

일반논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제27권 제4호, 2022년 7월 (JBE Vol.27, No.4, July 2022)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2022.27.4.569>

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

양안식 디스플레이에 제시되는 자극의 조절단서 조작이 양안융합에 미치는 영향

박 종 진^{a)}, 김 신 우^{a)}, 이 형 철^{a)†}

The Effect of Accommodation Cue Manipulation at Stereoscopic Display on Binocular Fusion

Jong-Jin Park^{a)}, Shinwoo Kim^{a)}, and Hyung-Chul O. Li^{a)†}

요 약

본 연구는 입체 영상을 시청할 때 시각적 불편감 중 하나로 언급되는 양안융합 실패를 인간의 삼차원 시각 시스템 관점에서 해결하기 위하여 주변 시야의 상 흐림이 양안융합에 미치는 영향을 검증하였다. 단속적 양안 시차 변화를 가지는 자극을 제시할 때 주변 시야의 상 흐림이 제시되는 경우 교차 및 비교차 시차를 가지는 표적자극에 대한 양안융합 실패율이 감소하였다. 또한 연속적 양안 시차 변화를 가지는 자극 역시 주변시야의 상 흐림이 제시되지 않을 때에 비하여 상 흐림이 제시되는 경우에 비교차시차를 가지는 표적자극 중 양안융합 실패를 유발하는 데에 상대적으로 더 큰 양안 시차가 요구되었다. 이와 같은 결과는 주변시야 상 흐림이 양안 시차 변화상황에서 양안융합을 촉진함을 의미하며, 인간의 3차원 시각 시스템의 특성을 고려하여 자극을 조작하는 것이 낮은 비용으로 양안식 디스플레이가 유발하는 시각적 불편감을 개선할 수 있음을 시사한다.

Abstract

In this study, we investigated the effect of peripheral blur on binocular fusion to resolve binocular fusion failure which is one of the 3D visual fatigues in the perspective of human visual system. With stimulus having discrete disparity change, binocular fusion failure rate for target stimulus having crossed and uncrossed disparity decreased. And target stimulus having continuous disparity also required relatively larger binocular disparity when peripheral blur was presented with target stimulus rather than when peripheral blur was not presented. These results imply that peripheral blur facilitated binocular fusion in the situation of binocular disparity change, and suggest that considering the characteristics of human three-dimensional visual systems, manipulating 3D contents can improve visual discomfort caused by binocular displays at low costs.

Keyword : Peripheral blur, Stereoscopic displays, Accommodation cue, Binocular fusion

I. 서 론

인간의 3차원 정보처리 시각 시스템의 특성을 고려하지 않고 3D 디스플레이의 하드웨어적 특성 그리고 여기에 제시되는 콘텐츠 특성의 수정 및 조작만으로 3D 휴먼팩터 문제를 해결하는 것은 불가능하다. 왜냐하면, 하드웨어와 콘텐츠 그 자체는 3차원이 아니며 제시되는 자극이 인간의 시각시스템에서 처리되어 의식에 표상되는 것이 3차원이기 때문이다. 본 연구의 목적은 주변 시야에 제시되는 상호립 조건이 눈 운동 동안의 양안융합에 미치는 영향을 검증하는 것인데, 이 연구의 의의와 맥락을 이해하기 위해 VR과 시각적 불편감, 감각 불일치 현상과 휴먼팩터, 그리고 수렴-조절 불일치와 양안 융합에 대한 인간의 시각정보 처리 관점에서의 이해가 필요하다.

1. VR과 시각적 불편감

HMD VR 기기는 3D 디스플레이에 비하여 높은 실감과 임장감을 가진다. 이는 HMD VR 기기의 설계 때문이다. 예를 들면, 오큘러스 리프트(Oculus Rift, Facebook Inc)는 모바일용 고밀집 소형 디스플레이 패널과 가속도 센서, 볼록렌즈 역할을 수행하는 플레넬 렌즈^[1]를 일체화시키는 방식으로 제작되었다. 이 기기는 가상현실 속에 들어와 있다는 임장감을 느끼는데 충분한 광학적 자극(수평 시야각 90도 이상, 머리 움직임 추적, 초점거리 2미터 이상)을 제공할 수 있도록 구성되어 있다. HMD VR기기의 이런 특성은 HMD를 통하여 제시되는 콘텐츠가 양안 시차와 광학흐름(optic flow)에 의한 공간적 단서를 풍부하게 가질 수 있게 해 준다.

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

‡ Corresponding Author : 이형철(Hyung-Chul O. Li)

E-mail: hyung@kw.ac.kr

Tel: +82-2-940-5425

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4650-8718>

※ This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2019S1A5B5A07094183) and has been conducted by the Research Grant of Kwangwoon University in 2022.

· Manuscript June 24, 2022; Revised July 18, 2022; Accepted July 18, 2022.

HMD VR의 주된 단점은 시각피로이다. 실감을 위하여 정교하게 재현한 광학 흐름은 자기운동착시(Vection)^[2] 뿐만 아니라 시각적으로 유도된 운동 멀미증(Visually Induced Motion Sickness, 줄여서 표현하면 VIMS)의 원인이 된다^[3]. 이 현상의 원인은 두뇌가 자기운동지각을 형성하는데 사용하는 시각 단서와 전정감각 단서 사이의 불일치로 알려져 있다^[4]. 시각적으로 유도된 운동 멀미증은 시각적인 운동 단서가 제공되지만 전정기관에서 운동 단서가 제시되지 않는 경우 어렵고 구토감이 느껴지는 일종의 멀미 증상이 유발되는 것을 말한다^[5]. 이 현상과 중요한 시각피로 원인인 수렴-조절 불일치(Vergence-accommodation conflict) 현상 역시 양안식 디스플레이(Stereoscopic display)에서 수렴 단서와 조절 단서가 일치하지 않을 때 발생한다^[6]. 따라서 양안식 디스플레이의 주요 시각피로 원인은 감각 단서 불일치 현상이라고 할 수 있다.

2. 감각 불일치 현상과 휴먼팩터

시각적으로 유도된 운동 멀미증과 수렴-조절 불일치가 시각피로에 미치는 영향은 자극을 제시하는 디스플레이의 구성이나 자극 특성에 따라 달라진다. HMD VR은 개인화된 디스플레이를 사용하며 머리 운동을 추적한다. 이는 자극 제시 방법에 따라 시청자에게 시각 및 전정감각의 자기 운동 자극을 일치하도록 만들 수 있다는 것을 의미한다. 즉, HMD VR은 자극 종류에 따라 VIMS를 감각단서 수준에서 원천적으로 제거할 수 있다. 가상 환경과 실제 환경의 감각 자극 불일치를 해결하는 방법은 응용 분야에서 이미 활용되고 있다. 예를 들면, 뉴욕 경찰은 전통적인 방법으로 훈련이 쉽지 않은 도심지 인질극에 대응하는 상황 훈련을 HMD VR로 수행하고 있다^[7]. 이 사례는 HMD VR기기 사용 시 감각 불일치를 제거할 수 있으며, VIMS 역시 제거될 수 있다는 것을 보여준다.

수렴-조절 불일치가 유발하는 시각피로는 시각적으로 유도된 운동 멀미증과 다른 상황에 놓여 있다. 수렴-조절 불일치 역시 감각 단서 수준에서 서로 충돌하는 두 감각 정보를 일치시키면 근본적으로 제거시킬 수 있다. 그러나 초점거리가 고정된 양안식 디스플레이에서 감각 정보를 일치시키는 방법은 시청자가 응시하는 지점인 주시점의 양안 시차

가 없는 경우뿐이다. 따라서 수렴-조절 불일치를 감각 단서 수준에서 원천적으로 통제하려면 입체자극의 특성인 입체 감 역시 부분적으로 통제해야 한다는 것을 의미한다. 이는 수렴-조절 불일치가 시각피로에 미치는 영향을 제거하는 것은 VIMS가 시각피로에 미치는 영향을 제거하는 보다 상대적으로 더 큰 비용을 지불해야 한다는 것을 시사한다.

3. 수렴-조절 불일치와 양안 융합

수렴-조절 불일치는 안구 통증, 초점 불안정, 양안융합 방해 등 다양한 시각피로 및 불편감을 유발하는 것으로 알려져 있다^{[6][8]}. 이런 현상을 완화시키거나 제거하려면 수렴-조절 불일치를 단순히 수렴-조절 불일치라는 하나의 현상으로 보는 것이 아니라, 제시된 자극에 대한 수렴 및 조절 반응이 입체시에 미치는 영향을 자세하게 살펴 어떤 기제가 시각 피로의 직접적인 유발 원인이 될 수 있는지 검토하는 것이 필요하다.

양안 시차를 가진 영상에 대한 시각 체계의 반응은 수렴과 조절 기제로 나눌 수 있다. 수렴 기제와 조절 기제는 자극에 대해서 일차적으로 반응한다. 수렴 반응은 표적 자극의 양안 시차를 제거하기 위한 반사적인 안구 운동이며, 조절 반응은 표적 자극의 상 호립을 제거하기 위한 시각 체계의 반사적인 수정체의 굴절 조절 작용이다. 한편 이 두 반사적 기제는 조절 반응이 나타날 때 같은 방향으로 수렴 눈 운동을 일으키는 현상인 조절성 수렴(accommodative ver-

gence)과 수렴 반응이 나타날 때 같은 방향의 조절을 일으키는 현상인 수렴성 조절(vergence accommodation)이라는 상보적 기제로 서로 엮여있다. 이 결합을 수렴-조절 결합(vergence-accommodation coupling)이라고 한다. 이 현상은 자연스러운 환경 속에서 동시에 발생하기 때문에 좌안과 우안의 영상을 하나로 합쳐 단일한 시각적 지각을 형성하는 양안 융합(binocular fusion)을 돋는 기제로 동작한다^[6].

수렴-조절 불일치가 나타나는 경우와 그렇지 않은 경우에 나타나는 차이를 예를 들어 설명해 보자. 이상적인 사례로, 관찰자가 어떤 대상을 주시하던 중 주시 대상이 갑자기 근접하여 관찰거리가 달라진다고 가정해 보자. 그럼 1 좌측에 자연스러운 장면, 즉 새로 주시하여야 하는 자극의 수렴 거리(a, 좌측)와 조절거리(b, 좌측)가 일치하는 경우 나타나는 수렴 및 조절의 변화 방향을 묘사하였다. 이 경우 네 가지 기제, 수렴 반응, 조절성 수렴, 조절 반응, 수렴성 조절의 방향이 모두 일치할 것이라고 기대할 수 있다. 그럼 1의 우측은 새로운 주시대상의 수렴거리(a, 우측)와 조절거리(b, 우측)가 불일치하는 수렴-조절 불일치 상황을 가상적으로 묘사하고 있다. 이 경우 자극의 양안 시차에 의한 반응인 수렴반응과 이에 의하여 유발된 수렴성 조절은 새로운 주시대상을 향할 것이라고 생각할 수 있다. 그러나 초점거리가 고정되어 있기 때문에 조절 반응은 없으며 조절성 수렴은 발생하지 않을 것이다. 이 가정에 따르면 수렴-조절 불일치에 의한 양안 융합 방해 유발 후보로 수렴 반응과 조절성 수렴의 방향이 일치하지 않는 현상을 고려해볼 수 있다. 고

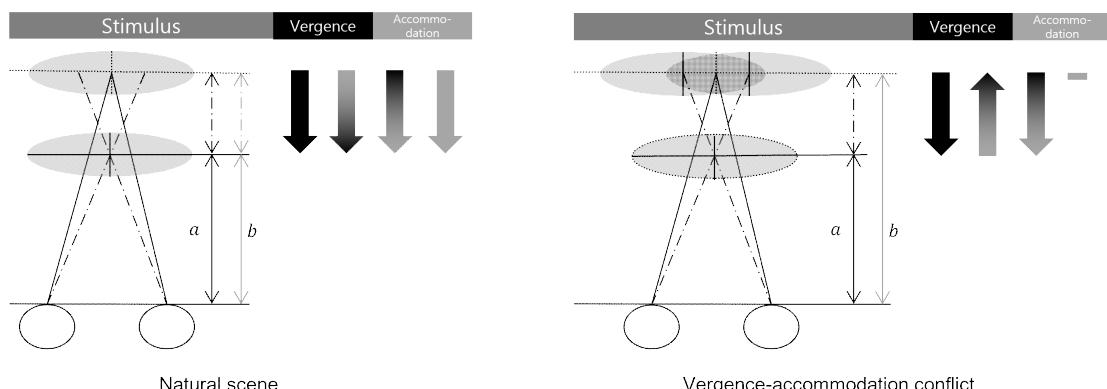


그림 1. 자연스러운 장면과 수렴-조절 불일치 상황의 수렴 및 조절

Fig. 1. Accommodation and vergence in natural scene and vergence-accommodation conflict scene

정된 초점거리는 조절 반응을 유발시키지 않기 때문에 조절성 수렴이 수렴 눈 운동 시작(onset)을 돋지 않을 것이며, 이는 수렴에 충분한 눈 운동을 유발시키지 않아 양안융합을 저해시킬 가능성이 있다. 따라서 수렴-조절 불일치가 양안 융합에 미치는 영향을 검증하려면 수렴 눈 운동 시작(onset)에 상 흐림이 변화하는 조건과 자극의 조절 변화를 지속적으로 유지하는 조건을 모두 검증할 필요가 있다.

조절 반응을 체계적으로 조작하려면 조절이 어떤 자극에 대한 반응인지 알아야 한다. 조절 반응은 순수한 단안 반응이다. 초점 거리가 달라지는 경우에 나타나는 다양한 광학적 변화에 의하여 유발된다고 알려져 있다. 상 흐림은 초점 거리가 변화하면서 생기는 상 흐림을 수정체의 굴절률을 변화시켜 깨끗한 상으로 맷하도록 하는 조절 단서이다. 그러나 상 흐림은 부호가 없는 신호이기 때문에 초기 연구에서는 상 흐림이 조절의 크기를 의미하는 신호로 사용되며 수렴이 조절 방향을 신호한다고 주장하였다^[9]. 그러나 이후 통제된 실험에서 망막상의 변화만으로 조절이 정확한 방향으로 유발된다는 것이 밝혀졌다^[10]. 또한 이후 연구에서 상 흐림과 장축 색수차 단서가 조절을 특정 방향으로, 광학적인 초점거리 변화와 유사하게 변화시킬 수 있음을 보였다^[11]. 그러나 상 흐림에 부호가 주어지지 않으면 수렴 방향에 따르는 조절 단서로 사용된다는 다른 증거가 있다. Maiello와 동료들은 풍부한 단안 단서가 주어진 자연스러운 장면을 제시할 때, 주시대상과 주변 시야의 상대적 깊이 차이에 따른 상 흐림을 적용한 자극에서 양안 융합이 촉진됨을 보였다^[12]. 결론적으로, 상 흐림 정보는 단독으로 주시자극에 대한 조절을 유발시키는데 충분하지 않지만, 배경에 제시되는 경우에 조절성 수렴이 양안 융합을 방해하는 현상을 억제할 수 있을 것이라고 예측할 수 있다.

II. 실험 1: 상 흐림이 단속적 양안 시차 변화 자극의 양안융합에 미치는 영향 검증

첫 번째 실험은 3D 디스플레이를 통하여 제시된 도약 눈 운동을 유발하는 단속적(discrete) 양안 시차 변화를 가지는 자극을 관찰할 때 주변 시야 상 흐림이 양안 융합에 영향을 미치는지 여부를 검증하기 위하여 수행되었다. 단속적 양

안시차 변화는 깊이 변화가 순간적으로 이루어지는 현상으로, 예를 들면 관찰거리 2m 밖에 있던 대상이 1m 거리로 순간적으로 이동하는 것을 들 수 있다. Maiello와 동료들은 풍부한 단안 단서가 주어진 자연스러운 장면을 관찰할 때 깊이에 대응하는 주변 시야 상 흐림이 양안 영상의 융합을 촉진한다는 것을 보였다^[12]. 실험 1은 오직 양안 시차에 의해서만 3차원으로 지각되는 자극에서도 동일한 현상이 반복되어 나타나는지 여부를 검증하는 것을 목표로 설계되었다.

1. 참가자

자원한 참가자 9명이 실험에 참여하였다. 참가자들은 실험에 대한 안내를 받고 입체시 정상성을 확인하기 위한 사전 검사를 수행하였다. 사전 검사는 무선점 양안 자극(random dot stereogram)으로 구성된 배경에 양안 시차를 가진 네 개의 사각형 자극을 2행 2열로 제시하였다. 매 시행마다 무작위 위치의 자극 하나만 시차 방향이 반대였다. 참가자들은 제시된 자극을 관찰하고 네 자극 중 시차 방향이 다른 자극의 위치를 응답하도록 요청받았다. 각 참가자는 이 과제를 10 시행 수행하였으며, 정답률 80% 이상인 경우 실험에 참가할 수 있었다. 사전 검사 단계에서 탈락한 참가자는 없었으며, 모든 참가자의 나안 또는 교정시력은 정상이었다.

2. 장치

실험 자극은 24인치 (너비 51 cm, 높이 28 cm)크기의 안경식 3D FPR(Film type Pattern Retarded) LCD 모니터(LG 전자)를 통하여 제시되었다. 화면 해상도는 1920 x 1080 픽셀이었으며 화면 갱신률은 60Hz였다. FPR 방식으로 입체자극을 제시하는 경우 각 행을 공간 분할하는 방법(vertical Interlace 방식)을 사용하여 한 화면의 상을 양안으로 분리하기 때문에 영상의 실제 해상도는 각 단안 기준 1920 x 540 픽셀이었다. 모니터는 참가자로부터 1m 거리에 배치하였다. 참가자들에게 머리 위치를 유지해달라고 요청하였으나 자연스러운 시청 환경을 모사하기 위하여 머리를 고정하기 위한 장치는 사용하지 않았다. 실험이 수행된 장소는 밝기 약 300 lux인 형광등을 조명으로 사용했다. 자극은 Mathwork사의 Matlab과 시각 실험용 함수 모음인

Psychtoolbox³^[13]^[14]^[15]를 사용하여 만든 실험 프로그램을 사용하여 제시되었다.

3. 실험 자극

무선점 양안 자극을 실험 자극으로 사용했다. 이 자극은 인간의 3차원 시각 시스템의 정보처리 특성을 연구할 때 단안단서와 같은 다른 3차원 단서들의 영향을 배제하고 양안 시각 단서의 영향만을 연구할 때 사용된다. 각 눈에 제시되는 무선점 양안자극은 어떤 모양도 보이지 않지만 3차원 시각시스템에서 양안융합이 되면 비로소 깊이에 의해 정의된 모양이 의식에 표상된다^[16].

자극은 한 변의 길이가 10 시각도인 정사각형 영역으로 정 중앙에 교차 또는 비교차 시차를 가지는 지름 3 시각도

의 원형 무선 점 영역을 가지고 있었다(그림 2). 무선점의 밀도는 20%, 밝기는 RGB 255였고 배경의 밝기는 RGB 127이었다. 자극의 중앙 3 시각도 원형 범위 내의 무선 점들은 자극의 깊이를 정의하는 양안 시차를 가지고 있었다. 자극 깊이는 자극 영역 내의 모든 점이 공유하는 양안 시차로 정의되었으며, 시차가 커질수록 화면에서 더 가깝거나 더 멀리 떨어진 것으로 지각된다. 깊이 범위는 시각도 단위로 비교차 시차 1도 (-60분)부터 교차 시차 1도 (60분)의 범위를 10분 간격으로 나누어 총 13조건 (-60', -50', -40', -30', -20', -10', 0', 10', 20', 30', 40', 50', 60')을 사용하였다. 격자는 자극 영역 내부 무선 점들의 상대적인 시차 차이로 정의하였다. 이 격자의 시차 변화는 사인 함수를 따르며, 1 cpd(cycle per degree)당 시차 범위 ±2분으로 총 3 cpd였다. 격자의 방위는 수직 방향을 0도로 놓고 오른쪽 방향은

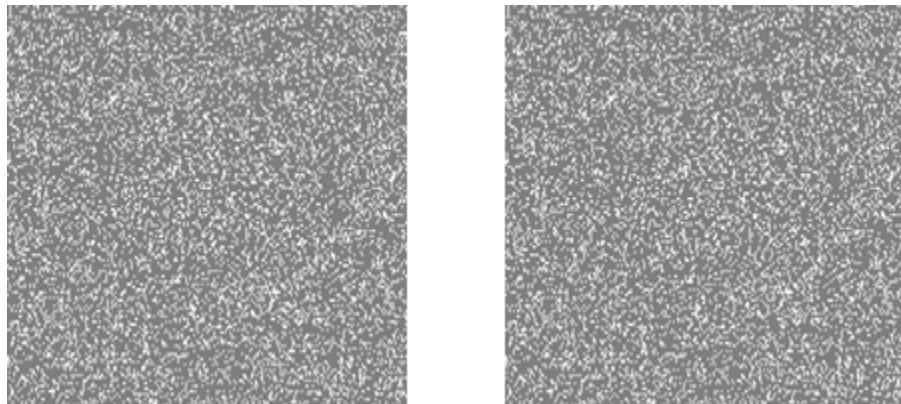


그림 2. 교차시차(10분)와 왼쪽 방향 격자(95도)를 가지는 자극 예시. (교차방식 나만 양안융합을 위해 좌안영상을 오른쪽에 우안영상을 좌측에 배치하였다. 실제 실험에서 참가자는 입체안경을 착용하고 자극을 관찰하였다)
 Fig. 2. A stimuli example which has crossed disparity(10') and leftward grid(95°)

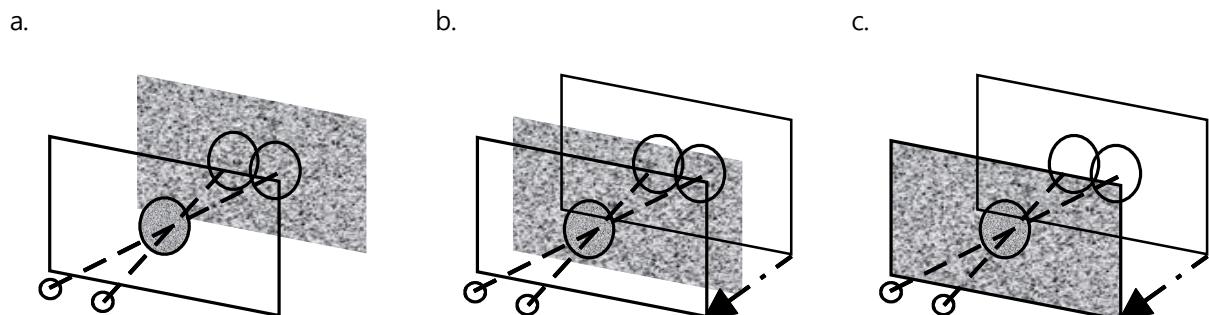


그림 3. 상 흐림 조건
 Fig. 3. Peripheral blur condition

85도, 왼쪽 방향은 -95도로 기울어져 있었다.

상 흐림 조건은 자극을 둘러싼 정사각형 모양의 배경 영역을 조작하여 구성되었다(그림 3). 상 흐림이 높은 조건은 상 흐림이 자극 화면시차 60분에 대응하도록 구성하였으며 (그림 3 c), 낮은 조건은 상 흐림이 자극 화면시차 30분에 대응하도록 구성하였고(그림 3 b), 상 흐림이 없는 조건을 통제 조건으로 사용하였다(그림 3 a). 각 양안 시차에 대응하는 상 흐림은 Gaussian filter를 사용하여 인공적으로 모사하였다. 상 흐림 조작은 Maiello 등(2014)과 동일하게 화면 시차의 0.29배에 해당하는 gaussian window의 표준 편차(sigma)를 사용하였다.

4. 절차

참가자들은 실험에 대하여 안내 받고 훈련 과제를 수행하였다. 시험 과제는 실험에 사용된 것과 동일했다. 그러나 표적 자극의 시차는 비교차 시차 10분, 시차 없음, 교차 시차 10분의 세 조건이었다. 참가자들은 각 조건마다 방위판별 과제를 20 시행씩 수행하도록 요청받았다. 정답률이 80%를 넘어서면 다음 조건을 진행할 수 있었다. 훈련 과제는 최대 세 번까지 반복되었으며 어느 한 조건이라도 통과하지 못한 참가자는 이후 실험에 참가하지 못했다.

본 실험에서 참가자는 제시되는 자극 격자의 방위판별 과제를 수행하도록 요청받았다(그림 4). 각 시행이 시작되면 자극 영역이 없는 RDS 배경 자극 위에 양안 시차가 없고 높이와 너비가 3 시각도인 붉은 십자 모양 고정점이 1000에서 1500 ms 동안 제시되었다. 고정점이 사라짐과 동시에 깊이로 정의된 격자 방향을 가진 자극이 13개 깊이

조건과 3개 배경 상 흐림 조건 중 어느 한 조합을 가진 상태로 1000 ms 간 제시되었다. 자극 방향은 매 시행마다 무선적이었다. 참가자는 격자 방향이 왼쪽 또는 오른쪽 중 어느 방향으로 기울었는지 판단하는 2AFC(2 alternative forced choice) 과제를 수행했다. 참가자가 응답하지 않으면 다음 시행은 시작되지 않았다. 한 참가자가 수행해야 하는 전체 시행 수는 390회로, 자극의 깊이 13조건, 배경 상 흐림 3조건, 반복 10회를 모두 교차하였다.

5. 결과

양안 응합 과제의 오답률을 시차의 크기에 따른 함수로 도시한 것을 그림 5에 제시하였다(좌: 교차 시차, 우: 비교 차 시차). 이 그림에 제시된 바와 같이 방위 판별 과제의 오답률은 자극의 양안 시차 크기가 커짐에 따라 증가하며, 그 경향성은 교차 시차가 비교차 시차보다 더 크다. 이 양안 시차 변화에 따른 오답률 증가 경향을 선형회귀로 분석하였다. 주시 자극의 양안 시차 1분 당 흐림이 실패할 확률 증가는 다음과 같았다. 상 흐림이 없을 때 교차 시차 0.05(5%) 및 비교차 시차 0.03(3%), 상 흐림이 양안 시차 30분에 대응할 때, 교차 시차 0.04(4%) 및 비교차 시차 0.02(2%), 양안 시차 60분에 대응할 경우 교차시차 0.02(2%) 및 비교차 시차 0.01(1%)로, 상 흐림이 증가함에 따라 양안응합 실패율이 체계적으로 감소하였다. 이 차이의 통계적 유의성을 검증하기 위하여 주시 자극의 양안 시차 방향과 상 흐림에 따른 양안응합 실패율 계수를 반복측정 변량분석으로 분석하였다. 그 결과 양안 시차($F(2, 16) = 13.45, p < .001$)와 상 흐림($F(1, 8) = 5.68, p < .05$)의 효과

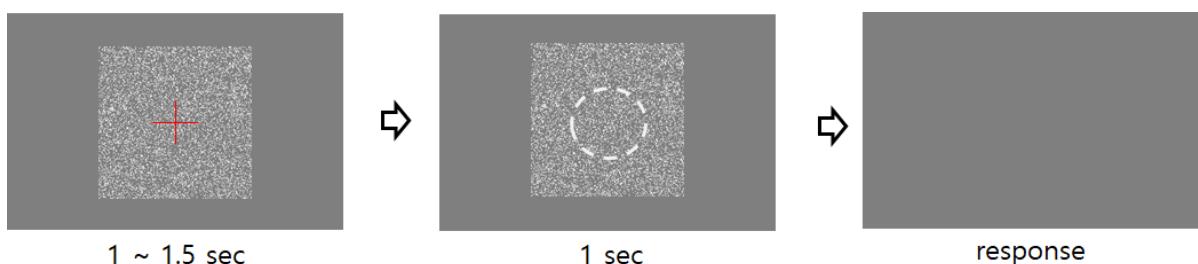


그림 4. 실험 1 단일 시행 절차

Fig. 4. A sequence of single trial in experiment 1

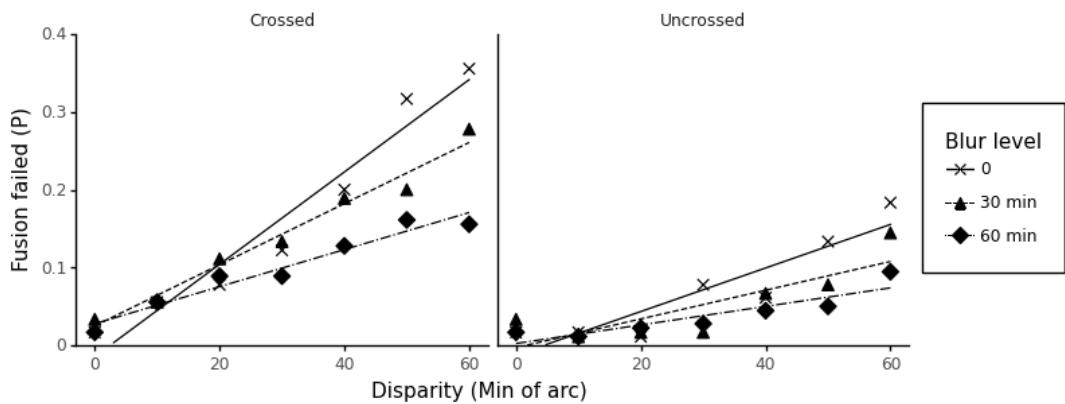


그림 5. 양안 시차 변화에 따른 양안융합 실패율
 Fig. 5. Binocular failure rate as a function of stimuli's disparity change

가 통계적으로 유의미하게 나타났으나 양안 시차와 상 흐림의 상호작용 효과($F(2, 16) = 2.61, p < .10$)는 통계적으로 유의미하지 않았다.

III. 실험 2: 상 흐림이 연속적 양안 시차 변화 자극의 양안융합에 미치는 영향 검증

실험 2는 주시 자극의 양안 시차가 연속적(continuous)으로 변화할 때 주변 시야 상 흐림이 표적자극의 양안융합을 촉진시키는지, 그리고 촉진시킨다면 상 흐림이 추적 눈 운동 시작(onset) 시 또는 추적 눈 운동이 진행되는 동안 제시될 때 중 어떤 조건이 더 양안융합에 더 큰 영향을 미치는지 검증하기 위하여 수행되었다. 이 목적을 달성하기 위하여 실험 2에서는 양안 시차가 연속적으로 변화하는 주시 자극을 제시하고, 그 자극에 방위 관별 과제를 수행하기 위한 격자 방위 자극이 출현하는 지연시간을 조작하였다.

1. 참가자

자원한 참가자 14명이 실험에 참가하였다. 참가자들은 실험에 대한 안내를 받고 과제 수행이 가능한지 여부를 확인하기 위한 사전 검사를 수행하였다. 참가자 중 두 명은 사전 검사에서 운동하는 표적자극에 대한 양안융합을 전혀 유지하지 못하여 실험에 참가하지 못했다. 또한 참가자 한

명은 교차시차 사전 검사에서만 탈락하여 실험은 진행하였으나 비교차 시차 자료만 분석에 포함시켰다. 또한 과도한 시차에 의한 입체 시각 피로를 피하기 위하여 최대 시차를 6도로 제한하였는데, 그 때문에 참가자의 입체시 능력이 실험에서 제시한 모든 조건을 다 융합시킬 수 있을 정도로 좋은 경우 모든 조건에서 최고 수준의 수행을 보이는 천정 효과가 발생한다. 이런 참가자의 자료가 분석에서 제외되었다. 결과 최종적으로 분석에 포함된 참가자의 자료는 비교차시차 8명, 교차시차 9명이었다. 실험에 참가한 참가자 12명의 시력 또는 교정 시력은 모두 정상이었다.

2. 장치 및 자극

실험 2는 실험 1과 동일한 장치를 사용하였다. 실험 2의 자극도 Mathwork사의 Matlab과 시각 실험용 함수 모음인 Psychtoolbox3를 사용하여 만든 실험 프로그램을 사용하여 제시하였다.

실험 2의 자극은 현저성을 조작한 것을 제외하면 실험 1과 동일하였다. 파일럿 실험 결과 실험 2의 자극은 실험 1에 비하여 상대적으로 더 양안 융합이 어렵기 때문이었다. 표적 자극의 현저성은 두 가지 방법으로 조작되었다. 첫째, 운동 자극을 양안 시차로만 정의하지 않고 대비 단서를 추가하였다. 실험 2에서 사용한 자극은 자극 영역의 밝기는 주변 시야 영역의 밝기(RGB 200)에 비하여 자극 영역의 밝기(RGB 255)가 더 밝았다. 둘째, 격자 자극의 좌/우 방위

차이를 10도에서 20도로 넓혀, 좌측 반응을 위한 자극은 100도, 우측 반응을 위한 자극은 80도로 구성하였다.

배경의 상 흐림은 표준, 최대, 대응의 세 조건으로 조작하였다. 표준 조건은 배경에 상 흐림이 없는 조건으로, 통제 조건으로 사용되었다. 최대 상 흐림 조건은 자극이 움직임과 동시에 배경에 그 자극이 움직일 최대 깊이 시차에 대응하는 상 흐림을 제시하는 것으로, 실험 1과 같은 방식으로 상 흐림을 제시하였다. 대응 조건은 표적 자극의 시차가 변화함에 따라 배경의 상 흐림이 그에 대응하여 변화하였다.

3. 절차

참가자는 실험에 대한 전반적인 안내를 받고 나서 실제 동작하는 자극 예시를 관찰하며 자극 구성과 과제 수행 방법에 대해 다시 한 번 안내받았다. 그 후 참가자들은 교차 및 비교차 시차 조건에 대하여 각각 30회씩 총 60 시행의 훈련과제 수행을 요청받았다. 이 과제의 자극은 제시되는 순간부터 격자가 표시되었다. 두 시차 조건 사이에서 피로 또는 불편감이 전이되는 것을 방지하기 위하여 한 시차 조건이 끝나고 나서 참가자들에게 최소 3분 이상의 휴식 시간

이 주어졌다. 시차 조건의 순서는 참가자 간 역균형법을 사용하여 무선적으로 제시하였다.

훈련과제는 항상 같은 시차부호를 가지는 자극을 연속하여 30 시행씩 제시하였으며, 표적자극의 응답 방향은 좌/우 각각 50%씩 무선적으로 제시되었다. 배경은 항상 상 흐림 없는 통제 조건이었다. 자극 제시 전, 높이와 너비가 3도이고 굽기가 2분인 붉은 십자 고정자극을 500 ms 동안 화면 중앙에 제시하고, 이 자극이 사라질 때 표적 자극이 제시되었다. 참가자들은 격자가 수평보다 높은 쪽 방향이 오른쪽이면 /키를, 왼쪽이면 z키를 눌러 응답하도록 요청받았다. 참가자들은 이전 시행 수행 성공 여부를 즉시 피드백 받았는데, 다음 고정 십자 자극 색이 녹색이면 성공, 붉은 색이면 실패였다. 각 시차 조건에서 70% 이상의 성공률을 보인 경우에만 본 실험을 수행할 수 있었다. 교차 조건과 비교차 조건의 수행은 각각 따로 판정하였다. 예를 들어 어떤 참가자가 교차조건은 통과하고 비교차 조건은 통과하지 못하였다면 이어지는 실험에서 교차 세션만 수행하도록 요청받았다.

실험 과제의 단일 시행(single trial) 절차는 다음과 같다(그림 6). 실험 자극은 참가자가 추적 눈 운동을 유지하는

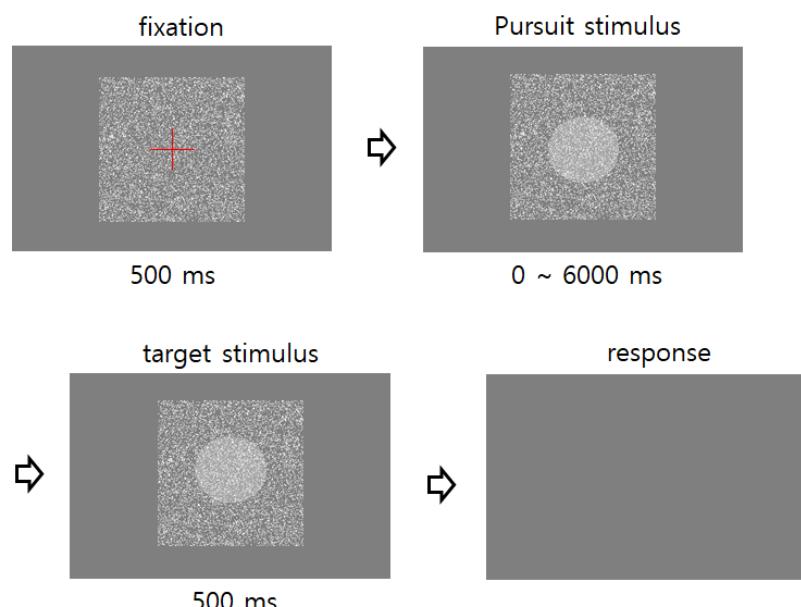


그림 6. 실험 2 단일 시행 절차
Fig. 6. A sequence of single trial in experiment 2

능력을 측정하기 위하여 자극이 시차가 없는 화면상에서 특정 깊이 수준까지 움직이도록 구성하였는데(추적 자극), 그 범위는 $0 \sim \pm 6$ 도였다. 이 자극은 초당 1도씩 움직였으며, 따라서 추적 자극을 표적 자극 없이 추적해야 하는 시간은 최대 6000 ms였다. 자극이 주어진 추적 시차까지 운동하면 표적 자극인 격자가 제시되었으며 500ms 동안 추적자극과 동일한 속도로 운동하다 사라졌다. 예를 들어 추적 시차가 없는 자극은 제시되는 순간부터 표적 자극이 나타나고 그 자극은 500ms가 지난 다음 사라졌다. 그러나 추적 시차가 6도인 자극은 표적 자극 없이 교차 또는 비교차시차 6도까지 운동하고, 그 이후 격자가 제시된 상태로 500ms동안 더 운동하였다. 이 자극의 경우 추적 눈 운동 요구 시간 6000ms였고, 총 자극 제시 및 운동시간 6500ms였다.

실험 2는 자극이 움직이는 깊이 방향 두 조건과 배경 상 흐림 세 조건을 교차하여 총 여섯 블록을 구성하였다. 각 블록은 50회의 시행으로 이루어졌으며, 각 블록 사이에 참가자들에게 최소 3분 이상의 휴식시간이 주어졌다. 따라서 총 시행 수는 300회였다. 실험 2 역시 2AFC 과제를 사용하였지만 양안 융합 수준 측정은 적응적 측정법(adaptive running fit method)인 BestPEST^[17]를 사용하였다. 이 측정법은 상대적으로 적은 시행으로 양안 융합 수준을 측정할 수 있어 참가자들의 수행에 피로감이 미치는 영향을 최소화하기 위하여 사용되었다.

4. 결과

운동자극의 양안 시차 방향과 주변 시야 상 흐림 종류에 따른 양안융합 실패 수준을 그림 7에 제시하였다. 참가자들은 표적 자극이 비교차 시차를 가지는 경우에 한하여 배경 상 흐림이 제시되었을 때 그렇지 않을 때보다 더 큰 깊이에서도 자극의 격자를 판별할 수 있었다. 이런 경향성은 비교차 시차 조건의 배경 상 흐림 조건에 따른 응답률을 반복측정 변량분석으로 검증한 결과 통계적으로 유의미하게 나타났다($F(2, 14) = 7.63, p < .01$). 그러나 상 흐림 종류에 따른 차이는 나타나지 않았다.

교차 시차 조건의 경우 주변 시야의 상 흐림 조건에 따른 방위판별 과제의 수행에 차이가 없었다. 이런 차이는 교차 시차가 비교차시차보다 넓은 양안 융합 범위를 가지기 때문으로 추정된다^[18]. 이는 시차 조건에 따라 과제 난이도를 다르게 만들었을 것이다. 비교차 시차 조건은 바닥 효과를 보인 조건이 없었으나, 교차시차 조건에서 분석에 사용된 참가자들의 자료 중 중 세 건의 자료가 바닥 효과를 보였다. 이는 교차시차의 난이도가 비교차시차보다 높다는 것을 시사한다. 반면에 천정효과를 보여 분석에서 배제된 참가자의 자료는 교차 시차 및 비교차 시차에서 각각 3건 및 5건이었다. 종합하면 비교차시차 조건에 비하여 교차 시차 조건이 상대적으로 과제의 난이도가 높아 상 흐림 조건의 효

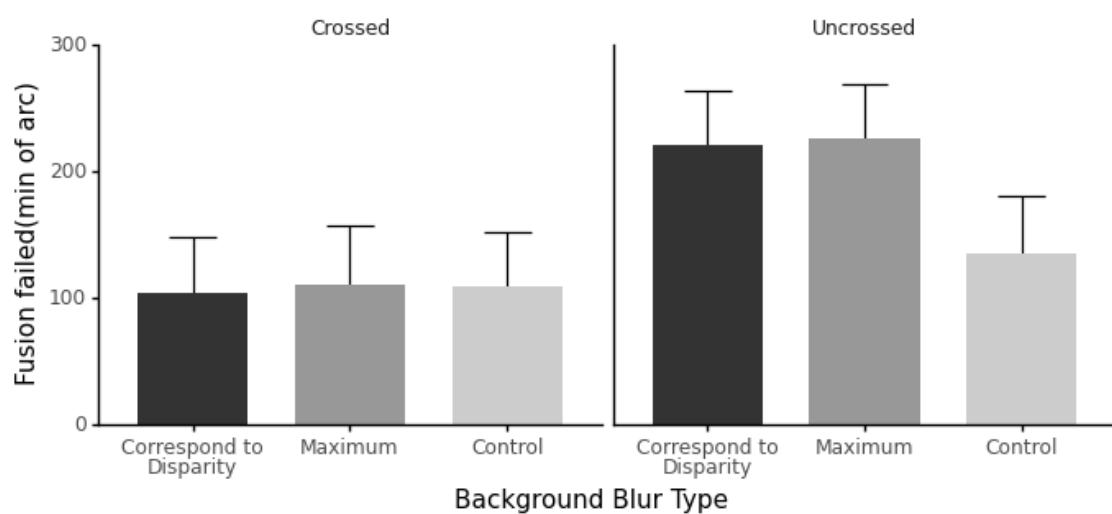


그림 7. 운동자극의 양안 시차 변화에 따른 양안융합 실패율
 Fig. 7. Binocular failure rate as a function of moving stimuli's disparity change

과가 충분히 반영되지 않았을 가능성이 있다.

IV. 결 론

본 연구는 수렴-조절 불일치에 의하여 유발되는 양안융합 실패가 수렴-조절 불일치 상황에서 나타나는 조절성 수렴의 변화에 의하여 유발될 것이라는 가설을 검증하기 위하여 주변 시야(peripheral vision)에 제시된 조절단서인 상호림을 조작하고 그 결과가 양안융합에 미치는 영향을 관찰하였다. 실험 1은 조절성 수렴이 양안융합에 미치는 영향을 간접적으로 검증하기 위하여 조절 요구가 없는, 단속적인 양안 시차 변화만 가지는 자극을 제시하였을 때 주변 영역의 상호림에 의하여 주시자극의 양안융합 실패율이 감소하는지 여부를 관찰하였다. 그 결과 주변 시야의 상호림이 커질수록 교차 및 비교차 시차 조건에서 모두 양안융합 실패율이 감소하였다. 실험 2는 연속적으로 깊이가 변화하는 자극을 깊이 방향으로 추적할 때 주변 영역 상호림 조작이 양안융합 실패율에 미치는 영향을 관찰하였다. 그 결과 주변 시야 상호림은 추적 눈 운동이 비교차시차를 가질 때 양안융합 실패율이 감소하였으며, 상호림이 자극 운동 시작에 제시되거나 자극이 제시되는 동안 지속적으로 운동하는지 여부와 무관하게 동일한 수준의 양안융합 실패율 감소를 보였다.

본 연구의 결과는 표적 자극의 양안시차가 변화할 때 주변 시야에 상호림이 제시되면 양안융합이 안정적으로 유지될 수 있다는 것을 보였다. 이 경향성은 양안 시차가 단속적으로 변화할 때와 연속적으로 변화할 때 모두 관찰되었으며, 그 경향성은 시차 방향에 따라 달랐다. 실험 1의 단속적 시차 변화 조건에서는 비교차시차에 비하여 교차시차를 가지는 표적자극의 양안융합을 더 크게 촉진하였다. 그러나 연속적 시차 변화 조건에서는 주변 시야의 상호림 효과는 오직 표적자극이 비교차시차를 가질 때에만 관찰되었다. 또한 연속적 시차 변화 조건에서도 상호림의 효과는 눈운동을 시작하는 순간에 제시되는 것만 유효하였다. 이는 주시자극의 시차 변화 방식이나 방향과 무관하게 양안시차가 변화하는 순간 주변 시야 영역에 상호림을 제시하는 것으로 양안융합을 촉진할 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구의 결과는 응용적 관점에서 앞선 연구의 결과를 일반화하고 확장한다. 실험 1의 결과는 광학적 변화를 부분적으로 모사한 조절 단서가 양안융합을 촉진한다는 것을 보인 Maiello와 동료들의 연구 결과와 일치한다^[12]. 본 연구는 여기서 더 나아가 단안 단서를 통제하거나 제한한 상태에서 주변 시야 상호림 조작만으로 양안융합을 촉진시킬 수 있다는 것을 보였다. 실험 2는 실험 1의 결과를 확장하여 주변 시야 상호림의 효과를 깊이 방향으로 운동하는 자극에 적용시켰다. 이 자극은 양안시차가 단속적으로 변화하는 자극과 다르게 추적 눈 운동을 유발시키는데, 주변 시야 상호림은 이 자극의 양안융합 실패율 또한 감소시키는 것을 관찰할 수 있었다. 이 효과는 추적 눈 운동이 시작되는 순간 상호림이 제시될 때에 제한되는 것을 관찰하였다. 실험 2에서 주변 시야 상호림의 효과는 양안시차의 방향이 비교차시차일 때 관찰된다. 그 원인으로 추정할 수 있는 것은 교차시차가 비교차시차보다 넓은 융합 영역을 가지기 때문이^[18]다. 따라서 더 넓은 양안시차 범위를 사용하면 교차시차에서도 주변 시야 상호림의 양안융합 실패율 감소 효과를 관찰할 수 있을 것으로 추정된다.

또한 본 연구의 결과는 자연적인 상황과 상이한 조점 고정식 디스플레이 상황에서 조절성 수렴이 서로 다른 양상으로 조절에 영향을 미쳐 양안융합 실패를 유발할 가능성이 있음을 시사한다. 3D 디스플레이나 HMD VR에서 양안시차를 가지는 자극이 제시되는 경우 수렴 거리는 변화하지만 초점 거리는 그에 대응하지 않는다. 이 대상을 단일상으로 지각하려면 수렴 눈 운동이 요구되며, 그 과정에서 수렴-조절 불일치가 발생한다. 수렴 눈 운동은 주시자극에 대한 수렴반응과 조절 반응에 의하여 유발된 조절성 수렴에 의하여 일어나는데, 수렴-조절 불일치를 가지는 자극은 수렴반응만 유발시킬 뿐 조절반응을 유발시키지 않으며 따라서 이 자극에 의하여 유발되는 조절은 수렴반응에 의한 수렴성 조절이 주로 영향을 끼칠 것이고, 조절성 수렴은 수렴에 상대적으로 낮은 영향을 미치거나 영향을 거의 미치지 못할 가능성이 있다. 본 연구에서 발견한, 조절을 방향성 없이 조작하는 상호림 단서를 사용하였을 때 양안융합 수행이 향상되는 현상은 상호림이 조절반응을 유발하고 그것이 조절성 수렴을 촉진시켜 수렴-조절 불일치가 양안융합에 미치는 영향을 감쇄시켰음을 시사한다. 이는 조절

성 수렴의 효과가 수렴-조절 불일치를 가진 자극에서 양안 융합을 방해하는데 비하여 상 흐림이 제시된 자극에서 이러한 방해를 감쇄할 것이라는 것을 시사한다. 또한 본 연구에서 발견된 양안융합 촉진 효과는 양안 시차가 단속적으로 변화할 때 양안 시차의 방향과 무관하게 발견되었고, 양안 시차가 연속적으로 변화할 때 비교차 시차에 한정하여 발견되었다.

실험 1과 2의 비교차 시차 조건에서 발견된 주변 시야 상 흐림이 양안 융합 실패율 감소에 미치는 영향은 도약 눈 운동과 추적 눈 운동에 대한 주변시야 상 흐림의 효과가 일관적인 경향을 보인다. 이 결과는 수렴 눈 운동이 시작되는 시기에 나타나는 조절성 수렴의 영향을 변화시키는 것이 양안융합을 촉진시켰다고 해석할 수 있지만, 여전히 주시 대상의 깊이가 연속적으로 변화할 때와 단속적으로 변화할 때 양안융합이 서로 다른 방식으로 이루어질 가능성도 있다.

응용적인 관점에서는 VR 실감 증진에 대한 연구들은 트레드밀 사용^[19]이나 화면 크기 통제^[20]와 같이 하드웨어적 접근을 시도하는데 비하여 본 연구는 주변 시야 영역에 상 흐림 단서를 제공하는 방법으로 낮은 비용으로 양안융합을 촉진할 수 있음을 시사한다. 한편 본 연구에서는 양안 융합을 유발하는데 충분한 상 흐림의 크기가 단일한지, 또는 얼마나 큰 상 흐림이 필요한지, 그리고 시각 피로에 생체신호 측정^[21]을 수행하지 않았는데, 이 또한 응용적인 관점에서 유용한 연구 주제가 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] I. Rakkolainen, R. Raisamo, M. Turk, and T. Höllerer, "Field-of-view extension for VR viewers," In *Proceedings of the 21st International Academic Mindtrek Conference*, pp. 227-230, Sep. 2017.
 doi: <https://doi.org/10.1145/3131085.3131088>
- [2] S. Palmisano, R. S. Allison, M. M. Schira, and R. J. Barry, "Future challenges forvection research: definitions, functional significance, measures, and neural bases," *Frontiers in psychology*, Vol.6, No.193, Feb. 2015.
 doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00193>
- [3] R. Patterson, M. D. Winterbottom, and B. J. Pierce, "Perceptual issues in the use of head-mounted visual displays," *Human factors*, Vol.48, No.3, pp.555-573, Sep. 2006.
 doi: <https://doi.org/10.1518/001872006778606877>
- [4] J. T. Reason, and J. J. Brand, "Motion sickness," Academic Press, pp.83-101, 1975.
- [5] R. S. Kennedy, J. Drexler, and R. C. Kennedy, "Research in visually induced motion sickness," *Applied ergonomics*, Vol.41, No.4, pp.494-503, July 2010
 doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.11.006>
- [6] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks, "Vergence - accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue," *Journal of vision*, Vol.8, No.3, pp.1-33, March 2008. (accessed June 16, 2022).
 doi: <https://doi.org/10.1167/8.3.33>
- [7] "NYPD using VR to train for active shootings and real-life scenarios," *Eyewitness News ABC7NY*, <https://www.youtube.com/watch?v=VZyhQZSTIGQ> (accessed June 16, 2022)
- [8] H. C. O. Li, "Human Factor Research on the Measurement of Subjective Three Dimensional Fatigue," *Journal of Broadcast Engineering*, Vol.15, No.5, pp.607-616, Sep. 2010.
 doi: <https://doi.org/10.5909/JBE.2010.15.5.607>
- [9] P. Eykhoff, "System identification: Parameter and state estimation," London, UK, Wiley-Interscience, 1974
- [10] L. M. Smithline, "Accommodative response to blur," *Journal of the Optical Society of America*, Vol.64, No.11, pp.1512 - 1516, Nov. 1974.
 doi: <https://doi.org/10.1364/JOSA.64.001512>
- [11] S. A. Cholewiak, G. D. Love and M. S. Banks, "Creating correct blur and its effect on accommodation," *Journal of Vision*, Vol.18, No.9, Sep. 2018
 doi: <https://doi.org/10.1167/18.9.1> (Accessed June 16, 2022)
- [12] G. Maiello, M. Chessa, F. Solari, and P. J. Bex, "Simulated disparity and peripheral blur interact during binocular fusion." *Journal of Vision*, Vol.14, No.8, pp.1-13, July 2014. (Accessed June 16, 2022)
 doi: <https://doi.org/10.1167/14.8.13>
- [13] D.H. Brainard, "The Psychophysics Toolbox." *Spatial Vision*, Vol.10, pp.433-436, Jan. 1997
 doi: <https://doi.org/10.1163/156856897X00357>
- [14] D.G. Pelli. "The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies." *Spatial Vision*, Vol.10, pp.437-442, Jan. 1997
 doi: <https://doi.org/10.1163/156856897X00366>
- [15] M. Kleiner, D. Brainard, D. Pelli. "What's new in Psychtoolbox-3?" *PerceptionECVP Abstract Supplement*, Sep. 2007
- [16] B. Julesz, "Foundations of cyclopean perception," U. Chicago Press. 1971.
- [17] A. Pentland. "Maximum likelihood estimation: the best PEST," *Perception & psychophysics*, Vol. 28, No. 4, pp.377 - 379, July 1980.
 doi: <https://doi.org/10.3758/BF03204398>
- [18] Y. Y. Yeh, and L. D. Silverstein, "Limits of fusion and depth judgment in stereoscopic color displays," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol.32, No.1, pp.45 - 60, Feb. 1990.
 doi: <https://doi.org/10.1177/001872089003200104>

- [19] I. Choi, J. Park, S. Kim, H. C. O. Li. "Effect of Inconsistency Between Visually Perceived Walking Speed and Physically Perceived Walking Speed on VR Sickness in VR-Treadmill Walking." *Korean society for emotion and sensibility*, Vol.23, No.3. pp.79-90, Sep. 2020.
doi: <https://doi.org/10.14695/KJSOS.2020.23.3.79>
- [20] H. Kang, S. Kim, H. Lee, H Hong "Effect of and Factors for Screen Size on Fatigue and Cybersickness When Watching Virtual Reality Videos." *J Korean Ophthalmic Opt Soc*, Vol.26, No.4, pp.299-305,
- Dec. 2021.
doi: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2021.26.4.299>
- [21] A.D. Souchet, S. Philippe, D. Lourdeaux, L. Leroy, "Measuring visual fatigue and cognitive load via eye tracking while learning with virtual reality head-mounted displays: A review." *International Journal of Human - Computer Interaction*, Vol.38, No.9, pp.801-824. Sep. 2022.
doi: <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1976509>

저자 소개

박 종 진



- 2009년 : 광운대학교 산업심리학과 학사
- 2011년 : 광운대학교 산업심리학과 석사
- 2011년 ~ 2018년 : 광운대학교 산업심리학과 박사
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-9752-7268>
- 주관심분야 : 3D 휴먼팩터, 시지각

김 신 우



- 2003년 : 연세대학교 심리학과 학사
- 2007년 : New York University 심리학과 석사
- 2010년 : New York University 심리학과 박사
- 2010년 ~ 현재 : 광운대학교 산업심리학과 교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-9959-8599>
- 주관심분야 : 시선추적, 범주화, 인과관계, 개념학습, 추론, 사용성

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
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-4650-8718>
- 주관심분야 : 3D 휴먼팩터, 시지각