바로 추돌사고이다(Dingus et al., 1997; Iwashita et al., 2011).

이러한 추돌사고 원인은 운전자의 부주의가 대략 60%를 정도 차지하지만(Lee et al., 2002), 자신의 주행 속도에 대한 추정 실패나 선행차량과의 차간거리 추정 실패도 중요한 원인이 된다(Iwashita et al., 2011). 특히 자신의 주행속도나 선행차량과의 거리에 대한 추정은 운전을 하는 동안 지속적으로 요구되는 과제일 뿐만 아니라 차량 정지, 장애물과의 충돌 회피 혹은 선행차량 추월을 포함한 기본적인 종적통제 운전 기술을 반영하는 과제들이다(Kemeny & Panerai, 2003). 이에 따라 운전기술을 반영하는 대표적인 하위과제이면서 이

와 동시에 추돌사고와 밀접한 관련이 있는 목표속도 유지나 선행차량과의 차간거리 유지 과제가 다양한 운전상황이나 운전자의 조건(예를 들어, 연령이나 성차 혹은 음주 등)에 따라 어떠한 방식으로 달라지는지에 대한 관심은 운전행동을 연구하는 영역에서는 기본적으로 측정되는 변인들이 되었다(Panerai et al., 2001).

그러나 이러한 운전자의 종적차량 통제 수행치를 실제 운전환경에서 측정하거나 평가하는 것은 매우 어려운 문제이다. 즉, 연구에서의 윤리적인 문제는 말할 것도 없고, 가외변인들에 대한 완전한 통제가 거의 불가능하다(Panerai et al., 2001). 이에 따라 운전 상황에서의 운전자의 속도와 거리에 대한 지각적 과정(좀 더 실제적인 용어를 사용하면 운전자의 속도 유지와 차간거리 유지)을 이해하는데 운전 시뮬레이션 기법이 많이 사용된다(Koskela et al., 2011; Arjona & Menéndez, 2004). 여기에서 제기되는 중요한 문제가 바로 운전 시뮬레이션 환경에서 제공되는 시각 정보들이 이러한 운전자의 차량에 대한 종적통제 수행을 타당하게 측정하는데 얼마나 실제와 근접할 수 있는가(즉, 연구 상황의 충실도 혹은 현실감) 하는 것이다.

앞에서도 기술되었듯이 기존의 많은 운전 시뮬레이션 연구들은 2D 화면을 이용한 운전장면을 제공하였으나 최근에는 3D 입체화면을 이용하여 운전장면을 제공할 수 있는 기술이 적용되고 있다. 2D 화면에 비해 3D 화면이 갖는 가장 중요한 특징은 양안시차 정보를 제공할 수 있다는 점인데, 이러한 양안시차는 관찰자의 깊이지각을 높이는 효과를 갖는다. 깊이지각을 통해 관찰자는 대상과의 상대적 거리뿐만 아니라 자신의 움직임 속도에 대한 정보를 좀 더 현실적 상황과 유사하게 얻을 수 있다. 따라서 기존의 2D 화면을 이용한 운전 시뮬레이션과 비교하여 3D 화면을 이용한 운전 시뮬레이션 환경에서 운전자의 거리나 속도 추정이 어떠한 차이를 갖는지 검토하는 것은 이론적, 실용적 측면에서 모두 중요한 의미를 가질 수 있다.

본 연구에서는 3D 화면이 갖는 깊이지각에 대한 이러한 추가적 단서(즉, 양안시차)가 운전자의 거리나 속도 추정에 영향을 미칠 수 있기 때문에 2D 화면 혹은 3D 화면이 제시된 운전 시뮬레이션 환경에 따라 이들의 목표속도 유지나 선행차량과의 차간거리 유지 수행에서 차이가 있을 것으로 기대된다.

1-3. 주관적 피로감과 지각된 현실감

위에서 기술한 운전수행치의 타당한 측정 이외에 운전 시뮬레이션을 통해 운전자의 운전수행을 연구하는데 기본적으로 고려해야 하는 또 다른 측면은 운전 시뮬레이션에 의해 실험참가자들이 얼마나 피로감을 경험하는지, 그리고 운전자의 입장에서 운전 시뮬레이션이 제공하는 제반 조건들이 실제 운전상황과 얼마나 유사한지의 여부이다.

운전 시뮬레이션 방식의 연구에서 운전자들이 경험하는 신체적/심리적 피로감의 대표적인 하위영역은 시뮬레이터에 의해 유도된 운동멀미감(simulator-induced motion sickness)인데, 이를 일반적으로 시뮬레이터 멀미감(simulator sickness)이라고 부른다. 시뮬레이터 멀미감에 영향을 미치는 요인들에는 광학흐름(optical flow), 유용한 시각장(useful field of view) 및 시각도(visual angle) 등 다양하지만 가장 일반적인 시뮬레이터 멀미감의 원인은 운동(혹은 움직임) 정보에 대한 인간의 시각각 체계와 전정감각 체계 사이의 불일치이다(Stoner, Fisher, & Mollenhauer, 2011). 우리가 일상적 상황에서 공간을 실제로 이동할 때 우리의 시각각과 전정감각은 움직임에 대한 동일한 정보를 동시에 제공한다. 그러나 운전 시뮬레이터를 운전할 때 시각각 체계는 디스플레이 공간 속을 우리가 이동하고 있다는 것을 경험하도록 하지만, 시뮬레이션 상황에서는 우리의 신체가 실제로 움직이는 것은 아니기 때문에 전정감각 체계는 움직임에 대한 정보를 제공하지 않는다. 이러한 불일치 혹은 괴리가 시뮬레이터 멀미감을 야기하는 가장 중요한 원인인 것이다.

본 연구에서도 이러한 시뮬레이터 멀미감이 2D 혹은 3D로 구현된 운전 시뮬레이션 환경에서 어떠한 차이를 보이는지 비교하고자 한다. 특히 시뮬레이터 멀미감은 시각적 피로감이나 속 울렁거림, 혹은 신체적 불편감과 같은 다양한 형태로 나타날 수 있기 때문에 3D 영상시청 상황에서 발생할 수 있는 이러한 다양한 피로감 차원들을 측정할 수 있도록 개발된 이형철(2009)의 척도를 사용하고자 한다. 이 척도에 대한 자세한 기술은 아래에 제시되어 있다.

2D 혹은 3D로 구현된 운전 시뮬레이션 환경에서 실험참가자들이 경험하는 피로감의 차이를 비교한 연

구 결과는 지금까지 거의 보고되지 않았다. 다만, TV나 영화 시청에서 관찰자들이 경험하는 시각피로감을 2D 조건과 3D 조건에 대해 비교한 연구는 많이 보고되었는데(e. g., Lambooi et al., 2009), 이들의 연구에 따르면 일반적으로 3D 화면의 시청은 2D에 비해 더 많은 시각피로감을 유발한다. 2D 화면이 3D 화면에 비해 시각적 피로감을 더 심하게 야기하는 이유는 다양하지만(예를 들어, 입체안경을 통해 각 안구에 맺히는 이미지 사이의 혼선이나 이미지들 사이의 정렬이 어긋나는 것 등), 그 중에서 가장 많이 거론되는 것이 수렴-조절 불일치(vergence-accommodation conflict)이다(e. g., Hoffman et al., 2008; Kim et al., 2005).

시각적으로 관찰하는 대상의 원근거리에 따라 안구가 안쪽으로 모이는 각도가 달라지거나(수렴) 혹은 수정체의 두께가 달라지는데(조절), 3차원 공간(실제 세계)에서는 수렴과 조절이 결합되어 동시에 발생하기 때문에 이 두 가지는 항상 일치하게 된다. 그러나 3D TV나 영화와 같이 2D 평면에 3D로 구현된 가상적 3D 환경에서는 이러한 수렴-조절 결합이 해제되어 수렴과 조절 사이의 불일치가 발생하게 된다. 즉, 3D 화면은 관찰자로부터 일정한 거리에 있기 때문에 관찰자의 안구는 조절과정을 통해 일정한 거리의 화면에 초점을 맞출 수 있지만, 3D 화면 속의 대상들은 양안 시차에 의해 깊이가 달라지고 이러한 서로 다른 깊이에 대해 안구의 수렴점도 달라지기 때문에 조절과정에 의한 초점맞추기(focusing)와 수렴과정 사이에 불일치가 발생하는 것이다. 이러한 수렴-조절 불일치는 3D 화면을 시청하는 관찰자에게 시각피로감을 유발시키는 주요 원인이 된다(Park et al., 2013).

3D TV나 영화의 시청과정에서 발생하는 관찰자의 시각피로감과 3D 운전 시뮬레이션 환경에서 운전자들이 경험할 수 있는 시각피로감은 한 가지 근본적인 차이가 있다. 즉, 3D TV나 영화는 관찰자의 반응과는 무관하게 움직이는 영상을 제공하는 반면, 운전 시뮬레이션 환경에서는 실험참가자의 운전 시뮬레이터 차량 조작 방식에 의해 시뮬레이터 화면의 요소들(예를 들어, 실험참가자의 브레이크나 액셀러레이터 조작으로 인한 화면 움직임 속도에서의 차이 혹은 조향장치 조작으로 인해 화면이 좌우방향으로 움직이는 것 등)이 변화된다. 이것은 위에서도 기술하였듯이 실험참

가자의 시각각과 전정각각 사이의 불일치를 야기하고 그 결과 시뮬레이터 멀미감을 유발하는 주요 원인이 된다. 따라서 3D 화면으로 제시된 운전 시뮬레이션 환경에서 실험참가자들은 시각피로감에 영향을 미치는 두 가지 요인들 즉, 수렴-조절 불일치와 시각각-전정각각 불일치를 모두 경험하게 될 것이다. 따라서 운전 시뮬레이션을 3D 화면으로 구성하여 운전자에게 제시하는 경우에는 2D 운전 시뮬레이션 환경에 비해 운전자의 시각피로감이 더 높을 것으로 예상된다.

위에서도 언급하였지만, 운전 시뮬레이션이 갖는 가장 큰 장점 중 하나는 비교적 현실 세계와 유사한 운전 조건을 제공함으로써 연구 결과의 외적타당도를 높일 수 있다는 점이다. 특정 운전 시뮬레이션 환경이 이렇게 현실 세계를 적절하게 반영하여 현실 세계에서와 유사한 형태의 그래픽을 제공하는 경우 일반적으로 운전 시뮬레이션 디스플레이의 '충실도(fidelity)'가 높다고 표현한다. 실험참가자의 입장에서는 운전장면에 대한 현실감이 높아지는 것 혹은 운전상황에 대한 안면타당도가 높아지는 것이 될 것이다. 본 연구에서 3D 디스플레이가 제공된 운전 시뮬레이션 조건에서는 2D에서 제공하지 못하는 양안 시차와 같은 추가적 시각 정보가 제공될 수 있을 것이기 때문에 2D 조건에 비해 3D 조건의 경우 실험참가자들이 주관적으로 지각하는 현실감 수준이 더 높을 것으로 예상된다.

2. 실험 방법

2.1. 실험참가자

부산지역 P대학교의 남녀 학부생 40명이 학점에서 추가점을 받는 조건으로 본 연구의 실험에 자발적으로 참여하였다. 실험참가자들은 모두 유효한 운전면허를 소지하였고, 이전에 운전 시뮬레이션을 운전한 경험이 없었다. 총 40명의 실험참가자들 중 남성은 31명이었고 이들은 평균 연령은 22.9세(표준편차=2.62)였다. 여성은 9명이었고 이들의 평균 연령은 19.9(표준편차=1.86)이었다. 실험참가자들의 시력과 청력은 실험 수행에 지장이 없는 것을 확인하였다.

2.2. 운전 시뮬레이터

본 실험에 사용된 운전 시뮬레이터는 고정형 시뮬레이터로 Forum8 UC-win/Road(ver. 6.1.2) 운전 시뮬레이션 소프트웨어를 통해 작동되었다. 2D와 3D로 각각 구현된 운전 장면은 Sharp사의 빔프로젝트(모델명: Z17000/2D는 60Hz, 3D는 동시 투사되는 두 영상 모두 60Hz로 투사 가능) 이용하여 운전자 전방 1m 지점에 위치한 Yucine사의 74인치 스크린에 투사되었는데, 스크린의 가로와 세로 비율은 5 : 3이었다. 이 스크린은 운전자의 시점을 중심으로 대략 60도의 시각도를 제공할 수 있었다. 운전 중 발생하는 청각적 자극(엔진이나 브레이크 소리 등)은 5.1 채널의 Britz BR5100T 스피커를 통해 제시되었다.

실험참가자들의 차량 통제는 차량 제어를 위한 기본적 장치인 스티어링휠과 브레이크 및 액셀러레이터를 포함하고 있는 Logitech Driving Force GT 조이스틱 장치를 이용하였다. 주통제 컴퓨터는 Window 7 운영체제에서, Intel(R) core(TM) I7 870(2.93GHz)의 CPU와 6.00GB의 RAM을 사용하였다. 적절한 수준의 그래픽을 제공하기 위해서 NVIDIA Geforce GTX640 그래픽카드 2개를 사용하여 초당 60Hz의 화면 갱신률로 실험을 진행하였다.

2.3. 입체안경

3D 디스플레이 조건에서 입체영상을 제공하기 위해 HTD 방식의 셔터글래스(모델명: AN-3DG10 3D Glass)를 사용하였다. 3D 안경의 착용여부에 따른 가외적 영향을 배제하기 위해 2D와 3D 조건 모두에서 모든 실험참가자들이 3D 안경을 착용하도록 하되, 입체영상은 3D 디스플레이 조건에서만 제공되도록 옵션을 조절하였다. 또한 실험참가자들에 따라 입체영상을 경험하는데 개인차가 있었기 때문에 실험을 시작하기 전에 각 실험참가자들에 따라 입체 영상이 자연스럽게 제시되는지 여부를 확인하고 필요한 경우 양안에 제시되는 화면의 교차비율을 조정하였다.

2.4. 주관적 피로감 및 현실감 측정도구

2D와 3D 디스플레이 조건에 따른 실험참가자들의

주관적 피로감을 측정하기 위해 이형철(2009)이 작성한 28개 문항의 5요인 척도를 사용하였다. 이 척도는 3D 디스플레이 시청에 의해 유발된 피로감을 정량적으로 파악하기 위한 방법의 하나로 주관적인 시각피로감을 주로 측정한다. 5개의 하위요인에는 눈 통증(10개 문항, 예: ‘눈이 뻑뻑하였다’), 시청중단 욕구(8개 문항, 예: ‘눈을 감고 싶은 욕구가 있었다’), 속 울렁거림(4개 문항, 예: ‘어지러웠다’), 신체 통증(3개 문항, 예: ‘목이 뻐근했다’), 그리고 상 흐림(3개 문항, 예: ‘상이 뚜렷하게 보이지 않았다’) 등이 포함되었다. 각각의 문항들에 대해서는 1점에서 7점 사이의 Likert 7점 척도 점수로 주관적으로 평정하도록 하였는데, 점수가 높을수록 해당 항목으로 측정한 주관적 피로감이 더 크다는 것을 나타낸다.

또한 2D와 3D 디스플레이를 이용한 운전 시뮬레이션 조건이 실험참가자들에게 각각 얼마나 현실적으로 경험되는지 측정하기 위해 ‘방금 주행하신 운전상황의 영상이 실제와 얼마나 가깝다고 생각하십니까?’라는 질문을 제시하여 비교하였다. 주관적 현실감도 Likert 7점 척도로 측정하였고, 점수가 높을수록 운전 시뮬레이션의 현실감이 높다는 것을 의미한다.

2.5. 종적 차량통제 과제

각 실험참가자들이 수행해야 하는 종적 차량통제는 속도 유지 과제와 선행차량 추종과제의 두 가지 과제로 구성되었다. 먼저, 속도 유지 과제는 운전속도계가 제공되지 않은 상태에서 실험참가자가 자신의 운전속도를 추정하여 주어진 목표속도에 최대한 근접하는 속도로 운전하는 과제였다. 그리고 선행차량 추종과제는 자신의 평소 자신의 운전습관대로, 그리고 선행차량과의 거리가 안전하다고 판단되는 거리를 유지하며 선행차량의 뒤를 따라가는 과제였다.

속도 유지 과제에서 실험참가자들이 유지해야 하는 목표속도는 60, 80, 100 및 120km/h의 네 가지 수준이었는데, 실험참가자들의 반응 목표속도가 점차적으로 증가하는 상승조건(ascending sequence)에서 먼저 시작한 반면 나머지 실험참가자들은 이외는 반대로 목표속도가 점차적으로 감소하는 하강조건(descending sequence)부터 시작하였다. 상승조건에서는 60 → 80 → 100 →

120 → 100 → 80 → 60 → 80 → 100 → 120km/h의 순서로, 반면 하강조건에서는 120 → 100 → 80 → 60 → 80 → 100 → 120 → 100 → 80 → 60km/h의 순서로 목표속도가 제시되었다. 실험참가자들이 준수해야 하는 목표속도는 도로 우측에 속도표지판의 형식으로 제시되었고 실험참가자가 목표속도로 주행할 수 있도록 주어진 시간은 각 목표속도 조건 모두 30초였다. 모든 실험참가자들은 2D와 3D의 각 조건에서 상승조건과 하강조건을 각각 2회씩 무선적 순서로 수행하였다. 속도 유지 과제에서의 증속측정치는 운전자가 특정 목표속도 조건에서 주행한 운전속도와 목표속도와의 차이를 km/h 단위로 측정하였다.

선행차량 추종과제에서 실험참가자들은 자신의 차량 앞에서 60, 80, 혹은 100km/h의 속도로 주행하는 선행차량과의 거리를 평소 자신이 운전하는 습관대로, 그리고 스스로 판단하기에 안전하다고 생각되는 수준으로 유지하며 운전하도록 지시하였다. 선행차량은 60, 80, 혹은 100km/h의 속도를 무선적으로 2회씩 주행하도록 미리 프로그램 되었다. 각각의 속도조건에서 선행차량이 특정 속도를 유지하며 주행하는 시간은 30초였고 실험참가자들은 이 시간 안에 선행차량과 차간거리를 유지하며 선행차량을 추종하도록 하였다. 모든 실험참가자들은 2D와 3D 조건 모두에서 차간거리유지 과제를 수행하였고, 2D와 3D 조건은 실험참가자들에 따라 무선적으로 주어졌다. 선행차량 추종 과제에서의 증속측정치는 선행차량 중심과 실험참가자 차량의 중심 사이의 거리였고, 측정단위는 미터(m)였다.

2.6. 실험 절차

실험참가자가 실험실에 입실하면 먼저 실험참가에 대한 동의서와 인구 통계학적 질문지를 작성하도록 하였다. 그 다음 운전 시뮬레이터의 기계적 특성에 익숙해질 수 있도록 조향장치와 브레이크 및 액셀러레이터 등을 조작해 보도록 하였다. 운전 시뮬레이터의 기계적 조작 특성을 숙지하면 실험자는 속도 유지 과제 혹은 선행차량 추종과제 중 한 과제에 대해 미리 제작된 과제설명서를 실험참가자에게 구두로 읽어주는 방식으로 설명해 주었고, 질문이 있을 경우 이에 대해 답해 주었다. 모든 운전시나리오에서 구현한 도

로는 편도 4차선 고속도로였는데, 도로의 굴곡 정도에 의한 측정치에서의 오염을 막기 위해 직선도로 또는 부분적으로는 매우 완만한 곡선도로를 적절하게 혼합하여 도로장면을 설계하였다. 그리고 실험참가자 차량 주변에 다른 차량을 제시하지 않았다.

각각의 과제 수행을 위해 5분의 연습시행이 주어졌는데, 연습시행은 본 시행과 동일한 형태로 이루어졌다. 속도 유지 과제 수행에 대한 연습시행의 경우에는 실험참가자 차량의 속도를 나타내는 속도계를 화면 우측 하단에 디지털 디스플레이 형식으로 제시하여 실험참가자들로 하여금 네 가지 수준(60, 80, 100 및 120km/h)의 운전속도에 익숙해지도록 하였다. 선행차량 추종과제 수행에 대한 연습시행에서는 실험참가자들이 세 가지 수준(60, 80, 혹은 100km/h)의 속도로 주행하는 선행차량과 안전하다고 판단되는 거리를 일정하게 유지하며 주행하는 연습을 실시하였다. 그리고 선행차량이 속도를 변경할 경우 즉시 선행차량과의 거리를 지시받은 방식대로 유지하도록 하였는데, 여기에서 실험참가자는 선행차량과 너무 근접하거나 이와는 반대로 너무 떨어져 운전하지 않도록 지시하였다.

각각의 과제에 대해 충분히 연습이 되었다고 판단된 이후 본 시행을 실시하였다. 본 시행에서 각 실험참가자는 속도 유지 과제의 경우 총 4회(2D와 3D 조건 각각에 대해 상승조건과 하강조건 1회씩), 그리고 선행차량 추종과제의 경우 총 2회(2D와 3D 조건 각각에 1회씩)의 과제를 수행하였다. 각각의 과제에서 각 시행이 종료된 이후 주관적 시각피로감과 현실감 문항에 대해 응답하도록 하고 응답내용을 실험자가 미리 제작된 기록지에 기입하였다. 속도 유지 과제 혹은 선행차량 추종 과제가 종료된 이후에는 5분의 휴식시간이 주어졌다. 연습시행과 본 시행 그리고 휴식시간을 포함한 총소요시간은 약 40분이었다.

2.7. 실험설계 및 자료분석

본 연구는 실험참가자들이 수행하는 과제 유형에 따라 두 가지의 실험 설계로 구성되었다. 먼저 속도 유지 과제에 대해서는 모든 실험참가자들이 두 가지의 디스플레이 조건과 네 수준의 목표속도 조건에 참여하는 2(디스플레이 조건: 2D vs. 3D) x 4(목표속도:

60 vs. 80 vs. 100 vs. 120km/h) 반복측정 요인설계로 구성되었다. 이와는 달리 선행차량 추종과제의 경우는 모든 실험참가자들이 두 가지의 디스플레이 조건과 세 수준의 선행차량 주행속도 조건에 참여하는 2 (디스플레이 조건: 2D vs. 3D) x 3(선행차량 주행속도: 60 vs. 80 vs. 100km/h) 반복측정 요인설계로 구성되었다. 각각의 실험설계에서 측정된 네 가지의 종속측정치들 즉, 속도 유지 수행, 선행차량 추종 수행, 주관적 피로감 및 지각된 현실감 점수에 대해 반복측정 변량 분석을 실시하였다. 모든 자료에 대한 분석은 IBM SPSS Statistics 21을 사용하여 사용해 분석하였다.

2.8 자료처리

본 연구에서 운전자의 운전수행 자료는 10Hz(즉, 초당 10회)로 측정되었는데, 실제 분석에서는 분석 목적에 기초하여 일부 자료를 배제하였다. 예를 들어, 속도 유지 과제에서는 실험운전자들이 도로 우측에 제시된 목표속도를 보고 이 목표속도로 (감속과 가속 모두 포함하여) 자신의 운전속도를 변경하기까지의 시간이 필요하였고 이때의 운전속도 자료는 본 연구의 목적에 부합하지 않는 부분이다. 따라서 원자료에 나타난 운전속도의 전반적 패턴을 살펴본 후 속도변경을 시사하는 구간에서의 자료는 제거하고 분석하였다. 또한 선행차량 추종 과제에서의 자료처리에도 마찬가지로의 방식이 적용되었다. 즉, 선행차량이 (미리 프로그램된 대로) 일정한 속도로 감속하거나 가속하는 구간에서는 실험참가자들도 자신의 차량속도를 이에 맞게 조절해야 한다. 따라서 이 선행차량이 속도를 변경하는 구간과 이에 따라 운전자가 속도를 변경하는 구간에서의 자료는 일부 제거한 후 분석하였다.

3. 결과

본 실험에서 얻어진 자료는 두 가지 과제(즉, 속도 유지와 선행차량 추종) 각각에 대해 별도로 분석하였다. 속도 유지 과제 수행에 대해서는 제시된 목표속도와 실험참가자가 실제 주행한 운전속도와의 차이를 분석하였고, 선행차량 추종과제에 대해서는 선행차량과의 거리를 분석하였다. 그리고 각 과제 상황에서 실험참가자들이 주관적으로 보고한 시각피로감에 대한 5개 하위 요인의 점수와 주관적 현실감 점수를 각 과제별로 분석하여 제시하였다. 속도 유지 과제와 선행차량 추종과제에서 각 디스플레이 조건에 따른 실험참가자들의 운전수행 자료는 Table 1에, 그리고 주관적 시각피로감과 현실감에 대한 자료는 Table 2에 각각 제시하였다.

3.1. 속도 유지과제

3.1.1. 목표속도 유지수행

Figure 1은 목표속도가 변함에 따라 실제 실험참가자들이 보인 운전속도의 전반적 패턴을 도식화한 것이고, Figure 2는 각 목표속도와 운전속도 사이의 차이값을 목표속도별로 나타낸 것이다. 실험참가자들이 주어진 목표속도에 따라 얼마나 정확하게 속도를 유지하는지를 목표속도와 실제 실험참가자의 주행속도 사이의 차이값을 이용하여 변량분석한 결과, 목표속도 수준과 디스플레이 조건 사이의 상호작용효과는 유의하지 않았으나[F(3, 117) = .535, ns, 부분에타자승 = .014], 목표속도 수준의 주효과[F(3, 117) = 11.61, p < .001, 부분에타자승 = .229]와 디스플레이 조건의 주효과[F(1, 39) = 8.11, p < .05, 부분에타자승 = .172]는 모

Table 1. Drivers' Driving Speeds(km/h) in each Target Speed Condition and Headway Distances(meters) to the Lead-Vehicle as a of Function Display Types(N = 40).

Types of Display		Target Speed				Lead-Vehicle Speed		
		60km/h	80km/h	100km/h	120km/h	60km/h	80km/h	100km/h
2D	M	81.37	97.42	112.57	130.04	53.13	72.65	93.58
	SD	20.16	23.59	26.25	30.92	17.33	23.99	28.95
3D	M	74.11	89.62	106.94	123.16	49.14	60.02	74.76
	SD	17.95	22.09	28.34	31.72	18.96	26.46	27.23

Table 2. Subjective Measure Scores in Speed Keeping and Car-Following Tasks in each Display Condition(N = 40).

Subjective Measures	Speed Keeping				Car-Following				
	2D		3D		2D		3D		
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	
Fatigue									
Eye Strain	3.07	1.47	3.66	1.42	2.65	1.47	3.27	1.58	
Desire to Stop Display-Watching	3.09	1.27	3.57	1.40	2.41	1.07	3.02	1.50	
Motion Sickness	2.15	1.34	2.44	1.41	1.82	.99	2.41	1.61	
Physical Uneasiness	2.37	1.38	2.65	1.47	2.07	1.24	2.24	1.51	
Image Blurring	2.29	1.30	3.44	1.54	2.00	.96	3.14	1.64	
Fidelity	3.54	1.47	3.43	1.39	3.60	1.58	3.50	1.59	

두 통계적으로 유의하였다. 이러한 결과는 실험참가자들이 목표속도를 유지할 때 3D 조건보다는 2D 조건에서, 그리고 목표속도가 낮을수록 목표속도에 비해 더 빠르게 운전한다는 것을 시사한다. 특히 3D 조건보다 2D 조건에서 더 빠르게 운전하는 경향은 목표 속도 조건과 상관없이 일정하게 나타났다.

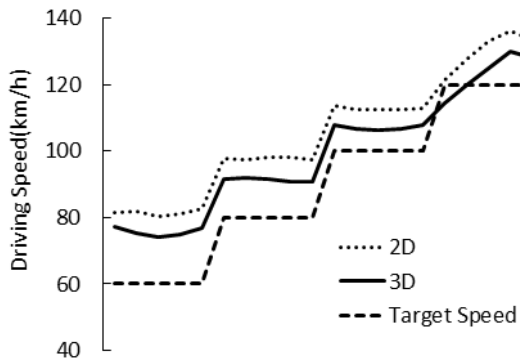


Figure 1. Patterns of Drivers' Driving Speeds in each Display Condition

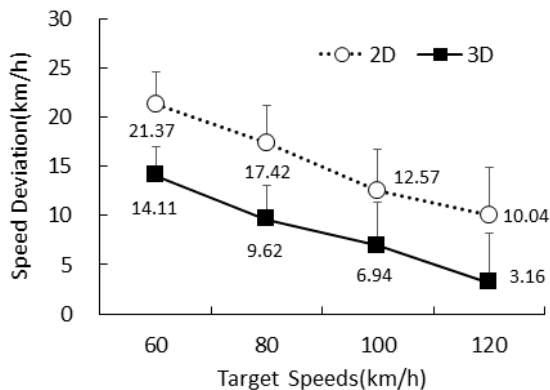


Figure 2. Speed Deviations from Target Speed in each Display Condition

3.1.2. 주관적 피로감과 지각된 현실감

Figure 3은 실험참가자들이 속도 유지 과제를 수행하면서 경험한 주관적 피로감을 각 하위요인별로 나타낸 자료이다. 속도 유지과제 수행에서 실험참가자들이 보고한 주관적 피로감 점수에 대한 분석 결과, 디스플레이 조건의 주효과[$F(1, 39) = 17.79, p < .001$, 부분에타자승 = .313]와 피로감 하위요인의 주효과[$F(4, 156) = 18.84, p < .001$, 부분에타자승 = .233], 그리고 디스플레이 조건과 피로감 하위요인 사이의 상호작용 효과[$F(4, 156) = 11.03, p < .001$, 부분에타자승 = .221]가 모두 통계적으로 유의하였다. 이러한 결과는 전반적으로 볼 때 2D 조건보다는 3D 조건에서의 주관적 피로감 점수가 더 높았고, 피로감 하위요인에 따라서는 점수가 유의하게 달랐기 때문이다. 피로감 하위요인 중 가장 점수가 높았던 요인은 시청중단 욕구 요인이었고, 가장 낮았던 요인은 속 울렁거림이었다(3.08 vs. 2.51).

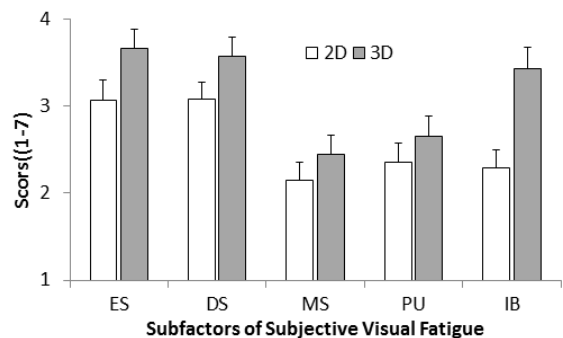


Figure 3. Scores of Subjective Visual Fatigue in the Speed Keeping Task(ES: Eye Strain, DS: Desire to Stop Display-Watching, MS: Motion Sickness, PU: Physical Uneasiness, IB: Image Blurring)

디스플레이 조건과 피로감 하위요인 사이의 상호작용 효과를 좀 더 구체적으로 살펴보기 위해 주관적 피로감의 각 하위요인별로 디스플레이 조건에 따른 시각피로감 차이를 대응표본 t-검정으로 비교하였다. 그 결과 속 울렁거림($t(39) = 1.95, ns$)과 신체통증($t(39) = 1.83, ns$) 요인에 대해서는 디스플레이 조건에 따른 차이가 유의하지 않았으나, 눈 통증($t(39) = 4.40, p < .001$), 시청중단 욕구($t(39) = 3.01, p < .01$) 및 상 호흡($t(39) = 5.52, p < .001$) 요인들에 대해서는 2D조건에 비해 3D 조건에서 유의하게 더 높은 점수가 보고되었다. 주관적 현실감은 2D와 3D 조건에 따라 유의한 차이가 관찰되지 않았다($t(39) = .678, ns$). 이러한 결과는 속도 유지 과제에서 2D와 3D조건에 따른 주관적 현실감에서의 차이는 없으나, Figure 3의 자료가 보여주듯이 주관적 피로감은 2D에 비해 3D 조건에서 상대적으로 더 높다는 것을 시사한다.

3.2. 선행차량 추종과제

3.2.1. 선행차량과의 차간거리

앞에서도 기술되었듯이, 본 연구에서 사용한 선행차량 추종과제에서 실험참가자들에게는 자신의 평소 운전습관대로 선행차량을 따라 너무 근접하거나 떨어지지 않게, 그리고 자신이 생각하기에 안전하다고 생각되는 거리를 일정하게 유지하도록 하였다. 이러한 선행차량 추종과제는 몇 가지 측면에서 속도 유지 과제와 차이가 있다. 첫째, 속도 유지 과제는 2D 혹은 3D 디스플레이를 통해 제시되는 “광학흐름”의 변화속도에 의존하여 자신의 “운전속도”를 지각(추정)하면서 정해진 목표속도를 유지하는 것이었던 반면, 선행차량 추종과제에서는 2D 혹은 3D 디스플레이에 제시된 선행차량 이미지의 지각된 “크기”에 의존하여 선행차량과의 “거리”를 일정하게 유지하는 것이었다. 인간 시지각의 특성과 관련된 연구들(e. g., Baird & Biersdorf, 1967; DeLucia & Warren, 1994)에 따르면 크게 보이는 물체는 실제보다 더 가까운 위치에 것으로 지각되는 반면, 작게 보이는 물체는 실제보다 더 멀리 있는 것으로 지각된다. 본 연구에서도 실험참가자가 지각한 선행차량 이미지의 크기가 클수록 선행차량과의 거리를 멀게 유지하는 반면 이와는 반대로 선행차량 이미

지의 크기가 작게 지각될수록 선행차량과의 거리를 가깝게 유지하며 추종할 것으로 가정한다.

둘째, 속도 유지 과제에서는 실험참가자들이 유지해야 하는 목표운전속도를 미리 지정하고 실험참가자들이 각각의 목표속도를 얼마나 잘 유지하면서 주행하는지 살펴보는 일종의 “평가”가 이루어졌다. 이와는 대조적으로 선행차량 추종과제에서는 실험참가자가 선행차량과 안전하다고 판단되는 거리를 유지하며 주행하기 때문에 수행의 우수성 여부보다는 실험참가자의 차간거리에 대한 지각적 경험이 2D 조건과 3D 조건에서 어떻게 다른지 비교하는 것이 주목적이다.

Figure 4는 선행차량의 주행속도 조건별로 실험참가자 차량과 선행차량 사이의 거리 변화 패턴을 두 개의 디스플레이 조건에 따라 도식화한 것이고, Figure 5는 선행차량의 각 주행속도 조건별로 해당 주행속도 조건에서 실험참가자들이 선행차량과 유지한 추종거리를 두 개의 디스플레이 조건에 따라 요약하여 나타낸 것이다. 실험참가자들이 선행차량과 어느 정도의 거리를

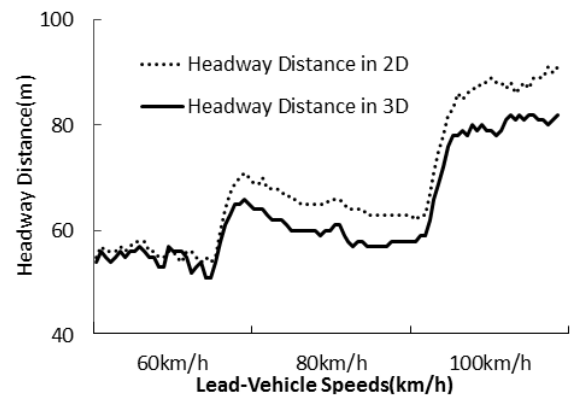


Figure 4. Patterns of Drivers' Headway Distance to Lead-Vehicle in each Display Condition

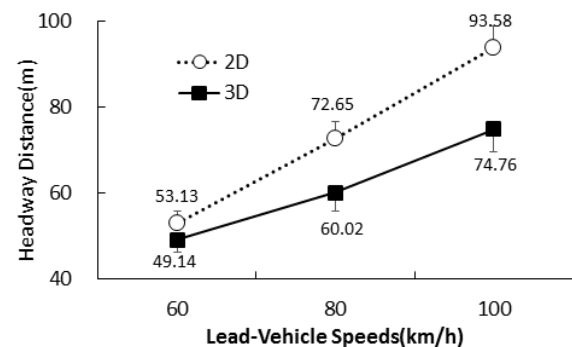


Figure 5. Headway Distance to Lead-Vehicle in each Display Condition

유지하며 주행하였는지 실험조건별로 비교하기 보기 위해 선행차량과 실험참가자 차량 사이의 거리 값을 이용하여 변량분석을 실시하였다. 그 결과, 디스플레이 조건의 주효과는 5%의 유의도 수준에 근접하였고 [F(1, 78) = 3.90, p = .056, 부분에타자승 = .091], 선행차량 주행속도의 주효과[F(2, 78) = 301.89, p < .001, 부분에타자승 = .886] 및 디스플레이 조건과 선행차량 주행속도 사이의 상호작용효과[F(2, 78) = 17.67, p < .01, 부분에타자승 = .312]가 통계적으로 유의하였다.

이러한 결과는 2D 조건에 비해 3D 조건인 경우 실험참가자들이 선행차량을 추종하면서 선행차량과 유지하는 차간거리가 더 짧았다는 것을, 그리고 (당연한 결과일 수 있지만) 선행차량의 주행속도가 빠를수록 더 먼 차간거리를 유지하며 주행하였다는 것을 시사한다. 특히 디스플레이 조건과 선행차량 주행속도 사이의 상호작용효과가 유의하였는데 이것은 선행차량의 주행속도에 따라 두 가지의 디스플레이 조건에서 실험참가자들이 보인 선행차량과의 차간거리가 유의하게 달라질 수 있음을 나타내는 것이다. 이러한 상호작용효과의 소재를 파악하기 위해 선행차량의 각 주행속도 조건별로 2D 조건과 3D 조건에 따라 실험참가자가 유지한 차간거리에서의 차이를 대응표본 t-검정으로 비교하였다. 그 결과, 선행차량의 주행속도가 60km/h 조건에서는 두 가지 디스플레이 조건에 따라 유의한 차이가 관찰되지 않았으나 [각각, $t(39) = .79$], 80km/h 조건에서는 5%의 통계적 기각역에 근접하는 수준에서 2D 조건과 3D 조건에 따른 선행차량과의 차간거리가 유의한 차이를 보이기 시작하여 [$t(39) = 1.96$, p = .058], 100km/h 조건에서는 그 차이가 통계적으로 유의하였다 [$t(39) = 2.76$, p < .01]. Figure 5에 제시되어 있듯이, 선행차량의 주행속도 증가할수록 2D와 3D 조건에 따른 선행차량과의 차간거리 차이가 점차 증가하기는 하지만 이러한 경향은 선행차량이 80km/h 수준 이상의 비교적 빠른 주행속도로 진행할 때 더 두드러지는 것으로 보인다. 즉, 실험참가자들은 선행차량이 60km/h로 주행하는 상황에서는 약 5m, 80km/h로 주행하는 상황에서는 약 10m, 그리고 100km/h로 주행하는 상황에서는 약 20m 정도 2D 조건에 비해 3D 조건인 경우 선행차량과 더 근접하여 차간거리를 유지하는 경향을 보였다.

3.2.2. 주관적 피로감과 지각된 현실감

Figure 6은 선행차량 추종과제를 수행하면서 실험참가자들이 경험한 주관적 피로감을 각 하위요인별로 나타낸 자료이다. 선행차량 추종과제 수행에서 실험참가자들이 보고한 주관적 피로감 점수가 디스플레이 조건과 피로감 하위요인에 따라 어떠한 방식으로 차이가 나타나는지 분석한 결과, 디스플레이 조건의 주효과[F(1, 39) = 22.83, p < .001, 부분에타자승 = .369]와 피로감 하위요인의 주효과[F(4, 156) = 7.39, p < .001, 부분에타자승 = .159], 그리고 디스플레이 조건과 피로감 하위요인 사이의 상호작용 효과[F(4, 157) = 6.78, p < .001, 부분에타자승 = .148]가 모두 통계적으로 유의하였다. 즉, 전반적으로 볼 때 2D 조건보다는 3D 조건에서의 주관적 피로감 점수가 높았고, 피로감 하위요인에 따라 점수가 유의하게 달라 눈 통증 요인 점수가 가장 높았던 반면 속 울렁거림 요인의 점수가 가장 낮았다(2.96 vs. 2.11).

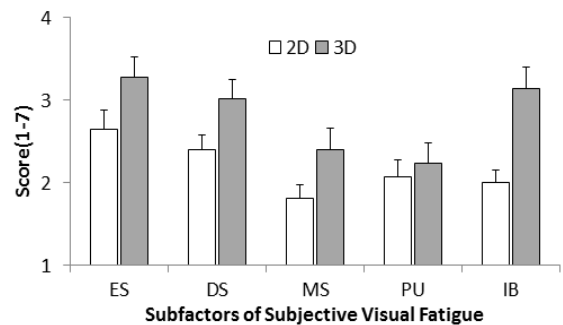


Figure 6. Scores of Subjective Visual Fatigue in the Car-Following Task(ES: Eye Strain, DS: Desire to Stop Display-Watching, MS: Motion Sickness, PU: Physical Uneasiness, IB: Image Blurring)

그러나 디스플레이 조건과 피로감 하위요인 사이의 유의한 상호작용 효과가 시사하듯 2D 조건과 3D 조건에 따른 주관적 피로감은 하위요인에 따라 다른 양상을 보이는 것으로 보인다. 이러한 상호작용 효과를 좀 더 구체적으로 살펴보기 위해 주관적 피로감의 각 하위요인별로 2D 조건과 3D 조건에 따른 주관적 피로감에서의 차이를 대응표본 t-검정으로 비교하였다. 그 결과 시정중단 욕구 [$t(39) = 1.58$, ns]와 신체통증 [$t(39) = 1.08$, ns] 요인에 대해서는 디스플레이 조건에 따른 주관적 피로감에서의 차이가 유의하지 않았으

나, 눈 통증[$t(39)=3.98, p<.001$], 속 울렁거림[$t(39)=3.19, p<.01$] 및 상 흐림[$t(39)=5.23, p<.001$] 요인들에 대해서는 2D조건에 비해 3D 조건에서 점수가 더 유의하게 높았다. 속도 유지 수행에서의 결과와 마찬가지로 선행차량 추종과제에서의 주관적 현실감 점수는 2D 조건과 3D 조건에 따라 유의한 차이가 관찰되지 않았다[$t(39)=.427, ns$].

4. 논의

최근 들어 3D 입체화면을 통해 2D 영상보다 좀 더 현실감 높은 영상을 시청자들이 경험할 수 있는 기회가 증가하고 있다. 실제 운전상황을 제대로 반영하고 좀 더 현실감 있는 운전상황을 제공하고자 오래 전부터 시도했던 운전 시뮬레이션 영역에서도 3D 입체화면을 통한 운전장면의 제공은 2D 화면을 이용한 기존의 운전 시뮬레이션 환경에 비해 몇 가지 측면에서 장점이 있을 것이다. 먼저, 3D 디스플레이를 이용한 운전 시뮬레이션은 차량의 종적통제를 위해 핵심적으로 요구되는 깊이지각에 따른 거리와 속도 판단에 대해 좀 더 풍부한 지각적 단서들을 제공할 수 있을 것이다. 둘째, 운전 시뮬레이션을 통한 운전자들의 운전 수행 지표들을 실제 운전수행에 좀 더 근접하게 그리고 타당하게 측정하도록 할 수 있을 것이다. 즉, 3D 디스플레이를 이용한 운전 시뮬레이션은 폭넓은 활용 가능성을 갖고 있다.

그러나 지금까지는 2D 화면과 3D 화면을 통한 운전 시뮬레이션 환경에서 운전자의 거리나 속도 지각에서 차이가 있는지, 그리고 이를 통해 운전자의 차량통제는 어떻게 달라지는지 체계적으로 비교한 연구는 거의 보고되고 있지 않다. 본 연구는 이러한 문제점에 기초하여 2D 화면과 3D화면으로 각각 제시된 운전 시뮬레이션 환경에서 운전자의 종적 차량통제의 두 가지 주요 요소인 목표속도 유지와 선행차량과의 차간거리 유지 수행, 눈 통증이나 운전멀미감을 포함하는 주관적 피로감, 그리고 실제 운전상황과 비교하여 두 가지 유형의 운전시뮬레이션 유형이 얼마나 현실적으로 경험되는지에 대한 현실감 평가 점수를 비교하였다.

본 연구의 결과들을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 실험참가자들은 미리 정해진 네 가지 수준의 목표속

도(60, 80, 100 및 120km/h)를 유지할 때 3D 조건보다는 2D 조건에서, 그리고 목표속도가 낮을수록 목표속도에 비해 더 빠르게 운전하였고, 이러한 경향은 목표속도 조건과 상관없이 일정하였다. 둘째, 선행차량과의 차간거리 유지수행에 대한 분석 결과, 2D 조건에 비해 3D 조건에서 실험참가자들은 선행차량과 더 근접한 차간거리를 유지하며 주행하였는데, 특히 선행차량의 주행속도가 비교적 느렸던 조건(즉, 60km/h)에 비해 비교적 빨랐던 조건(즉, 80 및 100km/h)에서 이러한 경향이 두드러졌다. 셋째, 속도 유지 과제와 선행차량과의 차간거리 유지수행 모두에서 2D 조건에 비해 3D 조건에서 실험참가자들이 경험하는 주관적 피로감의 수준이 더 높았다. 특히, 본 연구에서 측정된 주관적 피로감의 요소들 중에서 눈 통증 요인과 상 흐림 요인은 속도 유지 과제와 선행차량 차간거리 유지 과제 모두에서 2D조건에 비해 3D 조건에서 유의하게 더 높았다. 넷째, 지각된 현실감에 대한 평가에서는 두 가지 과제 모두에서 2D와 3D 조건에 따라 유의한 차이가 관찰되지 않았다.

이러한 결과들이 관찰된 것에 대한 가능한 설명들과 이에 대한 논의점들을 기술하면 다음과 같다. 먼저, Figure 1과 2를 종합적으로 검토해보면, 본 연구에서 실험참가자들이 보인 속도 유지 과제 수행은 몇 가지 특징을 갖는 것으로 보인다. 먼저, 2D 조건과 3D 조건에 따라 정도의 차이는 있었으나 모든 목표속도 조건에서 실험참가자들은 주어진 목표속도보다 더 빠르게 운전하였다는 점이다. 특히 이러한 경향은 목표속도가 낮은 경우일수록 더 두드러졌다. 실제 상황과 운전 시뮬레이션 상황에서 트럭 운전자들의 속도추정수행을 비교한 Panerai 등(2002)의 연구에서는 두 가지 실험환경에서 운전자들의 속도추정에 차이가 없을 뿐만 아니라 두 가지 실험환경 모두에서 목표속도와 거의 일치하는 속도로 운전한다는 것을 발견하였으나 본 연구의 결과는 이와는 다른 양상을 보인 것이다.

여기에는 몇 가지 설명이 가능하다. 첫째, Panerai 등(2002)의 연구에서는 운전 경험이 풍부한 트럭운전자들을 대상으로 하였다라는 점이다. 대학생 운전자들을 대상으로 한 본 연구와 비교해 볼 때 운전 경험에서의 차이가 이러한 비일관적 관찰 결과를 가져왔을 가능성이 높다. 둘째, Panerai 등(2002)의 연구에서 운전 시뮬레이션 조건에 구현된 도로장면의 현실성이 실제 운전상황을 거의 그대로 모사하였던 반면, 본 연구의 운전

시뮬레이션에서 사용된 도로 조건이 비교적 한산하면 서도 도로굴곡이 거의 없는 매우 단순한 고속도로 형태로 제시되었다는 점을 감안하면 이러한 도로 조건에서의 단순성이 실험참가들로 하여금 자신의 주행속도를 과소평가하여 목표속도보다 더 빠르게 운전하도록 하였을 가능성도 있을 것이다. 그리고 이것은 현실감에 대한 평가에도 영향을 미쳤을 것이다.

실험참가자들이 운전속도 유지 수행에서 보인 또 다른 특징은 목표속도의 수준과 상관없이 2D 조건보다는 3D 조건에서 비교적 일정한 속도의 크기로 목표속도에 더 근접하며 운전했다는 것이다. 그러나 비록 두 가지의 디스플레이 조건에 대한 주관적 현실감에서의 차이는 유의하지 않았고, 두 조건 모두에서 목표속도에 비해 과속하는 경향을 보이기는 하였으나, 이러한 과속 경향이 2D 조건보다는 3D 조건에서 감소하였다는 점을 고려하면 2D 조건에 비해 3D 조건은 속도 유지에 필요한 좀 더 풍부한 깊이지각 단서를 제공해 주는 것으로 보인다.

Figure 4와 5에 제시되어 있듯이 선행차량과의 차간거리 유지수행에서 실험참가자들은 전반적으로 2D 조건보다는 3D 조건에서 선행차량과의 안전거리를 과소추정하여 선행차량과 더 근접하여 주행하는 경향을 보였다. 물론 선행차량의 주행속도를 함께 고려하면 이러한 디스플레이 조건에 따른 차간거리 유지수행에서의 유의한 차이는 선행차량의 주행속도가 가장 빨랐던 100km/h 조건에서만 관찰되었으나(선행차량의 주행속도가 80km/h인 경우에는 5%의 기각역에 근접한 수준에서 2D 조건과 3D 조건 사이에서 선행차량과의 차간거리 차이가 유의하였다) 실험참가자가 유지한 선행차량과의 거리에 대한 전반적 패턴을 보면 2D 조건보다는 3D 조건에서 선행차량과의 거리를 과소추정 경향이 상대적으로 더 큰 것으로 보인다.

선행차량과의 거리를 안전한 수준으로 거리를 유지하며 주행하는 것은 추돌 사고방지 등을 포함한 안전한 운전의 확보에 필수적인 요소이다. 최소한 어느 정도의 거리를 유지하며 선행차량을 추종하는 것이 안전한지를 검토한 연구들은 선행차량 추종거리를 주로 운전자의 지각-반응 시간(perception-reaction time)의 측면에서 추정한다. 즉, 운전자가 (급정거하고 있는 선행차량 등을 포함하여) 전방의 위험요소를 지각한 후 이를 회피하기 위해 자신의 차량을 정지하기까지의 시간을 바탕으로 선행차량과의 안전한 유지거리를 산

출하는 것이다. 연구들에서 밝힌 운전자들의 지각-반응 시간은 연구자들에 따라 조금씩 차이가 있다. 예를 들어, 실제 운전 상황에서 측정한 결과에 따르면 일반적인 운전자들의 지각-반응 시간은 대략 1초에서 2초 정도(평균 1.5초)이다(Dewar, 1993; Green, 1995). 그러나 평균 1.5초라는 시간은 지각-반응 시간에 영향을 줄 수 있는 다른 변인들은 배제한 상황에서 얻어진 순수한 그리고 최소로 추정된 지각-반응 시간이다. 예를 들어, 운전자들의 지각-반응 시간은 주의분산이나 피로와 같은 개인적 측면이나 기대하지 않았던 사상의 출현과 같은 운전조건 등에 따라 큰 범위로 달라질 수 있다. 따라서 운전자의 지각-반응 시간은 이보다 약간 증가한 대략 2초에서 4초의 범위(평균 3초 정도)를 갖는다고 생각하는 것이 더 현실적이라는 주장이 있다(e. g., Wickens et al., 2004).

평균 3초의 지각-반응 시간에 기초하여 계산한다면 선행차량이 급정거하는 상황에서 운전자들이 추돌을 회피할 수 있는 선행차량과의 최소거리는 선행차량의 주행속도가 60km/h인 경우는 대략 50m, 80km/h인 경우는 70m, 그리고 100km/h인 경우는 90m 정도이다. 그러나 이러한 값들은 선행차량과의 추돌을 회피하기 위한 최소한의 차간거리이고 선행차량과 어느 정도 여유거리를 확보하고 정지하고자 한다면[이것을 정적 안전 여유거리(positive safety margin)라 부른다, Wickens et al., 2004] 이보다 더 긴 차간거리를 더 확보하는 것이 요구된다. 따라서 정적 안전 여유거리를 예를 들어 10m로 설정한다면 세 가지의 선행차량 속도에 대해 안전하게 선행차량과 추돌을 회피하는데 요구되는 거리는 각각 60, 80 및 100m 정도가 될 것이다.

그러나 일반적으로 운전자들은 실제 운전상황이나 운전 시뮬레이션 환경 모두에서 선행차량과의 거리를 과소추정하는 경향을 보여 결과적으로 자신의 자극-반응 역량을 넘는 속도로 과속하여 선행차량과의 안전거리 유지에 실패한다(Wasielewski, 1984). 이에 대한 이유에는 운전자의 지각적/인지적 요인이 모두 포함된다. 예를 들어, 지각적 요인에서 보면 운전자들은 자신의 실제 운전속도 자체를 과소평가하거나 선행차량이 실제보다 더 멀리 떨어져 있다고 판단할 수 있기 때문이다(e. g., Eberts & MacMillan, 1985). 또한 인지적 측면에서 보면 운전자들은 선행차량이 갑자기 정지하는 일은 발생하지 않을 것이고, 만일 선행차량이 급정거한다 하더라도 자신이 충분히 차량을 정지시켜 추돌을

피할 수 있을 것이라는 과다확신을 보이는 경향이 있기 때문이다(Brown, 1965; Evans, 1991; Summla, 1981).

실험참가자들의 거리 추정에서의 왜곡은 실제 환경과 시뮬레이션 환경 모두에서 나타나기는 하지만 실제 환경에 비해 시뮬레이션 환경에서 더 편파되는 것으로 보인다. 예를 들어 Wright(1995)는 거리 추정과 관련된 몇 개의 연구들을 개관한 후 실제 환경에서의 거리 지각은 실제 거리에 비해 87-91% 정도 과소 추정되지만 시뮬레이션 환경에서는 이러한 경향이 더 증가하여 실제 거리에 비해 과소 추정의 비율이 41-72% 정도에 이른다는 것을 발견하였다. 본 연구에서 이러한 거리의 과소 추정 경향은 2D 조건보다는 3D 조건에서 더 두드러졌다.

이에 대한 가능한 설명은 2D 조건과 3D 조건에서 제공되는 깊이단서들에서의 차이와 이에 따른 관찰자들의 시지각 특성에서 찾을 수 있을 것이다. 2D 환경에서 관찰자들이 대상과의 상대적 거리를 추정하기 위해서는 망막에 맺히는 대상의 상대적 크기에 의존해야 한다. 예를 들어, Dingus 등(1997)은 2D 운전 시뮬레이션 환경에서 운전자들은 선행차량과의 상대적 거리를 추정하기 위해 상대차량의 크기 변화에 따른 시각도에서의 변화에 의존한다고 언급하였다. 예를 들어, 선행차량이 주행속도를 변화시키기에 따라 선행차량에 대한 망막 이미지에서의 크기 즉, 선행차량 이미지가 제공하는 시각도가 변화하는데 운전자는 차량을 가속 혹은 감속하여 이러한 변화되는 시각도를 일정한 수준으로 유지함으로써 선행차량과의 차간거리를 유지한다는 것이다. 따라서 2D 시뮬레이션 환경에서는 운전자가 지각하는 선행차량의 크기 변화(선행차량 이미지에 대한 시각도 변화)가 차간거리 유지에 중요한 단서가 된다.

그러나 3D 운전 시뮬레이션 환경에서는 양안시차 단서가 추가적으로 제공된다. 이 경우 두 안구에 전달되는 상이한 이미지에 따른 교차시(crossed disparity)와 비교차시(uncrossed disparity) 지각이 가능하게 된다. 교차시란 두 눈이 초점을 맞추었을 때 동일한 초점 거리에 있는 응시점들로 이루어진 가상적 표면을 일컫는 단시케적(horopter)을 중심으로 관찰자 앞쪽에서 이루어지는 양안시차를 말하는 반면 비교차시는 관찰자 뒤쪽에서 이루어지는 양안시차를 의미한다.

본 연구에서 실험참가자들이 선행차량과의 차간거리 유지 수행에서 보인 결과, 즉, 2D 조건에 비해 3D 조건에서 선행차량과 더 근접하여 차간거리를 유지한 것도 이러한 교차시와 비교차시에서의 차이를 통해

설명될 수 있다. 박경수와 이두현(2003)은 3D 디스플레이 환경에서 양안시차 유형에 따른 깊이와 크기 지각에서의 차이를 비교하였는데, 그 결과 크기 지각에서 교차시의 경우에는 제시된 이미지는 실제 크기보다 더 작게 지각되는 반면, 비교차시의 경우 실제 크기보다 더 크게 지각된다고 보고하였다. 본 연구에서 사용된 3D 화면은 양안시차를 이용한 셔터 글래스 방식¹⁾이었는데, 이 방식을 통해 실험참가자들은 운전장면에서 응시점의 공간적 위치에 따라 교차시와 비교차시를 모두 경험할 수 있게 된다.

일상적 운전상황 뿐만 아니라 운전 시뮬레이션 상황에서 운전자 차량 앞에 선행차량이 있는 경우 운전자들은 선행차량 보다 앞에 있는 영역, 예를 들어 자신의 차량 바로 앞 도로 위를 응시하기 보다는(이 경우 선행차량은 비교차시 영역에 놓이게 될 것이다) 선행차량의 위치를 중심으로 좀 더 앞쪽을 응시하면서 주행하는 것이 더 일반적일 것이다. 이 경우 선행차량은 운전자의 교차시 영역에 위치하게 된다. 따라서 앞에서 기술한 박경수와 이두현(2003)의 연구결과 즉, 크기 지각에서 교차시의 경우에는 제시된 이미지는 실제 크기보다 더 작게 지각되는 반면, 비교차시의 경우 실제 크기보다 더 크게 지각된다는 점을 고려하면 본 연구의 3D 조건에서 제시된 선행차량의 이미지 크기는 2D 조건에 비해 상대적으로 더 작게 지각되었을 것이다. 대상의 상대적 크기와 거리 사이의 관련성에 대한 사람들의 지각처리 특성 중 하나는 작게 보이는 대상은 실제보다 더 멀리 있는 것으로 해석한다는 점인데(e. g., Baird & Biersdorf, 1967; DeLucia & Warren, 1994), 3D 조건에서 상대적으로 더 작게 지각된 선행차량 이미지에 의해 실험참가자들은 선행 차량이 더 멀리 떨어져 있는 것으로 판단하고 선행 차량과 더 근접하며 차간거리를 유지하였을 것이다.

본 연구의 속도 유지 과제와 선행차량과의 차간거리 유지과제 모두에서 실험참가자들은 2D 조건에 비해 3D 조건에서 상대적으로 더 높은 수준의 주관적 피로감을 보고하였다. 운전 시뮬레이션 상황에서 운전장면

1) 입체화면을 제공하기 위해 사용되는 방식 중 셔터 글래스(shutter glass) 방식은 좌우 안구로 들어오는 영상을 빠르게 번갈아 출력하는 방식이다. 이 방식에서 관찰자가 착용하는 3D 안경은 좌우 영상신호에 맞추어 렌즈의 셔터가 번갈아 개폐되어 각각의 안구에 해당하는 영상이 번갈아 제시되도록 함으로써 입체영상을 볼 수 있게 한다.

이 현실적 장면과 가까울수록 운전멀미감을 포함한 운전자의 피로감을 상승시킬 수 있다는 점을 감안하면(e.g., Kennedy et al., 1993), 이러한 결과는 2D 조건에 비해 3D 조건이 좀 더 현실에 근접하는 조건을 제공해 줄 수 있다는 것을 시사한다. 그러나 실험참가자들의 2D 조건과 3D 조건에 대한 주관적 현실감은 두 조건 사이에 차이가 유의하지 않았는데, 이러한 결과는 실험참가자들의 시뮬레이션 디스플레이의 시각적 현실감에 대한 주관적 평가와 실제 운전수행 사이에 괴리가 있음을 시사한다. 즉, 실험참가자들은 2D 조건과 3D 조건 사이의 지각적 현실감에서의 차이는 의식적으로 경험하지는 않았지만 2D 조건과 3D 조건이 갖는 물리적/시각적 차이는 실험참가자의 속도 유지 수행이나 차간거리 유지 수행에서 차이를 가져오는 것으로 보인다.

운전자가 자신의 움직임(ego-motion)을 지각하기 위해서는 광학흐름(optical flow)이 필수적인 요소이다(Gibson, 1950). 광학흐름이란 관찰자가 움직일 때 환경으로부터 관찰자의 눈으로 들어오는 빛 자극의 흐름으로 정의된다. 일반적으로 2D 보다는 3D 환경으로부터 주어지는 광학흐름이 움직임에 대한 더 풍부한 정보를 제공한다는 것(Arjona & Menéndez, 2004)을 감안하면 본 연구에서는 2D보다는 3D 조건이 더 풍부한 광학흐름 정보를 제공하였을 것이다. 즉, 비록 실험참가자들은 주관적으로는 두 가지 디스플레이 조건에서의 현실감 차이를 경험하지는 못했지만 이 두 가지 디스플레이 조건은 실험참가자들의 운전수행에 차별적으로 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

본 연구는 지금까지 많이 다루어지지 않았던 3D 입체화면을 이용한 운전 시뮬레이션 환경에서 운전자의 운전수행, 주관적 피로감 및 현실감 등이 기존의 2D 화면을 이용한 운전 시뮬레이션과 어떠한 차이를 보이는지 비교하였다는데 일차적인 의의가 있다. 특히, 두 가지 디스플레이 조건에 따른 운전자 행동과 주관적 경험 사이에서의 차이를 행동적 측정치인 종적 차량통제 수행 측정치(속도 유지 수행과 차간거리 유지 수행), 주관적 측정치인 피로감(눈 통증이나 상 흐림 등), 그리고 시뮬레이션 환경에 대한 지각된 현실감 등을 모두 측정함으로써 두 가지 디스플레이 조건을 다양한 측면에서 비교할 수 있었다.

그러나 본 연구는 몇 가지 측면에서 한계가 있다. 첫째, 실험참가자들이 모두 대학생들이었다는 점이다. 이들은 비교적 운전경력이 짧은 운전자 집단에 해당되

기 때문에 본 연구결과를 모든 운전자 집단에까지 일반화하여 적용하기에는 한계가 있을 것이다. 둘째, 본 연구에서 중요하게 다루어진 종속측정치 중 하나는 주관적으로 보고된 피로감이다. 그러나 2D 혹은 3D 디스플레이 조건에 따른 실험참가자의 피로감을 좀 더 객관적으로 분석하기 위해서는 실험참가자들의 시각적/신체적 피로감을 타당하게 측정할 수 있는 신경생리학적 지표들을 함께 사용할 필요가 있을 것이다.

REFERENCES

- Arjona, J. T. & Menéndez, J. M. (2004). Virtual reality devices in driving simulators: state of the art and ongoing developments at U.P.M. *Proceeding of the workshop on the application of new technologies to driver training*.
- Baird, J. C., & Biersdorf, W. R. (1967). Quantitative functions for size and distance judgments. *Perception & Psychophysics*, 2, 161-166.
- Brown, I. D. (1965). Effect of a car radio on driving in traffic. *Ergonomics*, 8, 475-479.
- Chen, J. Y. C., Oden, R. V. N. & Drexler, J. M. (2010). Evaluation of stereoscopic displays for indirect-vision driving and robot teleoperation. In *Proceedings of the 27th Army Science Conference*.
- DeLucia, P. R., & Warren, R. (1994). Pictorial and motion-based depth information during active control of self-motion: Size-arrival effects on collision avoidance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 783-798.
- Dewar, R.(1993). Warning: Hazardous road signs ahead. *Ergonomics in Design*, July. 26-31
- Dingus, T. A., McGehee, D. V., Manakkal, N., Jahns, S. K., Carney, C., & Hankey, J. M. (1997). Human factors field evaluation of automotive headway maintenance/collision warning devices. *Human Factors*, 39, 216-229.
- Eberts, R. E., & MacMillan, A. G. (1985). Miss perception of small cars. In R. E. Eberts & C. G. Eberts(Eds.), *Trends in Ergonomics/Human Factors II*(pp. 33-39), Amsterdam: North-Holland.
- Evans, L. (1991). Traffic safety and the driver(book review). *Ergonomics*, 36, 863-866.
- Gibson, J. J. (1950). *The Perception of the Visual World*. Boston, Houghton Mufflin.
- GDLS (2007). VTI *Synopsis_GDLS in Projectlink*

- C/MS HITWG, 29 Oct. 2007.
- Green, P.(1995) Automotive techniques. In J. Weimer(ed.), *Research Techniques in Human Engineering*, 165-201. San Diego, CA: Academic Press.
- Hoffman, D. M., Girshick, A. R., Akeley, K., & Banks, M. S. (2008). Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue, *Journal of Vision*, 8, 1-30.
- Iwashita, Y., Ishibashi, M., Miura, Y. & Yamamoto, M. (2011). Changes of Driver Behavior by Rear-end Collision Prevention Support System in Poor Visibility. *Proceedings of First International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic accident*, Tokyo, Japan, September 5-9.
- Kemeny, A. & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Cognitive sciences*, 7(1), 31-37.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.
- Kim, J. H., Matsui, Y., Hayakawa, S., Suzuki, T., Okuma, S., & Tsuchida, N. (2005). Acquisition and modeling of driving skills by using three dimensional driving simulator. *IEICE Trans. Fundamentals*, E88-A(3), 770-778.
- Koskela, K., Nurkkala, V.-M., Kalermo, J. & Järvillehto, T. (2011). "Low-cost driving simulator for driver behavior research," In *Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Virtual Reality(CGVR-2011)*, Las Vegas, USA, July 18-21.
- Lambooi, M., IJsselstein, W., Fortuin, M., & Heynderickx, I. (2009). Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review. *Journal of imaging science and technology*. 53(3). 030201-1 - 030201-14.
- Lee, J. S. (2000). Analysis of driver's front-to-rear-end collision avoidance behavior using a driving simulation study. *Korean journal of industrial and organizational psychology*, 13(2), 53-73.
- Lee, J. D., McGehee, D. V., Brown, T. L., & Reyes, M. L. (2002). Collision Warning timing, driver distraction, and driver response to imminent rear-end collision in a high-fidelity driving simulator. *Human factors*, 44(2), 314-334.
- Li, H. C. (2009). Quantitative measurement and instrument of subjective visual fatigue measures for 3D displays induced fatigue(3차원 디스플레이 유발 피로감을 정량적으로 측정할 수 있는 주관적인 시각적 피로감 측정방법 및 장치), *Publication of unexamined patent applications*, 10-2009-0079089.
- Panerai, F., Droulez, J., Kelada, J.-M., Kemeny, A., Balligand, E., & Favre, B. (2001). Speed and safety distance control in truck driving: comparison of simulation and real-world environment. *Proc. Driving simulation Conf. DSC 2000*, Paris, France.
- Park, J. J., Li, H. C. O., & Kim, S. W. (2013). Screen disparity and size perception function of various 3D stimuli. *Journal of Broadcast Engineering of Korea*, 18(1), 60-76.
- Park, K. S. & Lee, D. H. (2003). Perception of depth and size in stereoscopic displays. *Korean HCI Conference, 2003(2)*, 529-534.
- Schuemie, M. J., Straaten, P., Krijn, M. C., & Mast, A. (2001). Research on presence in VR: A survey. *Cyberpsychology and Behavior*, 4, 183-201.
- Singer, M., Ehrlich, J., Cinq-Mars, S., & Papin, J. (1995). *Task Performance in Virtual Environments: Stereoscopic Versus Monoscopic Displays and Head-Coupling(Tech. Rep. 1034)*. Alexandria, VA: U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Stoner, H. A., Fischer, D. L., & Mollenhauer, M. Jr. (2011). Simulator and scenario factors influencing simulator sickness, in D. L. Fischer, M. Rizzo, J. K. Caird and J. D. Lee, *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology*, CRC Press, Taylor and Francis Group, New York.
- Summala, H. (1981). Driver/vehicle steering response latencies. *Human Factors*, 23, 683-692.
- Wasielowski, P. (1984). Speed as a measure of driver risk: Observed speeds versus driver and vehicle characteristics. *Accident Analysis and Prevention*, 16, 89-103.
- Wickens, C. D., Lee, J. D., Liu, Y., & Gordon-Becker, S. E.(2004). *An Introduction to Human Factors Engineering*, Person Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Wright, R. H. (1995). *Virtual reality psychophysics: Forward and lateral distance, height and speed perceptions with a wide angle helmet display(ARI Technical Report 1025)*. Alexandria, VA: U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.

원고접수: 2014.08.13

게재확정: 2014.10.13