

머리착용 디스플레이에 의해 유발된 멀미 증상이 동공 리듬의 안정성에 미치는 영향

Effect of Simulator Sickness Caused by Head-mounted Display
on the Stability of the Pupillary Rhythm

박상인* · 이동원** · 문성철*** · 김홍익**** · 황민철*****†

Sangin Park* · Don Won Lee** · Sungchul Mun*** · Hong-ik Kim**** · Mincheol Whang*****†

*상명대학교 산학협력단

*Industry-Academy Cooperation Foundation, Sangmyung University

**상명대학교 감성공학과

**Department of Emotion Engineering, Sangmyung University

***CJ 헬로 Future Engine Lab.

***CJ Hello Future Engine Lab., CJ Hello

****CJ 헬로 기술담당

****Chief Technology Officer, CJ Hello

*****상명대학교 미래융합공학대학 휴먼지능정보공학과

*****Department of Intelligent Engineering Informations for Human, Sangmyung University

Abstract

The aim of this study is to determine the effect of motion sickness on pupil rhythm. Sixteen volunteers of both genders (8 male, 8 female, mean age 25.67 ± 2.43 years) experienced VR contents in both 2D and HMD versions for 15 minutes, and their pupillary rhythms were compared. The irregular pattern of the pupillary rhythms, as demonstrated by increasing mean pupil diameter (mPD) and standard deviation of the pupil diameter (sPD), revealed motion sickness after experiencing HMD condition. The pupillary response is strongly related to the cognitive load, and the motion sickness can be interpreted as a change in the cognitive load caused by the increasing volume of visual information that must be processed and the conflict or inconsistency between different sensory modalities. The method proposed in this study could be a non-contact measurement method for the monitoring of motion sickness using a web-camera rather than previous sensor-based methods.

Key words: Motion Sickness, Pupillary Response, Non-contact Measurement, Cognitive Load, Head Mounted Display (HMD)

※ 이 논문은 2017년도와 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 2017R1C1B2010488, NRF-2018R1A2B6008901).

† 교신저자 : 황민철 (상명대학교 미래융합공학대학 휴먼지능정보공학과)

E-mail : whang@smu.ac.kr

TEL : 02-2287-5426

FAX : 02-2287-5425

요약

본 연구는 멀미증상이 동공 리듬에 미치는 영향을 확인하는 것을 그 목적으로 하였다. 본 연구는 2D와 HMD를 통해 동일한 가상현실 콘텐츠를 실험참가자에게 15분 동안 경험하게 한 이후에 동공반응을 비교하였고 본 실험에는 16명(남자 8명, 여자 8명, 평균 나이: 25.67 ± 2.43 세)의 피험자가 참여하였다. 연구 결과, 영상멀미를 경험한 이후에 동공 리듬이 불규칙한 패턴을 나타내었고 이것은 동공 크기(mPD) 및 동공 리듬의 편차(sPD)가 증가하는 결과로 확인되었다. 이러한 동공 반응의 결과는 인지부하와 밀접한 관련이 있고 영상멀미를 처리해야 할 시각 정보량의 증가 및 감각정보들 사이의 충돌 혹은 불일치로 인한 인지부하 현상으로 해석이 가능하다. 본 연구에서 제안된 방법은 기존의 센서 기반의 평가 방법에 비해 멀미 증상을 카메라 기반의 비접촉식으로 측정할 수 있는 가능성을 확인하였다.

주제어: 멀미, 동공 반응, 비 접촉식 측정, 인지 부하, 머리 착용 디스플레이

1. 서론

머리 착용 디스플레이(head mounted display, HMD)의 보급이 확산되면서 가상현실(Virtual reality, VR) 기술이 교육, 의료, 서비스, 제조, 건축, 게임, 엔터테인먼트 등과 같은 우리 일상의 다양한 환경에 적용되어 오고 있다(Van Krevelon & Poelman, 2010; Kesim & Ozarslan, 2012; Ong & Nee, 2012). 가상현실 기술은 기존 2차원 디스플레이에 비해 3차원 영상 정보를 기반으로 사용자에게 높은 현실감, 몰입감을 제공하고(Biocca & Delaney, 1995; Ryan, 1999; Bailenson et al., 2008) 효율적이고 정확한 업무 및 편리한 일상생활을 가능하게 하는 장점이 있다(Raajan et al., 2012). 그러나 이러한 장점 이외에도 머리 착용 디스플레이를 이용해 가상현실 콘텐츠를 경험하는 경우, 멀미 증상(simulator sickness)과 같은 인적요인(human factor) 이슈 또한 내포하고 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 멀미 증상은 비행, 운전 등의 가상현실 시뮬레이터를 경험한 사용자들에게서 빈번하게 보고 되어오고 있으며(Kennedy et al., 2010; Naqvi et al., 2013), 이들은 또한 시각적 피로감, 불안, 구토, 방향감각상실 등과 같은 유사 증상들도 경험하는 것으로 알려져 있다(Bouchard et al., 2011; Carnegie & Rhee, 2015). 따라서 멀미 증상에 대한 정량적 평가 방법론의 개발을 통해 멀미 증상에 대한 원인 규명 및 개발자와 사용자에 대한 가이드라인을 제시하여 가상현실 산업 발전의 저해요인인 멀미 증상을 최소화하기 위한 노력이 요구 된다(Park et al., 2014; Park et al., 2015).

많은 선행연구들은 멀미 증상을 정량화하기 위한

노력을 기울여 왔다. 대표적으로 (1) 주관적 평가 방법: simulator sickness questionnaire (SSQ)(Kennedy et al., 1993), motion sickness susceptibility questionnaire (MSSQ)(Golding, 1998), (2) 행태 반응: 머리 움직임(Merhi et al., 2007), 신체 움직임(Yokota et al., 2005; Chardonnet et al., 2017), (3) 자율신경계 반응: 심전도(electrocardiogram, ECG) (Kiryu et al., 2008; Nalivaiko et al., 2015; Toschi et al., 2017), 피부 온도(skin temperature, SKT)(Kim et al., 2005), 피부 전도 반응(galvanic skin response, GSR)(Kim et al., 2005), 호흡(respiration, RR)(Kim et al., 2005; Kiryu et al., 2008), 혈압(blood pressure, BP)(Kiryu et al., 2008), (4) 중추신경계 반응: 뇌 활성화도(brain activity)(Chuang et al., 2016), 기능적 자기 공명 영상(functional magnetic resonance imaging, fMRI)(Toschi et al., 2017) 등이 있다. 선행 연구들을 통해 제안된 멀미 증상에 대한 정량화 방법들은 주관적인 평가 방법으로 객관성의 결여, 고가의 장비가 필요, 센서 착용에 대한 부담 및 시간적 제약 등의 한계점이 존재한다. 정량적 평가방법을 통해 멀미 증상의 세부유발 요인을 규명하기 위해서는 좀 더 저렴하고 간편하며 객관적으로 멀미 증상을 정량화 할 수 있는 표준화된 방법의 개발이 필요하다.

멀미 증상의 기전을 가장 잘 설명하는 것으로 잘 알려진 대표적인 이론중의 하나가 ‘감각충돌이론(sensory conflict theory)’이다. 신체의 움직임은 시각, 체성감각, 전정기관에 의해 조절되며, 감각충돌이론은 이러한 감각 기관의 정보들 사이에 정보 또는 기존의 경험과 상충되는 경우 멀미 증상을 경험하는 현상을 의미한다(Oman, 1990; Jeong, 2010). 예를 들어, 사용자가

가상현실의 콘텐츠를 경험할 때, 콘텐츠의 영상 정보로부터 전달되는 움직임에 대한 시각정보와 그에 대응되는 몸의 움직임의 정보 사이의 불일치 혹은 충돌에 의해 멀미 증상을 경험하게 된다. 본 연구에서는 이러한 정보의 불일치 혹은 충돌과정이 뇌의 정보프로세스 과정에서 과부하를 야기 시킬 것으로 생각된다(Lambooij et al., 2009). 따라서 뇌의 정보 프로세싱 과정의 과부하로 멀미 증상을 해석하고 정량적 평가에 지표로써 활용하고자 한다. 뇌의 인지부하를 평가할 수 있는 많은 지표들이 존재하지만 본 연구에서는 보다 간편한 카메라 기반의 비접촉식 측정을 위해 동공 반응을 이용하고자 한다. 동공 반응은 많은 선행 연구들에 의해 인지정보 프로세싱의 정보를 내포하고 있는 것으로 알려져 있다(Just & Carpenter, 1993; Just et al., 1996; Klingner et al., 2008). 따라서 본 연구에서는 멀미증상이 동공 리듬에 미치는 영향을 확인하는 것을 그 목적으로 한다.

2. 동공크기변화의 신경적 연결성

동공크기변화(동공리듬)는 신경적 연결성(구심성 및 원심성 신경로)을 기반으로 자율 및 중추신경계 반응과 밀접한 연관성을 갖고 있다(Kozicz et al., 2011; Júnior et al., 2015; Joshi et al., 2016; Park & Whang, 2018). 구심성 신경로(afferent pathway, CN II) 관점에서, 외부 환경으로 부터 동공에 자극이 도달하면, 망막(retina)은 쌍극세포(bipolar cells)와 연결(synapse)을 이루고 그 신경적 정보를 신경절 세포(ganglion cells)에 전달한다. 신경절 세포의 축색돌기는 시신경(optic nerve)을 통해 중뇌(mid-brain)의 덮개앞핵(pretecal nucleus)에 신경적 정보를 전달한다. 원심성 신경로(efferent pathway, CN III) 관점에서, 덮개앞핵은 덧눈돌림신경핵(Edinger Westphal nucleus)과 조임근(sphincter muscle) 사이의 연결성을 기반으로 자율신경계의 교감 및 부교감신경계 활성화도에 따른 동공의 수축과 이완을 조절한다(Siegle et al., 2004; Kozicz et al., 2011; Júnior et al., 2015; Park & Whang, 2018).

또한, 동공크기변화는 상구(superior colliculus) 및 시상하부(thalamus)를 포함하는 배측주위신경망(dorsal

attention network, DNN), 청반-부신수질호르몬(locus coeruleus - norepinephrine system, LC-NE), 대상엽(cingulate cortex)과 강한 양의 상관관계를 나타내며, 이들 영역은 집중, 인지 기능과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Hong et al., 2014; Ebitz & Platt, 2015; Joshi et al., 2016; Park & Whang, 2018). 인지부하가 활성화 되는 경우, 중뇌의 배측주위신경망, 청반-부신수질호르몬, 대상엽의 영역과 전전두엽(pre-frontal cortex) 및 전두엽(frontal cortex) 사이의 하향식 조절(top-down control) 매커니즘이 활성화 되고 이는 동공 크기 변화에 영향을 미친다(Van Steenberg et al., 2013; Geva et al., 2013; Buckner, 2013; Park & Whang, 2018). 이외에도 다수의 선행연구들에서 인지부하가 유발되었을 때, 동공 크기가 증가되는 현상이 확인되었다(Just & Carpenter, 1993; Just et al., 1996; Krause et al., 2007; Klingner et al., 2008; Wang, 2013; Hong et al., 2014; Tanaka et al., 2014; Chen & Epps, 2014; van den Brink et al., 2016).

3. 연구 방법

3.1. 실험 참가자

본 연구의 실험 참가자들을 대상으로 멀미 증상을 거의 느끼지 못하거나 혹은 극심한 멀미 증상으로 인해 실험 진행이 어려운 실험 참가자를 선별하기 위해 간단한 사전 실험을 실시하였다. 사전 실험은 머리 착용 디스플레이 ‘HTC VIVE(HTC Inc., Taiwan & Valve Inc., USA)’를 통해 가상현실 콘텐츠 ‘Ultimate Booster Experience(GexagonVR, 2016)’를 10분 동안 시청하도록 한 후에 멀미 증상에 대한 인터뷰를 실시하였다. 사전 실험 도중에 극심한 멀미 증상으로 인해 실험을 중단한 경우와 실험 이후 멀미 증상을 거의 느끼지 못했다고 응답한 실험 참가자들은 본 실험 참여를 제한하였다.

사전 실험 결과에 따라, 본 실험에는 16명(남자: 8명, 여자: 8명, 평균 나이: 25.67±2.43세)의 대학 및 대학원생이 참여하였다. 본 연구는 양안의 시력 또는 교정시력이 0.8 이상이고 중추신경계, 자율신경계, 시각

계의 병력 및 가족력이 없는 실험 참가자를 대상으로 하였다. 또한, 자율 및 중추신경계에 영향을 미칠 수 있는 흡연 및 음주를 제한하였고 실험 당일 피로를 최소화하기 위해 실험 전날 충분한 수면을 취하도록 하였다. 실험에 참여하기 전에 실험 참가자에게 연구 목적을 제외한 실험 내용에 대해 충분한 설명을 하였고 실험 참여에 대한 동의 받았다. 본 연구의 모든 실험 디자인은 상명대학교 연구윤리위원회의 심의를 받아 진행하였다(IRB Number: BE2017-21).

3.2. 실험 디자인

본 연구는 피험자 내 설계(within subject design)로 디자인되어 실험 참가자들은 가상현실 콘텐츠를 2D 및 HMD를 이용해 모두 경험하고 그에 따른 동공 반응을 비교 분석하는 것으로 구성되었다. 실험 참가자는 편안한 의자에 앉은 채로 가상현실 콘텐츠 'NoLimits 2 Roller Coaster Simulation(Ole Lange, Mad Data GmbH & Co. KG, 2014)'를 각각 2D 및 HMD 버전으로 15분 동안 시청하도록 하였다. 가상현실 콘텐츠 시청 전후에 각각 5분 동안 실험 참가자의 동공 반응을 분석하기 위해 동공영상을 취득하였다. 또한, 실험 시작 전후에 실험 참가자의 멀미 증상에 대한 주관적인 상태를 확인하기 위해 'simulator sickness questionnaire (SSQ)'를 이용해 각 설문 항목에 대해 0에서 3 스케일로 설문을 받았다. 자세한 실험 절차는 Fig. 1과 같다.

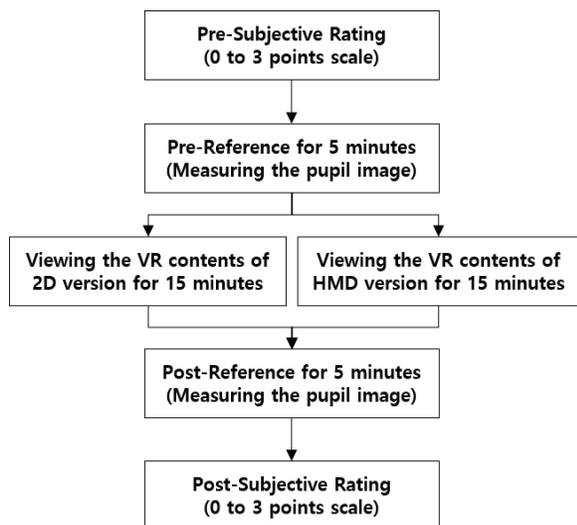


Fig. 1. Experimental procedure

SSQ 설문은 16개의 설문항목과 3개의 요인으로 다음과 같이 구성되어 있다(Kennedy et al., 1993).

- 메스꺼움(nausea) 요인: 일반적인 불편감(general discomfort), 타액분비 증가(increased salivation), 땀 흘림(sweating), 메스꺼움(nausea), 집중 곤란(difficulty concentrating), 거부감(stomach awareness), 트림(burping).
- 시신경 (oculo-motor) 요인: 일반적인 불편감(general discomfort), 피로(fatigue), 두통(headache), 눈 통증(eyestrain), 초점 맞추기 어려움(difficulty focusing), 집중 곤란(difficulty concentrating), 시야 흐림(blurred vision).
- 방향감각상실(disorientation) 요인: 초점 맞추기 어려움(difficulty focusing), 메스꺼움(nausea), 머리의 팽만감(fullness of head), 시야 흐림(blurred vision), 일반적인 어지러움(dizzy: eyes open), 일반적인 어지러움(dizzy: eyes close), 회전성 어지러움(vertigo).

각 설문 항목에 대해 실험 참가자들로 부터 취득된 점수는 각각의 3가지 요인에 대해 가중치를 부여하여 다음 식 (1)을 이용하여 통합 멀미 증상 점수(SSQ score)로 계산하였다(Kennedy et al., 1993).

$$SSQscore = (9.54 \times N) + (7.58 \times O) + (13.92 \times D) \times 3.74 \quad (1)$$

N: Nausea; *O*: Oculo-motor; *D*: Disorientation

2D 및 HMD 버전은 각각 '27인치 LED 모니터(27MP68HM, LG Inc., Korea)와 HTC VIVE HMD(HTC Inc., Taiwan & Valve Inc., USA)를 통해 실험 참가들에게 제시되었고 자세한 디스플레이 사양은 다음과 같다.

- 27인치 LED 모니터: 디스플레이 타입-LED, 해상도-1920x1080, 시야각-170도, 화면 주사율-75 Hz.
- HTC VIVE HMD: 디스플레이 타입-OLED, 해상도-2160x1200 (각 눈에 1080x1200), 시야각-110도 이상, 화면 주사율-90 Hz.

피험자 내 설계로 인한 가상현실 콘텐츠의 학습효과(learning effect)를 최소화하기 위해 각 버전의 시청 순서는 무작위로 하였다. 또한, 2D 및 HMD 버전의 실

험 일정은 실험 참가자의 신체적 혹은 정신적 상태에 영향을 최소화하기 위해 같은 요일 및 같은 시간으로 배정하였다(ex. 2D: 6월 5일(월) 오전 10시; HMD: 6월 12일(월) 오전 10시).

3.3. 신호 처리 및 지표 정의

동공 영상은 웹 카메라(HD Pro Webcam C920r, Logitech Inc., Switzerland)를 이용해 900 × 400 해상도 및 초당 30 fps(frame per second)의 속도로 취득하였다. 적외선 영상 취득을 위해 웹캠은 적외선 차단 필터(IR cut-filter)를 제거하고 적외선 필터(IR passing-filter, Kodac Inc., USA)를 삽입하여 적외선 카메라로 개조하여 사용하였다. 동공 영역의 검출을 위한 과정은 선행연구들을 참조하여 진행하였다(Daugman, 2004; Lee et al., 2009; Park et al., 2018). 적외선 카메라를 통해 취득된 눈 영상은 이진화(binazation) 처리하였다(Park et al., 2018). (2) 이진화된 영상은 원형 검출 알고리즘(circular edge detection, CDE)을 적용하여 동공 영역을 검출하였고 CDE 알고리즘은 식 (2)와 같다(Daugman, 2004; Lee et al., 2009).

$$Max_{(r,x_0,y_0)} \left| G\sigma(r) * \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r,x_0,y_0} \frac{I(x,y)}{2\pi r} ds \right| \quad (2)$$

$I(x,y)$: a gray level at the (x,y) position
 (x_0,y_0) : center position of the pupil
 r : radius of the pupil

영상처리 과정을 통해 검출된 동공 영역은 신호처리 과정을 거쳐 멀미 증상 평가를 위한 지표를 추출하였고 그 과정은 다음과 같다. (1) 검출된 동공 영역에서 영상의 픽셀(pixel)을 기반으로 동공의 지름을 30 fps로 추출하였다. (2) 눈 깜박임으로 인한 동공 지름 데이터의 손실을 최소화하기 위해 이동 평균(sliding moving average) 방법을 이용하여 30 fps 데이터를 1 fps 데이터로 리샘플링(Re-sampling) 처리하였다(window size: 30 fps, shift interval: 30 fps). (3) 리샘플링된 동공 지름(pupil diameter, PD) 데이터를 시계열 데이터(time serial data)로 배열하여 동공리듬(pupillary rhythms)으로 정의하고 (4) 동공 리듬으로부터 평균 동공 크기(mean of pupil diameter, mPD)와 동공 리듬의 표준편차(standard deviation of pupil diameter, sPD)를 멀미 증상 평가의 지표로 정의하였다. 자세한 신호처리 과정은 Fig. 2와 같다.

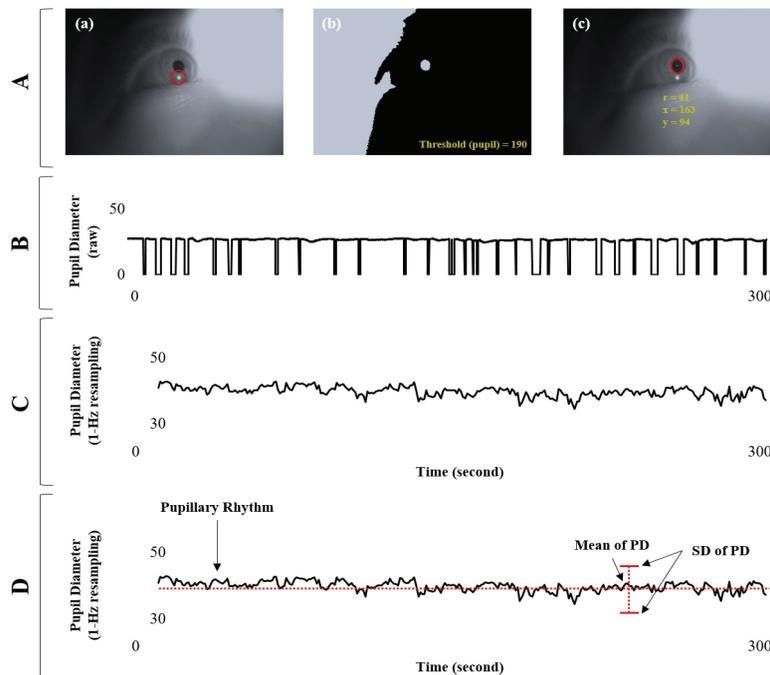


Fig. 2. Signal processing & indicator definition. (A) Procedure of pupil detection; (a) A raw image (grey scale) from IR camera, (b) Binarization image, (c) Detecting the pupil area using CED algorithm. (B) Pupil diameter signals at 30 fps. (C) Re-sampled pupil diameter to 1 fps from 30 fps. (D) Definition of pupil indicators such as mPD and sPD.

3.4. 통계 분석

본 연구는 피험자 내 설계로 2D 및 HMD 시청 후에 따른 동공반응 분석으로 정규성 검정(normality test)을 기반으로 ‘대응표본 t검정(Paired t-test)’을 이용해 각각 조건의 전후차를 통계분석 하였다. 또한, 대응표본 t검정은 2D 및 HMD 시청전의 실험 참가자의 상태를 고려하지 않기 때문에 ‘공분산 분석(analysis of covariance, ANCOVA)’을 이용해 2D 및 HMD 시청전의 상태를 공변량(covariant)으로 설정하고 각각의 시청 후의 동공반응 차이를 추가 통계검증 하였다(Keselman et al., 1998; Park et al., 2014; Mun et al., 2014). 그리고 본 연구에는 남자 및 여자 각각 8명의 실험 참가자가 실험에 참여하여 성별요인이 동공반응에 영향을 미칠 가능성이 있을 수 있다. 따라서 성별요인 또한 공변량으로 설정하였고 성별에 대한 영향을 고려하여 공분산분석을 실시하였다. 통계 검정에서 다중 가설로 인해 발생할 수 있는 1종 오류를 보정하기 위해 본 페로니 교정(bonferroni correction)을 이용해 통계 검정의 유의 수준 (i.e., $\alpha = .05/n$)을 보정하였다 (Dunnett, 1955). 이에 따라, 동공 반응에 대한 유의수준은 $p < 0.025$ 로 설정되었다(mPD & sPD, $\alpha = 0.05/2$). 또한, 통계적 유의성뿐만 아니라 실질적 유의성(practical significance)도 확인하기 위해 효과 크기(effect size)를 계산하였다. 대응표본 t검정 및 공분산 분석의 효과 크기는 각각 Cohen's d (0.20: small, 0.50: medium, 0.80: large)와 partial eta-squared (small: 0.01, medium: 0.06, large: 0.14)를 기준으로 판단하였다(Huck et al., 1974).

4. 연구 결과

4.1. 주관 평가

SSQ 점수에 대한 통계분석 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 대응표본 t검정 결과에서, HMD 시청 조건의 SSQ 점수는 시청 전에 비해 시청 후에 통계적으로 유

의하게 증가하는 결과가 확인 되었고($t[30] = -15.053$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 5.497$) 2D 시청 조건에서는 유의미한 차이를 나타내지 않았다($t[30] = -1.155$, $p = 0.266$, Cohen's $d = 0.422$). 공분산분석 결과에서, HMD와 2D 시청 후 사이에 SSQ 점수는 통계적으로 유의미한 차이가 있음을 확인하였다($F[1, 30] = 99.882$, $p < 0.001$, partial eta-squared = 0.781).

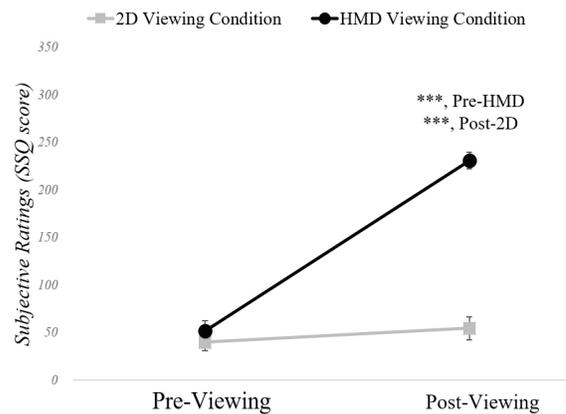


Fig. 3. Result of the total SSQ scores for motion sickness between the 2D and HMD conditions using a paired t-test and ANCOVA (***, $p < 0.001$).

4.2. 동공 반응

Fig. 4는 2D와 HMD 시청 전후에 동공 반응 차이에 대한 실험 참가자의 예시이다. 동공리듬패턴이 HMD 시청 전(mPD: 36.716, sPD: 1.308)에 안정적인 상태였던 것에 비해 시청 후에 불안정한 상태(mPD: 45.841, sPD: 2.385)로 변화한 것을 확인하였다. 그러나 2D 시청 전(mPD: 35.034, sPD: 1.157)과 후(mPD: 36.221, sPD: 1.263)에는 유의미한 패턴의 차이를 확인 할 수 없었다.

동공 반응(mPD & sPD)에 대한 통계분석 결과는 Fig. 5와 같다. 대응표본 t검정 결과에서, HMD 시청 조건의 mPD와 sPD는 시청 전에 비해 시청 후에 모두 통계적으로 유의하게 증가하는 결과가 확인 되었고 (mPD: $t[30] = -14.350$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 5.240$, sPD: $t[30] = -9.358$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 3.417$) 2D 시청 조건에서는 유의미한 차이를 나타내지 않았다

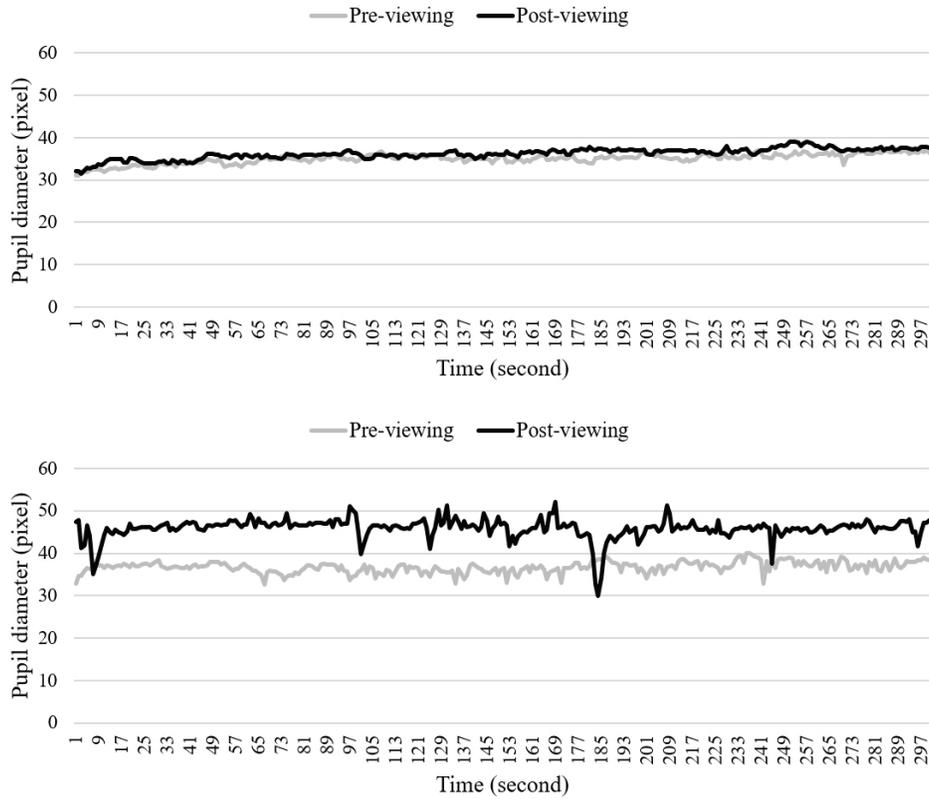


Fig. 4. Changes in pupillary rhythms (mPD and sPD) from pre- to post-viewing; 2D (top) and HMD (bottom) for participant 6.

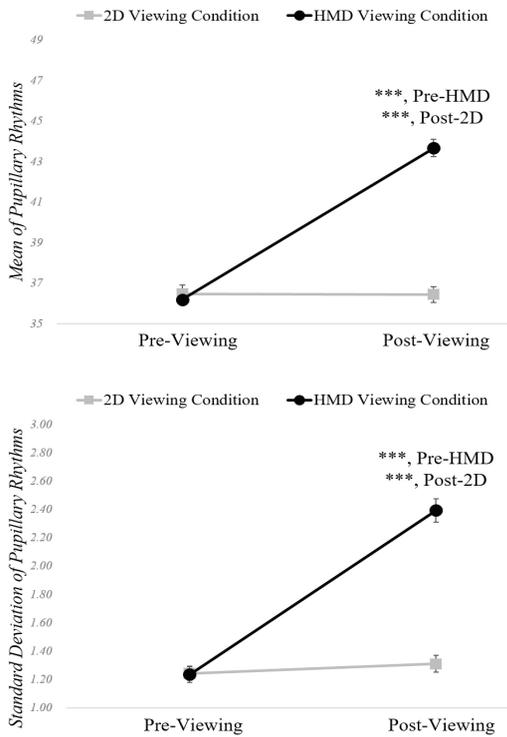


Fig. 5. Result of mPD and sPD between the 2D and HMD conditions using a paired t-test and ANCOVA (***, $p < 0.001$).

(mPD: $t[30] = 0.083$, $p = 0.935$, Cohen's $d = 0.030$, sPD: $t[30] = -1.741$, $p = 0.102$, Cohen's $d = 0.636$). 공분산분석 결과에서, HMD 및 2D 시청 후 사이에 mPD와 sPD는 모두 통계적으로 유의미한 차이가 있음을 확인하였다(mPD: $F[1, 30] = 139.978$, $p < 0.001$, partial eta-squared = 0.833, sPD: $F[1, 30] = 84.572$, $p < 0.001$, partial eta-squared = 0.751).

5. 결론 및 논의

본 연구는 가상현실 콘텐츠 경험으로 인해 야기되는 멀미 증상이 동공리듬 반응에 미치는 영향을 확인하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 실험 참가자들에게 가상현실 콘텐츠를 2D와 HMD를 통해 경험하게 하고 그에 따른 동공 반응의 차이를 확인 하였다. 실험을 통해 실험 참가자들에게 멀미 증상이 유발되었는지 여부를 확인하기 위해 SSQ 주관 설문을 실시하였고

통계적으로 유의미한 차이가 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 멀미 증상 유발에 따른 동공반응을 통해서 크게 두 가지 유의미한 결과를 확인하였다. 첫째, 멀미 증상이 유발된 후에 동공 크기가 증가하였다. 동공 크기 변화는 뇌와 신경적으로 연결되어 있어 감성(Partala & Surakka, 2003), 인지(Just et al., 1996; Klingner et al., 2008), 기억(Just et al., 1996), 집중(Beatty, 1988) 등의 정보처리 과정을 내포하고 있다. 특히, 많은 선행연구들을 통해서 이러한 뇌의 정보프로세싱 과정 중에서 인지기능과 밀접한 상관성이 있는 것으로 알려져 있으며, 동공 크기가 증가하는 것이 뇌의 정보프로세싱 과정의 과부하인 인지부하(cognitive load)의 지표로 보고하고 있다(Just & Carpenter, 1993; Just et al., 1996; Krause et al., 2007; Klingner et al., 2008; Wang, 2013; Hong et al., 2014; Tanaka et al., 2014; Chen & Epps, 2014; van den Brink et al., 2016). 또한, 인지부하가 증가할 때, 중뇌의 배측주위신경망, 청반-부신수질호르몬, 대상엽의 영역과 전전두엽 및 전두엽 사이의 하양식 조절 매커니즘이 활성화 되고 이것이 동공 크기 변화에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있어 우리의 연구결과와 일치하는 것으로 확인되었다(Van Steenbergen et al., 2013; Geva et al., 2013; Buckner, 2013; Park & Whang, 2018). 둘째, 멀미 증상이 유발된 후에 동공 리듬의 불규칙해지는 패턴, 즉 동공 크기 변화의 편차가 증가하는 현상이 확인되었다. 동공 크기 변화는 구심성 및 원심성 신경로(efferent and afferent pathway)를 통해 자율신경계 균형(교감 및 부교감 신경계)에 영향을 의해 조절 된다(Andreassi, 2013; Júnior et al., 2015). 이것은 심장리듬변화의 편차가 증가하는 것과 밀접한 관련이 있으며, 선행 연구를 통해 이러한 현상이 인지부하의 지표로 보고된바 있다(Park et al., 2014; Park et al., 2015).

본 연구의 결과에서 mPD와 sPD가 멀미 증상을 경험한 이후 모두 증가하는 반응을 보이는 것은 인지부하와 관련된 현상으로 해석할 수 있다. 멀미 증상의 경우는 아니지만 3D 시각피로 현상을 2D에 비해 많은 정보량을 처리해야하는 것으로 인한 인지부하 현

상으로 정량화하는 선행 연구들의 보고가 있었다(Lambooij et al., 2009; Mun et al., 2012; Park et al., 2014; Park et al., 2015). 멀미 증상을 또한 2D에 비해 360도로 제공되는 영상 정보를 처리해야하는 과정에 있어서의 인지부하와 더불어 감각 정보들 사이의 불일치 과정으로 인한 뇌의 정보처리과정의 과부하 현상으로 해석하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안된 방법은 멀미 증상을 저렴한 웹 카메라를 이용하여 비접촉식으로 또한 보다 간편하게 정량화 할 수 있는 활용 가능성을 확인하였다. 또한, 조명에 대한 동공 반응의 변화를 보정할 수 있는 기술이 뒷받침 된다면, 실시간으로 멀미 증상을 모니터링 할 수 있는 기술에도 적용될 가능성이 높다. 이를 기반으로 멀미 증상을 유발시킬 수 있는 세부유발요인들에 대한 정량적 평가를 통해 사용자 및 제작에 대한 가이드라인 제시가 가능하고 이는 가상현실 산업 발전 및 보급화에 긍정적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Andreassi, J. L. (2013). *Psychophysiology: Human behavior & physiological response*. Psychology Press.
- Bailenson, J., Patel, K., Nielsen, A., Bajscy, R., Jung, S. H., & Kurillo, G. (2008). The effect of interactivity on learning physical actions in virtual reality. *Media Psychology, 11*(3), 354-376.
DOI: 10.1080/15213260802285214
- Beatty, J. (1988). Pupillometric signs of selective attention in man. *Neurophysiology and psychophysiology: Experimental and clinical applications*, 138-143.
- Biocca, F., & Delaney, B. (1995). Immersive virtual reality technology. *Communication in the Age of Virtual Reality, 15*, 57-124.
- Bouchard, S., Robillard, G., Renaud, P., & Bernier, F. (2011). Exploring new dimensions in the assessment

- of virtual reality induced side effects. *Journal of Computer and Information Technology*, 1(3), 20-32.
- Buckner, R. L. (2013). The brain's default network: origins and implications for the study of psychosis. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 15(3), 351-358.
- Carnegie, K., & Rhee, T. (2015). Reducing visual discomfort with HMDs using dynamic depth of field. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 35(5), 34-41. DOI: 10.1109/MCG.2015.98
- Chardonnet, J. R., Mirzaei, M. A., & Mérienne, F. (2017). Features of the Postural Sway Signal as Indicators to Estimate and Predict Visually Induced Motion Sickness in Virtual Reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1-15. DOI: 10.1080/10447318.2017.1286767
- Chen, S., & Epps, J. (2014). Using task-induced pupil diameter and blink rate to infer cognitive load. *Human-Computer Interaction*, 29(4), 390-413. DOI: 10.1080/07370024.2014.892428
- Chuang, S. W., Chuang, C. H., Yu, Y. H., King, J. T., & Lin, C. T. (2016). EEG alpha and gamma modulators mediate motion sickness-related spectral responses. *International Journal of Neural Systems*, 25(2), 14. DOI: 10.1142/S0129065716500076
- Daugman, J. (2004). Iris recognition border-crossing system in the UAE. *International Airport Review*, 8(2), 49-53.
- Dunnett, C. W. (1955). A multiple comparison procedure for comparing several treatments with a control. *Journal of the American Statistical Association*, 50(272), 1096-1121. DOI: 10.1080/01621459.1955.10501294
- Ebitz, R. B., & Platt, M. L. (2015). Neuronal activity in primate dorsal anterior cingulate cortex signals task conflict and predicts adjustments in pupil-linked arousal. *Neuron*, 85(3), 628-640. DOI: 10.1016/j.neuron.2014.12.053
- Geva, R., Zivan, M., Warsha, A., & Olchik, D. (2013). Alerting, orienting or executive attention networks: differential patters of pupil dilations. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 7, 145(1)-145(11). DOI: 10.3389/fnbeh.2013.00145
- Golding, J. F. (1998). Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness. *Brain Research Bulletin*, 47(5), 507-516. DOI: 10.1016/S0361-9230(98)00091-4
- Hong, L., Walz, J. M., & Sajda, P. (2014). Your eyes give you away: Prestimulus changes in pupil diameter correlate with poststimulus task-related EEG dynamics. *PloS One*, 9(3), e91321. DOI: 10.1371/journal.pone.0091321
- Huck, S. W., Cormier, W. H., & Bounds, W. G. (1974). *Reading statistics and research* (pp. 74-102). New York: Harper & Row.
- Jeong, S. H. (2010). Motion sickness. *Korean Journal of Aerospace and Environmental Medicine*, 19(3), 87-90.
- Joshi, S., Li, Y., Kalwani, R. M., & Gold, J. I. (2016). Relationships between pupil diameter and neuronal activity in the locus coeruleus, colliculi, and cingulate cortex. *Neuron*, 89(1), 221-234. DOI: 10.1016/j.neuron.2015.11.028
- Júnior, E. D. D. S., Da Silva, A. V., Da Silva, K. R., Haemmerle, C. A., Batagello, D. S., Da Silva, J. M., Lima, L. B., Da Silva, R. J., Diniz, G. B., Sita, L. V., Elias, C. F., & Bittencourt, J. C. (2015). The centrally projecting Edinger-Westphal nucleus—I: Efferents in the rat brain. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 68, 22-38. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2015.07.002
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1993). The intensity dimension of thought: pupillometric indices of sentence processing. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 47(2), 310-339. DOI: 10.1037/h0078820
- Just, M. A., Carpenter, P. A., Keller, T. A., Eddy, W. F., & Thulborn, K. R. (1996). Brain activation

- modulated by sentence comprehension. *Science*, 114-116. DOI: 10.1126/science.274.5284.114
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220. DOI: 10.1207/s15327108ijap0303_3
- Kennedy, R. S., Drexler, J., & Kennedy, R. C. (2010). Research in visually induced motion sickness. *Applied Ergonomics*, 41(4), 494-503. DOI: 10.1016/j.apergo.2009.11.006
- Keselman, H. J., Huberty, C. J., Lix, L. M., Olejnik, S., Cribbie, R. A., Donahue, B., Kowalchuk, R. K., Lowman, L. L., Petoskey, M. D., Keselman, J. C., & Levin, J. R. (1998). Statistical practices of educational researchers: An analysis of their ANOVA, MANOVA, and ANCOVA analyses. *Review of Educational Research*, 68(3), 350-386. DOI: 10.3102/00346543068003350
- Kesim, M., & Ozarslan, Y. (2012). Augmented reality in education: current technologies and the potential for education. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 47, 297-302. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.06.654
- Kim, Y. Y., Kim, H. J., Kim, E. N., Ko, H. D., & Kim, H. T. (2005). Characteristic changes in the physiological components of cybersickness. *Psychophysiology*, 42(5), 616-625. DOI: 10.1111/j.1469-8986.2005.00349.x
- Kiryu, T., Tada, G., Toyama, H., & Iijima, A. (2008). Integrated evaluation of visually induced motion sickness in terms of autonomic nervous regulation. In Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE, 4597-4600. DOI: 10.1109/IEMBS.2008.4650237
- Klingner, J., Kumar, R., & Hanrahan, P. (2008, March). Measuring the task-evoked pupillary response with a remote eye tracker. In *Proceedings of the 2008 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, 69-72. DOI: 10.1145/1344471.1344489
- Kozicz, T., Bittencourt, J. C., May, P. J., Reiner, A., Gamlin, P. D., Palkovits, M., ... & Ryabinin, A. E. (2011). The Edinger-Westphal nucleus: A historical, structural, and functional perspective on a dichotomous terminology. *Journal of Comparative Neurology*, 519(8), 1413-1434. DOI: 10.1002/cne.22580
- Krause, C. M., Pesonen, M., Haarala Björnberg, C., & Hämäläinen, H. (2007). Effects of pulsed and continuous wave 902 MHz mobile phone exposure on brain oscillatory activity during cognitive processing. *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine. The European Bioelectromagnetics Association*, 28(4), 296-308. DOI: 10.1002/bem.20300
- Lambooi, M.T.M., Fortuin, M., Heynderick, I., Ijsselstein, W. (2009). Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review. *Journal of Imaging Science and Technology*, 53(3), 1-14. DOI: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2009.53.3.030201
- Lee, E. C., Park, K. R., Whang, M., & Min, K. (2009). Measuring the degree of eyestrain caused by watching LCD and PDP devices. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(5), 798-806. DOI: 10.1016/j.ergon.2009.02.008
- Merhi, O., Faugloire, E., Flanagan, M., & Stoffregen, T. A. (2007). Motion sickness, console video games, and head-mounted displays. *Human Factors*, 49(5), 920-934. DOI: 10.1518/001872007X230262
- Mun, S., Park, M. C., Park, S., & Whang, M. (2012). SSVEP and ERP measurement of cognitive fatigue caused by stereoscopic 3D. *Neuroscience Letters*, 525(2), 89-94. DOI: 10.1016/j.neulet.2012.07.049
- Mun, S., Kim, E. S., & Park, M. C. (2014). Effect of mental fatigue caused by mobile 3D viewing on

- selective attention: An ERP study. *International Journal of Psychophysiology*, 94(3), 373-381.
DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2014.08.1389
- Nalivaiko, E., Davis, S. L., Blackmore, K. L., Vakulin, A., & Nesbitt, K. V. (2015). Cybersickness provoked by head-mounted display affects cutaneous vascular tone, heart rate and reaction time. *Physiology & Behavior*, 151, 583-590.
DOI: 10.1016/j.physbeh.2015.08.043
- Naqvi, S. A. A., Badruddin, N., Malik, A. S., Hazabbah, W., & Abdullah, B. (2013). Does 3D produce more symptoms of visually induced motion sickness?. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013 35th Annual International Conference of the IEEE*, 6405-6408.
DOI: 10.1109/EMBC.2013.6611020
- Oman, C. M. (1990). Motion sickness: a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 68(2), 294-303. DOI: 10.1139/y90-044
- Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2013). *Virtual and augmented reality applications in manufacturing*. Springer Science & Business Media.
- Park, S., Won, M. J., Mun, S., Lee, E. C., & Whang, M. (2014). Does visual fatigue from 3D displays affect autonomic regulation and heart rhythm?. *International Journal of Psychophysiology*, 92(1), 42-48. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2014.02.003
- Park, S., Won, M. J., Lee, E. C., Mun, S., Park, M. C., & Whang, M. (2015). Evaluation of 3D cognitive fatigue using heart-brain synchronization. *International Journal of Psychophysiology*, 97(2), 120-130. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2015.04.006
- Park, S., Won, M. J., Lee, D. W., & Whang, M. (2018). Non-contact measurement of heart response reflected in human eye. *International Journal of Psychophysiology*, 123, 179-198.
DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2017.07.014
- Park, S., & Whang, M. (2018). Infrared camera-based noncontact measurement of brain activity from pupillary rhythms. *Frontiers in Physiology*, 9, 1400.
DOI: 10.3389/fphys.2018.01400
- Partala, T., & Surakka, V. (2003). Pupil size variation as an indication of affective processing. *International Journal of Human-computer Studies*, 59(1-2), 185-198. DOI: 10.1016/S1071-5819(03)00017-X
- Raajan, N. R., Suganya, S., Priya, M. V., Ramanan, S. V., Janani, S., Nandini, N. S., Hemanand, R., & Gayathri, S. (2012). Augmented reality based virtual reality. *Procedia Engineering*, 38, 1559-1565.
DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.191
- Ryan, M. L. (1999). Immersion vs. interactivity: Virtual reality and literary theory. *SubStance*, 28(2), 110-137.
DOI: 10.1353/sub.1999.0015
- Siegle, G. J., Steinhauer, S. R., & Thase, M. E. (2004). Pupillary assessment and computational modeling of the Stroop task in depression. *International Journal of Psychophysiology*, 52(1), 63-76.
DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2003.12.010
- Tanaka, M., Ishii, A., & Watanabe, Y. (2014). Neural effects of mental fatigue caused by continuous attention load: a magnetoencephalography study. *Brain Research*, 1561, 60-66.
DOI: 10.1016/j.brainres.2014.03.009
- Toschi, N., Kim, J., Sclocco, R., Duggento, A., Barbieri, R., Kuo, B., & Napadow, V. (2017). Motion sickness increases functional connectivity between visual motion and nausea-associated brain regions. *Autonomic Neuroscience*, 202, 108-113.
DOI: 10.1016/j.autneu.2016.10.003
- Van den Brink, R. L., Murphy, P. R., & Nieuwenhuis, S. (2016). Pupil diameter tracks lapses of attention. *PloS One*, 11(10), e0165274.
DOI: 10.1371/journal.pone.0165274
- Van Krevelen, D. W. F., & Poelman, R. (2010). A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *International Journal of Virtual Reality*, 9(2), 1-20.

- Van Steenbergen, H., & Band, G. P. (2013). Pupil dilation in the Simon task as a marker of conflict processing. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 215. DOI: 10.3389/fnhum.2013.00215
- Wang, Y. (2013). *An investigation of visual field test parameters in glaucoma, patterns of visual field loss in diabetics and multispectral imaging of the optic nerve head in glaucoma* (Doctoral dissertation, The University of Manchester (United Kingdom)).
- Yokota, Y., Aoki, M., Mizuta, K., Ito, Y., & Isu, N. (2005). Motion sickness susceptibility associated with visually induced postural instability and cardiac autonomic responses in healthy subjects. *Acta Oto-laryngologica*, 125(3), 280-285. DOI: 10.1080/00016480510003192

원고접수: 2018.08.27
수정접수: 2018.12.05
게재확정: 2018.12.11