

Changes in Visual and Physical Discomfort according to Video Viewing Time While Using Virtual Reality Devices

Hyungoo Kang^{1,a}, Duhyun Kim^{2,b}, Sangjoon Kim^{2,c}, and Hyungki Hong^{3,d,*}

¹Dept. of Optometry, Catholic Kwandong University, Professor, Gangneung 25601, Korea

²Dept. of Optometry, Seoul National Univ. of Science and Technology, Student, Seoul 01811, Korea

³Dept. of Optometry, Seoul National Univ. of Science and Technology, Professor, Seoul 01811, Korea

(Received April 7, 2026: Revised April 28, 2026: Accepted May 6, 2026)

Purpose: This study aimed to analyze changes in the symptoms of visual and physical discomfort over time as the viewing duration increased while using virtual reality (VR) devices. **Methods:** Seventeen adults with a corrected binocular visual acuity of 0.8 or higher participated in the study. Participants watched a VR video (Aladdin, 2019) for 40 minutes while wearing an HTC VIVE COSMOS HMD. Fatigue was assessed by using a questionnaire comprising five symptom categories: eye strain, general discomfort, nausea, difficulty focusing, and headache. Measurements were performed five times: before viewing and at 10-minute intervals during viewing. Changes in symptoms over time were analyzed using one-way repeated measures ANOVA. **Results:** Statistically significant increases across all symptom categories were observed as the VR viewing time increased ($p < 0.05$). In particular, the eye strain and headache categories increased significantly from a relatively early stage and demonstrated a large effect size (partial $\eta^2 \geq 0.26$). Post hoc analysis revealed that most symptoms significantly increased starting from 10 or 20 minutes of viewing compared to baseline symptoms. **Conclusions:** Symptoms of visual and physical discomfort tended to accumulate as VR viewing duration increased. We identified eye strain and headache as the most sensitive indicators reflecting early fatigue responses. These results suggest the need to limit continuous viewing time and provide regular rest periods when using VR. Furthermore, these findings can serve as fundamental data for future development of health-friendly VR usage guidelines.

Key words: Virtual reality, Simulator sickness questionnaire, Cybersickness, Head-mounted display, Visual fatigue

서론

가상현실(virtual reality; VR) 기술은 최근 게임 및 엔터테인먼트 산업을 넘어 의료, 교육, 국방, 제조 산업 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 5세대 이동통신(5G) 기술의 발전과 함께 대용량 몰입형 콘텐츠의 전송이 가능해지면서 고해상도 VR 콘텐츠의 보급이 빠르게 확대되고 있다.^[1,2]

가상현실 시스템에서 핵심적인 인터페이스 역할을 하는 장치는 HMD(head mounted display)이다. HMD는 사용자의 시각과 청각을 포함한 감각 체계와 직접적으로 상호작용하여 높은 몰입감을 제공한다. 최근 개발된 HMD 기기들은 초기 모델에 비해 해상도와 화소 밀도가 크게 향상되었으며, 레이턴시(latency)가 감소하여 보다 현실감 있는 가상 환경을 구현할 수 있게 되었다. 최근의 HMD 기기 중 일부는 외부 베이스 스테이션 없이 내부 센서를 통해 사용

자의 움직임을 추적하는 inside-out tracking 방식을 적용하여, 공간적 제약을 줄이고 사용자 편의성을 높이고있다.^[4]

그러나 이러한 기술적 발전에도 불구하고 HMD 기반 VR 환경을 장시간 이용할 경우 다양한 시각적 및 신체적 불편 증상이 발생할 수 있다는 문제가 지속적으로 제기되고 있다. VR 사용 중 발생하는 대표적인 증상으로는 안구 피로, 두통, 어지러움, 구역감(오심) 등이 있으며 이러한 증상은 일반적으로 사이버 멀미(cyber-sickness)로 분류된다.^[5] 가상현실 이용 시 발생하는 ‘사이버 멀미(cyber-sickness)’와 안구 피로(asthenopia)는 조절-폭주 불일치(vergence-accommodation conflict) 현상과 디스플레이의 광학적 특성에서 기인하며, 이는 사용자에게 두통, 현기증, 시력 저하 등의 신체적 부작용을 유발한다.^[6,7] 현재까지 제시된 해결책은 대부분 증상 발현 시 기기를 일시적으로 탈거하고 휴식을 취하는 사후 조치에 국한되어 있으며, 누적 피로도

*Corresponding author: Hyungki Hong, TEL: +82-2-970-6232, E-mail: hyungki.hong@snu.ac.kr

Authors ORCID: ^a<https://orcid.org/0000-0002-1200-9913>, ^b<https://orcid.org/0009-0002-0226-3499>, ^c<https://orcid.org/0009-0006-8541-2486>, ^d<https://orcid.org/0000-0001-5249-9243>

에 따른 체계적인 완화 가이드라인은 미비한 실정이다.^[8]

기존의 VR 피로 연구들은 대부분 VR 사용 전(pre-test)과 사용 후(post-test)의 결과를 비교하는 방식으로 수행되어 왔다.^[9] 이러한 연구 방법은 VR 노출의 전반적인 영향을 평가하는 데에는 유용하지만, 실제 VR 사용 과정에서 피로가 시간에 따라 어떻게 변화하는지에 대한 동적 변화를 충분히 설명하기에는 한계가 있다. 일부 연구에서는 중간 측정을 시도하기도 하였으나, 측정 과정에서 HMD를 제거할 경우 시각 시스템이 일시적으로 휴지 상태에 들어가 피로도 측정 결과에 영향을 미칠 가능성이 있다.^[10-12] 따라서 본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위하여 피검자가 HMD를 착용한 상태를 유지한 채 연속적으로 피로도를 측정하는 실험 설계를 적용하였다. VR 시청 중 10분 간격으로 설문 조사를 실시함으로써 VR 노출에 따른 시각적 및 신체적 피로도의 시간적 변화를 보다 정밀하게 분석하고자 하였다.

본 연구의 목적은 가상현실(VR) 기기를 이용한 영상 시청 시 시청 시간 경과에 따른 시각적 및 신체적 피로도의 변화를 정량적으로 분석하고, 피로도가 어느 시점에서 유의하게 증가하는지를 확인하고자 한다.

대상 및 방법

1. 실험 대상

본 연구의 실험은 양안 교정시력 0.8 이상이며 사시나 부등시, 안과적 질환, 정신질환 등이 없고 가상현실 기기를 이용한 시청이 가능하며 사전 설문을 통해 당일 과도한 피로를 느끼지 않았던 성인남녀 17명을 대상으로 진행하였으며, 평균 나이는 24.71 ± 1.36 세이다. 시력교정 수술을 한 피검자는 나안상태로, 나안시력이 낮은 피검자는 안경을 착용하거나 콘택트렌즈로 교정한 후에 실험을 실시하였다. 본 연구는 최소 위험을 수반하는 비침습적 연구이며, 헬싱키 선언의 윤리 원칙에 따라 수행되었다. 모든 참여자는 연구 목적과 절차에 대한 충분한 설명을 들은 후 자발적으로 실험에 참여하였다. 또한 참여자는 연구 도중 언제든지 철회할 수 있음을 고지받았다. 본 연구의 표본 수는 VR 시각 피로도 관련 선행 연구에서 보고된 효과 크기(effect size ≈ 0.35)를 기준으로 하였으며, 이는 반복측정 ANOVA에서 사용되는 Cohen's f 기준값이다. 반복 측정 ANOVA ($\alpha=0.05$, power=0.80) 기준 최소 표본 수는 15명이었으며, 탈락 가능성을 고려하여 17명을 모집하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 기기는 VIVE COSMOS(HTC Corporation, Taiwan) PC용 VR HMD 제품이다. 1440 ×

1700 픽셀의 해상도, 90Hz 재생률, 최대 110° 시야각을 제공한다. 인체공학 설계로 플립 업 디자인을 통해 HMD를 통째로 벗지 않고 위로 꺾어 여는 식으로 쉽게 현실과 VR 공간을 오갈 수 있으며 착용감이 좋고 얼굴이 크거나 안경 착용자라도 큰 불편함 없이 사용할 수 있다. 또한 동공간 거리 설정 기능으로 개인에 맞는 PD 거리를 설정하여 기기와 사용자 사이의 광학적 불일치에 의한 피로도 증가에 영향을 주지 않도록 하였다. 영상 재생을 위해 사용된 애플리케이션은 'Simple VR Video Player'이며, 영상 재생 동안 일시정지, 설문지 화면전환 등의 기능이 있는 애플리케이션이다. 피로도 설문용 화면은 Microsoft Power Point 앱을 사용하였다.

본 실험에서는 'Simple VR Video Player' 애플리케이션을 사용했다. 이 앱은 영화관에서 대형 스크린 화면을 보는 것과 같은 시야를 제공하며, 피검자는 스크린 화면에 나오는 영화(알라딘(Aladdin), 2019)를 40분 동안 시청했다. 본 연구에서는 시각적 움직임과 장면 전환이 비교적 균형 있게 포함된 상업 영화 콘텐츠를 사용하여 일반적인 VR 시청 환경을 모사하고자 하였으며, 모든 피검자는 Screen Mode로, 동일한 구간(40:00~1:20:00)을 동일한 속도(x1.0)로 시청했으며, 해당 구간은 과도하게 빠른 장면 전환이나 극단적인 시각 자극에 치우치지 않으면서도, 인물 및 배경의 움직임과 시각적 변화가 비교적 균형 있게 포함되어 있어 일반적인 VR 시청 환경을 반영할 수 있는 구간으로 선정하였다. 음량과 PD 조절은 피검자에게 직접 하도록 하여 최대한 편한 환경이 조성되도록 했다(Fig. 1). 영상 시청에 앞서 피검자가 갑작스러운 시야 변화로 인한 피로와 혼란을 생길 것을 우려하여, 기기에 익숙해질 시간을 주기 위해 간단한 컨트롤러 조작법을 교육하고 이를 사용하는 시간을 가졌다. 그 이후 실험 전 설문을 진행



Fig. 1. Experiment in progress wearing HTC VIVE COSMOS.

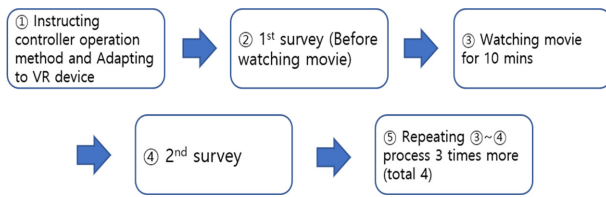


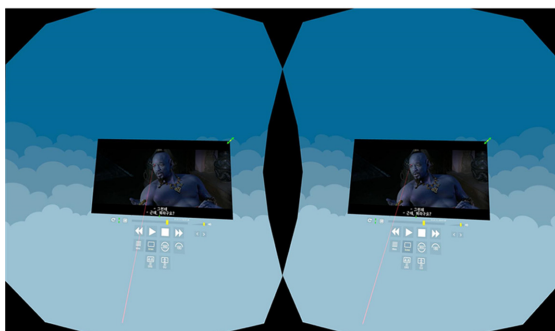
Fig. 2. Experimental procedures.

했다(Fig. 2).

본 연구에 사용된 설문 문항은 Kennedy 등의 Simulator Sickness Questionnaire(SSQ)를 기반으로 하여 VR 시청 환경에 맞게 구성되었다.^[6] SSQ는 Kennedy et al.(1993)에 의해 개발된 이후 다양한 연구에서 활용되어 왔으며, 이후 연구에서는 약 0.85 수준의 Cronbach's α 가 보고되어 높은 내적 합치도를 보이는 것으로 확인되었다.^[15] 28개의 피로도 항목은 한 페이지에 4개씩 나누어 표시하였다(Fig. 3). 설문 항목은 Table 1에 제시하였으며, 각 항목을 한글로 번역해서 질문 형식으로 제공하였다. 각 문항은 Likert 7점 척도를 사용하여 최소 1점에서 최대 7점으로 평가되었다. 1점은 무증상으로서 해당 항목에 대해 전혀 자각하지 못한다는 뜻이며 7점은 매우 심각한 증상을 뜻한다. 범주 점수는 해당 범주에 포함된 문항 점수의 평균으로 산출하였다. 전체 설문 시간은 평균 1분 30초가 걸렸으며, 영상

Table 1. Questionnaire for evaluating visual fatigue

List of fatigue survey	
Eye strain	Blurry, Dry eye, Eye strain, Gritty, Pain in the eye, Stinging, Eye heavy, Hazy, Warm eyes, Flickering, Watery eyes
General discomfort	Feeling heavy in the head, difficulty concentrating, Dizzy, Stiff neck, Sleepy, Feel heavy, Stiff shoulder
Nausea	Vomiting, Vertigo, Nausea
Focusing	Difficulty focusing, Double vision, Near vision difficulty, Far vision difficulty
Headache	Pain in the temple, Pain in the middle of the forehead, Pain in the back of the head



시청 전 1회, 시청 중 10분마다 1회씩 4회를 설문하여, 총 5차에 걸친 설문을 진행하였다.

3. 통계 분석

본 연구의 모든 통계분석은 IBM SPSS Statistics 27 (IBM Corp., Armonk, USA)를 사용하여 수행하였다. VR 시청 시간에 따른 증상 변화 양상을 검증하기 위해, 반복 측정 분산분석(one-way repeated measures ANOVA)을 실시하였다. 분석은 증상 범주별로 각각 수행하였으며(눈의 피로, 일반적인 불편감, 멀미, 초점 맞추기 어려움, 두통), 측정 시점(시청 전, 시청 후 10분, 20분, 30분, 40분)을 피험자 내 요인(within subject factor)으로 설정하였다. 본 연구에서는 VR 시청에 따른 피로 반응의 다차원적 특성을 고려하여, 개별 문항 수준과 범주 점수 수준의 분석을 병행하였다. 개별 문항 분석은 특정 증상의 변화 양상을 세밀하게 평가하기 위함이며, 범주 점수 분석은 여러 증상의 누적 효과를 반영한 전체적인 피로도도의 변화를 평가하기 위해 수행되었다. 반복 측정 분산분석의 가정인 구형성(sphericity)은 Mauchly의 구형성 검정을 통해 확인하였다. 구형성 가정이 위배된 경우($p < 0.05$), Greenhouse-Geisser 보정을 적용하여 자유도를 조정한 결과를 보고하였으며, 구형성 가정이 충족된 경우에는 보정되지 않은 결과를 사용하였다. 각 반복 측정 분산분석 결과에 대해 F값, 자유도, 유의확률을 제시하였고, 효과크기의 지표로 부분 에타 제곱(partial eta squared, η^2p)을 산출하였다. 효과 크기는 일반적인 기준에 따라 $\eta^2p \approx 0.01$ 은 작은 효과, ≈ 0.06 은 중간 효과, ≈ 0.14 이상은 큰 효과로 해석하였다. 본 연구에서는 개별 문항(item level)과 범주 점수(category level)에 대해 반복 측정 분산분석을 각각 수행하였다. 개별 문항 분석은 각 증상의 세부적인 변화 양상을 탐색적으로 확인하기 위한 목적으로 수행되었으며, 다수의 비교가 포함되는 특성을 고려하여 효과 크기는 별도로 제시하지 않았다. 반면 범주 점수는 여러 문항을 통합한 주요 결과 지표(primary outcome)로 간주하였으며, 시간 요인의 설명력

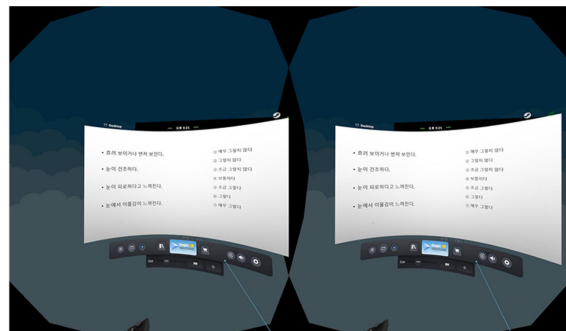


Fig. 3. Watching VR videos and taking a survey while wearing the HMD.

을 평가하기 위해 부분 에타제곱(partial η^2)을 산출하여 효과 크기를 보고하였다. 시간 요인의 주효과가 유의한 경우, 시점 간 차이를 확인하기 위해 Bonferroni 보정이 적용된 사후 검정(pairwise comparisons)을 실시하여 다중비교로 인한 제1종 오류를 통제하였다. 모든 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다.

결과 및 고찰

1. 착용 시간에 따른 안구 피로 관련 항목의 변화

반복 측정 분산분석을 실시한 결과, 시간의 경과에 따라 여러 안구 피로 증상에서 통계적으로 유의미한 차이가 나타났다. 구체적으로는 안구 피로(eye strain)($F(4, 64)=6.40$, $p < 0.001$), 이물감(gritty)($F(4, 64)=3.57$, $p=0.011$), 안구 통증(eye pain)($F(4, 64)=5.84$, $p < 0.001$), 따가움(stinging)($F(4, 64)=3.10$, $p=0.021$), 눈의 무거움(eye heaviness)($F(4, 64)=4.42$, $p=0.003$), 시야 흐림(hazy vision)($F(4, 64)=3.76$, $p=0.008$), 그리고 안구 열감(warm eyes)($F(4, 64)=3.21$, $p=0.018$) 항목에서 시간 변화에 따른 유의한 주 효과가 확인되었다. Bonferroni 교정을 이용한 사후 검증 결과, 다수의 안구 증상 점수가 기저치(baseline) 대비 20분에서 40분 사이의 시점에서 유의하게 증가한 것으로 나타났으며, 이는 작업 시간이 지속됨에 따라 주관적인 안구 불편감이 심화되었음을 시사한다. 반면 흐림(blurry), 건조감(dry eye), 눈물(watery eyes), 깜박임(flickering) 등의 항목에서는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다 (Table 2).

Table 2. Repeated measures ANOVA and post hoc comparisons of eye strain symptoms over time

Symptom	F	p value	Bonferroni post hoc
Blurry	2.12	0.089	
Dry eye	2.52	0.050	
Eye strain	6.4	<0.001	before vs. 20min before vs. 30min before vs. 40min
Gritty	3.57	0.011	before vs. 30min before vs. 40min
Pain in the eye	5.84	<0.001	before vs. 30min before vs. 40min
Stinging	3.1	0.021	Before vs. 30min
Eye heavy	4.42	0.003	before vs. 20min before vs. 30min before vs. 40min
Hazy	3.76	0.008	Before vs. 30min
Warm eyes	3.21	0.018	Before vs. 30min
Flickering	1.04	0.391	
Watery eyes	2.01	0.104	

2. 착용 시간에 따른 일반적인 불편함 관련 항목의 변화

시간의 경과에 따라 전신 불편감의 여러 증상에서 통계적으로 유의미한 주효과가 확인되었다. 구체적으로는 머리의 무거운 느낌(feeling heavy in the head)($F(4,64)=5.49$, $p < 0.001$), 목의 뻣뻣함(stiff neck)($F(4,64)=4.47$, $p=0.003$), 전신 중압감(feeling heavy)($F(4,64)=4.29$, $p=0.004$), 그리고 어깨의 뻣뻣함(stiff shoulder)($F(4,64)=4.68$, $p=0.002$) 항목에서 모두 유의한 차이가 나타났다. Bonferroni 사후 검증 결과, 머리의 무거운 느낌은 기저치(baseline)와 비교하여 40분 경과 시점에서 유의하게 높게 측정되었다. 또한, 목의 뻣뻣함과 어깨의 뻣뻣함 증상은 작업 시작 후 30분에서 40분 사이에 기저치 대비 유의미하게 증가한 것으로 분석되었다. 반면 집중 곤란(difficulty concentrating), 졸림(sleepy), 어지러움(dizzy) 등의 항목에서는 통계적으로 유의한 변화가 나타나지 않았다(Table 3).

3. 착용 시간에 따른 멀미 관련 항목의 변화

시간에 따른 증상 변화를 확인하기 위해 반복 측정 분산분석을 실시한 결과, 어지럼(vertigo)($F(4, 64)=5.29$, $p < 0.001$)과 멀미(nausea)($F(4, 64)=4.35$, $p=0.004$) 점수는 시간에 따라 통계적으로 유의미한 차이가 나타났으나, 구토(vomiting)($F(4, 64)=1.61$, $p=0.182$) 점수는 유의미한 변화가 관찰되지 않았다. Bonferroni 사후 검정 결과, 어지럼과 구역 점수는 모두 기저치(baseline)와 비교하여 40분 시점에서 통계적으로 유의하게 높은 것으로 나타나 특정 시점의 증상 변화를 확인하였다 (Table 4).

Table 3. Repeated measures ANOVA and post hoc comparisons of general discomfort symptoms over time

Symptom	F	p value	Bonferroni post hoc
Feeling heavy in the head	5.49	<0.001	before vs. 40min
Difficulty concentrating	0.68	0.610	
Dizzy	1.18	0.328	
Stiff neck	4.47	0.003	before vs. 30min before vs. 40min
Sleepy	2.09	0.093	
Feel heavy	4.29	0.004	before vs. 30min
Stiff shoulder	4.68	0.002	before vs. 30min before vs. 40min

Table 4. Repeated measures ANOVA and post hoc comparisons of nausea symptoms over time

Symptom	F	p value	Bonferroni post hoc
Vomiting	1.61	0.182	
Vertigo	5.29	<0.001	before vs. 40min
Nausea	4.35	0.004	before vs. 40min

4. 착용 시간에 따른 초점 맞추기 관련 항목의 변화

초점 맞추기 관련 증상에 대해 반복 측정 분산분석을 실시한 결과, 초점 맞추기 어려움(difficulty focusing)($F(4, 64)=3.91, p=0.006$), 복시(double vision)($F(4, 64)=3.27, p=0.017$), 근거리 시력 저하(near vision difficulty)($F(4, 64)=4.63, p=0.002$)의 항목에서 시간에 따른 통계적으로 유의미한 차이가 확인되었다. Bonferroni 사후 검정 결과, 해당 증상들의 점수는 기저치(baseline)와 비교하여 20~40분 경과 시점에서 유의하게 증가한 것으로 나타나 특정 시간대 이후 증상이 심화됨을 확인하였다. 반면 원거리 시력 저하(Far vision difficulty)는 시청 시간에 따른 유의한 변화가 나타나지 않았다($F(4, 64)=1.52, p=0.204$)(Table 5).

5. 착용 시간에 따른 두통 관련 항목의 변화

두통 관련 증상에 대해 반복 측정 분산분석을 실시한 결과, 관자놀이 통증(pain in the temple)($F(4, 64)=6.18, p<0.001$), 이마 통증(pain in the middle of the forehead)($F(4, 64)=6.71, p<0.001$), 후두부 통증(pain in the back of the head)($F(4, 64)=5.54, p<0.001$)은 시간에 따라 통계적으로 유의미한 변화가 확인되었다. Bonferroni 사후 검정 결과, 두통 관련 증상들은 기저치(Baseline)와 비교하여 20분 경과 시점부터 통계적으로 유의하게 증가하는 양상을 보여 특정 시간대 이후 증상이 뚜렷하게 심화됨을 보였다(Table 6).

Table 5. Repeated measures ANOVA and *post hoc* comparisons of difficulty focusing symptoms over time

Symptom	F	p value	Bonferroni <i>post hoc</i>
Difficulty focusing	3.91	0.006	before vs. 20min before vs. 30min before vs. 40min
Double vision	3.27	0.017	before vs. 20min before vs. 30min before vs. 40min
Near vision difficulty	4.63	0.002	before vs. 20min before vs. 30min before vs. 40min
Far vision difficulty	1.52	0.204	

Table 7. Symptom scores according to VR viewing time (M±SD)

Category	Before	10 min	20 min	30 min	40 min
Eye strain	2.26±1.48	2.68±1.57**	3.11±1.70**	3.27±1.77**	3.22±1.86**
General discomfort	2.55±1.42	2.89±1.74	3.18±1.84**	3.40±1.95**	3.51±2.02**
Nausea	1.49±0.97	2.10±1.36	2.12±1.39*	2.25±1.48*	2.53±1.63**
Focusing difficulty	1.93±1.41	2.35±1.48	2.43±1.58	2.53±1.71*	2.85±1.90**
Headache	1.63±1.06	2.31±1.57*	2.80±1.89**	3.12±2.15**	3.33±2.25**

Values are presented as means±standard deviations across time points

* means $p<0.05$, ** means $p<0.001$ compared with baseline (before), Bonferroni corrected

6. 눈의 피로, 일반적인 불편함, 멀미, 초점 맞추기, 두통 범주별 평균 비교

VR 시청 중 증상 점수의 시간 경과에 따른 변화를 Table 7에 나타내었다. 모든 증상 범주에서 시간이 지남에 따라 점진적인 증가가 나타났으며, 눈의 피로와 두통 범주는 다른 증상에 비해 더 일찍, 더 가파르게 증가하였다.

VR 시청 시간에 따른 각 증상 범주의 평균 점수와 표준 편차를 Table 7에 제시하였다. 전반적으로 모든 증상 범주에서 시청 시간이 증가함에 따라 점진적인 증가 경향이 관찰되었다. 반복 측정 분산분석 결과(Table 7), 모든 증상 범주에서 시간에 따른 유의한 변화가 확인되었다($p<0.001$). Baseline 대비 사후검정 결과(Table 7)를 기준으로 살펴보면, 눈의 피로와 두통 범주는 시청 후 10분 시점부터 유의한 증가가 나타났으며, 이후 모든 시점(20~40분)에서 유의성이 지속되었다. 반면 일반적인 불편함과 멀미 범주는 20분 시점부터 유의한 증가가 관찰되었고, 초점 맞추기 어려움은 30분 이후부터 유의한 증가가 나타났다. 반복 측정 분산분석 결과, 모든 증상 범주에서 시간에 따른 유의한 변화가 확인되었다. Mauchly의 구형성 검정 결과 일부 범주에서 구형성 가정이 위배되어 Greenhouse-Geisser 보정을 적용하였다. 반복 측정 분산분석 결과 눈의 피로(eye strain)($F(2.71, 504.67)=32.77, p<0.001, \eta^2p=0.150$), 일반적인 불편함(general discomfort)($F(3.25, 383.29)=19.73, p<0.001, \eta^2p=0.144$), 멀미(nausea)($F(2.62, 31.09)=9.05, p<0.001, \eta^2p=0.153$), 초점맞추기 어려움(focusing difficulty)(3.43,

Table 6. Repeated measures ANOVA and *post hoc* comparisons of headache symptoms over time

Symptom	F	p value	Bonferroni <i>post hoc</i>
Pain in the temple	6.18	<0.001	before vs. 20min before vs. 30min before vs. 40min
Pain in the middle of the forehead	6.71	<0.001	before vs. 20min before vs. 30min before vs. 40min
Pain in the back of the head	5.54	<0.001	Before vs. 20min before vs. 30min before vs. 40min

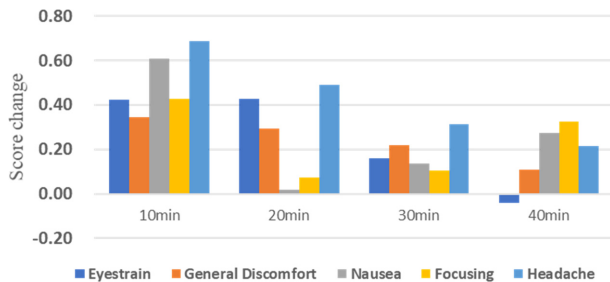


Fig. 4. Changes in symptom scores per 10-minute interval during VR viewing.

219.97)=8.07, $p<0.001$, $\eta^2p=0.107$), 두통(headache)($F(2.09, 104.96)=21.51$, $p<0.001$, $\eta^2p=0.302$) 모두에서 시간에 따른 유의한 변화가 확인되었다. 효과 크기 측면에서 두통은 가장 큰 partial η^2 값을 나타내 시간 요인이 해당 증상의 변동을 가장 크게 설명하는 것으로 나타났으며, 눈의 피로 역시 비교적 큰 효과 크기와 함께 초기 시점(10분)부터 빠른 증가 양상을 보여 VR 노출에 민감하게 반응하는 지표일 가능성을 시사한다. 이러한 결과는 눈의 피로와 두통이 VR 노출에 대한 주요 반응 지표로 활용될 수 있음을 뒷받침한다.

Fig. 4는 VR 시청 중 10분 간격으로 산출한 각 증상 범주의 변화량(delta value)을 나타낸 것이다. 본 그림은 절대 점수의 변화가 아닌, 시간 구간별 변화의 크기를 시각화함으로써 초기 VR 노출 단계에서의 반응 강도를 보다 직관적으로 제시하기 위한 보조적 자료이다. 모든 증상 범주에서 시청 시작 후 첫 10분 구간에서 가장 큰 변화량이 관찰되었으며, 이후 시간 구간에서는 변화량이 점차 감소하는 경향을 보였다. 특히 두통(headache), 멀미(nausea), 눈의 피로(eye strain)는 10분 시점에서 다른 증상 범주에 비해 상대적으로 큰 증가 폭을 나타내 초기 VR 노출에 대한 민감한 반응을 보였다. 관찰된 결과는 VR 시청에 따른 신체적·시각적 피로가 선형적으로 증가하기보다는, 초기 노출 단계에서 급격히 증가한 이후 점진적으로 누적되는 양상을 보일 가능성을 시사한다. 이러한 초기 변화 양상은 사용자가 VR 환경에 적응하는 과정에서 시각 및 감각 체계에 상대적으로 큰 부담이 가해지는 현상과 관련될 수 있으나, 본 연구에서 직접적으로 검증된 기전은 아니므로 해석에 주의가 필요하다.

본 연구는 VR 시청 시간 증가에 따른 시각적·신체적 피로도의 변화를 반복 측정 분산분석을 통해 검증하였다. 그 결과, 모든 증상 범주에서 시간에 따른 유의한 증가가 확인되었으며, 증상 유형에 따라 발현 시점과 증가 양상이 상이하게 나타났다. 특히 눈의 피로와 두통 범주는 시청 10분 시점부터 유의한 증가를 보였으며, 상대적으로 큰 효과 크기를 나타내 VR 노출에 대한 초기 반응 지표로서의

가능성을 시사하였다. 반면, 일반적인 불편함, 멀미, 초점 맞추기 어려움은 주로 20분 이후 시점에서 유의성이 나타나 보다 지연된 반응 양상을 보였다.

이러한 결과는 VR 사용 시 시각적 피로가 단시간 내에 빠르게 증가할 수 있음을 보고한 선행연구와 일치하며,^[7] 사이버 멀미가 노출 시간과 개인차의 영향을 받아 점진적으로 발생한다는 기존 연구 결과와도 부합한다.^[6,11] 특히 눈의 피로와 두통이 초기 단계에서 민감하게 반응한 점은, VR 환경에서의 시각 자극이 다른 신체 증상보다 우선적으로 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 이와 같은 증상 발현 양상은 조절-폭주 불일치(vergence-accommodation conflict)와 감각 불일치(sensory conflict) 기전으로 설명될 수 있다. 눈의 피로는 지속적인 근거리 시각 자극과 광학적 불일치로 인해 시각 시스템에 즉각적인 부담과 관련될 수 있으며, 두통은 이러한 시각적 스트레스와 더불어 고정된 자세 및 감각 정보 간 불일치가 복합적으로 작용한 결과로 해석될 수 있다. 반면 멀미 및 일반적 불편감은 감각 불일치 정보가 누적되면서 일정 시간 이후에 발현되는 지연적 반응으로 이해할 수 있다.

본 연구에서는 카테고리 수준의 분석과 개별 문항 수준의 분석 간에 유의성 발현 시점에서 차이가 관찰되었다. 구체적으로, 눈의 피로와 두통 범주는 카테고리 점수 기준에서는 시청 10분 시점부터 유의한 증가를 보였으나, 개별 문항 수준에서는 일부 항목이 20분 이후에 유의한 변화를 나타냈다. 이러한 차이는 카테고리 점수가 복수의 문항 점수를 합산한 지표라는 점에서 기인하는 것으로 해석된다. 즉, 개별 문항에서는 통계적으로 유의하지 않은 변화라도, 여러 항목에서 일관된 증가 경향이 나타날 경우 누적 효과에 의해 카테고리 수준에서는 더 이른 시점에서 유의성이 검출될 수 있다. 이러한 결과는 VR 시청에 따른 피로가 특정 단일 증상보다는 다차원적이고 복합적인 형태로 초기부터 동시에 발생함을 시사하며, 총합 점수 기반 접근이 초기 피로 탐지에 보다 민감할 수 있음을 보여준다.

종합하면, VR 시청에 따른 신체적 피로는 단일 증상이 아닌 다차원적 반응으로 나타나며, 증상별로 발현 시점과 민감도가 다르게 나타난다. 특히 눈의 피로와 두통 범주는 비교적 짧은 노출 시간에서도 급격히 증가하여, VR 사용 시 초기 단계에서부터 관리가 필요한 핵심 지표로 판단된다. 본 연구는 HMD 착용 상태에서의 연속적 측정을 통해 VR 피로의 시간적 누적 양상을 정량적으로 제시하였다. 이러한 결과는 VR 콘텐츠 이용 시 10-20분 단위의 휴식 제공이 시각적·신체적 부담을 완화하는 데 효과적일 수 있음을 시사하며, 향후 VR 사용 가이드라인 수립을 위한 경험적 근거로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구는 몇 가지 한계점을 지닌다. 첫째, 본 연구는

반복 측정 설계를 통해 개인 내 변화 양상을 분석하였으나, 연구 대상자가 17명의 젊은 성인으로 제한되어 있어 결과를 모든 연령대와 사용자 집단으로 일반화하는 데에는 한계가 있다. 특히 연령, 성별, VR 사용 경험에 따른 개인차가 사이버 멀미 및 시각적 피로에 영향을 미칠 수 있으므로, 향후 연구에서는 보다 다양한 연령층과 표본 규모를 확대한 분석이 필요할 것이다. 둘째, 본 연구에서는 단일 VR 기기(HTC VIVE COSMOS)와 단일 콘텐츠(영화 Aladdin)를 사용하여 실험을 수행하였다. 그러나 VR 기기의 해상도, 시야각(field of view), 재생률(refresh rate), 지연 시간(latency), 무게 및 착용감과 같은 물리적·광학적 특성은 사용자 경험 및 시각적 피로, 두통, 멀미 등에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서 관찰된 피로 양상은 사용된 특정 HMD의 특성에 부분적으로 의존했을 가능성이 있다. 또한 실험에 사용된 콘텐츠의 경우, 장면 전환 빈도, 카메라 움직임, 시각적 복잡도, 시점 변화 등 콘텐츠의 구성 요소에 따라 감각 불일치 수준과 인지적 부하가 달라질 수 있으며, 이는 사이버 멀미 및 피로도의 발생 양상에 영향을 줄 수 있다. 예를 들어 빠른 시점 이동이나 역동적인 장면이 포함된 콘텐츠는 보다 강한 멀미 반응을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과는 특정 기기 및 콘텐츠 조건에 기반한 결과로 해석할 필요가 있으며, 다양한 HMD 기기와 콘텐츠 유형을 포함한 후속 연구를 통해 VR 환경 전반에 대한 일반화 가능성을 보다 신중하게 검증할 필요가 있다. 셋째, 본 연구에서 피로도 평가는 자가 보고식 설문에 기반하여 이루어졌다는 점에서 해석에 주의가 필요하다. 자가 보고 방식은 동일한 자극에 대해서도 개인의 주관적 인식, 피로 민감도, 응답 성향에 따라 결과가 달라질 수 있으며, 일부 피검자는 증상을 과대 또는 과소 보고할 가능성이 있다. 또한 반복적인 설문 측정 과정에서 피검자가 자신의 상태를 의식적으로 평가하게 되면서 응답 편향(response bias)이 발생할 가능성도 배제할 수 없다. 더불어 자가 보고식 평가는 실제 생리적 피로 상태를 직접적으로 반영하기보다 ‘인지된 불편감’을 측정하는 지표이기 때문에, 객관적인 생체 반응과 반드시 일치하지 않을 수 있다. 이러한 특성은 VR 노출에 따른 피로도의 절대적 수준보다는 주관적 변화 양상에 초점을 두어 결과를 해석해야 함을 시사한다. 향후 연구에서는 VR의 360도 몰입형 시청 환경에서 일반 디스플레이 시청과 구별되는 안구 운동 패턴, 피로 및 집중도 변화에 따른 깜빡임 빈도, 그리고 시청 거리와 주변 조도에 따른 동공 반응 등 시각 생리 지표를 통합적으로 분석할 필요가 있다. 더불어 심전도 및 눈물막 파괴 시간과 같은 객관적 생체 신호를 병행 측정함으로써, VR 노출에 따른 피로 발생 기전을 보다 정밀하게 규명할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 실험의 결과가

VR 시청 환경에서 관찰된 피로 증가가 2D 및 3D 영상을 포함한 일반적인 디스플레이를 장시간 시청 효과와 구별되는 VR 고유의 영향인지에 대해서는 추가적인 비교 연구가 필요하다. 이러한 한계에도 불구하고, 본 연구는 HMD 착용 상태를 유지한 채 시간 경과에 따른 피로도의 연속적 변화를 분석하였다는 점에서 기존 연구와 차별성을 가지며, VR 시청 시간 관리 및 사용자 보호를 위한 실증적 근거를 제공한다는 의의를 지닌다.

결론

본 연구는 VR 시청 시간 증가에 따른 신체적·시각적 불편 증상의 변화를 반복 측정 분산분석을 통해 검증하였다. 그 결과, 눈의 피로, 일반적인 불편함, 멀미, 초점 맞추기, 두통의 모든 증상에서 시간에 따른 유의한 증가가 확인되었으며, 특히 눈의 피로와 두통 범주에서 가장 큰 효과 크기가 나타났다. 이는 VR 노출이 단일 시점의 일시적 불편을 넘어, 시간에 따라 누적되는 신체 부담과 관련될 가능성을 시사한다.

본 연구의 결과는 VR 사용 시 비교적 짧은 시간에서도 시각적 피로가 빠르게 증가하는 경향이 있음을 보여주며, 사용 시간이 길어질수록 두통과 전반적인 신체 불편으로 확장될 가능성이 있음을 관찰할 수 있다. 또한 일반적인 불편함, 멀미, 그리고 초점 맞추기 어려움의 점진적인 증가는 VR 환경에서의 감각 불일치와 지속적인 시각적·인지적 요구가 사용자 경험에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 특히 본 연구에서 10분 간격으로 분석한 증상 변화량은 VR 시청 후 첫 10분 구간에서 대부분의 증상 범주에서 가장 큰 증가가 발생함을 보여주었다. 이는 VR 사용에 따른 신체적·시각적 피로가 선형적으로 누적되기보다, 초기 노출 단계에서 급격히 증가한 이후 점진적으로 축적되는 양상을 보인다는 점을 시사한다. 이러한 결과는 VR 사용 시 단순히 총 사용 시간을 제한하는 것보다, 초기 10-20분 이내에 주기적인 휴식 제공이 필요한 것으로 보인다. 또한 본 연구 결과는 연속적인 VR 시청 시간이 10-20분 범위를 초과할 경우 피로 증가 가능성을 시사하며, 이러한 조건에서 일정 시간 간격의 휴식 제공이 사용자 안전성 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

결론적으로, 본 연구는 VR 노출의 시간적 누적 효과를 실증적으로 제시함으로써, VR 사용이 사용자에게 미치는 신체적 영향을 체계적으로 이해하는 데 기여할 수 있다. 본 연구의 결과는 향후 VR 시스템 설계, 사용자 보호 정책, 그리고 건강 친화적 VR 사용 환경 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] Hazarika A, Rahmati M. Towards an evolved immersive experience: exploring 5G- and beyond- enabled ultra-low-latency communications for augmented and virtual reality. *Sensors*. 2023;23(7):3682. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23073682>
- [2] Bastug E, Bennis M, Medard M, et al. Toward interconnected virtual reality: opportunities, challenges, and enablers. *IEEE Commun Mag*. 2017;55(6):110-117. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1601089>
- [3] Riva G, Wiederhold BK, Mantovani F. Neuroscience of virtual reality: from virtual exposure to embodied medicine. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*. 2019;22(1):82-96. DOI: <https://doi.org/10.1089/cyber.2017.29099.gri>
- [4] Niehorster DC, Li L, Lappe M. The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research. *i-Perception*. 2017; 8(3). DOI: <https://doi.org/10.1177/2041669517708205>
- [5] Reimer D, Podkosova I, Scherzer D, et al. Evaluation and improvement of HMD-based and RGB-based hand tracking solutions in VR. *Front Virtual Real*. 2023;4:1169313. DOI: <https://doi.org/10.3389/frvir.2023.1169313>
- [6] Kennedy RS, Lane NE, Berbaum KS, et al. Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness. *Int J Aviat Psychol*. 1993;3(3):203-220. DOI: https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- [7] Hoffman DM, Girshick AR, Akeley K, et al. Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *J Vis*. 2008;8(3):33. DOI: <https://doi.org/10.1167/8.3.33>
- [8] Lambooi M, Fortuin M, Heynderickx I, et al. Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review. *J Imaging Sci Technol*. 2009;53(3):030201-14.
- [9] Hong H, Kang H. Investigation of the effect of the alignment of the eye and the virtual image of virtual reality on fatigue in viewing VR device. *J Soc Inf Display*. 2024; 32(11):747-754. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsid.2007>
- [10] Pesudovs K. The development of a symptom questionnaire for assessing virtual reality viewing using a head-mounted display. *Optom Vis Sci*. 2005;82(7):571. DOI: <https://doi.org/10.1097/01.opx.0000171186.02468.b7>
- [11] Weech S, Kenny S, Barnett-Cowan M. Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: a review. *Front Psychol*. 2019;10:158. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00158>
- [12] Stanney KM, Mourant RR, Kennedy RS. Human factors issues in virtual environments: a review of the literature. *Presence Teleoperators Virtual Environ*. 1998;7(4):327-351. DOI: <https://doi.org/10.1162/105474698565767>
- [13] Stanney K, Lawson BD, Rokers B, et al. Identifying causes of and solutions for cybersickness in immersive technology: reformulation of a research and development agenda. *Int J Hum-Comput Interact*. 2020;36(19):1783-1803. DOI: <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1828535>
- [14] Keshavarz B, Hecht H. Validating an efficient method to quantify motion sickness. *Hum Factors*. 2011;53(4):415-426. DOI: <https://doi.org/10.1177/0018720811403736>
- [15] Balk SA, Bertola DB, Inman VW. Simulator sickness questionnaire: twenty years later. *Driving Assessment Conference Archive*. 2013;7:257-263. DOI: <https://doi.org/10.17077/drivingassessment.1498>

가상현실기기를 이용한 영상 시청 시간에 따른 시각적 및 신체적 불편 증상 변화

강현구¹, 김두현², 김상준², 홍형기^{3,*}

¹가톨릭관동대학교 안경광학과, 교수, 강릉 25601

²서울과학기술대학교 안경광학과, 학생, 서울 01811

³서울과학기술대학교 안경광학과, 교수, 서울 01811

투고일(2026년 4월 7일), 수정일(2026년 4월 28일), 게재확정일(2026년 5월 6일)

목적: 본 연구는 가상현실(VR) 기기를 이용한 영상 시청 시 시청 시간이 증가함에 따라 시각적 및 신체적 불편 증상이 시간 경과에 따라 어떻게 변화하는지를 분석하고자 하였다. **방법:** 양안 교정시력 0.8 이상을 가진 성인 17명을 대상으로 HTC VIVE COSMOS HMD를 착용한 상태에서 VR 영상(알라딘, 2019)을 40분간 시청하도록 하였다. 피로도 평가는 눈의 피로, 일반적인 불편함, 멀미, 초점 맞추기, 두통의 5개 증상 범주로 구성된 설문지를 사용하였으며, 시청 전과 시청 중 10분 간격으로 총 5회 측정하였다. 시간에 따른 증상 변화는 반복 측정 분산분석(one-way repeated measures ANOVA)을 이용하여 분석하였다. **결과:** VR 시청 시간이 증가함에 따라 모든 증상 범주에서 통계적으로 유의한 증가가 나타났다($p < 0.05$). 특히 눈의 피로와 두통 범주는 비교적 이른 시점부터 유의하게 증가하였으며 큰 효과 크기(partial $\eta^2 \geq 0.26$)를 보였다. 사후분석 결과 대부분의 증상은 시청 전과 비교하여 10분 또는 20분 이후부터 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. **결론:** VR 시청 시간이 증가함에 따라 시각적 및 신체적 불편 증상이 누적되는 경향이 나타났으며, 특히 눈의 피로와 두통 범주가 초기 피로 반응을 가장 민감하게 반영하는 지표로 확인되었다. 이러한 결과는 VR 사용 시 연속적인 시청 시간을 제한하고 일정한 휴식 시간을 제공할 필요성을 시사하며, 향후 건강 친화적인 VR 사용 가이드라인 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

주제어: 가상현실, 시뮬레이터 멀미 설문지, 사이버 멀미, 헤드마운트 디스플레이, 시각피로