정규논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제18권 제3호, 2013년 5월 (JBE Vol. 18, No. 3, May 2013)

<http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2013.18.3.425>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

다양한 시청환경에 따른 무안경식 interactive 3D 시스템의 시각피로도 측정

김 정 열^{a)}, 이 형 철^{a)}, 김 신 우^{a)†}

Measuring Visual Fatigue of Glasses-free Interactive 3D System Under Various Viewing Conditions

Jung-Yul Kim^{a)}, Hyung-Chul O. Li^{a)}, and ShinWoo Kim^{a)†}

요 약

3D 디스플레이를 통해 입체감을 느낄 때에는 현실세계에서 입체감을 느낄 때와는 다르게 피로를 느끼게 된다. 이러한 피로에 대해 안경식 3D 디스플레이를 사용한 연구는 많았지만 무안경식 3D에 대한 연구는 아직까지 미비한 실정이다. i3D시스템이란 interactive 3D 시스템의 약자로 사용자가 간단한 손동작 등으로 콘텐츠와 협응이 가능하도록 제작한 무안경식 3D 디스플레이 시스템을 말한다. 본 연구에서는 현재 시연용으로 구현되어 있는 i3D시스템을 이용하여 이 시스템을 사용하는 다양한 시청 환경에서의 시각 피로를 측정하였다. 그 결과 시청거리가 멀어질수록 낮은 피로를 보였으며 시차가 작을수록 낮은 피로를 보였다. 시청각도의 경우 3D 입체상이 안정적으로 지각되지 않는 시청각도에서 높은 피로를 느끼는 것으로 나타났다. 또한 시청거리와 시청각도간의 상호작용 효과를 볼 수 있었는데, 3D가 안정적으로 지각되었을 때의 시청각도에서는 시청거리에 따라서 피로도가 감소하는 것을 보였으나 안정적인 3D지각이 되지 않았을 때의 시청각도에서는 거리에 따른 피로도의 차이가 없었다. 이러한 결과는 무안경식 3D 디스플레이와 i3D 시스템 개발에 있어 최적의 사용자 경험을 위한 중요한 자료이다.

Abstract

Observers usually experience visual fatigue when they watch contents displayed on 3D display. There has been various research on visual fatigue incurred in stereoscopic displays that use 3D glasses, but relatively less studies have been done in the area of autostereoscopic displays. i3D system refers to interactive 3D system that makes it possible for users to interact with contents using their hands. Current research measured visual fatigue that users experience from i3D under various visual environments. We examined the effects of viewing distance, disparities and visual orientation on visual fatigue in i3D. The results indicated that visual fatigue decreased with longer distance and smaller disparity. Visual fatigue increased with angle when 3D fusion was unstable. In addition, there was an interaction effect between angle and distance in which visual fatigue increased with distance under stable 3D fusion but there was no difference in visual fatigue as a function of distance when 3D fusion was unstable. These results would be importantly used to develop autostereoscopic displays that minimize visual fatigue.

Keyword : Interactive 3D, Visual Fatigue, Glasses-free 3D Display, Immersive Media

1. 서론

최근 우리 주변에서 어렵지 않게 3D 디스플레이들을 만나 볼 수 있다. 3D 디스플레이들은 기존의 2D 디스플레이가 주는 영상정보에 3차원 깊이정보를 제공함으로써 더욱 실감나는 콘텐츠를 사용자들에게 제공 해 준다. 사람은 외부세계의 여러 정보들을 이용하여 3차원 깊이를 지각하게 되는데, 이 중 가장 중요한 정보중의 하나가 바로 양안 시차이다. 두 개의 눈이 물리적으로 떨어져 있음에 따라 양안에 각각 들어오는 좌안 영상과 우안 영상은 서로 차이를 가지게 되는데 인간의 시각 기제는 이러한 양안시차를 자동으로 계산하여 대상의 깊이를 지각한다. 따라서 물리적으로 평면의 영상이라도 관찰자의 양 눈에 다른 영상을 제공 할 수 있다면 3차원 깊이 감을 느낄 수 있게 된다.

최근 확산되고 있는 안경식 3D 디스플레이는 방식에 따른 차이는 있지만 이러한 점을 이용하여 안경을 통해 좌안과 우안에 서로 다른 이미지를 보이게 하여 3차원 깊이 감을 제공한다. 하지만 이렇게 자연 상황이 아닌 인위적으로 제공되는 시차는 수렴-조절 불일치로 인한 피로감을 가져 오게 된다^[1-3]. 수렴(vergence)은 양안의 이미지를 하나의 상으로 융합하기 위해 대상의 거리에 따라 수정체의 각도가 달라지는 현상을 말한다. 조절(accommodation)은 상이 망막에 또렷하게 맺힐 수 있도록 수정체의 두께를 변화시켜 빛의 굴절을 조정하는 현상이다. 이 때 시각기제는 이 두 과정에서 근육으로부터 오는 정보를 거리 지각에 사용한다. 인간이 자연 상황에서 시각을 통해 얻은 거리정보를 계산할 때에는 안구의 수렴과 조절로 얻어지는 거리정보가 같기 때문에 문제가 되지 않지만, 3D디스플레이 상에서 인위적으로 시차가 만들어 졌을 때에는 수렴은 두 영상의 융합을 위해 지각되는 대상의 거리에 맞춰지고 조절은 뚜렷

한 영상을 얻기 위해 디스플레이의 실제위치로 맞춰지기 때문에 수렴정보와 조절정보가 주는 거리정보에 불일치가 발생한다. 이러한 수렴-조절 간의 불일치는 3D 디스플레이의 가장 중요한 시각피로 유발 원인으로 알려져 있다. 이렇게 발생하는 시각피로의 개선은 3D 디스플레이 발전의 큰 과제이다^[4].

3D 디스플레이와 더불어 영상 콘텐츠 감상에 있어 실감을 증대 시키려는 노력도 계속 되고 있다. Interactive 3D 시스템(i3D시스템)도 이러한 노력의 하나로 3D입체영상과 더불어 동작을 통한 콘텐츠와의 협응과 촉감정보를 제공하여 사용자가 콘텐츠 사용에 있어 마치 실제 있는 물건을 만지는 것 같은 실감의 극대화를 목표로 한다. 이러한 i3D 시스템이 개발이 완료 된다면 공공장소에 설치되어 광고, 홍보, 의료, 교육 등의 목적으로 주로 사용 될 것으로 예상된다.

안경식 3D 디스플레이는 반드시 3D용 안경을 착용해야 3D 시청이 가능하다. 하지만 야외나 공공장소에서 i3D 시스템을 광고, 홍보 등 목적으로 사용할 때, 지나가는 모든 사람들이 3D 안경을 착용하는 것은 불가능 하다. 따라서 안경식 3D 디스플레이는 i3D 시스템에 적절치 못하다. 때문에 i3D 시스템 기본적으로 무안경식 3D 디스플레이를 사용한다.

무안경식 3D 디스플레이는 그 구현 방법에 있어서 안경식 3D 디스플레이와 차이는 있지만 구조적인 원리는 같다. 안경식 3D 디스플레이와 마찬가지로 좌안과 우안에 각기 다른 영상을 제공하여 입체감을 느끼게 되고, 따라서 기존의 안경식 3D 디스플레이가 가지고 있는 수렴-조절 불일치로 인한 피로감 문제 역시 발생하지만 지금까지 무안경식 3D 디스플레이를 대상으로 한 피로도 연구는 거의 이루어 지지 않았다. 기존 3D 입체 시각피로 연구들은 보다 먼저 활발하게 상용화된 안경식 3D 디스플레이를 대상으로 연구를 진행하여 왔는데 무안경식 3D 디스플레이든 안경식 3D 디스플레이든 기본적인 구현원리가 같기 때문에 이로 인해 발생하는 시각피로 양상 역시 비슷하게 나타날 것이라 가설로서 예측 할 수 있지만 이에 대한 경험적인 검증이 필요하다. 앞서 언급한대로 3D 디스플레이에서 발생하는 피로감의 개선은 3D디스플레이의 성공과 발전에 있어 매우 중요한 일이다. 만약 i3D 시스템을 사용함에 있어서 크

a) 광운대학교 산업심리학과 (Department of Industrial Psychology, Kwangwoon University)

‡ Corresponding Author : 김신우 (ShinWoo Kim)

E-mail: shinwoo.kim@kw.ac.kr

Tel: +82-2-940-5421

※본 연구는 지식경제부 “인터랙티브 UI 기반 3D 시스템 기술개발” 과제의 지원을 통해 수행되었습니다.

Manuscript received December 17, 2012 Revised February 28, 2013

Accepted March 18, 2013

게 피로감이 발생하게 된다면 사용자의 안전성뿐만 아니라 시스템의 개발 목적인 사용자의 실감증대에도 부정적인 영향을 미칠 수밖에 없다.

시각피로의 개선을 위한 연구를 위해서는 먼저 피로감을 측정하는 타당한 방법의 개발이 선행 되어야 한다. 앞선 연구에서 3D 시각피로의 측정은 생체측정치를 이용한 객관적인 방법과^[5,6] 자기보고를 이용한 주관적인 방법들이 제안되었다^[7,8,9]. 안구의 움직임이나 뇌파 등을 이용하여 객관적인 측정치로 3D 시각피로를 측정하는 것이 가능하지만 아직까지 측정치의 안정성과 비용 면에서 문제가 있다. 주관적 3D 시각피로 측정은 측정치가 실험자극 자체가 아닌 다른 피험자의 주관에 의해서 결과가 영향 받을 수 있다는 단점이 있지만 비교적 안정적으로 보다 쉽고 정확한 시각피로를 측정할 수 있다. 김덕중 등 (2012)은 안경식 3D 디스플레이를 사용하였던 이전 연구들과 달리 배리어 방식의 무안경식 3D 디스플레이를 사용하여 무안경식 3D 디스플레이에서의 피로측정을 위한 주관적인 자기보고식 설문문항을 개발하였다^[9].

본 연구는 김덕중 등 (2012)이 개발한 문항을 사용하여 실제 구현된 시연용 i3D 시스템을 사용하여 보다 i3D 시스템의 실제 사용과 거의 동일한 상황에서 피로도를 측정하였다. 이를 통해 이전까지 다른 3D 디스플레이에서 피로도에 영향을 미치는 것으로 알려진 시청거리, 시청각도, 시차가^[10,11] 실제 i3D시스템에서는 어떻게 피로도에 영향을 미치는지 알아 볼 수 있다.

II. 실험

1. 목적

3D 디스플레이 시청 시에 피로감에 영향을 준다고 알려진 3가지 요인 (시청거리, 시청각도, 시차)이 무안경식 디스플레이를 사용한 i3D시스템 사용 시의 피로감에 어떠한 영향을 주는지를 검증하고자 하였다. 이를 위해 실제 시연용 i3D시스템을 이용하여 실제 사용이 일어날 것으로 예상되는 범위 내에서 위의 3가지 요인을 여러 조건으로 조작하여

각각의 조건에서 사용할 때 발생하는 피로도를 측정하였다.

2. 장치 및 자극

현재 개발되고 있는 무안경식 3D 디스플레이의 방식으로는 크게 배리어 방식, 렌티큘러렌즈 방식, 지향성 백라이트 방식 등이 있다^[12]. 서론에서 언급한 것처럼 물리적으로 평면인 디스플레이가 3D 입체 정보를 표현 하려면 디스플레이가 시청자의 양안에 서로 다른 이미지를 보여 주어야 한다. 렌티큘러렌즈를 이용하면 이를 통과하는 빛의 굴절로 인해 관찰각도에 따라 각각 다른 이미지를 볼 수 있다. 이를 디스플레이에 이용하면 디스플레이 시청위치에 따라 디스플레이의 동일한 영역에서 시점개수만큼(예: 8시점 디스플레이의 경우 8개)의 서브픽셀이 나타내는 서로 다른 영상을 제시할 수 있다. 따라서 좌안과 우안이 가지는 물리적 위치 차이에 의하여 양안에 서로 다른 영상을 제공할 수 있는데 이와 맞추어 좌안 영상과 우안 영상을 제공함으로써 시청자는 평면 디스플레이에서 안경 등의 부가 장비 없이도 깊이 정보를 얻을 수 있다. 이 때 콘텐츠에서 의도한대로 좌안영상과 우안영상의 제공이 최적화되어 깊이 지각이 가장 안정적으로 이루어지는 위치를 *sweet spot*이라고 하는데 렌티큘러렌즈 구현방식의 한계로 인해 아직까지는 *sweet spot*이 아닌 위치에서는 정상적인 시청을 하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

본 실험에서는 디지털 사이니지 (Digital signage) 목적으로 제작한 i3D시스템을 사용하여 자극을 제시하였다. 디지털 사이니지란, 공공장소에 설치되어 각종 정보를 영상, 소리, 사진 등으로 제공하는 디지털 디스플레이 시스템을 말한다. 실험에 사용한 시스템은 Alioscopy 社の 42인치 렌티큘러렌즈 방식 다시점 무안경식 3D 디스플레이를 사용하고 있다(Alioscopy 3D HD 42"; 해상도 1920 x 1080; 가로 93.5cm, 세로 53cm; <http://www.alioscopy.com/>). 이 디스플레이는 렌티큘러렌즈 방식의 8시점 무안경식 3D 디스플레이며 16개의 *sweet spot*을 가지고 있다.

실험에 사용한 영상은 현재 사용 할 수 있는 i3D시스템의 시연용 동영상 6종류 중 ‘자동차’와 ‘수족관’을 사용하였다 (그림1). ‘자동차’는 검은색 배경을 가진 3차원 공간

그림 1. 실험에 사용한 자극의 스크린샷 (위 : 자동차, 아래 : 수족관)

Fig. 1. Screen-shots of stimuli used in the experiment (top : car, bottom : aquarium)

중앙에 은회색의 자동차 한 대가 위치하여 있는 영상으로 화면상의 움직임이 적고 정보가 중앙에 위치하여 있다. 반면, ‘수족관’은 형형색색의 배경을 가지고 있으며 3차원 공간상에서 물고기들이 앞 뒤, 좌 우 방향으로 계속 하여 움직이고 있어 화면 중앙 뿐 만 아니라 주변부에도 지속적으로 움직임이 있는 정보가 제시 된다.

피로도 측정에는 김덕중 등 (2012)이 개발한 i3D 피로측

정 설문문항을 사용하였다. 이 측정 도구는 7점 척도의 자기보고식 설문으로 피로감을 묻는 문항들에 대하여 1점 (전혀 그렇지 않다)에서 7점 (매우 그렇다)사이로 보고하며 안구피로, 시청 시 불편감, 신체피로의 3가지 하위요인으로 구성되어 있다. 실험 진행에 있어 참가자의 이동이 많은 것을 고려하여 신체피로와 관련된 문항 중 일부를 제외하였다 (e.g. 목이 아팠다, 허리가 빠근했다).

3. 실험설계

3D 디스플레이 시청 시에 느끼는 피로감에 영향을 미치는 주요한 역할을 하는 것으로 알려진 3가지 변인을 (시청 거리, 시청방위, 화면시차) 각 변인 별로 3가지 수준으로 조작하여 시각피로를 측정 하였다. 3 (시청거리: 1.7, 3, 4.3m) x 3 (시청각도: 0, 20, 40°) x 3 (시차: 보통, 작음, 큼)의 피험자 내 요인설계로 모든 요인을 완전 교차 하여 27조건을 구성하였다 (그림2).

그림 2. 실험실 조건 구성
Fig. 2. Illustrated laboratory conditions

실험에 사용한 시청 거리, 시청 각도, 화면 시차 조건의 조작 수준은 i3D 시스템을 공공 장소에 설치하여 일반인들이 사용하는 경우를 가정한 시나리오를 바탕으로 결정하였다. 시청 거리는 세 조건(170 cm, 300 cm, 430 cm)으로 구성하였다. 이 조건은 시연용 i3D 시스템에서 손동작을 통해 콘텐츠와 협응이 가능한 기본 관찰 거리인 170 cm를 기준으로, 여러 명의 관찰자가 멀리서 i3D 시스템을 관찰하는 상황을 가정하여 130 cm 간격을 두어 추가로 두 조건을 구

성한 것이다. 시청 각도 조건 역시 세 조건(0°, 20°, 40°)으로 구성하였다. 시청 거리와 마찬가지로 i3D 시스템과 협응이 가능한 기본 관찰 각도인 0°를 기준으로, 이 시스템을 통하여 입체감을 느낄 수 있는 한계 조건에 가까운 40°와 두 수준의 중간지점인 20°를 포함하여 구성하였다. 시차 역시 세 조건(보통, 작음, 큼)으로 구성하였다. 시연용 i3D 시스템의 시연 영상의 기본 깊이 설정 상태에서 가장 큰 화면 시차를 가진 지점을 기준으로, 기본 설정 상태는 약 8 cm의 화면 시차를 가지고 있었으며(보통 시차 조건), 이를 기준으로 절반인 약 4cm의 화면시차를 가지는 조건(작은 시차 조건), 이와는 반대로 4cm의 화면 시차가 증가한 약 12cm의 화면시차를 가지는 조건(큰 시차 조건)을 구성하여 시각 피로를 측정하였다.

4. 참가자

광운대학교 게시판을 통해 모집 한 21명이 실험에 참가하였다 (여성 10명; 나이 평균=21, 표준편차=1.78). 실험참가자들을 자극에 종류에 따라 두 집단으로 무선 할당 하였다 (수족관: 11명, 자동차 :10명). 참가자들은 모두 정상시력 혹은 교정된 정상시력을 가지며, 입체지각에 문제가 없었다. 참가자들은 실험참가비를 실험이 끝난 후 바로 지급 받았다.

5. 절차

참가자들이 실험실에 입장을 하면 먼저 대기석에 앉아 설문지를 받고 실험의 진행 과정에 대한 설명을 구두로 제공하였다. 특별히 정확한 피로도 측정을 위해 실험자의 지시가 있기 전까지는 화면 시청을 삼가고 실험자의 지시에 따라 화면을 시청을 시작하고 중단해 주길 요청 하였다. 실험실에는 각 조건별 위치가 바닥에 표시되어 있었으며, 매 시행마다 실험자가 참가자를 해당 조건의 위치로 안내하였다. 참가자가 화면을 향해서 해당 조건에 적절하게 위치하면 ‘화면을 시청하여 주십시오.’ 라고 지시 하였다. 자극은 20초간 제시되었고 20초가 지나면 ‘설문지를 작성해 주세요.’ 라는 지시와 함께 화면 시청을 중단시켰다. 그

후 참가자는 방금 시청한 영상에 대한 피로도를 설문문을 통해 응답하였으며 설문 작성에는 충분한 시간을 주어 정확한 피로도 평정이 이루어질 수 있도록 하였다. 설문지 작성 이 끝나면 참가자를 다음 조건 위치로 안내하였으며 같은 절차를 반복하여 실험을 계속 진행 하였다.

각 실험참가자에게서 모든 조건 당 1번씩 측정을 시행하여 총 27번의 반복 측정을 하였으며, 동일한 참가자가 여러 조건에 노출되는 것에 따른 순서효과 및 학습효과를 제거 하기 위하여 각 조건의 제시순서를 무선화 하였다.

6. 결과 및 논의

결과 분석에 앞서 실험과정에서 시차 조작에 있어 오류가 있는 5명의 사례를 분석에서 제외하였고, 역 문항 간의 상관관계수가 매우 낮은 수치로 나온 참가자 2명을 불성실한 참가자로 판단하여 ($r < .5$) 총 7명을(자동차 조건 3명, 수족관 조건 4명) 분석에서 제외하였다. 최종적으로 분석에는 총 14명의 사례를 사용하였다.

자극 조건(자동차, 수족관)에 따른 시각피로는 자동차 자극이 수족관 자극에 비하여 조금 더 높게 나타났지만(자동차: 평균 = 3.31, 수족관: 평균 = 3.00) 집단 간 변량 분석 결과 실험 자극의 종류 간에 나타나는 피로도의 차이는 유의미하지 않았으며 ($F(1, 12) = .54, p = .475$), 다른 피험자 내 변인들(시청거리, 시청각도, 시차)과의 상호작용 역시 통계적으로 유의하지 않았다($ps > .05$). 따라서, 이 후 모든 분석에 있어서 자극에 따른 구분을 두지 않았다.

실험 결과 각 독립변인에 따른 조건별 피로도의 평균은 위의 표 1과 같이 나타났다. 전체적으로 피로도는 4점을 크게 넘지 않아 전반적으로 영상을 관람하는데 있어서 피로도가 크게 나타나지 않았다. 피로도는 시청거리에 따라 거리가 멀어질수록 대체로 감소하는 모습을 보여주었지만, 0° 조건에서는 오히려 170cm에 비해 300cm조건에 더 피로도가 높게 나타났으며 400cm로 더 멀어져도 피로도가 크게 감소하지 않았다(이후 논의). 시차에 따라서는 시차가 작을수록 피로도가 감소하는 모습을 보여주었다. 시청각도의 경우 0°, 40°, 20° 순으로 피로도가 높게 나타난 것을 볼

표 1. 시청거리, 시청각도, 시차에 따른 조건별 피로도 평균 (표준오차)

Table 1. Average visual fatigue depending on viewing distance, viewing angle and disparity (Standard error)

시청거리	시차	시청각도			평균
		0°	20°	40°	
170 cm	작음	3.39 (.31)	3.33 (.31)	3.75 (.28)	3.49 (.24)
	보통	3.56 (.30)	3.75 (.37)	3.99 (.32)	3.77 (.28)
	큼	3.64 (.39)	3.55 (.27)	4.10 (.29)	3.76 (.29)
	평균	3.52 (.29)	3.54 (.26)	3.94 (.26)	3.67 (.25)
300 cm	작음	3.83 (.33)	2.25 (.23)	2.61 (.28)	2.90 (.20)
	보통	3.57 (.39)	2.56 (.27)	2.56 (.36)	2.98 (.27)
	큼	4.07 (.36)	2.87 (.26)	2.63 (.37)	3.19 (.25)
	평균	3.82 (.32)	2.56 (.21)	2.60 (.30)	3.00 (.22)
400 cm	작음	3.25 (.30)	2.26 (.24)	2.27 (.30)	2.59 (.22)
	보통	3.62 (.36)	2.41 (.27)	2.29 (.20)	2.77 (.21)
	큼	4.01 (.41)	2.48 (.30)	2.64 (.24)	3.04 (.25)
	평균	3.63 (.33)	2.38 (.22)	2.40 (.23)	2.80 (.21)
시차 평균	작음	3.49 (.28)	2.61 (.23)	2.87 (.25)	2.99 (.20)
	보통	3.58 (.33)	2.91 (.25)	2.95 (.24)	3.15 (.23)
	큼	3.90 (.33)	2.97 (.22)	3.11 (.25)	3.33 (.23)
전체평균		3.66 (.30)	2.83 (.20)	2.98 (.23)	3.15 (.21)

수 있다. 가장 높은 피로도를 보인 시청 조건은 170cm · 40° · 시차 큰의 조건이었고, 가장 낮은 피로도를 보인 조건은 300cm · 20° · 시차 작은의 조건이었다.

실험의 결과를 통계적으로 분석하기 위해 측정 조건의 각 독립변인에 따른 피로도를 3 (시청거리) x 3 (시청각도) x 3 (화면시차)의 피험자 내 변량 분석을 실시하였다. 이 결과 시청거리에 따라서 화면으로부터 시청거리가 멀어질수록 나타나는 피로도의 감소는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다 (그림3a; $F(2, 24) = 19.720, p < .001$). 이는 일반적으로 3D디스플레이 시청 시에 나타나는 현상으로 디스플레이 시청 거리가 가까워 질수록 크로스토크가 증가하여 시청 시의 피로감이 상승하는 반면 디스플레이와 멀어질수록 크로스토크가 줄어들어 피로감이 감소하는 모습을 보인다.

시청각도에 따른 피로도의 차이 또한 통계적으로 유의한 것으로 나타났다 ($F(2, 24) = 8.19, p < .01$). 0° 조건 일 때 20° 조건과 40° 조건에 비하여 높은 것으로 나타났고, 40° 조건이 20° 조건에 비하여 평균 피로도가 높았지만 이 차이는 통계적으로 유의하지 않았다 (그림 3b; $F(1, 12) = 1.61, p = .23$). 앞서 소개한대로 실험에 사용한 3D 디스플레이는 8시점의 무안경식 3D 디스플레이로 16개의 sweet spot (3D지각이 가장 안정 적으로 일어나는 지점)을 갖는다. 짝수 개의 sweet spot을 가지는 디스플레이의 특성에 따라 0° 조건, 즉 화면의 정면은 sweet spot이 아닌 위치가

되었다. 때문에 0도에서 보았을 때 피로도가 가장 높게 나타났다고, 이에 비해 정면이 아닌 측면은 보다 낮은 피로도가 나타날 수 있었다.

화면시차 또한 피로도에 영향을 미치는 것으로 나타났다 (그림3c; $F(2, 24) = 3.56, p < .05$). 시차가 커질수록 피로도가 증가하는 경향을 보였다. 앞서 언급한대로 수렴-조절 간의 불일치는 3D 디스플레이 시청 시에 피로감을 유발하는 주요 원인이다. 시차가 커지면 화면으로부터 상의 입체감은 증가 하는 반면, 우리 눈의 수렴거리와 조절거리의 차이가 더욱 심해지게 되는데 이에 따라서 피로감은 더욱 증가 하게 된다.

실험에서 조작한 3가지 요인의 주 효과는 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 반면 상호작용 효과의 경우 시청거리와 시청각도의 상호작용을 제외 하고는 모두 통계적으로 유의하지 않았다.

시청거리와 시청각도 간의 상호 작용은 유의미 하였다 (그림4; $F(4, 48) = 15.46, p < .05$). 시청각도가 0° 일 때는 시청거리 변화에 따른 피로도의 차이가 거의 없는 반면 20° 와 40° 조건에서는 시청거리가 멀어짐에 따라 피로도가 감소하는 모습을 보였다. 이 결과는 앞서 논의한대로 시청각도가 0° 일 때, 3D지각이 매우 불안정하게 일어남에 따라 발생한 결과로 보인다. 3D지각이 불안정할 때는 시청거리가 피로도에 영향을 미치지 못했지만, 3D지각이 안정적으로 일어나는 시청각도 (20°, 40°)에서는 시청거리가 멀어질

그림 3. 각 독립변인의 주효과에 따른 시각피로
Fig. 3. Visual fatigue depending on each main factors

그림 4. 시청거리와 시청각도에 따른 피로도의 상호작용효과
Fig. 4. Interaction between viewing distance and viewing angle

수록 피로도가 낮아짐을 보여준다.

그 외의 시청거리와 화면시차의 상호작용($F(4, 48) = 1.14, p > .05$), 시청각도와 화면시차의 상호작용($F(4, 48) = .60, p > .05$), 시청거리와 시청각도와 화면시차의 3원 상호작용은 ($F(8, 96) = .99, p > .05$) 모두 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

이 결과는 앞서 같은 피로도 측정 도구를 사용하였던 김덕중 등 (2012)의 실험 결과와 다른 양상을 보인다(그림 5). 앞의 연구에서는 시청거리의 측정단위를 1m · 2m · 4m, 시청각도를 0° · 28° · 56° 로 조작하여 피로도를 측정 하였는데 이 결과 가장 큰 시청각도인 56° 조건에서는 시청거리에 따른 피로도의 차이가 없으나 0° 와 26° 에서는 시청거리가 멀어짐에 따라 피로도가 감소하였다. 본 연구는 이와 반대로 가장 작은 시청각도인 0도에서 시청거리간의 차이가 없었지만 20° 와 40° 조건에서 시청거리가 멀어질수록 피로도가 감소하는 것을 볼 수 있는데 이러한 차이는 크게 2가지를 원인으로 들 수 있다. 먼저, 디스플레이 방식의 차이로 앞의 연구는 배리어 방식의 무안정식 3D디스플레이를 사용하는데 비해 본 연구는 렌티큘러 방식의 무안정식 3D

디스플레이를 사용하였다. 이러한 방식의 차이로 인하여 앞선 연구의 디스플레이는 0° 에서도 참가자들이 안정적인 3D경험을 할 수 있었지만 본 연구에서는 디스플레이 특성에 따라 0° 조건에서 크로스톡이 증가하여 크게 이중상을 경험하였다. 또한 시청각도 조건의 범위가 달랐는데, 본 연구는 실제 사용 상황을 가정하여 40° 조건이 가장 넓은 시청각도 조건이었던 것에 비해, 이전의 연구는 보다 극단적인 시청각도인 56° 에서 측정을 하였다. 그 결과 시청각도 56° 조건에서 상이 입체로 지각되지 않고 이중상이 완전히 분리된 2D화면으로 지각되어 시각피로가 감소하는 모습을 보였다.

따라서 이 두 가지 연구결과는 다른 데이터 추세를 보여주고 있지만 역설적으로 같은 결과를 보여 준다고 볼 수 있다. 결과적으로 3D가 안정적으로 지각되는 시청각도에서는 시청거리가 가까워질 수 록 피로감이 증가하는 경향을 보이지만, 3D 지각이 안정적으로 이루어지지 않는 시청각도조건(앞의 연구에서 56° 조건, 본 연구에서 0° 조건)에서는 시청거리가 3D 시청 시 피로감에 크게 영향을 미치지 못하는 결과를 보여준다고 할 수 있다.

그림 5. 김덕중 등 (2012)의 실험 결과
Fig. 5. Results of Kim et al. (2012)

III. 종합논의

본 연구에서는 i3D 시스템을 사용할 때의 피로도에 영향을 미치는 각 요인들을 조작하여 실제 사용 상황에서 발생할 수 있는 피로도를 측정하였다. 실험을 통해 다양한 환경별(시청거리 : 1.7, 3, 4.3m; 시청각도 : 0, 20, 40°), 콘텐츠별(시차 : 작음, 보통, 큼) 상황을 체계적으로 조작하여 각 상황에서 시청 시에 발생하는 피로도를 측정한 결과 모든 독립변인이 피로도에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 시청거리가 가까울수록 피로도가 높게 나타났고, Sweet spot이 아닌 시청각도에서는 피로도가 높게 나타났으며 시차는 커질수록 피로도가 증가하였다.

또한, 시청거리와 시청각도간의 상호작용이 유의미 하였는데 0° 조건에서는 거리 조건에 따른 피로도의 변화가 없었던 반면, 20° 와 40° 조건에서는 거리가 멀어질수록 피로도가 감소함을 보였다. 이는 입체 지각이 불안정한 조건인 시청각도 0° 에서는 시청거리에 따른 피로도의 변화가 없었지만 입체 시청에 적절한 각도 내에서는 시청거리가 멀어질수록 덜 피로하게 느끼는 경향을 보였다고 할 수 있다.

실험의 결과들은 앞선 안경식 3D 디스플레이를 이용한 시각피로 연구와 마찬가지로 거리가 가까워짐에 따라 시각피로가 증가하였고, 시차가 커짐에 따라 시각피로가 증가하여 기존의 연구와 일치하는 결과를 보인다. 이는 무안경식 3D 디스플레이의 시각피로 역시 안경식 3D 디스플레이에서 나타나는 시각피로와 원리적으로 다르지 않다는 것을 말해준다. 따라서 시각피로의 해결에 있어서 안경식 3D 디스플레이에서 사용하는 방법들이 무안경식 3D 디스플레이에서도 해결책이 될 수 있음을 시사한다. 단, 시청각도의 경우 무안경식 3D 디스플레이의 특성상 존재하는 Sweet spot이 시각피로에 큰 영향을 미치므로 시청각도에 따른 시각피로에 대해서는 안경식과 무안경식 3D 디스플레이를 구분 할 필요가 있다. 특히 시청거리와 시청각도의 상호작용에 따라 나타나는 시각피로는 김덕중 등 (2012)의 연구와 결과적으로 같은 양상을 보여주었다. 즉, 이 결과가 특정 디스플레이에서만 나타나는 결과가 아닌 배리어 방식과 렌티큘러렌즈 방식을 통틀어 무안경식 3D 디스플레이에서 일반적으로 나타나는 시각피로 양상임을 보여준다.

본 연구는 무안경식 3D와 인터랙션이 특징인 i3D시스템의 실제 상황에서 사용 할 때의 상황을 실험실에서 재현하여 피로감을 연구하였다. 현재의 시스템도 일반적인 사용 위치 모두 전반적으로 낮은 피로감을 보여주어 길지 않은 시간동안 사용하는 시스템의 특성상 실제 사용에 있어 피로감이 크게 문제가 되지 않을 것으로 예상 된다. 하지만 i3D 시스템이 다른 무안경식 디스플레이와 차별화 되는 점은 무엇보다도 콘텐츠와의 협응동작 이라고 할 수 있다. 따라서 협응위치는 가장 중요한 사용위치라고 할 수 있는데, 현재의 시스템은 가장 중요한 협응위치인 170cm · 0° 조건에서 피로감이 다른 최적화 된 위치에 비해서 상대적으로 높은 모습을 보여주고 있다. 이러한 피로감이 나타나는 양상은 최적의 사용자 경험이라는 측면에서 분명 보완되어야 할 점이다.

본 연구는 실제 사용 상황을 가정하여 다양한 조건에서 실험을 진행하였지만 협응에 따른 피로도 측정이 이루어지지 않았다. 앞서 언급한 것처럼 i3D시스템의 가장 큰 특징은 협응에 있는데, 앞선 배리어 방식의 무안경식 3D 디스플레이를 사용한 김덕중 등 (2012)에서는 협응에 따른 차이가 나타나지 않았었다. 하지만 디스플레이의 3D 구현 방식이나 콘텐츠 종류에 따라서, 또는 이 둘의 상호작용에 따라서 다른 결과가 나올 가능성은 여전히 남아있다. 추후 본 연구 결과를 더 발전시켜 개선된 디스플레이와 더 다양한 시청 상황에서, 또 더 다양한 측정방법으로 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, & M. S. Banks, "Vergence - accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue", *Journal of Vision*, 8(3):33, pp. 1 - 30, 2008. DOI: 10.1167/8.3.33.
- [2] M. Torii, Y. Okada, K. Ukai, J. S. Wolffsohn, and G. Gilmartin, "Dynamic measurement of accommodative responses while viewing stereoscopic images", *Journal of Modern Optics*, Vol.55, pp. 557-567, 2008. DOI: 10.1080/09500340701467652.
- [3] G. Walsh, W.N. Charman, "Visual sensitivity to temporal change in focus and its relevance to the accommodation response", *Vision Research*, Vol. 28, pp. 1207 - 1221, 1988. DOI: 10.1016/0042-6989

- (88)90037-5.
- [4] H.-C. O. Li, "A stepping-stone for leap of 3DTV technology", Journal of Broadcast Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 65-71, 2008
 - [5] H.-C. O. Li, K.-A. Moon, "Validity examination of the measurement of 3D visual fatigue using EEG", The Korean Society for Emotion and Sensibility, Vol. 15, No. 1, pp.17-28, 2012.
 - [6] M. Emoto, T. Niida, and E. Kkana, "Repeated vergence adaptation causes the decline of visual functions in watching stereoscopic television", Journal of Display Technology, Vol.1, pp. 328-340, 2005. DOI: 10.1109/JDT.2005.858938.
 - [7] J. Kuje, K. Ukai, "Subjective evaluation of visual fatigue caused by motion images", Displays, 29, pp. 159-166, 2008.
 - [8] H.-C. O. Li, "Human Factor Research on the Measurement of Subjective Three Dimensional Fatigue", Journal of Broadcast Engineering, v.15, no.5, pp.607-616, 2010. DOI: 10.5909/JBE.2010.15.5.607.
 - [9] D.-J. Kim, H.-C. O. Li, S.W. Kim, "Glasses-free Interactive 3D Display: The Effects of Viewing Distance, Orientation and Manual Interaction on Visual Fatigue", Journal of Broadcast Engineering, v.17, no.4, pp.572-583, 2012. DOI: 10.5909/JBE.2012.17.4.572.
 - [10] M. Lambooi, W. IJsselsteijn, M. Fortuin, and I. Heynderickx, "Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review", Vol. 53, J. Imaging Science Technology, 2007. DOI: 10.2352/J. ImagingSci.Technol.2009.53.3.030201.
 - [11] T. Shibata, J. Kim, D. M. Hoffman, and M. S. Banks, "The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays", Vol. 11, No. 8, Article. 11, Journal of vision, pp. 1-29, 2011. DOI: 10.1167/11.8.11
 - [12] S.-S. Ju, "Development status and future prospects of glasses-free 3DTV", TTA Journal, Vol.140, pp 55-59, 2012.

저 자 소 개

김 정 열

- 2012년 : 광운대학교 미디어영상학부 학사
- 2012년 ~ 현재 : 광운대학교 산업심리학과 석사과정
- 주관심분야 : 시지각, 시각주의, 시각적인지, HCI(인지 디자인)

이 형 철

- 1987년 : 연세대학교 심리학과 학사
- 1989년 : 연세대학교 심리학과 석사
- 1996년 : 미국 University of Wisconsin, Madison, 심리학과 박사
- 1999년 ~ 현재 : 광운대학교 산업심리학과 교수
- 2010년 ~ 2011년 : TTA, 3DTV PG, 품질안전규격 WG 의장
- 2010년 ~ 2011년 : 3D 시청 안전성 협의회 의장
- 주관심분야 : 3D 휴먼팩터, 시지각, Brain-Computer Interface

김 신 우

- 2003년 : 연세대학교 심리학과 학사
- 2007년 : New York University 심리학과 석사
- 2010년 : New York University 심리학과 박사
- 2010년 ~ 현재 : 광운대학교 산업심리학과 조교수
- 2010년 ~ 현재 : 감성과학회 편집위원
- 주관심분야 : 시선추적, 범주화, 인과관계, 개념학습, 추론, 사용성