

편광식 3D 디스플레이를 위한 상대적 시차, 시청 거리, 시청 방위에서의 시각피로 최소화 기준 제안

Criterion Suggestion on Relative Disparity, Viewing Distance and Viewing Angle to Minimize
3D Visual Fatigue for Pattern-Retarded Type 3D Display

박종진 · 김신우 · 이형철*

Jong-Jin Park · Shinwoo Kim · Hyung-Chul O. Li†

광운대학교 산업심리학과 인지공학전공
Department of Industrial and Organization Psychology, Kwangwoon University

Abstract

3D visual fatigue is known as one of the most important factors that interfere the commercial success of 3D contents. Vergence-accommodation conflict, which is known to occur when an observer watches an image containing binocular disparity presented on a 3D display, has been suggested as a major cause of 3D visual fatigue. This implies that any image incorporating binocular disparity might cause 3D visual fatigue. In order to reduce 3D visual fatigue, it would be necessary to consider indirect ways of reducing 3D visual fatigue as well as eliminating the direct causes of 3D visual fatigue. We have examined the effect of the variables that are expected to affect subjective 3D visual fatigue and these variables included the relative disparity contained in an image, viewing distance and viewing angle. We have also figured out the proper levels of the variables required to minimize 3D visual fatigue. The results indicate that observers began to report significant 3D visual fatigue when the crossed disparity contained in an image exceeded 7.22' and the vertical viewing angle was larger than 15 degree.

Key words: 3D Visual Fatigue, Pattern-Retarded Type, Relative Depth Proportion, Vertical Viewing Angle

요약

입체 시각 피로는 3D 영상의 확산을 방해하는 가장 주된 요인으로 알려져 있다. 입체 시각 피로는 수렴과 조절의 불일치에 의하여 유발되는 것으로, 이 현상은 양안 시차를 포함하는 영상을 3D 디스플레이로 제시하는 경우 자극에 의하여 유발된 수렴 거리가 물리적인 조절 거리와 불일치하여 발생한다. 이는 실감을 증진시키기 위하여 입체 자극을 사용하는 경우 언제나 입체 시각 피로를 유발할 가능성이 있음을 의미한다. 따라서 입체 시각 피로를 감소시키기 위하여 직접적인 원인을 제거하려는 노력뿐만 아니라 이를 간접적으로 감소시키기 위한 노력 역시 필요하다. 이런 관점에서 본 연구는 입체 시각 피로에 영향을 미칠 가능성이 높은 상대적 시차, 시청 거리, 시청 방위 요인이 주관적 입체 시각 피로에 미치는 영향을 측정하고 입체 시각 피로를 최소화하기 위한 각 요인의 수준을 알아보려고 하였다.

* 이 논문은 2015년도 광운대학교 교내학술연구비 지원(이형철)에 의해 연구되었음.

† 교신저자 : 이형철 (광운대학교 산업심리학과 인지공학전공)

E-mail : hyung@kw.ac.kr

TEL : 02-940-5425

FAX : 02-940-5420

그 결과 참가자들이 입체 시각 피로를 보고하는 경우는 상대적 시차의 교차 시차 크기가 7분 22초를 넘어설 때, 그리고 수직 시야각이 15도 보다 클 때라는 것을 확인하였다.

주제어: 입체 시각 피로, 편광식, 상대적 시차, 수직 시야각

1. 서론

2009년 아바타의 성공 이후로 영화관에서 3D 영화를 관람하는 것은 일상적인 일이 되었다. 3D 영화의 성공적인 보급 이후로 TV, 게임 등 다양한 분야에 3D 기술을 접목시키고자 하는 노력이 이어져 왔으나 여전히 영화가 아닌 3D 콘텐츠는 시장에서 찾아보기 힘든 실정이다. 3D 콘텐츠 보급 확산이 지연되는 이유로 지적되는 것은 여러 가지가 있으나 입체 시각 피로, 콘텐츠 제작의 어려움, 시청시 안경과 전용 디스플레이가 필요하다는 점 등이 주로 언급되고 있으며, 이런 여러 원인 중 가장 결정적인 요인으로 지적되는 것은 입체 시각 피로이다(Li et al., 2008).

입체 시각 피로는 양안 시차가 포함된 영상을 3D 디스플레이로 시청하는 사람들이 보고하는 고유한 시각적 피로 및 불편감 증상으로 안구통증, 안구 건조, 초점 어려움, 두통 등 다양한 증상을 포괄하는 개념이다(Howarth, 2011). 이러한 시각피로 증상의 주된 원인 중 하나로 꼽히는 것은 수렴-조절 불일치로, 시각 체계가 자연스러운 영상을 관찰할 때 도움을 주는 수렴-조절 결합이라는 시각 기체가 3D 디스플레이에 제시되는 영상을 시청하는 경우에 깨어지기 때문에 발생한다(Hoffman et al., 2008). 수렴과 조절은 외부 세계의 대상으로부터 정확한 정보를 얻기 위한 절차로, 수렴 눈 운동은 주시하고자 하는 대상이 양눈의 중심부이자 가장 높은 해상력을 가지는 중심와(fovea)에 놓이도록 두 눈을 서로 반대 방향으로 움직이는 안구 운동을 가리키며 조절 작용은 주시하고자 하는 대상의 상이 망막에 흐림 없이 깨끗하게 맺히도록 수정체의 두께를 조절하는 것을 가리킨다. 이 두 현상의 상호작용인 수렴-조절 결합은 수렴이 조절을 유발하고 조절이 수렴을 유발하는 현상으로, 주시 대상이 양안 시차에 대응하는 초점 거리를 가지고 있는 일상적인 관찰 조건에서는 주시 대상을 빠르고 정확하게 바꿀 수 있도록 돕는 역할을 수행한다. 그러나

3D 디스플레이 상의 영상은 자극의 시차와 무관하게 관찰자로부터 관찰 대상까지의 거리, 즉 시청자에서 디스플레이까지의 거리가 일정하다. 따라서 양안 시차가 변화해도 그에 대응하는 초점 정보의 변화는 나타나지 않게 된다. 이는 수렴-조절 결합을 깨트리며 그 과정에서 입체 시각피로를 유발한다(Hoffman et al., 2008). 이 현상은 앞서 언급한 바와 같이 입체 영상에서 입체감을 유발하는 단서 자극인 양안 시차가 원인이 되기 때문에 2D 영상이나 자연적인 장면을 관찰할 때는 경험할 수 없는 3D 영상만의 고유한 피로 유발 요인이다. 영상의 실감을 증진시키기 위하여 양안시차를 포함하는 영상을 제작하지만, 역설적이게도 입체감을 증가시키기 위하여 양안 시차를 증가시키면 입체 시각 피로 역시 증가하는 경향이 있다(Hoffman et al., 2008).

이는 3D 입체 시각 피로를 제거하기 위한 주된 노력이 콘텐츠 제작 및 사후 처리 단계에서 이루어져야 한다는 것을 의미하지만, 콘텐츠 제작 또는 후처리가 아닌 과정에서 조작할 수 있는 입체시각피로 관련 변인도 있다. 이런 맥락에서 3D 콘텐츠의 내용과 무관하게 입체시각피로에 영향을 미칠 가능성이 있는 요인들에 대한 연구가 필요하다. 입체시각피로의 주된 원인을 제거하는 것이 어렵거나 불가능하다면 차선책으로 입체시각피로에 영향을 미칠 수 있는 다른 요인을 조작하는 것으로 입체시각피로를 최소화할 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 3D 콘텐츠의 내용을 조작하지 않은 상태에서도 조작할 수 있으면서, 동시에 입체 시각 피로 및 불편감에 영향을 미칠 만한 요인들을 선정하였다. 이런 맥락에서 선택한 관심 요인은 상대적 시차(Barkowsky & Le Callet, 2011), 시청 거리, 시청 방위이다(Kooi & Toet, 2004).

첫째, 상대적 시차는 영상에 제시된 교차시차와 비교차 시차의 비율을 의미한다. 절대적인 시차의 크기, 즉 최대 교차 시차에서 최대 비교차 시차에 이르는 범위는 영상 처리를 통하여 콘텐츠를 수정하는 과정

을 거치지 않으면 조작할 수 없다. 그러나 상대적 시차는 손쉽게 조작할 수 있다. 영상의 최대 교차시차 및 최대 비교차 시차의 크기만 알고 있다면 좌안 영상과 우안 영상의 수평 위치를 서로 반대방향으로 움직여 전체적인 시차의 비율을 조작하는 것이 가능하기 때문이다. 이런 방법을 사용하면 교차 시차를 전부 비교차 시차로 만들거나 그 역 또한 가능하다.

둘째, 시청 거리는 디스플레이에서 관찰자까지의 거리를 의미한다. 화면상에 제시된 콘텐츠의 망막 상 크기는 관찰 거리에 따라서 달라진다. 망막 상 시차 역시 관찰 거리에 따라 달라지므로 가까운 관찰 거리에서 망막 상의 양안 시차가 더 커지며, 먼 거리에서는 망막 상의 양안 시차가 작아지게 된다. 이런 차이가 입체시각피로 영향을 줄 가능성이 있어 간접적 피로 요인으로 포함시켰다.

셋째, 시청 방위는 디스플레이에 대한 관찰자의 상대적 위치가 만들어내는 각도이다. 이 요인의 경우 휴대용 기기와 같은 개인용 3D 디스플레이가 아닌 모든 3D 디스플레이에서 언제나 나타날 수 있을 것이라고 판단하여 포함시켰다. 시청 방위는 특히 양안 영상 분할을 위하여 공간 분할 방식을 사용하는 편광 방식이나 패럴랙스 배리어 방식의 디스플레이의 입체시각피로 변화에 큰 영향을 미칠 가능성이 있다 (Dodgson, 1997).

본 연구의 목적은 앞서 언급한 요인들, 즉 상대적 시차, 시청 거리, 시청 방위가 입체시각피로 및 불편감이 미치는 영향을 측정하여 입체시각피로를 최소화하기 위한 간접적 피로 요인의 수준을 확인하는 것이다. 이를 위하여 주관적 입체시각피로 측정 도구를 사용하여 관찰자들이 인지하는 입체시각피로 수준을 측정하고, 입체시각피로 문항에 동의하는 정도를 바탕으로 입체시각피로를 최소화할 수 있는 간접적 피로 요인의 범위를 제안하는 것을 목표로 한다.

2. 연구 방법

2.1. 참가자

실험의 목적을 알지 못하는 참가자 85명이 실험에

참가하였다. 모든 요인 전체를 하나의 실험에서 측정하는 것이 이상적이지만, 결과의 해석과 참가자 모집 및 실험 진행의 문제로 관심 요인 별로 별개의 실험을 수행하였다. 따라서 85명의 참가자들이 모두 같은 조건에 참가하지 않고 각각 상대적 시차 조건에 24명, 관찰 거리 조건에 20명, 시청 방위 조건에 41명(수평 시야각 20명, 수직 시야각 21명) 씩 무선적으로 할당되었다. 모든 참가자의 나안 시력 또는 교정 시력은 정상이었으며(기준 0.7 이상) 색맹이거나 양안 시차에 의한 입체감을 인지할 수 없는 피험자는 없었다. 참가자들은 실험을 수행하기 전에 실험이 시각적 피로를 유발할 수 있으며 언제든지 실험을 종료할 수 있다는 사실을 정확하게 전달받았으며, 중도에 포기한 참가자는 없었다.

Table 1. Subjective measuring tool for 3D stereoscopic fatigue and discomfort

요인	문항
Color degradation	The screen looks like dark and faded.
	The color looks like dusky.
	Screen of the display was dim.
	Color presentation of display was insufficient.
Depth insufficiency	Perceived as 2D rather than 3D when the image protrudes from the display.
	Perceived as 2D rather than 3D when the image gets into the display.
	Could not discriminate the depth of foreground from depth of background
Physical symptoms	Had a headache.
	Felt dizzy.
	nauseated. disgusted.
Eye pain	Felt dazzling. stung eyes.
	Felt eye exhausted.
	Experienced dry eyes.
Image flickering and double image	Felt strong afterimage when image moves fast.
	image looks like flickering. Experienced double images
	Felt strong image flickering when image moves fast
Focus difficulty	Felt as though eyes were focusing too close
	Experienced difficulty in focusing eyes on a desired point

2.2. 실험 장치

3D 디스플레이는 편광 방식을 사용하여 입체 영상을 제시하도록 제작된 LG 전자의 47 인치 디스플레이인 47LW5700을 사용하였다. 실험은 형광등 조명 아래에서 수행되었으며 조명 조도는 평균 320 lux였다. 실험 자극을 제시하기 위하여 Mathwork 사의 Matlab과 시지각 실험용 함수 모음인 Psychtoolbox 3를 사용하여 제작한 실험 프로그램을 사용하였다 (Pelli, 1997).

입체 시각 피로 및 불편감은 Table 1에 제시한 주관적 입체 시각 피로 측정도구를 사용하여 측정되었다. 이 도구는 6개 요인(색감 열화, 입체감 부족, 신체적 불편감, 안구 통증, 상 떨림 및 이중상, 초점 어려움)을 총 21개의 문항으로 측정하도록 구성되어 있다. 이 측정도구는 Li, Seo, Kham & Lee(2008)와 동일한 방법으로 구성하였다. 이 연구에 사용된 시각 피로 측정 도구는 크게 두 단계를 거쳐 구성되었다. 첫째, 일반 참가자 20명을 대상으로 실험 자극을 제시하고 개방형 설문을 수집한 다음 별개의 평정자 세 명이 진술문을 설문 문항으로 정리하였다. 세 명의 평정자가 모두 동의한 내용만 설문 문항으로 사용하였다. 둘째, 설문 문항을 일반 참가자 200명을 대상으로 평가하였다. 평가는 자극을 제시하고 각 문항에 대한 동의 정도를 측정하는 방법을 사용하여 수행하였다. 그 결과 연구에 사용된 문항은 평가 결과를 요인 분석한 결과를 바탕으로 결정하였다. 요인 이름은 문항 내용을 바탕으로 임의로 결정하였다. 그 중 신체적 불편감, 안구 통증, 상 떨림 및 이중상, 초점 어려움과 같은 요인은 앞선 연구에서 개발된 입체 시각 피로 측정 도구와 동일하거나 유사한 증상에 대한 문항임을 확인하였으며, 따라서 이 도구를 입체 시각 피로 측정 도구로 사용하는 데 문제가 없을 것이라고 판단하였다(Li et al., 2008; Ukai & Howarth, 2008; Li & Moon, 2012).

시각 피로 측정 도구는 참가자에게 문항에 해당하는 증상에 동의하는지 여부를 7점으로 응답하도록 구성하였다. 1에서 3점은 문항에 동의하지 않는 경우로 각각 1점은 매우 동의하지 않음, 2점은 동의하지 않음, 3점은 약간 동의하지 않음으로 표시되었다. 4

점은 보통이라는 응답으로 Likert 척도를 구성할 때 중립적인 의미로 사용하는 값으로, 참가자들에게는 측정 전에 이 값의 의미에 대하여 직접 안내하였다. 5에서 7점은 문항에 동의하는 경우로 각각 5점은 약간 동의함, 6점은 동의함, 7점은 매우 동의함으로 표시되었다. 모든 문항은 시각 피로 증상에 대한 기술로 구성되어 있었기 때문에, 어떤 참가자가 3점 이하의 반응을 보였다면 그 참가자는 해당하는 자극이 불편하지 않았다고 간주할 수 있다.

2.3. 자극

10개의 정지 영상을 자극으로 사용하였다. 자극은 Sony에서 제작된 디스플레이 시험용 영상 8개 (정물 1개, 인물 7개), 3D 애니메이션인 “볼트”의 영상 1개, 다큐멘터리 영화의 풍경 영상 1개였다. 자극 영상 중 시각적 특성이 서로 다른 네 가지(정물, 다큐멘터리, 인물, 애니메이션)의 사례를 Fig. 1에 제시하였다. 자극은 화면을 꽉 채우는 정지 영상으로, 매 시행 시작마다 3초 간 왼 쪽에서 오른 쪽 방향으로 밀려들어오고 나서 7초 간 정지 상태를 유지하도록 구성하였다 (Fig. 2).

본 연구에서 조작한 독립 변인은 영상을 조작하여 변경할 수 있는 상대적 시차 요인과 시청 환경을 조작하여 변경할 수 있는 시청거리 및 시청방위 요인으로 나눌 수 있다. 상대적 시차는 좌안 영상과 우안 영상의 수평 위치를 조작하는 방법으로, 이 방법을 사용하면 전체 시차 크기는 유지하면서 교차 시차 비율과 비교차 시차 비율을 조작하는 것이 가능하다. 좌안 영상이 좌측으로, 우안 영상이 우측으로 움직이면 상대 시차를 증가시킬 수 있으며 각 영상을 반대 방향으로 움직이면 상대적 시차를 감소시킬 수 있다. 연구에 사용된 자극 10개의 시차 크기가 다르기 때문에 시차 수준은 Fig. 3에 제시한 것처럼 교차 시차 대비 비교차 시차의 비율로 정의하였다. 실험에 사용된 시차 조건은 Table 2에 제시하였다. 시청환경 요인인 시청거리나 시청방위 요인을 조작하는 것은 참가자의 위치를 고정하고 디스플레이의 위치를 조작하는 것으로 손쉽게 구현할 수 있다.

시청 거리는 제시된 자극의 망막 상 크기를 결정환

Table 2. Relative disparity conditions.

Ratio of disparities (Crossed : Uncrossed)	Average size of disparities (Visual angle)
0 : 1	0 : 28'46"
0.25 : 0.75	7'12" : 21'33"
0.5 : 0.5	14'25" : 14'25"
0.75 : 0.25	21'33" : 7'12"
1 : 0	28'46 : 0"

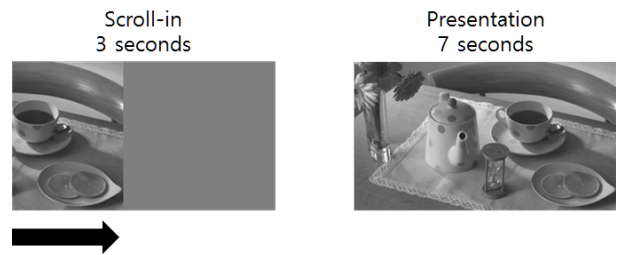


Fig. 2. Schematic procedure of stimulus presentation.



Fig. 1. Image examples which used as stimuli.

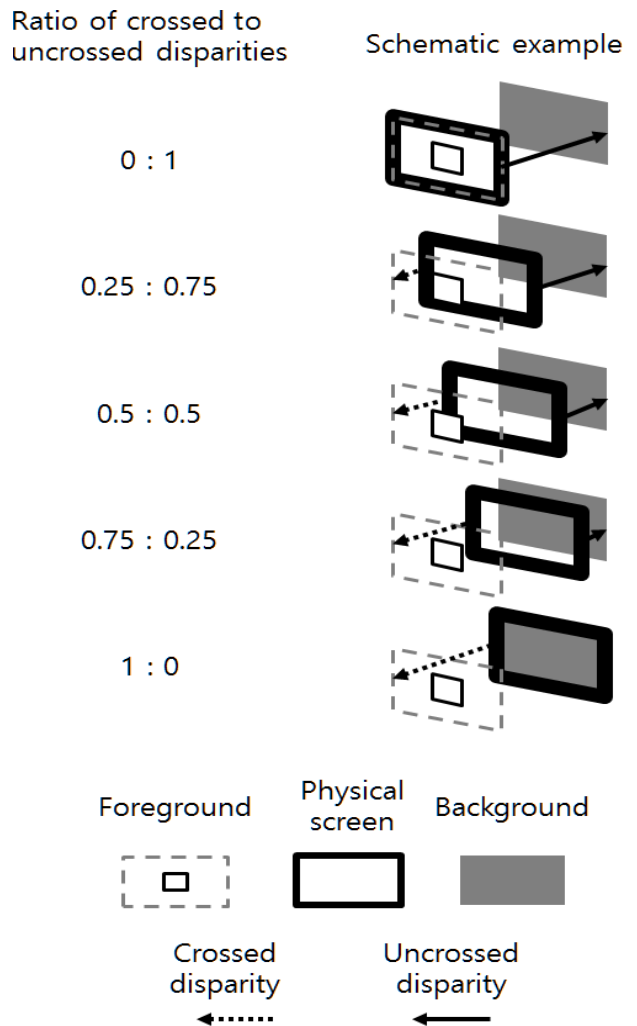


Fig. 3. Schematic illustration of relative disparity conditions.

다. 망막 상의 화면시차 역시 관찰 거리가 가까우면 더 커지기 때문에 시청거리 요인 또한 입체 시각 피로에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 디스플레이의 높이(H)를 기준으로 2.5 H, 3.5 H, 4.5 H, 5.5 H, 6.5 H의 다섯 조건을 관찰 거리 수준으로 사용하였다. 각 조건은 147.5cm, 206.5cm, 265.5cm, 324cm, 383cm였다.

시청 방위는 수평 및 수직 방향의 시야각으로 정의하였다. 수평 시야각 수준은 0, 10, 20, 30, 45도로 총 5개 수준이었으며, 수직 시야각 수준은 15, -7.5, 0, 7.5, 15도로 총 5개 조건이었다. 수직 및 수평 방위각 조건은 서로 독립적으로 조작하였으며 조작한 수준의 값 역시 달랐는데, 이는 본 연구에서 사용한 디스플레이의 입체영상 제시 방법 때문이다. 본 연구에서 사용한 편광식 3D 디스플레이는 공간 분할 방식, 그 중에서도 수직 인터레이스(Vertical interlace) 방식으로 입체 영상을 제시한다. 이 방식으로 제작된 디스플레이는 좌안 영상과 우안 영상을 물리적으로 한 줄씩 섞어 디스플레이에 제시한다. 각 줄의 영상은 편광 필름을 통하여 양안에 각각 부리되어 제시된다. 이런 양안 영상 분리 방식을 사용한 디스플레이는 입체 자극을 정확하게 관찰할 수 있는 수평 범위는 넓지만 수직 범위는 좁다. 즉 수직 시야각의 변화에 따라 패럴랙스 배리어(Parallax barrier) 방식의 디스플레이처럼 입체감이 사라지거나 역전되어 보이는 현상이 나타날 수 있다(Dodgson, 1997). 이러한 디스플레이의 기술적 특성을 반영하여 수평 시야각 수준이 수직 시야각 수준보다 더 큰 간격을 가지고 더 넓은 범위를 가지도록 구성하였다. 또한 수평 시야각의 경우 디스플레이를 한 방향으로 회전시켰으나 수직 시야각의 경우에는 양 방향 모두 회전시켰다.

2.4. 절차

참가자들은 연구에 대하여 설명을 듣고 나서 디스플레이 앞 3 m (시청 거리 조건 제외)에 준비된 좌석에 앉아 제시되는 자극을 관찰할 것을 요청받았다. 매 시행마다 자극은 3초 간 화면 좌측에서 우측으로 밀려 들어왔으며, 자극 전체가 화면에 제시되면 7초 간 자극을 정지 상태로 두어 총 10초 간 제시되었다. 참가자들은 자극이 화면에서 사라지고 나서 방금 제시되었던 자극에 대한 주관적 입체 피로 설문을 수행하도록 요청받았다. 주관적 입체 피로 및 불편감은 Likert 7점 척도 상에 평정되었다. 자극은 각 독립변인 당 5개 수준을 가지고 있었으며, 프로그램으로 조작 가능한 화면시차 요인의 경우 독립변인 조건에 따라 자극을 무선적인 순서로 제시하였다. 나머지 세

변인 (시청 거리, 수평 시야각, 수직 시야각) 실험은 물리적인 관찰 거리를 조작하거나 또는 장치의 위치를 조작해야 하는 문제 때문에 독립변인 수준 하나에서 무선적으로 10개 자극을 모두 제시한 다음, 다른 독립변인 수준으로 변경하여 자극을 제시하는 것을 반복하였다.

2.5. 결과

각 요인에 대한 실험 결과는 요인 별로 따로 분석하였으며, 각 변인 조작에 따른 결과의 차이를 통계적으로 분석하기 위하여 반복 측정 변량 분석 기법을 사용하여 독립 변인 조작에 따른 주관적 피로 및 불편감 평정치의 차이가 나타나는지 검증하였다.

화면시차 요인 실험의 결과는 Fig. 4에 제시되어 있다. 측정 결과 모든 요인에서 일관적으로 교차 화면시차 비율이 증가하면 입체 시각 피로 및 불편감이 증가하였으며 그 차이는 변량분석을 사용한 통계 분석에서 유의미하게 나타났다(색감 열화 요인: $F(4, 76) = 3.28, p < .05$, 신체적 증상 요인: $F(4, 76) = 20.81, p < .001$, 안구통증 요인: $F(4, 76) = 16.72, p < .001$, 입체감 저하 요인: $F(4, 76) = 9.48, p < .001$, 상떨림/이중상 요인: $F(4, 80) = 39.02, p < .001$, 초점 요인: $F(4, 76) = 39.53, p < .001$). 특히 신체적 증상, 상떨림/이중상, 초점, 입체감 저하 요인의 경우 교차시차의 비율이 낮을 때 3점 이하 수준인 반면에 교차

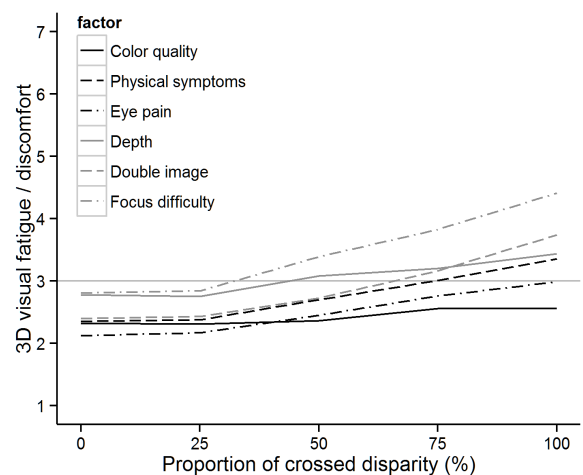


Fig. 4. Measured 3D visual fatigue / discomfort as a function of crossed disparity proportion in stimulus disparity.

시차 비율이 증가함에 따라 입체 시각 피로 및 불편감이 3점 이상으로 증가하여 상대적 시차 변화의 영향을 크게 받는다는 것을 확인하였다. 한편 화질 열화나 안구 통증 요인은 상대적 시차 크기 변화에 거의 영향을 받지 않았다. 한편 상대적 시차 중 교차 시차 비율이 25% 이하인 경우 (7'22") 참가자의 입체 시각피로 및 불편감 평정이 3점 이하로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 동일한 시차 범위를 가지는 자극이라도 이는 상대적으로 적은 비율의 교차시차를 가지는 경우 시청자가 시각 피로를 덜 느낄 수 있다는 것을 시사한다.

시정 거리 요인 실험 결과는 Fig. 5에 제시되어 있다. 변량분석을 사용하여 시정 거리 요인에 따른 입체 시각피로 및 불편감의 차이를 검증한 결과, 신체적 증상 및 상떨림/이중상 요인은 통계적으로 유의미한 차이를 보였으나(신체적 증상 요인: $F(4, 76) = 3.07, p < .05$, 상떨림/이중상 요인: $F(4, 76) = 2.76, p < .05$), 나머지 요인은 차이가 없었다(색감 열화 요인: $F(4, 76) = 2.02, p = .13$, 안구통증 요인: $F(4, 76) = 1.47, p = .23$, 입체감 저하 요인: $F(4, 76) = 0.84, p = .48$, 초점 요인: $F(4, 76) = 0.95, p = .44$). 이는 시정 거리의 변화가 입체 시각피로 및 불편감에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 시사하는 결과이다. 그러나 시정 거리가 가까운 경우 입체 시각피로 및 불편감이 증가하는 경향을 보이는데, 이는 더 가까운 거리 조건이 추가되면 입체 시각피로 및 불편감이 더 커질 가능성이 있음을 시사

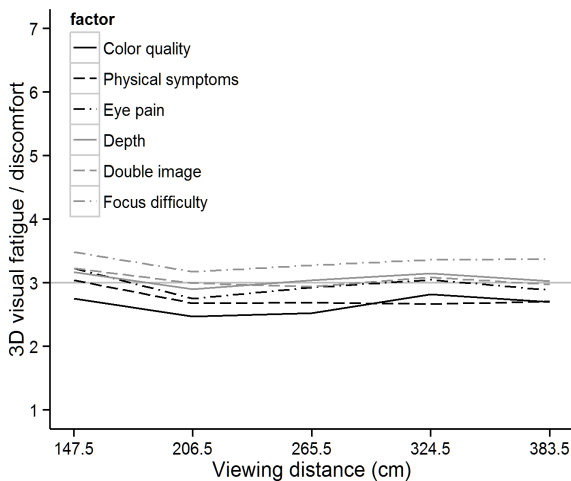


Fig. 5. Measured 3D visual fatigue / discomfort as a function of viewing distance.

한다.

수평 및 수직 시야각 요인의 결과는 각각 Fig. 6과 7에 제시되어 있다. 수평 시야각 조건의 경우 Fig. 6에서 제시된 바와 같이 어떤 요인에서도 수평 시야각에 따른 입체 시각피로 및 불편감의 변화 경향성을 보이지 않았으며, 변량 분석을 사용한 통계 분석 결과 역시 수평 시야각의 변화에 따른 입체 시각피로 및 불편감의 차이를 보이는 요인은 없었다(색감 열화 요인: $F(4, 76) = .79, p = .45$, 신체적 증상 요인: $F(4, 76) = .05, p = .96$, 안구통증 요인: $F(4, 76) = .73, p = .5$, 입체감 저하 요인: $F(4, 76) = 1.97, p = .14$, 상떨림/이중상 요인: $F(4, 76) = .4, p = .73$, 초점 요인: $F(4, 76) = .69, p = .55$). 이 결과는 0도에서 45도 사이의 수평 시야각 변화는 입체 시각피로 및 불편감에 영향을 미치지 않는다는 것을 시사한다.

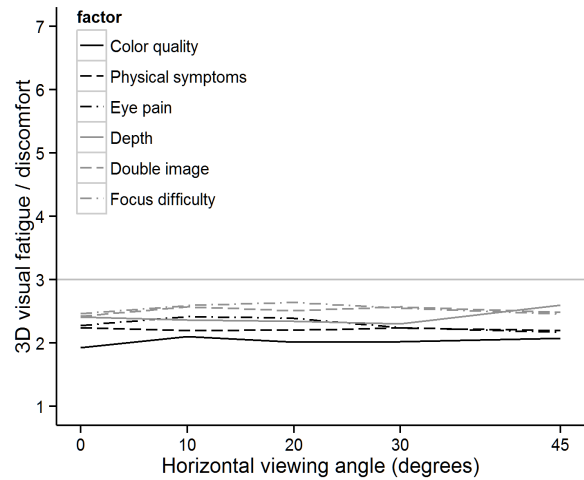


Fig. 6. Measured 3D visual fatigue / discomfort as a function of horizontal viewing angle.

반면에 수직 시야각 조건의 경우 Fig. 7에 제시된 것처럼 15도에서 높은 입체 시각 피로 및 불편감의 차이를 보였으며 그 차이를 변량 분석으로 검증한 결과 통계적으로 유의미하게 나타났다(색감 열화 요인: $F(4, 80) = 5.03, p < .05$, 신체적 증상 요인: $F(4, 80) = 6.32, p < .001$, 안구통증 요인: $F(4, 80) = 4.37, p < .05$, 입체감 저하 요인: $F(4, 80) = 12.82, p < .001$, 상떨림/이중상 요인: $F(4, 80) = 48.88, p < .001$, 초점 요인: $F(4, 80) = 22.28, p < .001$). 이는 디스플레이가 앞으로 기울어진 형태일 때, 즉 디스플레이보다 높은 시점에서

디스플레이를 바라볼 때 입체 시각 피로 및 불편감이 증가함을 시사한다.

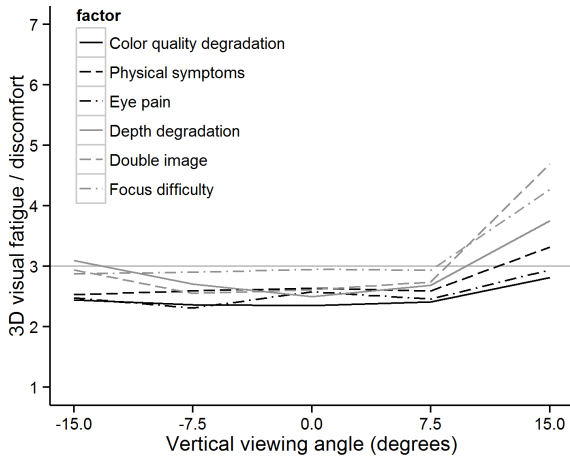


Fig. 7. Measured 3D visual fatigue / discomfort as a function of vertical viewing angle.

3. 논의

본 연구는 편광식으로 양안 영상을 분리하는 3D 디스플레이에서 나타날 수 있는 입체 시각 피로 및 불편감이 간접적 피로 요인 수준에 따라 어떻게 변화하는지 측정하고, 입체 시각 피로 및 불편감 측면에서 3D 디스플레이를 시청할 때 적절한 간접적 피로 요인 수준을 제안하는 것을 목표로 수행되었다. 측정 결과 상대적 시차 요인과 수직 시야각 요인은 관찰자들의 입체시각피로 및 불편감 변화에 영향을 미쳤으나 시청 거리 요인 및 수평 시야각 요인이 입체시각 피로 및 불편감에 미치는 영향은 확인할 수 없었다.

상대적 시차를 조작하였을 때 입체 시각 피로 및 불편감 수준이 변화하는 것은 예측할 수 있었다. 왜냐하면 일정 수준 이상의 양안 시차가 포함된 자극을 3D 디스플레이로 관찰하면 입체 시각 피로 및 불편감을 보고한다는 것을 이미 잘 알려진 사실이기 때문이다(Barkowsky & Le Callet, 2011). 양안 시차는 수렴 눈 운동을 유발시키며 이 때 조절과 수렴의 변화가 자연적인 장면을 관찰할 때와 다르게 나타나기 때문에 수렴과 조절 반응의 결합이 깨지는 수렴-조절 불일치가 발생한다(Hoffman et al., 2008). 따라서 상대적 시차를 변화시켜 교차시차 비율이 증가하는 경

우 입체 시각 피로 및 불편감이 증가하며, 교차시차 비율을 감소하는 경우 입체 시각 피로 및 불편감이 감소할 것이라고 예측할 수 있다. 측정 결과는 예측한 결과와 동일하게 나타났다. 교차 화면시차가 평균 7'22" 수준이 되도록 조작하면 참가자들이 입체시각 피로 및 불편감 문항에 동의하지 않는다는 것을 확인하였으며, 이 결과는 이미 제작된 영상의 시차 수준을 조작하여 입체 시각 피로를 감소시킬 수 있음을 시사한다. 영상의 최대 시차 수준을 알고 있다면 본 연구에서 사용한 방법과 동일하게 영상의 좌/우 위치를 조작하는 것으로 쉽게 최대 시차 수준을 조작하는 것이 가능하다. 이 방법을 사용하면 영상의 전체적인 시차 또는 부분적 시차를 조작하여 영상의 입체 시각 피로 및 불편감을 일정한 수준으로 유지하도록 조작하는 것 뿐만 아니라 시청자의 피로 수준에 따라 실시간으로 입체 시각 피로 및 불편감 수준을 조작할 수 있다. 기존의 영상에 최대 교차 시차 및 비교차 시차에 대한 정보만 추가하거나 또는 영상을 분석하여 얻어낼 수 있다면 단순한 조작으로 입체 시각 피로를 쉽게 조작할 수 있을 것이다.

수직 시야각이 변화하였을 때 나타나는 입체 시각 피로 및 불편감의 변화 역시 예측과 동일하게 나타났다. 이 요인은 특히 기존 연구에서 크로스톡이 입체 시각 피로 및 불편감에 미치는 영향과 유사한 효과를 낼 것이라고 예측할 수 있다. 즉 이 요인의 수준이 증가하면 양안 영상의 분리가 제대로 이루어지지 않으며, 결과적으로 입체감이 느껴지지 않게 된다. 그 결과 참가자들은 수직 시야각이 높을 때 입체감, 상떨림 및 상 흐림, 초점 어려움 요인과 같이 상 결합과 관련된 증상을 묻는 문항에 동의하는 정도가 증가하는 반면에 안구 통증이나 어지러움과 같은 전형적인 입체 시각 피로 증상을 묻는 문항에 동의하는 정도가 감소할 것이라고 예측할 수 있다. 수직 시야각 요인의 측정 결과는 예측한 바와 동일하게 나타났으나, 그 경향이 비대칭적으로 나타났다. 측정 결과 참가자들은 아래쪽 15도에서 시청하는 것 보다 위쪽 15도에서 시청하는 것이 더 불편하다고 반응하였다. 이런 차이는 아마도 디스플레이 설계 단계에서 의도된 것일 가능성이 높다. 본 연구에서 사용한 장비의 양안 자극 분리 방식은 수직 인터레이스 방식인데, 그

특성 상 좁은 수직 시야각을 최대한 시청 환경에 맞게 구성하여야 한다. 본 연구에서 사용한 디스플레이는 47인치 크기의 TV로 일반적인 시청환경에서는 TV를 바닥에 앉아서 보거나 의자에 앉아서 보게 되며, 이 경우 디스플레이를 정면에서 시청하거나 또는 TV보다 낮은 위치에서 시청하게 될 것이라고 예측할 수 있다. 좁은 수직 시야각을 측정 시청 방위에 최적화시키는 방법은 예측한 시청 환경에서 디스플레이를 시청하는 경우에는 큰 도움이 될 수 있으나, 시청 환경이 변화하게 되면 입체 시각 피로 및 불편감을 증가시킬 수 있는 요인이 된다. 이는 편광식 3D 디스플레이를 설계할 때 사용 환경을 적절하게 예측하고 그에 따라 화소 배열에 대한 편광 필름의 상대적 위치를 조절하여 최적 시청환경에 어울리는 수직 시야각 범위를 구성해야 할 필요성이 있음을 시사한다.

한편 시청 거리와 수평 시야각 요인의 수준에 따른 입체시각 피로 및 불편감의 차이는 나타나지 않았다. 시청 거리 요인의 경우 연구에서 사용한 최소 시청거리보다 더 가까운 거리에서 시청하는 경우 입체 시각 피로 및 불편감이 나타날 가능성이 있다. 따라서 더 가까운 거리에서 주로 사용하는 다른 디스플레이, 특히 모니터나 소형 TV 등과 같은 다른 화면 크기와 사용 환경을 가지는 디스플레이에서 더 가까운 거리 조건을 측정해 볼 필요가 있을 것이다. 수평 시야각 요인의 경우 45도 수준까지 차이가 나타나지 않았으며, 이는 입체 시각 피로 및 불편감이라는 관점에서 측면 시청은 큰 효과를 가지지 않는다고 해석할 수 있다.

본 연구는 실제로 입체 영상을 관찰하는 상황을 가정하고 간접적 피로 요인이 입체 시각 피로와 불편감에 미치는 영향을 측정하였다. 그 결과 상대적 시차 및 수직 시야각 요인에서 입체 시각 피로 및 불편감에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 그 결과 교차 화면 시차 7'22" 이하, 관찰 거리 147cm 에서 383cm, 수직 시야각 -15도 에서 7.5도, 수평 시야각 0도에서 45도 범위 안에 있을 때 관찰자들이 입체시각피로 및 불편감 문항에 동의하지 않는다는 것을 확인하였다. 이 결과는 입체 영상의 실시간 시차 조절을 통한 피로 감소 및 시청 환경에 따른 디스플레이 설계에 도움을 줄 수 있을 것이다.

그러나 본 연구에서 다루지 못한 부분 역시 존재한다. 본래 시청용으로 제작된 입체영상은 본질적으로 동영상이며, 이는 단순히 영상이 움직인다는 측면 뿐 아니라 입체 공간 내에서 전경과 배경이 움직이고 그 움직임이 상호작용한다는 측면에서 정지 영상과 본질적인 차이점을 가진다. 본 연구에서는 인공적인 자극을 피하기 위하여 정지 영상 화면 자극 전체를 움직이는 방법을 사용하였으나 이는 동영상에서 나타나는 전경과 배경의 상호작용하는 움직임을 포함하지 않는다. 따라서 본 연구의 결과는 동영상을 사용하는 경우 나타날 수 있는 역동성을 전부 포함하지 못하였을 가능성이 있다. 이러한 차이는 동영상 자극을 사용한 추가적인 연구를 통하여 밝혀져야 할 것이다. 본 연구는 주로 입체 시각 피로 및 불편감에 초점을 맞추었으며, 다양한 환경 변화에 따른 입체감과 실감의 변화는 조작하지 않았다. 이는 입체효과의 원천인 양안 시차가 시각 피로 및 불편감을 주로 유발하는 요인이라는 사실(Hoffman et al., 2008)에 비추어 보았을 때 연구의 적용 가능 범위를 제한할 수 있다. 영상에 따라서 상대적 시차를 조작하였을 때 입체감이 감소하거나 사라지는 경우가 있을 수 있기 때문이다. 또한 입체 시각 피로 및 불편감에 미치는 효과를 발견하지 못한 요인(관찰 거리 및 수평 시야각 요인)의 경우 일반적인 시청 환경의 범위 내에서 수준을 조작하였으나, 시청 환경은 디스플레이의 크기에 따라 달라지는 경향을 보인다. 본 연구에서 사용한 디스플레이는 상대적으로 크고 여러 사람이 시청하는 것을 가정하고 만들어 진 것인데, 모니터나 스마트폰 또는 스마트 패드와 같이 더 작은 화면과 더 가까운 시청거리를 가지는 디스플레이는 TV와 완전히 다른 시청 환경을 가지게 된다. 이러한 경우 시청 환경 요인의 범위가 달라져 본 연구의 내용을 일반화하는데 한계를 가지게 된다. 그리고 본 연구에서 사용한 디스플레이의 특성상 제한적 시청 환경을 가지게 되며 다른 종류의 3D 표시장치에서 본 연구의 내용을 확일적으로 일반화할 수 없을 것이다. 이 뿐만 아니라 3D TV라는 환경에 제한한다고 해도, 최근 시청 환경의 개선을 위하여 평면 화면이 아니라 곡면 화면을 사용하는 디스플레이나 VR 환경과 같이 다양한 디스플레이들이 출시되고 있거나 출시 될 예정이

며, 이러한 디스플레이들은 각기 다른 시청환경을 구성하게 된다. 이러한 다양한 시청환경에 대한 일반화를 수행하려면 더 다양한 장비를 대상으로 단순 시청 환경 뿐 아니라 시각적 기능의 특성을 반영한 정교한 추가 연구가 필요할 것이다.

REFERENCES

- Barkowsky, J. Li, M., & Le Callet, P. (2011). The influence of relative disparity and planar motion velocity on visual discomfort of stereoscopic videos. *In Proceeding of the International Workshop on Quality of Multimedia Experience*, 155-160.
- Dodgson, N. A. (1997). Autostereo displays: 3D without glasses. *In Proceeding of Electronic Information Displays, '97*.
- 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(3), 1-30.
- Howarth, P. A. (2011). Potential hazards of viewing 3-D stereoscopic television, cinema and computer games: a review. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 31(2), 111-122.
- Kooi, F. L. & Toet, A. (2004). Visual comfort of binocular and 3D displays. *Displays*, 25(2), 99-108.
- Li, H. C. O. (2010). Human Factor Research on the Measurement of Subjective Three Dimensional Fatigue, *Journal of Broadcast Engineering*, 15(5), 607-616.
- Li, H. C. O. & Moon, K. A. (2012). Validity examination of the measurement of 3D visual fatigue using EEG. *Journal of Korean Society for Emotion and Sensibility*, 15(1), 17-28.
- Li, H. C. O., Seo, J., Kham, K., & Lee, S. (2008). Method of Measuring Subjective 3-D Visual Fatigue: A Five-Factor Model. *In Proceeding of Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, 2008.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10(4), 437-442.
- Pastoor, S. (1993). Human factors of 3D displays in advanced image communications. *Displays*, 14(3), 150-157.
- Ukai, K. & Howarth, P. A. (2008). Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories, and observations. *Displays*, 29(2), 106-116.

원고접수: 2015.07.01

수정접수: 2015.09.30

게재확정: 2016.02.26