

## 가상현실-트레드밀 보행에서 시각적 속도감과 보행 속도감의 불일치가 가상현실 멀미에 미치는 영향

Effect of Inconsistency Between Visually Perceived Walking Speed and  
Physically Perceived Walking Speed on VR Sickness in VR-Treadmill Walking

최인범<sup>1</sup> · 박종진<sup>2</sup> · 김신우<sup>3</sup> · 이형철<sup>4\*</sup>

InBeom Choi<sup>1</sup> · Jong-Jin Park<sup>2</sup> · ShinWoo Kim<sup>3</sup> · Hyung-Chul O. Li<sup>4\*</sup>

### Abstract

The inconsistency in different sensory information causes virtual reality (VR) sickness. This research verifies whether the consistent sensory information reduces VR sickness within treadmill-based virtual reality. Furthermore, we examined the inconsistency between the visually perceived walking speed by optical flow in VR and the physically perceived walking speed in treadmill walking on VR sickness. In Experiment 1, participants reported VR sickness levels while experiencing an increase in the virtual reality. We compared the VR sickness level reported on the standing still condition with that on the treadmill-walking condition. Based on our results, less VR sickness and more sense of presence and immersion were reported on the treadmill-walking condition than on the standing still condition. In Experiment 2 and Experiment 3, the effect of inconsistency between perceived visual speed and perceived walking speed on VR sickness was examined. Interestingly, participants reported less sickness when the perceived visual speed was faster than the perceived walking speed, compared to when the sense of speed was consistent. These results imply that allowing participants to walk on a treadmill while experiencing virtual reality reduces VR sickness. Hence, the perceived visual-walking speed consistency is not necessarily required to reduce VR sickness.

**Key words:** Vr Sickness, Treadmill-Based Virtual Reality, Sensory Conflict Theory, Multisensory Integration, Speed Perception, Inconsistency of Perceived Walking Speed

### 요약

서로 다른 감각 정보의 불일치가 가상현실 멀미를 유발하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 트레드밀 기반의 가상현실 보행을 통해 감각 정보 일치의 멀미 완화 효과를 검증하고 나아가서 가상현실에서의 광학 흐름(optic flow) 단서에 의한 시각적 속도감과 트레드밀 보행을 통한 보행 속도감의 불일치가 멀미 완화 효과에 미치는 영향을 검증하였다. 실험1에서는 트레드밀 보행의 멀미 완화 효과를 검증하기 위해 HMD를 통해 앞으로 이동하는 가상현실 체험을 하면서 가만히 서 있을 때와 트레드밀 보행을 할 때의 멀미 수준을 비교하였다. 실험 결과 가상현실 속에서 이동을 하며 트레드밀 보행을 할 때 더 적은 멀미를 느끼고 실제감과 몰입감은 증가하였다. 실험2와 실험3에서는 가상현실 속에서 이동하는 속도에 대한 시각적 속도감과 트레드밀 보행의 속도감을 조작해 두 속도감이 일치할 때와

※ 이 논문은 2020년도 광운대학교 연구년에 의하여 연구되었음.

<sup>1</sup> 최인범: 광운대학교 산업심리학과 석사

<sup>2</sup> 박종진: 광운대학교 산업심리학과 박사

<sup>3</sup> 김신우: 광운대학교 산업심리학과 부교수

<sup>4\*</sup> (교신저자) 이형철: 광운대학교 산업심리학과 정교수 / E-mail: hyung@kw.ac.kr / TEL: 02-940-5425

불일치할 때의 멀미 수준을 비교하였다. 흥미롭게도 참가자들은 시각적 속도감이 보행속도감보다 빠르게 느껴지는 불일치 조건에서 일치조건보다 더 낮은 멀미를 경험하였다. 이와 같은 실험결과는 가상현실 속에서 이동할 때 시각적 정보와 일관되게 트레드밀 보행을 하게 하는 것이 가상현실 멀미를 완화시키지만 속도감의 일치가 필수적인 것이 아님을 시사한다.

**주제어:** 가상현실 멀미, 가상현실 - 트레드밀 보행, 감각 갈등 이론, 다감각 통합, 속도 지각, 속도감 불일치

## 1. 서론

가상현실 기술의 발전과 산업의 성장에도 불구하고 가상현실 멀미 증상은 여전히 해결되지 않은 문제로 남아있다. 가상현실 멀미는 게임, 영화, 시뮬레이터 등 시각 정보를 바탕으로 한 다양한 인터페이스에서 경험하는 멀미증상을 일컫는 사이버 멀미(cybersickness)의 일종으로 현기증, 두통, 메스꺼움, 눈의 피로, 어지러움, 구토 등의 증상을 경험한다는 점에서 일반적인 멀미(motion sickness) 증상과 유사한 면이 있다(McCauley & Sharkey, 1992; Jang et al., 2019).

사이버멀미는 일반적인 멀미와 다른 특징을 갖는다. 일반적인 멀미는 자동차, 배, 비행기 등 운송수단을 이용 할 때 예상하지 못한 신체의 흔들림이나 자세의 불안정성으로 인한 전정감각 이상으로 발생하는 반면 게임, 영화, 가상현실 상황에서 경험하는 사이버 멀미는 신체 움직임이 없는 상황에서 오로지 시각정보만으로 발생할 수 있다. 신체 움직임 없이 시각 정보만으로 멀미를 경험한다는 점에서 시각자극에 의한 멀미(visually induced motion sickness, VIMS)라고 불리기도 한다(Keshavarz et al., 2015; Chang et al., 2018).

Reason & Brand(1975)의 감각갈등이론(sensory conflict theory)에 의하면 전정감각(vestibular sense)을 통한 움직임 지각의 이상으로 발생하는 멀미 증상과 달리 사이버 멀미는 시각 정보와 전정감각 정보의 불일치로 인해 발생한다. 전정감각은 머리의 이동과 회전 등의 움직임을 지각해 신체의 균형을 유지하고 움직임과 시각의 통합에 필수적인 감각이다. 가상현실에서 시각을 통해 입력되는 정보를 기반으로 예상되는 내 신체의 움직임과 전정감각과 신체의 팔다리의 위치에 대한 감각인 고유감각(proprioception) 등을 통해 입력되는 움직임 정보의 불일치로 인한 부작용으로 멀미 증

상이 나타난다고 보는 것이 감각갈등이론의 입장이다. 실제로 다감각 정보의 통합(multi-sensory integration)에 어려움이 있는 광장공포증 환자는 가상현실 멀미를 더 쉽게 느끼는 것으로 알려져 있다(Viaud-Delmon et al., 2006).

사용자의 신체 움직임을 통해 가상현실에서의 활동을 체감할 수 있도록 하는 모션플랫폼(motion platform)은 사이버멀미, 특히 가상현실 멀미를 줄일 수 있는 방안 중 하나이다(Kim et al., 2003). 이론적으로 모션플랫폼 기반의 가상현실은 신체 움직임 지각을 위해 고유감각과 촉각 등을 포함하는 체성감각(somatosensory system) 정보를 활용함으로써 감각 간 갈등을 완화시켜 멀미를 줄일 수 있다. 또 가상현실 체험의 몰입감(immersion)과 실재감(presence)을 높이는 효과가 있어서 게임과 훈련, 재활 등 상황에서 특히 중요한 문제이다(Kwon & Sung, 2019).

HMD(head-mounted display)를 착용한 사용자가 가상현실에서 이동을 하며 트레드밀(treadmill) 보행을 하는 형태가 대표적인 모션플랫폼의 예이다. 가상현실 이동 상황에서 사용자는 HMD를 통해 광학 흐름(optic flow)이 포함된 자극을 보며 공간 속을 이동하는 착각(illusion)을 경험한다. 감각 갈등 이론을 바탕으로 예상하면 이 같은 상황에서 신체 움직임이 없다면 시각 정보와 전정감각 및 체성감각 정보와의 갈등으로 멀미 증상이 나타날 것이다. 하지만 트레드밀 보행이나 혹은 제자리 걸음 등을 통해 신체가 보행한다는 정보를 입력받는다면 멀미는 줄어들고 가상현실에서 이동한다는 느낌은 더 강화될 것이다.

그런데 트레드밀 보행을 통해 가상현실 멀미를 감소시키기 위해서는 가상현실과 트레드밀에서 구현한 물리적 속도와 실제 사용자가 지각하는 주관적 속도감을 구별해서 접근해야 할 필요가 있다. 가상현실에서 광학

흐름의 속도와 트레드밀 보행의 속도가 물리적으로 동일하더라도 실제 사용자가 지각하는 것은 동일하지 않다. 가상현실에서의 자기 운동 속도감은 실제 현실에서의 물리적 속도보다 일관되게 압축되어 지각되기 때문이다. Banton et al. (2005)은 이와 같은 현상의 원인이 가상현실에서의 좁은 시야각(field of view, FOV) 때문이라고 주장하였다. 전진 이동을 할 때의 시각적 속도감은 눈으로 들어오는 광학 흐름 단서를 통해 형성되는데 HMD의 좁은 시야각은 측면에서 들어오는 광학 흐름 단서를 제한하기 때문에 충분한 속도 지각이 되지 않는 것이다. Caramenti et al. (2019)은 가상현실에서 자기중심 거리(egocentric distance)가 압축되어 지각되는 것을 원인으로 제시했다. 가상현실에서는 거리 및 크기가 실제 현실에서 보다 작거나 짧게 지각되는 경향이 있다(Plumert et al., 2005). 거리 지각이 압축되기 때문에 속도도 압축되어 지각되는 것이다.

또 물리적 속도와 지각되는 속도인 속도감을 구별하는 것 뿐 아니라 가상현실에서 시각 정보를 통해 지각되는 시각적 속도감과 트레드밀 보행을 할 때 시각을 제외한 다른 신체감각을 통해 지각되는 신체적 속도감을 구별해야 할 필요가 있다. 일상에서의 자연스러운 이동과 보행 시에는 내 보행 속도와 광학 흐름 속도가 분리되지 않기 때문에 이러한 의도적인 구분은 자연스럽지 않지만 트레드밀 기반의 가상현실에서 자연스러운 보행을 구현하기 위해서는 고려해야 할 문제이다. Rieser et al. (1995)은 의도적으로 신체 보행 속도와 광학 흐름 속도를 분리하기 위해 주행 중인 트랙터 뒤에 트레드밀을 매달아 트레드밀 보행을 하는 방식을 시도하기도 하였다. HMD를 사용하는 트레드밀 기반 가상현실에서는 HMD를 통해 투사되는 광학흐름의 속도에 의해 입력되는 시각적 속도감과 트레드밀 보행으로 입력되는 보행 속도감을 독립적으로 조작하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 이런 트레드밀 기반 가상현실 상황에서 광학 흐름 속도를 통한 시각적 속도감과 트레드밀 보행을 통해 입력되는 신체적 속도감 간의 불일치가 가상현실 멀미에 미치는 영향을 실험을 통해 검증하고자 하였다. 자기 신체의 움직임에 대한 지각은 시각, 전정감각, 고유감각 및 체성감각, 그리고 청각까지 다양한 감각들의 통합으로 형성된다(Gibson, 1966; Howard,

1982). 특히 가상현실-트레드밀 보행에서는 HMD에서 투사되는 광학 흐름 단서를 통해 입력되는 시각 정보와 트레드밀 보행을 통해 입력받는 체성감각 정보의 통합으로 속도감이 통합된다. 서로 다른 감각 정보의 불일치로 인한 혼란과 부작용이 사이버멀미의 원인이므로 이런 실험 상황에서 서로 다른 감각 정보의 자기 운동 속도 지각은 멀미를 유도할 것이라 예상할 수 있다.

실험1은 가상현실을 체험할 때 트레드밀 보행을 하는 것이 멀미를 완화시키는지 그 효과를 검증하기 위해 정지한 채로 가상현실 이동을 체험할 때와 가상현실의 시각적 속도감과 일치하는 속도로 트레드밀 보행을 할 때의 멀미 수준을 비교하였다. 실험2와 실험3에서는 가상현실에서의 시각적 속도감이 보행 속도감보다 더 빠르거나 더 느릴 때의 멀미와 보행 속도감과 일치할 때의 멀미를 비교하였다. 이를 통해 시각 정보를 바탕으로 한 가상현실서의 속도감과 트레드밀 보행을 통한 신체의 속도감의 불일치가 가상현실-트레드밀 보행의 멀미 완화 효과에 미치는 영향을 검증하고자 하였다.

## 2. 실험 1

실험1의 목적은 1인칭 시점에서 전진하는 것을 모사한 시각적 가상현실 상황에서 실제로 트레드밀 위를 걷는 신체 움직임이 시각-고유 감각의 갈등을 해소하여 멀미증상을 완화하는가에 대한 가설을 검증하는 것이다. 참가자는 HMD를 통해 1인칭 시점으로 가상현실 속 복도에서 앞으로 이동하는 상황을 모사한 시각 자극을 체험하였다. 이때 트레드밀 위에서 가만히 서 있는 ‘정지’ 조건과 영상 속 이동속도와 일치한다고 지각하는 속도로 트레드밀 위를 걷는 ‘보행’ 조건에서 경험하는 멀미 수준을 측정하고 비교하였다.

### 2.1. 방법

#### 2.1.1. 연구대상

00대학교 학생 18명(남자 5명)이 자발적으로 실험에 참여하였고 평균 연령은 22.14세( $SD=2.16$ )였다. 참가자들에게는 한번 실험 당 8000원의 참가비를 지급하였

다. 예비 실험을 진행한 결과 크기가 큰 안경을 착용한 참가자들은 HMD를 착용한 채로 보행을 할 때 안경과 함께 HMD가 흔들리는 현상을 보고하였다. 이것이 가상현실 멀미에도 영향을 줄 것이라고 판단하여 본 실험에는 안경을 착용하지 않은 참가자만 모집하였다. 교정시력 0.6D 이상의 참가자만 실험에 참여하도록 하였고 평균 교정시력은 좌안 0.99D( $SD=0.18$ ), 우안 1.00D( $SD=0.28$ )이었다.

### 2.1.2. 측정도구

도구. 시야각 110°, 해상도 2,160 × 1,200와 90Hz의 화면 갱신을 지원하는 Oculus Rift CV1 HMD를 가상현실 장비로 사용하였다. 가상현실 자극은 4.21.1버전의 Unreal Engine으로 구현하였다. 트레이드밀은 PowerFisrt사의 Vegas-6000모델을 사용하였다.

가상현실 자극. HMD를 통해 제시된 가상현실은 참가자의 시점에서 복도를 걸어가는 상황을 모사한 자극이다. 복도는 폭 2.5m, 높이 3m로 Unreal Engine에서 제공하는 기본 텍스처들을 사용하여 구성하였다. 속도 지각의 단서가 될 광학 흐름자극을 제공하기 위해 평균 9m 간격으로 벽에 기둥을 배치하였다. 가상현실에서 앞으로 이동하는 속도는 가상현실에서 자기운동 속도 지각에 대한 이전 연구(Banton et al., 2005)와 동일하게 4.5km/h로 설정하였다.

멀미 측정 척도. 가상현실 체험 중 참가자가 경험하는 멀미의 수준을 측정하기 위해 Keshavarz & Hecht (2011)가 개발한 주관적인 사이버 멀미 측정 방법인 FMS(Fast motion sickness scale)를 사용하였다. 본 척도는 사용자가 느끼는 멀미를 스스로 보고하는 방식이기 때문에 빠르고 간단한 측정이 가능하다. 또 시간대별로 멀미 수준의 변화를 알 수 있다는 장점이 있다. 참가자는 가상현실 체험을 하며 자신이 느끼는 멀미(메스꺼움, 불편감, 위장의 문제)의 수준을 숫자 0(증상 없음)부터 20(매우 심함) 사이에서 1분 단위로 보고하였다.

예비 실험 단계에서 몇몇 참가자들이 주관적인 멀미 수준을 숫자로 보고하는 데에 어려움을 호소하였다. 따라서 본 실험에서는 기준을 보다 구체적으로 설정하였다. 최저점인 0을 ‘가상현실 체험을 하기 전의 상태와 같은 수준’으로, 20을 ‘더 이상 실험을 진행할 수 없을

정도로 심각한 수준’이라고 추가적으로 안내하고 이와 같은 기준을 참조하여 멀미 수준을 숫자로 보고하도록 안내하였다.

몰입감 및 실재감 척도. 멀미감과 함께 가상현실에서 참가자들이 경험한 몰입감(immersion)과 실재감(presence)도 측정하였다. Kye & Kim (2008)가 개발한 증강현실 기반 학습 효과 척도에서 ‘현존감’과 ‘감각적 몰두’ 설문문항들을 본 실험에 맞게 단어를 바꾸어 사용하였다. 설문은 각 4개 문항이었고 1점(전혀 느껴지지 않았다)부터 5점(아주 강하게 느꼈다)까지 리커트 5점 척도로 구성하였다.

### 2.1.3. 실험 절차

본 실험은 집단 내 실험으로 한 명의 참가자가 두 번 실험에 참여하였기 때문에 같은 자극을 두 번 체험하였다. 따라서 참가자의 멀미감이 습관화의 영향을 받을 것을 고려해 각 조건을 서로 다른 날에 실험하도록 구성하였다. 순서 효과를 제거하기 위하여 모든 조건의 순서는 상쇄균형화 하였다.

실험실에 도착한 참가자는 먼저 실험에 대한 설명을 들은 후 실험 참가 동의서를 작성하였으며 동의서



Fig. 1. The scene of the actual experiment



작성 후 나이, 성별 등의 간단한 신상정보를 포함한 설문지를 작성하였다. 위의 과정은 이후의 두 번째 실험에서는 생략되었다.

설문 작성 후 양안 시차에 의해 유발되는 입체 지각을 가상현실 체험을 하는 데에 필요한 최소한의 수준 이상으로 지각 가능한지 확인하기 위해 무선점 입체 자극(random dot stereo, RDS) 과제를 진행하였다. 과제는 화면의 좌우에 제시되는 두 가지의 자극 중 더 가까이 있다고 지각되는 자극을 선택하는 것이었다. 총 20번의 시행 중 4회 이상 틀린 참가자는 실험 대상으로 적절하지 않다고 판단해 배제하였다.

무선점 입체 자극 과제를 통과한 참가자는 각 참가자가 가상현실의 이동 속도와 일치한다고 지각하는 트레드밀 보행 속도를 측정하는 ‘속도 일치 과제’(speed matching task)를 실시하였다. 참가자들은 먼저 HMD를 착용한 채로 트레드밀 보행을 하였다. 트레드밀의 속도가 목표속도(3km/h 혹은 6km/h)에 도달하고 10초 뒤부터 HMD를 통해 가상현실 자극을 제시하였다. 이때 참가자는 트레드밀 손잡이에 장착된 버튼을 사용해 트레드밀 속도를 0.1km/h 단위로 조작해 가상현실에서의 광학 흐름 속도 4.5km/h와 일치한다고 지각되는 트레드밀 속도를 탐색하였다. 이것은 절대적인 속도 값을 찾는 것이 아니라 시각 정보를 통해 입력된 속도 지각(시각적 속도감)과 고유감각을 비롯한 체성감각을 통해 입력된 속도(보행 속도감)의 지각적 일치점(가상 일치 속도)을 찾는 것이다(Caramenti et al., 2019). 속도 탐색은 두 번 진행하였고 매 시행은 3분을 넘지 않도록 하였다. 두 번의 속도 측정의 평균을 구해 각 참가자 별로 가상현실 속도 4.5km/h와 일치한다고 지각하는 트레드밀 보행 속도로 규정하였다. 속도 일치 과제가 끝나면 참가자는 HMD를 벗은 뒤 자리에 앉아 3분간 휴식을 취하고 본 실험을 시작하였다.

참가자는 HMD를 쓴 채로 다시 트레드밀 위에 올라 보행 조건과 정지 조건의 실험을 진행하였다. 보행 조건에서는 속도 일치 과제에서 측정한 속도로 트레드밀 보행을 하였다. 이때 참가자의 양 손은 트레드밀에 장착된 손잡이를 잡도록 지시하였다. 보행을 시작하고 10초 뒤부터 HMD를 통해 가상현실 자극을 제시하였고 참가자는 10분 동안 가상현실-트레드밀 보행을 실시하였다. 실험자는 1분 단위로 참가자에게 멀미감을 보고

하도록 안내하였다. 10분 간 10번의 측정 후 가상현실-트레드밀 보행을 종료하였다. 이후 의자에 앉아 몰입감과 실제감 설문지를 작성하였다. 정지 조건에서는 다른 요인은 모두 보행 조건과 동일하였고 다만 참가자가 트레드밀 위에 서서 실험을 진행하였다.

위와 같은 실험 절차를 마친 참가자는 다른 날 다시 방문하여 이전과 다른 조건의 실험을 한 번 더 실시하였다. 실험 전 과제와 가상현실 체험, 설문지 응답을 모두 포함하여 전체 실험은 약 40분이 소요되었다.

#### 2.1.4. 분석 방법

조건 간의 멀미감을 비교하기 위해 시간 경과에 따른 멀미감 증가의 경향성을 분석하였다. 선형회귀 분석을 통해 각 참가자별 시간 경과에 따른 멀미감의 변화의 기울기( $\beta$ )를 구한 뒤 각 조건의 평균 멀미감 증가의 경향을 구했다. 또 각 조건 간 평균 멀미감을 비교하고 시간 변화와 조건의 상호작용을 확인하기 위해 실험 조건과 시간대별 측정을 요인으로 하는 이원반복분산분석(Two-way Repeated Anova)를 실시하였다. 추가로 시간대별 평균 멀미감과 평균 실제감, 몰입감을 역시 대응표본 T검증을 사용해 조건 간 비교하였다.

## 2.2. 결과

모집된 참가자 20명 중 입체 지각 테스트를 통해 2명을 제외해 총 18명의 참가자를 대상으로 분석하였다. 참가자들은 서로 다른 날에 두 번 실험에 참가하였으며, 평균 2.14일( $SD=1.60$ )의 간격을 두고 실험을 진행하였다.

평균 멀미감 변화량은 정지 조건의 평균 기울기는 .71( $SD=.48$ )로 보행 조건의 평균 기울기 .34( $SD=.35$ )보다 통계적으로 유의미하게 높은 것으로 나타났다( $t(17)=3.14, p<.01, ES(d)=1.48$ ). 각 조건의 시간 경과에 따른 평균 멀미감과 멀미감 변화의 경향성을 나타낸 Fig. 2 그래프를 보면 정지 조건에서 보행 조건보다 더 큰 멀미를 경험하였고 시간경과에 따른 멀미감의 기울기가 더 가파름을 알 수 있다.

이원반복분산분석을 실시한 결과, 조건의 주효과가 유의미한 것으로 나타났다( $F(1,17)=4.79, p<.05, ES(\eta^2)=.22$ ). 보행 조건의 평균 멀미감은 3.18( $SD=3.11$ )으로

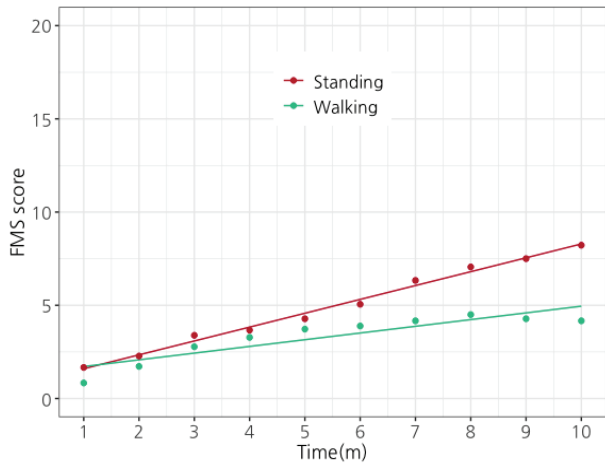


Fig. 2. The linear regression and mean levels of VR sickness along with time pass in Experiment 1

정지 조건의 평균 멀미감 4.86( $SD=3.89$ )보다 유의미하게 낮은 것으로 나타났다. 또한 시간과 조건의 상호작용 역시 유의미한 것으로 나타났다( $F(9,153)=9.04, p<.001, ES(\eta^2)=0.34$ ).

상호작용효과가 나타난 것에 대해 사후분석을 위해 단순주효과 분석(Simple Main Effect)을 실시하였다. 그 결과 보행 조건과 정지 조건에서 모두 시간에 의한 단순주효과가 유의미한 것으로 나타났다(보행 조건:  $F(9,340)=2.31, p<.01, ES(\eta^2)=.06$ , 정지 조건:  $F(9,340)=9.16, p<.001, ES(\eta^2)=.19$ ). 두 조건 간의 효과크기를 비교했을 때, 정지 조건에서 시간 변화에 따른 멀미 증가의 효과가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 실험 시간 10분 경과한 시점에서의 조건에 의한 단순주효과가 유의미한 것으로 확인되었다( $F(1,340)=13.58, p<.05, ES(\eta^2)=.03$ ). 즉, 10분 경과한 시점에서는 조건 간의 멀미감 차이가 유의미한 것으로 확인되었다.

두 조건 간 실재감의 차이는 통계적으로 유의미하게 나타났고 몰입감은 유의미하지는 않았지만 임계치에 근접한 차이(marginally significant)가 나타났다(실재감:  $t(17)=2.74, p<.001, ES(d)=0.73$ , 몰입감:  $t(17)=1.88, p=.076, ES(d)=0.54$ ). 보행 조건의 몰입감과 실재감 평균은 3.47( $SD=1.01$ )과 3.53( $SD=0.99$ )로 정지 조건의 2.93( $SD=0.99$ )과 2.85( $SD=0.86$ ) 보다 높게 나타났다 (Fig. 3 참조). 즉, 실재감과 몰입감 모두 보행 조건에서 더 크게 경험한 것으로 나타났다.

실험1의 결과는 가상현실 체험에서 신체 움직임을 통해 시각정보와 고유감각 등 체성감각을 일치시켜 서로 다른 감각 정보 간 갈등을 완화시켜줬을 때 멀미를 적게 경험할 것이라는 가설을 지지하였다. HMD를 통해 제시된 앞으로 전진하는 1인칭 시점의 가상현실 자극을 보며 트레드밀 보행을 했을 때 가만히 서서 자극을 봤을 때보다 더 낮은 멀미감을 경험하였고 시간경과에 따른 멀미감 증대도 적게 나타났다. 또한 트레드밀 보행을 통한 고유감각 및 체성감각 정보의 일치가 멀미 증상을 완화시키는 효과 뿐 아니라 가상현실 체험의 몰입감과 실재감을 높여주는 효과도 확인하였다.

실험2에서는 더 나아가 트레드밀 보행을 통한 멀미감 완화 현상에서 두 감각 정보 간 속도감의 상대적 관계가 멀미감에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 기존 연구에서 속도감의 불일치로 인한 감각 갈등이 멀미에 미치는 영향을 다룬 바는 없었다. 하지만 실험1에서 확인한 것과 같이 가상현실에서 시각 정보를 통해 예상되는 신체의 다른 감각 정보들을 실제 현실에서의 신체 움직임을 통해 유사하게 제공하는 것이 멀미 완화를 위해 중요한 요인이라면 속도감의 일치 역시 멀

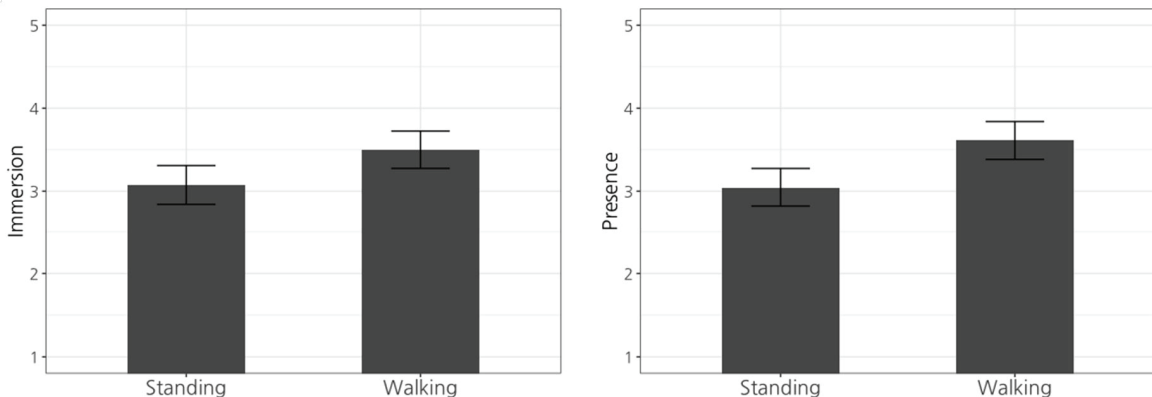


Fig. 3. The mean immersion(left) and presence(right) in Experiment 1

미 완화를 위해 필요한 요인일 것이라 예상할 수 있다. 따라서 가상현실의 시각적 속도감이 트레드밀의 보행 속도감보다 빠르거나 느릴 때, 두 속도감이 일치할 때보다 멀미가 증가할 것이라고 예측하였다.

### 3. 실험 2

실험2의 목적은 전진하는 1인칭 시점의 가상현실에서의 시각적 속도감과 트레드밀 보행 속도감이 불일치한다면 속도감이 일치할 때보다 더 큰 멀미감을 경험하는지를 검증하는 것이다. 이를 통해 서로 다른 감각으로 입력되는 속도감의 불일치가 감각 갈등을 일으켜 멀미를 유도하는지를 확인하고 응용적으로는 가상현실 멀미를 줄이기 위한 조건을 탐색하고자 하였다.

가설을 검증하기 위해 가상현실의 시각적 속도감이 트레드밀의 보행 속도감보다 빠른 조건과 느린 조건의 두 조건에서의 멀미감을 통제조건에 해당하는 속도감이 일치하는 조건에서의 멀미감과 비교하였다. 또 추가적으로 각 조건에서의 가상현실 체험의 실제감과 몰입감 역시 측정해 비교하였다. 독립변인 등의 부분적인 실험 설계를 제외한 나머지는 실험1과 동일하였다.

#### 3.1. 방법

##### 3.1.1. 연구 대상

실험1과 마찬가지로 참가자는 00대학교 학생 15명(남자 5명)을 모집했고 평균 연령은 21.59세( $SD=1.50$ )였다. 교정시력 0.6D 이상의 참가자만 대상으로 했고 평균 교정시력은 좌안 0.96D( $SD=0.22$ ), 우안 0.99D( $SD=0.18$ )이었다.

##### 3.1.2. 실험 절차

전체 실험 절차는 실험1과 동일하였고 실험 조건과 자극 제시 시간에서 차이가 있었다. 실험 조건은 가상현실에서의 시각적 속도감과 트레드밀 보행 속도감이 일치하는 일치 조건, 가상현실의 속도감이 더 ‘빠른 조건’, 그리고 가상현실의 속도감이 더 ‘느린 조건’의 세 가지였다. 집단 내 실험으로 한 참가자는 서로 다른 날에 세 번 참여하였고 실험1과 마찬가지로 각 조건의

순서는 상쇄균형화되었다.

통제 조건인 일치 조건의 트레드밀 보행 속도를 3.5km/h로 설정하였다. 이 속도는 실험1 참가자들의 가상현실 속도 4.5km/h와 일치한다고 지각한 평균 보행 속도였다. 빠른 조건의 보행 속도는 이전 연구(Kim et al., 1994)에서 측정했던 일반인의 최대 안전 보행 속도인 6km/h로 설정하였다. 느린 조건의 보행 속도는 일치 조건의 3.5km/h와 빠른 조건의 6km/h 간의 비율과 동일한 비율을 유지하기 위해 2km/h로 설정하였다.

실험1과의 또 다른 차이점은 자극 제시 시간으로 실험2에서는 실험1에서의 10분보다 5분을 더 제시해 15분 간 멀미감을 측정하였다. 실험1에서 자극 제시 시간이 지날수록 조건 간 차이가 커졌던 것을 감안해 독립변인의 효과를 명확히 확인하고자 제시시간을 확장하였다.

##### 3.1.3. 분석 방법

실험1과 같이 주효과 분석을 위해 조건 간의 멀미감 증가의 평균 경향성을 계산하여 비교하였고 추가분석으로 시간대별 평균 멀미감이 조건 간 차이가 나타나는지 분석하였다. 또 조건 간 평균 멀미감에 의한 주효과와 시간과 조건 간의 상호작용효과를 검증하기 위해 이원반복측정 분산분석(Two-way Repeated ANOVA)을 수행하였다. 마지막으로 가상현실 체험의 평균 실제감과 몰입감을 조건 간 비교하였다. 집단 내 설계였으므로 세 조건 간의 평균을 비교하기 위해 반복측정 분산분석(One-way Repeated ANOVA)을 시행하였다.

#### 3.2. 결과

조건 간 멀미감 증가의 평균 기울기는 통계적으로 유의미한 차이가 나타나지 않았다( $F(2,28)=.45, p>.05, ES(\eta^2)=0.03$ ). Fig. 4의 그래프를 보면, 각 조건의 평균 회귀선은 절편값의 차이만 있을 뿐, 기울기는 유사한 것을 알 수 있다. 또한 시간과 조건을 요인으로 하는 이원반복분산분석 결과, 시간에 의한 주효과( $F(14,196)=16.02, p<.001, ES(\eta^2)=0.53$ )만 나타났고 조건에 의한 주효과( $F(2,28)=1.71, p>.05, ES(\eta^2)=.10$ )와 상호작용효과( $F(28,392)=.45, p>.05, ES(\eta^2)=.03$ )는 나타나지 않았다. 몰입감( $F(2,28)=.01, p>.05, ES(\eta^2)=.00$ )과 실제감

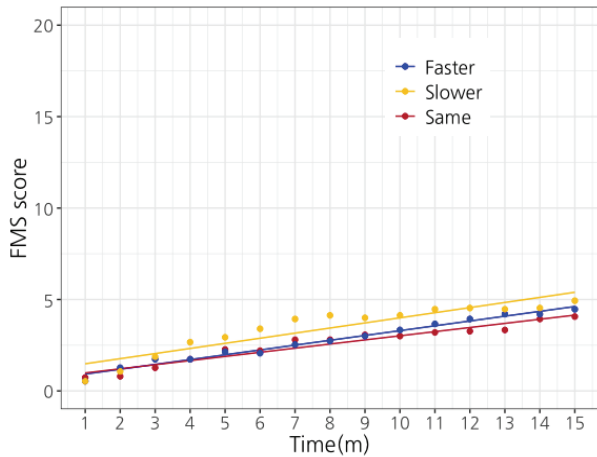


Fig. 4. The linear regression and mean levels of VR sickness along with time pass in Experiment 2

( $F(2,28)=.03, p>.05, ES(\eta^2)=.02$ )에서도 역시 유의미한 차이는 발견되지 않았다.

실험 가설과 달리 가상현실과 트레드밀의 주관적 속도감이 일치할 때의 멀미감 증가의 경향이 불일치하는 두 조건과 차이가 나타나지 않았다. 오히려 특정 시점에서는 속도감이 일치할 때 속도감이 불일치 하는 두 조건보다 더 심한 멀미감을 경험하기도 하였다. 실재감과 몰입감 역시 가설과 달리 일치 조건과 빠른 조건, 느린 조건 간에 차이가 나타나지 않았다.

실험2와 실험1의 결과를 종합하면, 가상현실에서 시각을 통해 입력되는 전진한다는 정보와 동일하게 트레드밀 보행을 통해 신체의 다른 감각 역시 앞으로 보행한다는 정보를 제공하는 것이 가만히 정지해 있을 때와 비교해 멀미가 완화되고 실재감과 몰입감이 증가하는 효과를 발견하였다. 그런데 이때 가상현실의 시각속도와 트레드밀 보행의 속도가 불일치하는 것은 멀미 완화 효과를 저해하지 않았다. 이러한 결과는 가설과는 상반되지만 감각 정보 간 속도감의 불일치가 멀미감에 미치는 영향에 대한 연구가 기존에 없었다는 점에서 새로운 현상의 발견일 가능성이 있다. 또 가상현실 멀미를 줄이기 위한 방법적 측면에서 중요한 응용적 가치를 가질 수 있다.

실험2의 결과가 가지는 중요성을 고려했을 때, 후속 실험을 통해 반복 검증하는 것이 필요하다고 판단하였다. 이를 위해 실험2의 실험 설계 중 독립변인인 가상현실의 시각 속도와 트레드밀 보행 속도 간 관계를 조작하는 방식을 수정해 실험3을 진행하였다.

실험2에서는 일치조건에서의 보행속도를 설정하기 위한 일치 속도 탐색 과제를 생략하고 실험1에서 측정한 평균 가상 일치 속도를 사용하였다. 참가자 개인의 시각적 속도감의 차이를 고려하지 않은 실험 구성이 어찌면 가설과 다른 결과가 나온 원인일수도 있다는 판단으로 실험3에서는 일치 속도 탐색 과제를 수행해 각 참가자의 일치 속도를 기준으로 트레드밀 보행 속도를 조작하였다.

### 4. 실험 3

실험3의 목적은 각 참가자의 가상현실의 속도와 일치하는 보행속도인 가상 일치 속도를 직접 측정해 실험2의 결과가 반복되는지를 검증하는 것이었다. 실험2의 결과가 정교하지 못한 변인 조작에 기인한 것이 아니라면 가상현실의 시각적 속도감이 트레드밀의 보행 속도감보다 더 빠를 때 속도감이 일치하거나 더 느릴 때보다 멀미를 적게 경험할 것이다. 독립변인 조작 방식과 가상현실 체험의 시간을 제외한 나머지 실험 설계는 실험2와 동일하였다.

#### 4.1. 방법

##### 4.1.1. 연구 대상

00대학교 학생 18명(남자 10명)을 모집했고 평균 연령은 22.6세( $SD=2.30$ )였다. 교정시력 0.6D 이상의 참가자만 대상으로 했고 평균 교정시력은 좌안 0.94D( $SD=0.11$ ), 우안 0.93D( $SD=0.18$ )이었다. 이전 실험과의 유사성을 고려해 실험2 참가자는 모집대상에서 제외하였다.

##### 4.1.2. 실험 절차

전체 실험 절차는 이전 실험들과 동일하였고, 자극 제시 시간과 독립변인 처치인 가상현실 - 트레드밀의 주관적 속도감 관계를 조작하는 방식과 자극 제시 시간만 차이가 있었다. 자극 제시 시간은 15분 간 보행을 했던 실험2에서 몇몇 참가자들이 체력적 부담을 호소해 실험1과 동일하게 10분으로 설정하였다.

본 실험에서 가상현실 - 트레드밀의 주관적 속도감 관계를 조작하는 방식은 이전의 두 실험과 두 가지 측



면에서 차이가 있다. 먼저 가상현실의 이동 속도, 즉 광학 흐름 속도를 4.5km/h로 고정한 채 트레드밀 보행 속도를 조작했던 실험2와 달리 트레드밀 보행 속도를 4.5km/h로 고정한 채로 실험 조건 별로 가상현실의 광학 흐름 속도를 조작하였다. 두 번째로 실험2에서는 실험1에서 측정된 가상 일치 속도의 평균을 일치 조건의 가상현실 광학 흐름 속도로 설정하였던 반면에, 실험3에서는 각 참가자의 가상 일치 속도를 측정해 트레드밀 보행 속도로 설정하였다. 즉, 각 참가자 개인의 시각적 속도감 차이를 충분히 반영한 실험 설계였다.

다음은 실험3에서의 가상 일치 속도 탐색의 절차이다. 참가자는 먼저 4.5km/h 속도로 트레드밀 보행을 시작하였다. 트레드밀 속도가 4.5km/h에 도달하고 10초 뒤부터 착용하고 있는 HMD를 통해 가상현실 자극을 제시하였다. 참가자들은 직접 트레드밀 위에 장착된 키보드의 화살표키를 눌러 가상현실에서의 이동속도를 조작하였다. 이 과정을 통해 참가자가 걷고 있는 트레드밀의 속도와 일치하는 가상현실에서의 전진하는 속도를 탐색하였다. 과제는 처음 제시되는 가상현실 이동 속도를 3km/h와 6km/h로 설정해 두 번 측정하였다.

측정 결과 트레드밀 속도 4.5km/h와 일치하는 것으로 지각한 가상현실 이동 속도의 평균은 5.36km/h ( $SD=1.82$ )였다. 따라서 주관적 속도감이 일치하는 조건(이하 ‘일치 조건’)의 평균 가상현실 이동 속도는 5.4km/h로 구성하였고, 가상현실 속도가 트레드밀 속도보다 두 배 빠른 조건(이하 ‘빠른 조건’)은 평균적으로 10.8km/h, 느린 조건(이하 ‘느린 조건’)은 2.7km/h로 제시되었다. 각 조건은 이전 실험들과 마찬가지로 상쇄 균형화되었다.

4.1.3. 분석 방법

분석 방법은 실험2와 모두 동일하였다. 다만 자극 제시 시간이 10분으로 줄었기 때문에 10분 동안 멀미감 증가의 평균 기울기를 조건 간 비교하였다. 또 조건 간 평균 멀미감에 의한 주효과와 시간과 조건 간의 상호작용효과를 검증하기 위해 이원반복측정 분산분석(Two-way Repeated ANOVA)을 수행하였다. 마지막으로 가상현실 체험의 평균 실재감과 몰입감을 조건 간 비교하였다. 집단 내 설계였으므로 세 조건 간의 평균을 비교하기 위해 반복측정 분산분석(one-way repeated

ANOVA)을 시행하였다.

4.2. 결과

멀미감 증가의 평균 기울기는 조건 간 통계적으로 유의미한 차이가 나타났다( $F(2,34)=5.41, p<.01, ES(\eta^2)=.24$ ). 사후분석을 통해 빠른 조건의 평균 기울기 0.17( $SD=.33$ )가 일치 조건의 평균 0.40( $SD=.38$ )과 느린 조건의 평균 0.49( $SD=.61$ )보다 낮은 것을 확인하였다. Fig. 5의 그래프를 보면 일치 조건과 느린 조건의 멀미감 증가 경향이 빠른 조건보다 가파르게 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 실재감과 몰입감은 조건 간 차이가 나타나지 않았다(실재감:  $F(2,34)=.56, p>.05, ES(\eta^2)=.02$ , 몰입감:  $F(2,34)=.34, p>.05, ES(\eta^2)=.01$ ).

멀미감에 대하여 시간과 조건의 이원반복 분산분석을 실시한 결과, 시간에 의한 주효과( $F(9,153)=13.65, p<.001, ES(\eta^2)=.44$ )와 시간과 조건의 상호작용 효과( $F(18,306)=2.90, p<.05, ES(\eta^2)=.14$ )가 유의미했던 반면, 조건에 의한 주효과( $F(2,34)=1.71, p>.05, ES(\eta^2)=.06$ )는 유의미하지 않은 것으로 나타났다. 시간과 조건의 유의미한 상호작용 효과에 대한 사후분석으로 단순주효과 분석을 실시한 결과, 느린 조건에서의 시간의 단순주효과( $F(9,510)=4.63, p<.001, ES(\eta^2)=.07$ )와 일치 조건에서의 시간의 단순주효과( $F(9,510)=2.93, p<.05, ES(\eta^2)=.04$ )는 유의미하였으나 빠른 조건에서는 유의미하지 않았다( $F(9,510)=.60, p>.05, ES(\eta^2)=.01$ ).

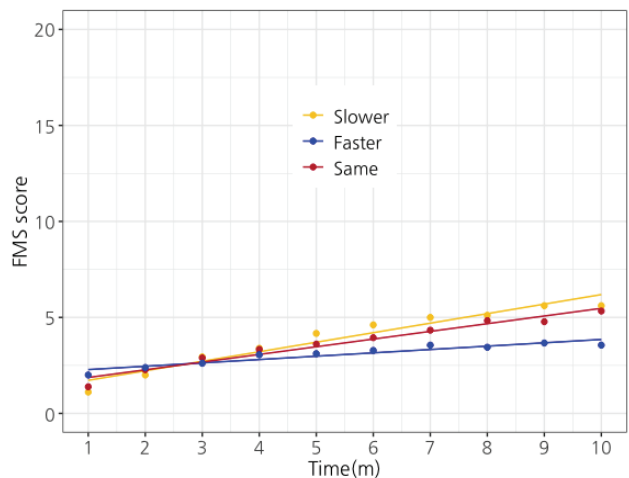


Fig. 5. The linear regression and mean levels of VR sickness along with time pass in Experiment 3

가상현실의 시각적 속도감과 트레드밀의 보행 속도감의 불일치할 때의 멀미가 일치할 때와 차이가 나타나지 않았던 실험2과 동일하게 실험3에서도 평균 멀미감은 조건 간 차이가 없었지만 시간 변화에 따른 멀미감 증가의 경향성에서 조건 간 차이가 나타났다. 특별히 시각적 속도감이 보행 속도감보다 느릴 때와 두 속도감이 일치할 때는 차이가 없었지만 시각적 속도감이 보행 속도감보다 더 빠를 때에는 앞선 두 조건에서 보다 시간 변화에 따른 멀미감 증가의 경향성이 낮은 것으로 나타났다. 시간과 조건의 상호작용 효과에 대한 단순주효과 분석의 결과에 의하면 이러한 조건 간의 차이는 가상현실 체험 시간이 경과할수록 멀미감이 증가했던 다른 두 조건과 달리 시각적 속도감이 더 빠를 때는 가상현실 체험 시간이 지속되더라도 멀미감이 크게 증가하지 않았기 때문으로 해석할 수 있다. 이것은 실험2에서 시각 속도가 보행 속도보다 빠를 때 부분적으로 나타난 멀미감 완화 현상이 실험3에서 실험 설계의 수정으로 인해 더 명확하게 나타난 것으로 볼 수 있다. 실재감과 몰입감은 실험2에 이어서 실험3에서도 조건 간 차이가 나타나지 않은 것으로 보아 속도감의 불일치가 실재감과 몰입감을 저해하지 않는 것으로 해석할 수 있다.

## 5. 종합 논의

본 연구는 트레드밀 기반 가상현실에서 가상현실의 시각적 속도감과 트레드밀 보행의 속도감 간의 불일치가 사용자의 가상현실 멀미에 미치는 영향을 검증하고자 수행하였다. 실험1은 감각 갈등 이론을 바탕으로 트레드밀 보행이 가상현실 이동 상황에서 실제로 멀미감을 낮추는 효과를 갖는지 검증하고자 수행하였다. 그 결과 트레드밀 보행을 하며 가상현실 이동 체험을 할 때 신체가 정지해 있을 때보다 낮은 멀미감과 높은 실재감, 몰입감을 경험하였다. 즉, 트레드밀 기반 가상현실의 감각 정보 간 일치를 통한 멀미감 완화 효과를 확인할 수 있었다. 실험2는 트레드밀 보행의 속도감이 HMD를 통해 투사되는 가상현실에서의 시각적 속도감과 불일치할 때 일치할 때보다 높은 멀미감을 경험할 것이라는 예상으로 진행하였다. 가상현실의 광학흐름

속도를 고정된 채로 트레드밀 보행 속도를 조작하는 방식으로 시각적 속도감이 트레드밀 보행의 속도감보다 더 빠른 조건과 더 느린 조건, 그리고 속도감이 일치하는 조건의 세 조건 간 시간 변화에 따른 멀미감 증가의 경향성을 측정해 비교하였다. 결과는 가설과 달리 멀미감 증가의 경향성과 평균 멀미감, 실재감과 몰입감 모두 조건 간 차이가 없는 것으로 확인되었다. 실험3에서는 트레드밀 속도를 고정된 채로 각 참가자의 시각적 속도감과 보행 속도감의 일치점을 측정해 가상현실의 광학 흐름 속도를 조작하는 방식으로 실험2의 결과가 반복되는지를 검증하였다. 그 결과 시각적 속도감이 더 빠를 때 멀미감 증가의 기울기가 더 낮았고 시간대별 멀미도 적게 느낀 것으로 나타났다. 유의해야 할 것은 실험2와 실험3의 일치 조건은 설계상 실험1의 보행 조건과 유사한 것으로 참가자들의 멀미감도 유사하게 나타났다. 즉, 속도감의 일치 여부를 차치하고 트레드밀 보행을 했던 조건들은 가만히 선 채로 가상현실 보행을 했던 실험1의 정지 조건보다 낮은 멀미감이 나타난 것이다.

전체 실험의 결과를 종합하여 해석하면, 가상현실에서의 이동 상황에서 트레드밀 보행을 통한 시각 정보와 신체 감각 정보의 통합은 멀미감을 낮추고 가상현실의 몰입감과 실재감은 높이는 효과가 관찰되었다. 이러한 트레드밀 기반 가상현실의 멀미감 완화 효과에서 시각적 속도감과 보행 속도감의 일치 여부는 필수적인 요소가 아닐 수 있다. 일단 트레드밀 보행을 하면 일정 수준의 불일치는 트레드밀 보행의 멀미 완화 효과를 저해하지 않을 가능성이 높다.

흥미로운 발견은 속도감의 불일치가 멀미를 강화하는 것이 아니라 오히려 완화하는 효과가 나타났다는 것이다. 시간대별 멀미 수준을 보면 시각적 속도감이 보행 속도감보다 두 배 빠른 조건에서 참가자들은 두 속도감이 일치할 때보다 적은 멀미를 경험하였다. 실험3에서의 일치 조건에서 참가자들은 시각적 속도감이 더 빠른 조건보다 높은 멀미를 경험하였지만 여전히 실험1의 정지 조건에 비하여 멀미감이 낮았다.

실험3의 일치조건보다 불일치 조건, 특히 시각적 속도감이 더 빠른 조건에서 멀미감이 낮게 나타난 결과를 해석할 때 주의가 요구된다. 실험1의 일치조건과 실험2, 실험3의 일치조건의 멀미감이 유사하였다는 것을

고려하면 실험2와 3의 일치조건에서 멀미감을 더 경험한 것 보다는 시각적 속도감이 더 빠른 조건에서 트레드밀 보행을 통한 멀미감 완화 효과가 더 크게 나타난 것으로 해석할 수 있다.

이것을 검증하기 위해 추가적으로 실험1의 정지 조건과 실험3의 빠른 조건 간의 평균 멀미감의 차이가 나타나는지를 검증하기 위해 집단 간 실험으로 가정하고 독립표본 T검증을 실시하였다. 그 결과 실험3의 일치 조건( $M=3.60, SD=3.30$ )에서 실험1의 정지 조건( $M=4.54, SD=3.52$ )보다 통계적으로 유의미하게 적은 멀미감을 경험한 것으로 확인되었다( $t=5.97, p<.001$ ). Fig. 6의 그래프에서 보는 것과 같이 트레드밀 보행을 실시했던 실험3의 세 조건에서 트레드밀 보행을 하지 않은 실험1의 정지 조건에서 보다 낮은 멀미감을 경험한 것이다.

실험3에서 발견된 시각적 속도감이 더 빠를 때 멀미감이 더 완화된다는 결과는 아직 알지 못했던 새로운 현상의 발견일 가능성이 있다. 일상적인 상황에서의 자기 운동 속도감은 단일한 신체, 단일한 자아가 경험하는 것이다. 가상현실을 통해 인위적으로 속도감 분리를 경험하기 전까지 실험3에서 발견한 현상은 직관적으로는 예상하기가 어려운 문제였다. 이와 같은 결과는 기존의 감각 갈등 이론으로 쉽게 설명되지 않는다. 정지 조건에 비해 일치조건에서 멀미감이 완화된다는 실험1의 결과는 감각갈등이론에 의해 설명되지만, 속도감 일치조건에 비해 시각적 속도감이 더 빠른 불일치조건에서 멀미감이 더 완화된다는 실험3의 결과는 합리적으로 설명되지 않는다.

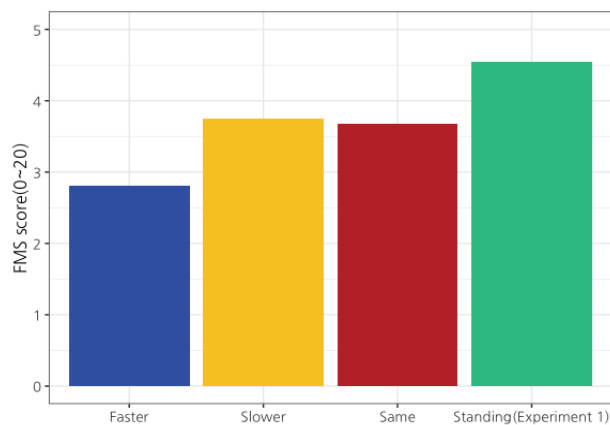


Fig. 6. The mean levels of VR sickness at 'standing' condition in Experiment 1 and those of three conditions in Experiment 3

본 연구의 결과는 자기 운동 속도 지각의 다감각 통합 현상에는 기존의 감각 갈등 이론이 설명하지 못하는 다른 기제가 관여되어 있을 가능성이 있다. 감각 정보 간 속도감의 불일치가 멀미를 유도하지 않는 것과 특정 속도감의 관계, 즉 시각적 속도감이 더 빠를 때 멀미를 더 완화하는 현상에 대해 이해하기 위한 후속 연구가 필요하다. 이러한 연구는 다감각 통합 기제에 대한 이해를 넓히는 데에 기여할 것이다.

본 연구에서 나타난 트레드밀 보행과 속도감 조작의 효과는 실제 가상현실 상황에 적용이 가능하다. 특히 트레드밀 기반 가상현실을 사용하는 게임, 재활 분야 등의 기기와 소프트웨어에 적용할 수 있다. 또 이러한 효과는 속도감 조작의 매우 간단한 처치를 통해 얻을 수 있는 것으로 손쉽게 가상현실 체험의 수준을 높일 수 있는 방안이 될 수 있다. 따라서 감각 정보 간의 속도감의 일치 여부, 혹은 상대적 속도감의 관계가 멀미감에 미치는 영향에 대한 연구 역시 보다 다양한 상황과 맥락에서의 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구의 실험 참가자는 추가적인 과제가 주어지지 않은 채 가상현실 보행을 했던 것과 달리, 후속 연구에서는 다양한 과제와 상황에서의 멀미감을 측정하는 설계 역시 고려해야 할 것이다.

## REFERENCES

Banton, T., Stefanucci, J., Durgin, F., Fass, A., & Proffitt, D. (2005). The perception of walking speed in a virtual environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(4), 394-406. DOI: 10.1162/105474605774785262

Chang, E. H., Seo, D. I., Kim, H. T., & Yoo, B. H. (2018). An Integrated Model of Cybersickness: Understanding User's Discomfort in Virtual Reality. *Journal of KIISE*, 45(3), 251-279. DOI: 10.5626/JOK.2018.45.3.251

Caramenti, M., Lafortuna, C. L., Mugellini, E., Khaled, O. A., Bresciani, J. P., & Dubois, A. (2018). Matching optical flow to motor speed in virtual reality while running on a treadmill. *PLoS ONE*, 13(4), 1-13. DOI: 10.1371/journal.pone.0195781

- Caramenti, M., Lafortuna, C. L., Mugellini, E., Abou Khaled, O., Bresciani, J.-P., & Dubois, A. (2019). Regular physical activity modulates perceived visual speed when running in treadmill-mediated virtual environments. *PLoS ONE*, *14*(6), e0219017. DOI: 10.1371/journal.pone.0219017
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Houghton, Mifflin.
- Howard, I. P. (1982). *Human Visual Orientation*. Wiley, Chichester.
- Jang, J. S., Kim, S. Y., Hyeong, J. H., Roh, J. R., & Park, G. D. (2019). Comparison of muscle activity and muscle fatigue during running exercise on non-motorized treadmill, motorized treadmill and overground. *Korean Journal of Sports Science*, *28*(2), 987-1000.
- Keshavarz, B., & Hecht, H. (2011). Validating an efficient method to quantify motion sickness. *Human Factors*, *53*(4), 415-426. DOI: 10.1177/0018720811403736
- Kim, Y. Y., Kim, E. N., Ko, H. D., & Kim H. T. (2003). The positive effect of motion platform in virtual navigation. *Science of Emotion & Sensibility*, *6*(1), 11-16.
- Kim, M. J., Lee, S. A., Kim, S. K., & Sung, I. Y. (1994). The study for gait speed of stroke patients comfortable versus maximum safe speed. *Ann Rehabil Med*, *18*(4), 1-7.
- Kwon, H. J., & Sung, J. H. (2019). A study on the problem and improvement of vr content using motion platform and VR HMD. *Journal of Korea Game Society*, *19*(3), 15-23.
- Kye, B. K., & Kim, Y. S. (2008). Investigation on the relationships among media characteristics, presence, flow, and learning effects in augmented reality based learning. *Korean Society for Educational Technol-*  
*ogy*, *24*(4), 193-224. DOI: 10.1007/978-3-8348-9313-0\_3
- McCauley, M. E., & Sharkey, T. J. (1992). Cybersickness: Perception of self-motion in virtual environments, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *1*(3), 311-318. DOI: 10.1162/pres.1992.1.3.311
- Plumert, J. M., Kearney, J. K., Cremer, J. F., & Recker, K. (2005). Distance perception in real and virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception*, *2*(3), 216-233. DOI: 10.1145/1077399.1077402
- Reason, J. T., & Brand, J. J. (1975). *Motion sickness*. Academic Press, pp. 83-101.
- Riecke, B. (2011). Compelling self-motion through virtual environments without actual self-motion – using self-motion illusions (“vection”) to improve user experience in VR. *Virtual Real.* 149-176 (InTech). DOI: 10.5772/553.
- Rieser, J. J., Pick, H. L., Ashmead, D. H., & Garing, A. E. (1995). Calibration of human locomotion and models of perceptual-motor organization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*(3), 480-497. DOI: 10.1037/0096-1523.21.3.480
- Viaud-Delmon, I., Warusfel, O., Seguelas, A., Rio, E., & Jouvent, R. (2006). High sensitivity to multisensory conflicts in agoraphobia exhibited by virtual reality. *European Psychiatry*, *21*(7), 501-508. DOI: 10.1016/j.eurpsy.2004.10.004
- 원고접수: 2020.05.27  
수정접수: 1차 2020.07.29  
2차 2020.09.07  
게재확정: 2020.09.08