



The effect of reducing the refresh rate of a task-irrelevant window on the temporal and spatial resolution of a task-relevant window*

Yunsoo Yeo¹, Daun Jung², Cheongil Kim¹, Jeong Hyeon Park³, Jieun Cho¹,
Jeunghwan Choi¹, Sang Chul Chong^{1,4*}

¹Graduate Program in Cognitive Science, Yonsei University

²Department of Library and Information Science, Yonsei University

³Center for Cognitive Science, Yonsei University

⁴Department of Psychology, Yonsei University

With recent advances in display technology, there is a growing trend in using a large screen divided into multiple windows or connecting multiple displays to use them together. In such scenarios, the screen can be divided into task-relevant and task-irrelevant windows, allowing selective reduction of the refresh rate in the latter to enhance energy efficiency. However, whether the decrease in the refresh rate in the task-irrelevant window affects task performance in the task-relevant window remains unknown. Here, in two experiments, we adopted critical flicker-fusion frequency (CFF) measurement and image quality degradation detection tasks to investigate the impact of reducing the refresh rate of the task-irrelevant window on the temporal and spatial resolution in the task-relevant window. We found that the refresh rate reduction of the task-irrelevant window affected the temporal, but not the spatial resolution of the task-relevant window. These results suggest that the nature of the current task in the task-relevant window must be considered if the refresh rate in the task-irrelevant window is to be reduced in real-world display usage scenarios.

Keywords: split screen, temporal frequency, critical flicker-fusion frequency, attentional capture, distractor suppression

1차원고접수: 24.03.18; 수정본접수: 24.06.03; 최종게재결정: 24.06.12



Copyright: © 2024 The Korean Society for Cognitive and Biological Psychology. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided that the article is properly cited and the use is non-commercial.

우리는 화면을 통해 유용한 정보들에 쉽고 빠르게 접근할 수 있다. 예를 들어, 친구와 약속을 잡을 때, 식당으로 가는 길을 찾을 때, 지금 이 글과 같은 문서를 읽을 때처럼 다양한 상황에서 화면을 이용하여 쉽게 정보를 얻을 수 있다. 정보 전달 매체로서의 편리함과 효율성 때문에 화면은 인간의 삶

에서 필수적인 부분으로 자리 잡았지만, 화면 사용량이 증가하고 고성능의 화면 기기들이 등장함에 따라 전력 소비 문제 또한 부각되었다. 화면 기기의 과도한 전력 소비는 배터리 사용 시간을 감소시켜 사용자들의 불편을 야기할 뿐 아니라 자원 문제를 초래한다는 점을 고려할 때, 화면 기기의 전력

* 본 논문은 삼성디스플레이(주)의 지원을 받아 수행된 연구임

† 교신저자: 정상철, 연세대학교 인지과학협동과정 및 심리학과, (03722) 서울특별시 서대문구 연세로 50, E-mail: scchong@yonsei.ac.kr

소비량을 감소시키고 에너지 효율성을 개선해야 할 필요성이 있다.

이를 위한 한 가지 방법은 화면의 주사율을 감소시키는 것이다. 화면의 주사율이 높을수록 더 많은 전력을 소비하므로(Nixon et al., 2014; You et al., 2020), 화면 사용 환경에 따라 적응적으로 주사율을 조절해 전력 소비량을 감소시킬 수 있다. 이전 연구들은 화면의 내용에 따라 주사율을 가변적으로 조절하는 기법들을 소개한 바 있다(Bhowmik & Brennan, 2007; Kim et al., 2007; Kim et al., 2014). Kim 등(2007)은 사람들이 문서 작업을 할 때에는 동영상상을 볼 때와 달리 낮은 주사율에도 불편함을 덜 경험한다는 실험 결과를 토대로, 화면에 제시되는 정보의 주된 내용이 텍스트인지 이미지인지에 따라 서로 다른 주사율을 적용해 전력 소비량을 감소시켰다. 또한, Kim 등(2014)은 화면에서 프레임별로 얼마나 많은 정보가 변화하는지를 계산해 그에 맞춰 주사율을 조절하는 방법을 제안하였다. 구체적으로, 화면에 동일한 정보가 반복적으로 제시될 때는 주사율을 감소시켜도 정보의 손실이 최소화된다는 것을 보여 주었다.

위와 같은 이전 연구들은 하나의 화면에서 화면 전체의 주사율을 일괄적으로 조절하는 방식을 취했다. 하지만 최근 화면의 크기가 점점 커져감에 따라 한 화면을 여러 영역으로 분할해 사용하는 경우나, 여러 화면 기기들을 연결해 하나의 화면처럼 사용하는 경우가 증가하고 있다. 이러한 분할 화면 환경에서는 영역별로 화면의 주사율을 각각 조절할 수 있다. 예를 들어 한 영역에서는 동영상상이 재생되고 다른 영역에서는 동영상 댓글이 표시된다고 하면, 동영상상이 재생되는 영역에는 높은 주사율을 적용하는 반면 댓글이 표시되는 영역에는 보다 낮은 주사율을 적용할 수 있다.

이처럼 분할 화면 환경에서는 영역별로 서로 다른 내용이 제시될 수 있으므로, 화면은 현재 작업과 관련이 높은 과제 창과 그렇지 않은 비과제 창으로 구분할 수 있다. 예로 들었던 동영상 재생 환경의 경우 이용자가 동영상을 집중해서 시청하고 있다면 동영상상이 제시되는 영역은 과제 창, 댓글이 표시되는 영역은 비과제 창이 될 것이다. 우리가 화면의 모든 부분을 적극적으로 사용하지 않는다는 점을 고려하면(Iyer et al., 2003), 분할 화면 환경에서는 사용하지 않는 비과제 창의 주사율을 선택적으로 감소시키는 방안을 생각해볼 수 있다.

하지만 이때 발생할 수 있는 한 가지 문제는 주의를 주지 않는 비과제 창의 주사율 저하가 과제 창의 작업 수행에 영향을 끼칠 가능성이 있다는 점이다. 화면의 주사율이 점멸 시각 역치(critical fusion frequency) 아래로 떨어질 경우에

는 깜빡임을 경험하는 점멸(flickering) 현상이 나타나게 된다(Landis, 1954; Simonson & Brozek, 1952). 이러한 점멸 현상은 불편감과 피로를 유발할 뿐 아니라(Blehm et al., 2005), 현저성(saliency)으로 인해 주의를 상향적으로 포획한다(Itti, 2005; Waldner et al., 2014). 주사율 저하로 인해 비과제 창에서 깜빡임이 지각되면 비과제 창으로 주의를 포획되어 과제 창의 작업 수행을 방해할 수 있다.

특히, 우리의 주변시가 중심시보다 이러한 점멸 현상에 더 민감하다는 점을 고려하면(Hartmann et al., 1979; Raninen et al., 1991; Tyler & Hamer, 1993; Waldin et al., 2017), 과제 창과 달리 주로 주변시에 위치하게 되는 비과제 창에서는 통상적인 중심시의 점멸 지각 역치보다 높은 수준의 주사율에도 깜빡임이 경험될 수 있다. 실제로 Waldin 등(2017)은 중심시에서는 깜빡임을 유발하지 않는 시간 주파수의 자극이 주변시에 제시될 때에는 깜빡임을 유발해 사람들의 주의를 포획할 수 있음을 보였다. Waldin 등(2017)에서 참가자들은 깜빡이는 자극을 직접 응시할 때에는 깜빡임을 느끼지 못했지만 주변의 다른 곳을 응시할 때에는 깜빡이는 자극이 불편함을 유발했다고 보고하였다.

이처럼 비과제 창의 점멸에 주의를 포획될 가능성도 있지만, 비과제 창에서 점멸 현상이 발생하더라도 이를 억제함으로써 과제 수행에 대한 영향을 최소화할 가능성 또한 존재한다. 이전 연구들은 과제와 관련 없는(task-irrelevant) 현저한 방해자극에 대한 주의를 하향적으로 억제할 수 있다는 행동적, 신경학적 증거들을 제시하였다(Gaspar & McDonald, 2014; Gaspelin et al., 2015; Gaspelin & Luck, 2018; Geng, 2014; Sawaki & Luck, 2010). 이들 연구에 따르면 현재 과제와 관련된 주의 태세(attentional set)에 부합하지 않는 현저한 방해자극에 대한 처리는 억제될 수 있다. 따라서 과제와 관련 없는 비과제 창의 점멸에 대한 처리는 억제될 수 있으며, 특히 과제에서 주의를 주고 있는 특징들이 비과제 창의 점멸과 명확히 구분되는 경우 과제 창의 작업 수행은 방해받지 않을 가능성이 있다.

본 연구는 이와 같이 분할 화면 환경에서 비과제 창의 주사율이 감소할 때, 과제 창의 작업 수행이 영향을 받는지 검증하고자 하였다. 본 연구에서는 비과제 창의 밝기 변화 주기(시간 주파수)를 조작하여 주사율 변화를 구현하였다. 구체적으로, 과제 창과 비과제 창이 인접해 있는 분할 화면 환경에서 비과제 창의 밝기 변화 시간 주파수를 낮춤으로써 주사율을 감소를 구현하고, 이에 따른 과제 창의 작업 수행 능력 변화를 측정하였다. 실험 1에서는 과제 창의 시간적 해상도에 대한 비과제 창의 주사율 영향을 검증하기 위해 과제 창

에서 점멸 지각 역치 측정 과제(Eisen-Enosh et al., 2017)를 진행하였다. 참가자들은 과제 창에 차례로 제시되는 서로 다른 시간 주파수의 두 자극들 중 어느 자극에서 점멸이 지각되었는지 응답하는 과제를 수행하였고, 이를 통해 얻어진 참가자들의 점멸 지각 역치가 비과제 창의 주사율 조건에 따라 변화하는지를 검증하였다. 실험 2에서는 과제 창의 공간적 해상도에 대한 비과제 창의 주사율 영향을 검증하기 위해 과제 창에서 동영상의 화질 저하 탐지 과제를 진행하였다. 참가자들은 과제 창에 제시된 동영상에서 화질 저하가 감지될 때마다 이를 보고하는 과제를 수행하였고, 화질 저하 탐지 정확률이 비과제 창의 주사율에 따라 변화하는지 검증하였다.

실험 1

방 법

참가자

실험 1에는 총 20명의 참가자(남성 6명, 19세-32세, 평균: 24.55세, 표준편차: 3.91세)가 참가하였다. 실험의 참가자들은 연세대학교 온라인 커뮤니티를 통해 모집되었으며, 나안 혹은 교정시력 0.8 이상이였다. 참가자들은 실험의 구체적인 가설을 알지 못했으며, 실험 전 참가 동의서에 서명하였다. 참가자들은 실험 참여 보상으로 현금 12,000원을 지급받았다. 모든 연구 절차는 연세대학교 생명윤리위원회(IRB)의 승인을 받아 수행되었다.

기구

실험 자극은 24인치 ROG PG259QN모니터에 제시되었으며, 모니터의 해상도는 1920 × 1080 픽셀, 주사율은 360 Hz이었다. 외부 빛이 차단된 암실에서 실험이 진행되었고, 참가자들은 이마-턱 받침대에 머리를 고정된 채 실험에 참가하였다. 실험 프로그램은 MATLAB(The Mathworks, Inc., Natick, MA, USA)에서 Psychophysics Toolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997)를 사용하여 제작되었다.

자극

실험 1에서는 과제 창과 비과제 창을 구분하여 제시한 다음, 비과제 창의 시간 주파수 변화가 과제 창의 점멸 지각 역치에 미치는 영향을 검증하였다(Figure 1). 비과제 창의 시간 주파수 조건들은 기존 연구에서 보고된 점멸 지각 역치(Eisen-Enosh et al., 2017)를 중심으로, 디스플레이에 통상

적으로 채택되는 높은 시간 주파수부터 점멸 지각 역치 아래의 낮은 시간 주파수까지 모두 포함하기 위하여 다섯 가지 수준(90, 60, 45, 30, 20 Hz)으로 설정하였다. 이때, 시간 주파수는 흰색과 검은색을 방형파(Square wave) 형태로 번갈아 제시함으로써 구현되었다. Figure 1B의 위는 180 Hz, 그리고 아래는 90 Hz로 시간 주파수를 구현한 예시이다. 과제 창과 비과제 창의 크기는 각각 4° × 4° 였다. 과제 창은 화면 중앙에 제시되었으며, 비과제 창은 과제 창 바로 아래에 인접하여 제시되었다. 과제 창의 평균 밝기는 10 cd/m²였으며, 비과제 창의 평균 밝기는 과제 창과 명확히 구분되도록 하기 위하여 11 cd/m²로 설정되었다. 과제 창에 순차적으로 제시되는 두 자극 중 한 자극은 기준 자극으로서 고정적으로 90 Hz로 제시되었으며, 기준 자극의 앞이나 뒤에 제시되는 다른 한 자극의 시간 주파수는 참가자의 과제 수행 수준에 따라 계단법(staircase)을 사용하여 조절되었다(Kingdom & Prins, 2016).

절차

실험 1의 절차는 Figure 1A와 같다. 참가자들은 과제 창에 연이어 제시된 두 자극 중 어떤 자극에서 점멸이 지각되었는지 응답하는 과제를 수행하였다(two-interval forced choice, 2-IFC). 시행이 시작되면 응시점이 1 s 동안 제시된 뒤, 첫 번째 자극이 1 s 동안 제시되었다. 이어서 다시 응시점이 1 s 동안 제시된 뒤, 두 번째 자극이 1 s 동안 제시되었다. 참가자들은 두 자극이 모두 제시된 후 첫 번째 자극에서 점멸이 지각되었다면 숫자 '1' 키를, 두 번째 자극에서 점멸이 지각되었다면 숫자 '2' 키를 눌러 응답하였다. 실험은 약 60분 동안 진행되었다. 본 실험에서 응답에 대한 피드백은 주어지지 않았으며, 응답 시간에 제한은 없었다.

비과제 창의 시간 주파수가 각각 90, 60, 45, 30, 20 Hz인 조건에서 과제 창의 점멸 지각 역치를 측정하였으며, 5개의 시간 주파수 조건에 따라 총 5개의 구획으로 나뉘어 실험이 진행되었다. 이때 구획의 순서는 참가자별로 무작위로 정해졌다. 각 시간 주파수 조건의 점멸 지각 역치는 기준 자극이 아닌 자극에 대해 교차 시행한 두 계단법에서 산출된 역치들을 평균 낸 역치였다. 두 계단법의 시작 지점은 서로 달랐는데 하나는 22.5 Hz, 다른 하나는 60 Hz이었다. 이때 1-up-3-down 규칙을 사용하여 응답이 틀리면 자극의 시간 주파수를 낮췄고, 3번 연속으로 응답이 맞으면 자극의 시간 주파수를 높였다. 시간 주파수의 전환이 8회 발생하면 구획은 종료되었으며, 마지막 4개의 전환점 값을 평균 내어 각 계단법에 대한 역치를 계산하였다.

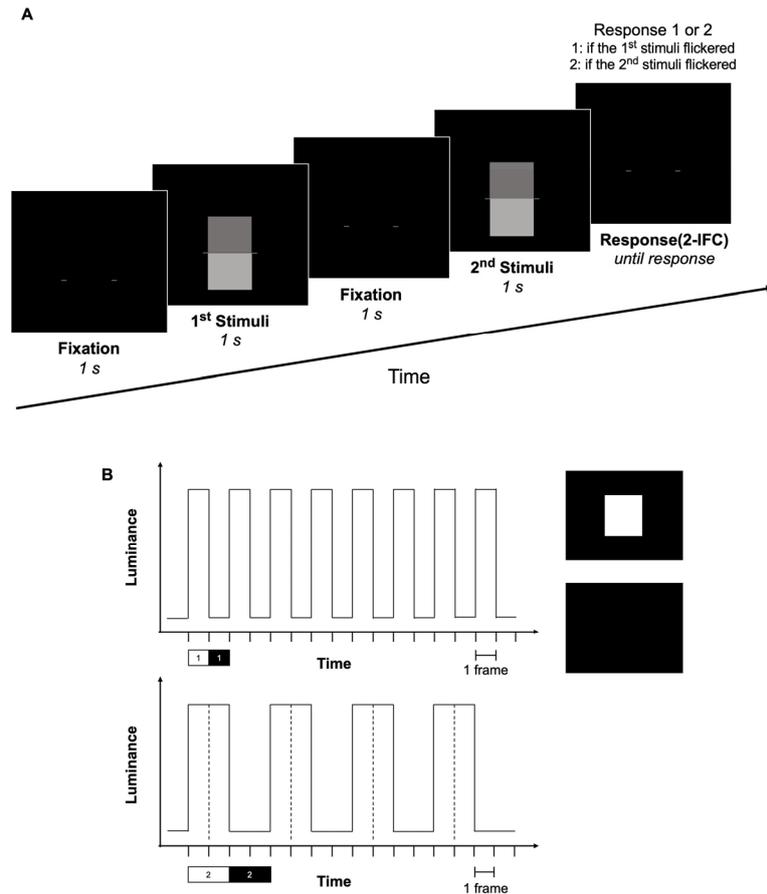


Figure 1. Experimental procedure of Experiment 1. (A) Example trial of measuring critical flicker-fusion frequency (CFF). Participants responded whether they perceived flickering of the task-relevant window in the 1st stimuli or in the 2nd stimuli, (B) Temporal frequency of luminance variations in a square wave form. Top-part of B indicates 180 Hz and bottom-part of B indicates 90 Hz.

분석

실험 1의 분석은 JASP(Version 0.18.1; JASP Team, 2023)를 이용하여 베이지안 일원 반복측정 분산분석(Bayesian one-way repeated measures ANOVA)을 수행하였다. 베이지안 분석은 대립가설뿐 아니라 영가설을 지지하는 증거 또한 얻을 수 있으며, 수집된 데이터가 대립가설이나 영가설을 지지하는 정도를 정량적으로 나타낼 수 있다는 장점이 있다 (Lee & Wagenmakers, 2014). 모든 분석은 기본 설정된 사전 확률(default prior)을 이용하였으며, 관찰된 데이터가 영가설(H₀)에 비해 대립가설(H₁)을 얼마나 지지하는지 베이즈 요인(Bayes Factor; BF₁₀)을 계산해 검증하였다. BF에 대한 일반적인 해석에 따라 BF₁₀이 1부터 3 사이, 3부터 10 사이, 10 이상일 때 각각 대립가설에 대한 일화적 증거, 중간 수준의 증거, 강한 증거를 제공한다고 해석하였다(Jeffreys, 1998; Lee & Wagenmakers, 2014). 반대로 BF₁₀이 0.33부터 1 사이, 0.1부터 0.33 사이, 0.1 이하일 때 각각 영가설에 대한 일화적 증거, 중간 수준의 증거, 강한 증거를 제공한다고 해석하였다.

결과 및 논의

실험 1의 결과는 Figure 2에 제시하였다. 비과제 창의 시간 주파수가 90, 60, 45, 30, 20 Hz일 때 과제 창의 평균 점멸 지각 역치는 각각 48.04, 47.99, 44.22, 45.66, 43.74 Hz였다. 이때 비과제 창의 시간 주파수 조건에 따라 과제 창의 점멸 지각 역치에 차이가 있는지 검증하기 위하여 비과제 창의 시간 주파수 조건(90, 60, 45, 30, 20 Hz)을 참가자 내 요인으로 베이지안 반복측정 분산분석을 진행하였다. 그 결과, 비과제 창의 시간 주파수 조건에 따라 과제 창의 점멸 지각 역치에 차이가 존재한다는 중간 수준의 증거를 발견하였다(BF₁₀ = 3.15). 이후 분산분석 결과를 바탕으로 개별 조건들 간의 차이를 알아보기 위해 조건 간 사후 분석을 진행하였다. 사후 분석 결과, 45 Hz 조건에서 90 Hz 조건보다 과제 창의 점멸 지각 역치가 낮다는 중간 수준의 증거를 발견하였다(BF₁₀ = 4.32). 반면, 90 Hz 조건과 60 Hz 조건 간 (BF₁₀ = 0.23), 그리고 45 Hz 조건과 20 Hz 조건 간(BF₁₀ = 0.24)에는 과제 창의 점멸 지각 역치에 차이가 존재하지

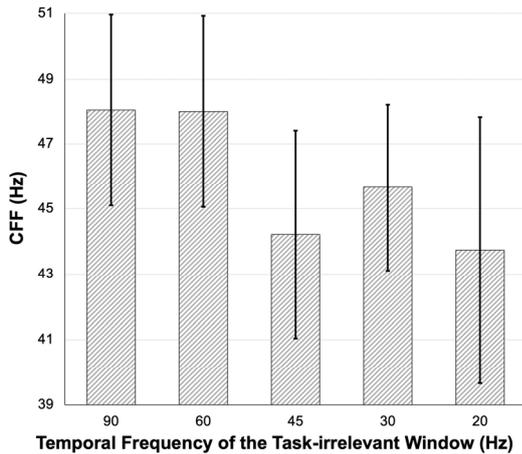


Figure 2. The impact of the temporal frequency of the task-irrelevant window on CFF of the task-relevant window. The graph depicts the average CFF of the task-relevant window by the temporal frequency of the task-irrelevant window ($n = 20$). Error bars indicate 95% credible intervals.

않는다는 중간 수준의 증거를 발견하였다. 이 외의 조건 간 비교들에서는 일화적 수준의 증거들만이 발견되었다($0.33 < BF_{10} < 3$).

실험 1의 결과는 비과제 창의 시간 주파수가 감소함에 따라 과제 창의 점멸 지각 역치가 낮아질 수 있음을 보여준다. 과제 창의 시간 주파수가 동일하더라도, 비과제 창의 시간 주파수가 낮을 경우 과제 창에서 밝기가 빠르게 교차하면서 변화하는 자극 대신 밝기가 중간 수준으로 고정되어 변화하지 않는 자극이 지각될 수 있다. 이는 곧 비과제 창의 주사를 감소가 과제 창의 시간적 정보에 대한 민감도를 저하시킬 수 있음을 시사한다.

실험 2

방법

참가자

실험 2에는 총 15명의 참가자(남성 9명, 19세-26세, 평균: 22.33세, 표준편차: 2.09세)가 참가하였다. 실험의 참가자들은 연세대학교 온라인 커뮤니티를 통해 모집되었으며, 나안 혹은 교정시력 0.8 이상이였다. 참가자들은 실험의 구체적인 가설을 알지 못했으며, 실험 전 참가 동의서에 서명하였다. 참가자들은 실험 참여 보상으로 현금 12,000원을 지급받았다. 모든 연구 절차는 연세대학교 생명윤리위원회(IRB)의 승인을 받아 수행되었다.

기구

실험 2에서 사용된 기구는 실험 1에서 사용된 기구와 동일하다. 실험 프로그램 또한 실험 1과 마찬가지로 MATLAB(The Mathworks, Inc., Natick, MA, USA)에서 Psychophysics Toolbox(Brainard, 1997; Pelli, 1997)를 사용하여 제작되었다.

자극

실험 2에서는 비과제 창의 시간 주파수 변화가 과제 창의 공간적 해상도에 미치는 영향을 검증하였다(Figure 3). 실험 1과 동일하게 비과제 창은 시간 주파수 조건에 따라 5 종류의 시간 주파수(90, 60, 45, 30, 20 Hz)로 제시되었다. 과제 창과 비과제 창의 크기는 각각 $11.2^{\circ} \times 6.1^{\circ}$ 였고, 과제 창은 화면 중앙에, 비과제 창은 과제 창 바로 아래에 인접하여 제시되었다. 과제 창에 제시할 자극으로 YouTube에 올라온 다양한 분야(예능, 애니메이션, 스포츠, 다큐멘터리, 광고 등)의 영상들 중 원본 길이 5분 이상, 원본 화질 480 p 이상인 영상 30개를 선정하였다. 선정한 영상은 640×480 크기의 화질과 30 fps로 다운로드하고, 5분 길이로 편집하였다. 이때 페이드인(fade-in), 페이드아웃(fade-out)과 같이 원본 영상 내에서 화질 조정이 나타난 부분은 Adobe Premiere Pro 프로그램을 이용하여 잘라내고 나머지 부분을 이어 붙였다. 과제 창의 영상 화질 저하는 원본 영상을 고속 푸리에 변환(fast fourier transform) 시킨 후 가우시안 필터 함수(1)를 적용하고, 이를 다시 고속 푸리에 역변환(inverse fast fourier transform)시킴으로써 구현되었다. 가우시안 필터 함수(1)에서 x 는 가로축, x_c 는 x 축의 중심, y 는 세로축, y_c 는 y 축의 중심을 의미한다. 과제 수행 난이도는 쉬운 조건과 어려운 조건 두 가지였으며, 각 과제 수행 난이도 조건에서 화질 저하 정도는 r 값을 통해 조절되었고, r 값은 각 조건에서 고정되었다. 쉬운 조건은 $r=90$, 어려운 조건은 $r=110$ 이었으며 r 값이 작을수록 화질이 더 저하되었다.

$$Filter Function = e^{-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2r^2}} \quad (1)$$

절차

실험 2의 절차는 Figure 3과 같다. 시행 시작 전, 영상 자극을 불러오는 동안 대기 화면이 제시되었다. 이후 지시 화면에서는 참가자들에게 과제 수행 방법을 안내하면서, 숫자 '0' 키를 눌러 시행을 시작하도록 지시하였다. 참가자들은 각 시행에서 과제 창의 영상을 보며 화질 저하가 느껴질 때마다

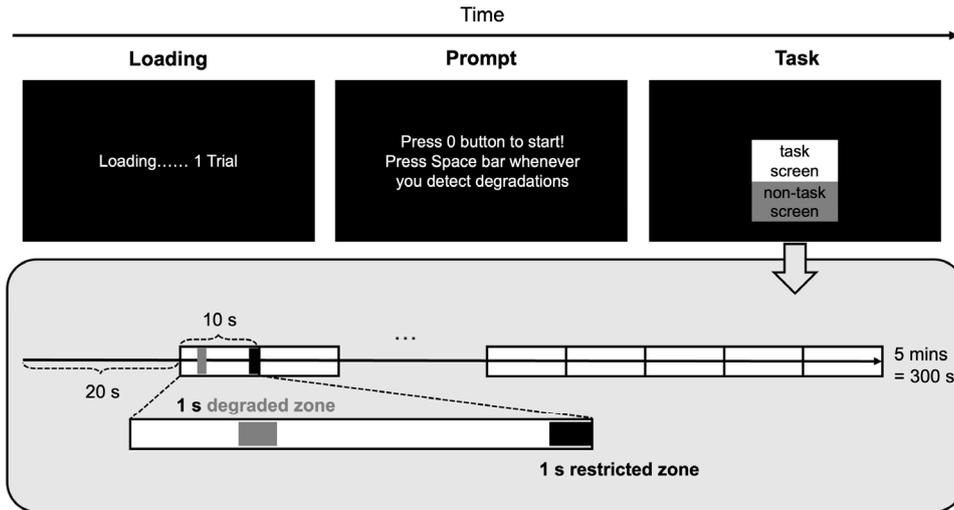


Figure 3. Procedure of Experiment 2. Example trial of detecting image quality degradation.

‘스페이스 바’ 키를 눌러 응답하는 과제를 수행하였다.

Figure 3의 아래 부분은 참가자들에게 제시된 화질 저하를 도식화한 것이다. 과제 창에서 제시되는 영상(5 min)의 처음 20 s 구간에서는 화질이 저하되지 않았다. 이후 280 s를 10 s 단위로 구분하여 총 28개의 화질 저하 구간을 형성한 뒤, 각 구간 내에서 무작위로 1 s 동안 화질을 저하시켰다. 이때 화질 저하가 연속적으로 일어나는 것을 방지하기 위해 구간의 마지막 1 s에서는 화질 저하가 발생하지 않았다. 28구간 중 14구간에는 쉬운 조건, 14구간에는 어려운 조건의 화질 저하가 무선적으로 배정되었다. 단, 동일한 난이도 조건이 세 번 이상 연속으로 등장하지는 않았다. 화질은 처음 200 ms 동안 순차적으로 저하되었다가, 마지막 200 ms 동안 순차적으로 원본 화질로 돌아갔다. 즉, 1 s의 화질 저하 구간 내에서 600 ms 동안 설정한 화질 저하 상태가 유지되었다. 각 시행이 끝나면 대기 화면과 지시 화면이 이어서 제시되었고 다음 시행이 곧바로 진행되었다. 참가자들은 화질 저하가 각 시행에서 몇 번 발생하는지 알지 못한 채 과제를 수행하였다. 실험 소요 시간은 약 60분이었다.

각 참가자들은 서로 다른 영상들에 대해 총 10시행의 화질 저하 탐지 과제를 수행하였다. 각 시간 주파수 조건들은 앞 절반의 5시행 내에서 한 번, 뒤 절반의 5시행 내에서 한번씩 제시되었으며, 각 조건들의 제시 순서는 앞 절반과 뒤 절반 시행들 내에서 무선화되었다. 30개의 영상 자극은 5개의 비과제 창 시간 주파수 조건에 따라 총 150가지의 영상-시간 주파수 조합을 구성하였고, 한 참가자 내에서 동일한 영상 자극이 반복되지 않고 각 비과제 창 시간 주파수 조건당 2개의 영상 자극이 제시되도록 각 참가자당 10가지 조합이 할당되었다.

분석

분석은 실험 1과 동일한 방식으로 진행하였다. 모든 분석은 기본 설정된 사전 확률(default prior)을 이용하였으며, 관찰된 데이터가 영가설(H_0)에 비해 대립가설(H_1)을 얼마나 지지하는지 베이지안 요인(Bayes Factor; BF_{10})을 계산해 검증하였다. 실험 2에서는 베이지안 이원 반복측정 분산분석(Bayesian two-way repeated measures ANOVA)을 이용하였다. 주효과와 상호작용 효과에 대한 BF 를 구하기 위해 특정 효과를 포함하는 모든 모델들을 평균하는 “analysis of effects” 방법(BF_{incl})을 이용하였으며, 이때 특정 효과를 포함하는 모델들과 해당 효과만을 제거한 동등한 모델들을 비교하는 “across matched models” 방식을 적용하였다.

결과 및 논의

실험 2에서는 참가자들의 응답을 적중과 오경보로 구분하여 화질 저하 탐지 과제 수행을 분석하였다. 화질 저하 탐지 후 응답까지 걸리는 시간을 고려하고, 화질 저하 이후 다시 화질이 원래 수준으로 되돌아올 때 화질 저하를 인지하는 경우를 포함하기 위하여 화질 저하 제시 시점부터 2초 안에 응답이 있으면 적중으로 처리하였다. 이 외의 시점에 응답했을 경우 오경보로 처리하였다. 적중과 오경보를 포함하여 한 참가자당 한 시행에서의 평균 응답 횟수는 11.21회($SD = 3.94$)였으며, 그 중 쉬운 조건에서의 적중에 해당하는 평균 응답 횟수는 5.47회($SD = 2.50$), 어려운 조건에서의 적중에 해당하는 평균 응답 횟수는 2.56회($SD = 1.79$), 오경보에 해당하는 평균 응답 횟수는 3.19회($SD = 2.38$)였다. 비과제 창 시간 주파수 조건별 오경보의 평균 빈도수는 각각 90 Hz일

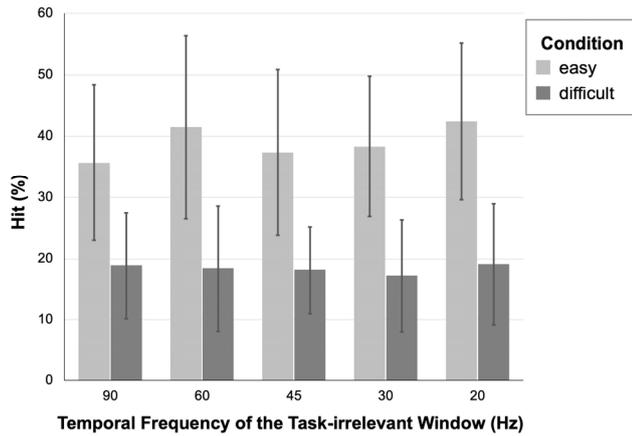


Figure 4. The impact of the temporal frequency of the task-irrelevant window on the image quality degradation detection task performance of the task-relevant window. The graph depicts the hit rate of image quality degradation detection task by the temporal frequency of the task-irrelevant window. Pale gray indicates the average hit rate for the easy condition, while dark gray indicates the average hit rate for the difficult condition ($n = 15$). Error bars indicate 95% credible intervals.

때 3.17회, 60 Hz일 때 3.47회, 45 Hz일 때 2.9회, 30 Hz일 때 3회, 20 Hz일 때 3.4회로, 오경보는 가능한 총 빈도수를 계산할 수 없고 난이도 조건별로 계산할 수 없어서 통계 분석 없이 시간 주파수 조건에 따른 평균 빈도수만 보고 하였다. 직중률 분석 결과는 Figure 4에 제시하였다. 비과제 창 시간 주파수 조건(90, 60, 45, 30, 20 Hz)과 과제 수행 난이도(쉬운 조건 대 어려운 조건)에 대하여 베이지안 반복 측정 분산분석을 실시한 결과, 과제 수행 난이도와 비과제 창의 시간 주파수 변화 사이에는 상호작용이 없다는 중간 수준의 증거를 발견하였다($BF_{incl} = 0.15$). 또한 과제 수행 난이도가 영상의 화질 저하 탐지 직중률에 영향을 준다는 강한 수준의 증거를 발견하였지만($BF_{incl} = 70294.09$), 비과제 창의 시간 주파수 변화는 영상의 화질 저하 탐지 직중률에 영향을 주지 않는다는 중간 수준의 증거를 발견하였다($BF_{incl} = 0.19$).

실험 2의 결과는 비과제 창의 시간 주파수 변화가 과제 창의 화질 저하 탐지 과제 수행에는 영향을 미치지 않았음을 나타낸다. 쉬운 조건과 어려운 조건 간의 수행 차이가 발견되었기 때문에, 비과제 창의 시간 주파수 변화에 따른 효과 부재가 과제 난이도의 천장 효과나 바닥 효과로 인해 발생한 것으로 보기는 어렵다. 이러한 결과는 비과제 창의 주사율 감소가 과제 창의 공간적 해상도에 미치는 영향이 제한적일 수 있음을 시사한다.

종합논의

본 연구는 화면을 과제 창과 비과제 창으로 나누어 사용하는 분할 화면 환경에서 비과제 창의 주사율을 감소시키는 것이 과제 창의 작업 수행에 부정적인 영향을 미치는지 검증하였다. 실험 1에서는 비과제 창의 주사율 감소가 과제 창의 시간적 해상도에 영향을 미치는지 검증하기 위해서, 비과제 창의 시간 주파수에 따라 과제 창의 점멸 지각 역치가 변화되는지 관찰하였다. 실험 결과 비과제 창의 주사율이 감소함에 따라 과제 창의 점멸 지각 역치가 낮아짐을 관찰하였으며, 이는 비과제 창의 주사율 감소가 과제 창에서 주사율 변화와 같은 시간적 정보에 대한 탐지 민감도를 저하시킬 수 있음을 보여준다. 실험 2에서는 비과제 창의 주사율 감소가 과제 창의 공간적 해상도에 영향을 미치는지 검증하기 위해서, 비과제 창의 시간 주파수에 따른 과제 창의 화질 저하 탐지 수행 변화를 관찰하였다. 실험 결과, 비과제 창의 주사율 감소가 과제 창에 제시되는 동영상의 화질 저하 탐지 수행에는 영향을 주지 않는다는 것을 발견하였다. 이는 비과제 창의 주사율 감소가 과제 창의 공간적 해상도에는 영향을 미치지 않음을 보여준다.

실험 1에서 과제 창의 점멸 지각 역치는 비과제 창의 시간 주파수가 60 Hz보다 낮아질 때, 즉 45 Hz부터 감소하는 경향성을 보였다. 이와 관련하여, Alais 등(2016)은 깜빡이는 자극이 어느 시간 주파수 이하로 제시될 때부터 주의를 포획하는지 실험한 결과, 60 Hz 이상으로 제시되는 자극은 주의를 포획하지 않고, 48 Hz 이하로 제시되는 자극은 주의를 포획한다는 것을 보여 주었다. 나아가 이들은 추가적인 실험에서 48 Hz 이하로 깜빡이는 자극에서는 점멸이 지각되지만 60 Hz 이상으로 깜빡이는 자극에서는 점멸이 지각되지 않았다는 사실을 통해, 깜빡이는 자극은 점멸이 지각될 때에만 주의를 포획할 수 있다는 결론을 내렸다. Alais 등(2016)의 연구 결과를 고려하면, 실험 1에서 과제 창의 점멸 지각 역치가 45 Hz부터 감소한 것은 45 Hz부터 비과제 창에서 점멸이 지각되어 주의를 포획하였기 때문일 수 있다.

그렇다면 비과제 창의 시간 주파수가 실험 2의 공간적 해상도에는 영향을 미치지 않고 실험 1의 시간적 해상도에만 영향을 미친 이유는 무엇일까? 이는 비과제 창의 시간 주파수 저하로 인한 점멸이 실험 2에서와 달리 실험 1에서는 과제와 관련성이 높았기 때문일 수 있다. 이전 연구들은 방해 자극이 주변시에 제시될 때, 방해 자극의 과제 관련성에 따라 방해 정도가 조절된다는 것을 밝힌 바 있다(Folk et al., 1992; Lichtenstein-Vidne et al., 2007). 실험 1에서 비과제

창의 자극은 과제 창의 자극과 유사한 형태를 가지고 있었을 뿐 아니라, 비과제 창에서 점멸이 지각될 경우 이는 과제 수행을 위해 필요한 시간적 해상도와 관련된 시간적 정보를 지니고 있었다. 참가자들은 과제 창의 자극에서 점멸을 탐지하기 위해 시간적 정보에 주의를 주었고, 이때 비과제 창의 점멸 현상은 참가자들의 주의 태세(attentional set)에 부합하여 방해 자극으로 쉽게 억제되지 않은 채 주의를 포획했을 수 있다(Eimer & Kiss, 2008; Gaspelin et al., 2015; Gaspelin & Luck, 2018). 이와 달리 실험 2의 참가자들은 화질이라는 과제 창의 공간적 정보에 주의를 기울이고 있었기 때문에 상대적으로 쉽게 비과제 창의 점멸 현상을 방해 자극으로 억제했을 수 있다.

또한 실험 2의 화질 저하 탐지 과제가 보다 초점화된 주의 모드를 요구하였기 때문에 과제 창 바깥의 비과제 창에 의한 방해 효과가 감소하였을 가능성이 있다(Treisman, 2006). 구체적으로, 실험 2에서 참가자들은 화질 저하를 탐지하기 위해 과제 창 영상 내에서 사물들과 같은 세부 요소들에 주의를 기울였을 수 있다. 이처럼 참가자들이 영상 전체에 주의를 분산시키기보다 영상 내의 특정 요소들에 주의를 집중했다면, 비과제 창의 주의 범위 내에 포함되지 않아 과제 창의 과제 수행에 영향을 미치지 어려웠을 것이다.

위 두 설명들은 상호 배타적이지 않으며, 두 가지 주의 기전이 실험 1과 2의 결과 차이를 함께 유발했을 수 있다. 즉, 비과제 창의 주사율 저하로 인해 점멸이 지각되고 이것이 성공적으로 억제되지 않을 때 과제 창의 작업 수행에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 지각된 점멸 자극이 성공적으로 억제되는지의 여부는 과제 창에서 요구하는 주의 태세와 주의 모드에 의해 달라질 수 있다. 이러한 결과는 지각 처리 과정에서 비과제 창의 어떻게 처리되는지에 대한 단서를 제공할 뿐 아니라, 실제 디스플레이 사용 환경에서 어떠한 조건 하에 비과제 창의 주사율을 줄여야 하는지에 대한 함의점을 내포하고 있다. 구체적으로, 본 연구 결과는 과제 창의 지각된 해상도를 손상시키지 않기 위해서 사람들이 과제 창의 어떤 정보에 주의를 기울이고 있는지, 또 현재 과제에서 어떤 주의 모드를 사용하고 있는지를 고려하여 비과제 창의 주사율을 줄여야 함을 시사한다. 예를 들어, 사용자가 분할 화면 환경의 과제 창에서 빠른 화면 전환이 일어나며 그것이 높은 정보를 지니는 게임을 플레이하는 경우, 비과제 창의 주사율 저하는 과제 창 내에서의 정보 획득을 방해할 수 있다. 특히, 과제 창 내에서 깜빡이는 경고 신호와 같이 시간적 주파수를 가지는 자극을 쉽게 발견하지 못하고 놓치게 될 수 있다. 따라서, 비과제 창의 주사율을 감소시킬 때에는 비과

제 창의 현재 작업에 이용되는지 여부와 함께 과제 창에서 진행되는 작업 유형을 고려할 필요가 있다.

본 연구에는 다음과 같은 제한점들이 존재한다. 첫 번째로 본 연구는 비과제 창의 점멸 지각 역치를 직접 측정하지는 않았다. 그러나 실험 1에서 과제 창의 점멸 지각 역치가 40 Hz와 50 Hz 사이에 위치했으며, 점멸이 지각될 경우에만 주의를 포획한다는 Alais 등(2016)의 연구 결과와 이심률에 따른 점멸 지각 역치를 측정했던 이전 연구들의 결과(Hartmann et al., 1979; Krajancich et al., 2021)를 고려했을 때 참가자들이 45 Hz 조건부터 비과제 창에서 점멸을 지각했을 것으로 유추해볼 수 있다. 후속 연구에서는 비과제 창의 점멸 지각 역치를 직접 측정함으로써 비과제 창에서의 점멸 지각과 과제 창의 지각된 해상도 저하 간의 관계를 더욱 명확히 밝힐 수 있을 것이다.

두 번째로 본 연구에는 실험 2의 결과 분석에서 반응 편향의 영향을 통제할 수 없었다는 제한점이 존재한다. 참가자들은 과제 화면의 영상을 보며 화질 저하를 감지할 때마다 자유롭게 응답할 수 있었기 때문에 가능한 총 응답 횟수가 정해져 있지 않았다. 따라서 오정보 횟수는 구할 수 있었지만 오정보율은 계산할 수 없었고, 신호 탐지 이론을 적용해 민감도(d')와 반응 기준(c)을 분석하는 것은 불가능했다. 추후 연구에서는 민감도와 반응 기준을 구분해낼 수 있는 설계를 채택함으로써 반응 편향의 영향을 통제할 필요성이 있다.

마지막으로 본 연구는 불편감과 피로감 같은 참가자들의 주관적 경험은 측정하지 않았다는 제한점을 지닌다. 비과제 창에서 지각된 점멸이 성공적으로 억제되어 과제 창의 작업 수행은 영향을 받지 않는 경우에도, 지각된 점멸로 인해 주관적인 불편감과 피로감 등이 발생할 수 있다(Blehm et al., 2005; Lin et al., 2014). 이후 연구에서는 비과제 창의 주사율 감소에 따른 주관적 경험의 질 차이를 직접 측정하여(e.g., Bampis et al., 2017; Pinson & Wolf, 2003), 화면 사용에 불편감을 초래하지 않는 비과제 창의 주사율 범위를 특정해낼 수 있을 것이다.

요약하면, 본 연구에서는 사용되지 않는 비과제 창의 주사율 저하가 과제 창의 시간적, 공간적 해상도에 미치는 영향을 알아보았다. 실험 결과 비과제 창의 주사율 저하는 과제 창의 시간적 해상도에 선택적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 분할 디스플레이 사용 환경에서 과제의 특성을 고려하여 비과제 창의 주사율을 적응적으로 감소시켜야 함을 시사한다. 과제 특성을 고려한 주사율 감소는 사용자의 불편감을 최소화하면서 에너지 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

References

- Alais, D., Locke, S. M., Leung, J., & Van der Burg, E. (2016). No attentional capture from invisible flicker. *Scientific Reports*, 6, Article 29296.
- Bampis, C. G., Li, Z., Moorthy, A. K., Katsavounidis, I., Aaron, A., & Bovik, A. C. (2017). Study of temporal effects on subjective video quality of experience. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26(11), 5217-5231.
- Bhowmik, A. K., & Brennan, R. J. (2007). System-level display power reduction technologies for portable computing and communications devices. In *2007 IEEE International Conference on Portable Information Devices* (pp. 1-5). IEEE.
- Blehm, C., Vishnu, S., Khattak, A., Mitra, S., & Yee, R. W. (2005). Computer vision syndrome: a review. *Survey of Ophthalmology*, 50(3), 253-262.
- Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, 10(4), 433-436.
- Eimer, M., & Kiss, M. (2008). Involuntary attentional capture is determined by task set: Evidence from event-related brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(8), 1423-1433.
- Eisen-Enosh, A., Farah, N., Burgansky-Eliash, Z., Polat, U., & Mandel, Y. (2017). Evaluation of critical flicker-fusion frequency measurement methods for the investigation of visual temporal resolution. *Scientific Reports*, 7, Article 15621.
- Folk, C. L., Remington, R. W., & Johnston, J. C. (1992). Involuntary covert orienting is contingent on attentional control settings. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(4), 1030-1044.
- Gaspar, J. M., & McDonald, J. J. (2014). Suppression of salient objects prevents distraction in visual search. *Journal of Neuroscience*, 34(16), 5658-5666.
- Gaspelin, N., Leonard, C. J., & Luck, S. J. (2015). Direct evidence for active suppression of salient-but-irrelevant sensory inputs. *Psychological Science*, 26(11), 1740-1750.
- Gaspelin, N., & Luck, S. J. (2018). The role of inhibition in avoiding distraction by salient stimuli. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(1), 79-92.
- Geng, J. J. (2014). Attentional mechanisms of distractor suppression. *Current Directions in Psychological Science*, 23(2), 147-153.
- Hartmann, E., Lachenmayr, B., & Brettel, H. (1979). The peripheral critical flicker frequency. *Vision Research*, 19(9), 1019-1023.
- Itti, L. (2005). Quantifying the contribution of low-level saliency to human eye movements in dynamic scenes. *Visual Cognition*, 12(6), 1093-1123.
- Iyer, S., Luo, L., Mayo, R., & Ranganathan, P. (2003). Energy-adaptive display system designs for future mobile environments. In *First International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys2003)* (pp. 245-258). USENIX Association.
- JASP Team (2023). JASP (Version 0.18.1) <https://jasp-stats.org/>
- Jeffreys, H. (1998). *The theory of probability*. Oxford University Press.
- Kim, H., Cha, H., & Ha, R. (2007). Dynamic refresh rate scaling via frame buffer monitoring for power aware LCD management. *Software: Practice and Experience*, 37(2), 193-206.
- Kim, D., Jung, N., & Cha, H. (2014). Content-centric display energy management for mobile devices. In *Proceedings of the 51st Annual Design Automation Conference* (pp. 1-6). Association for Computing Machinery.
- Kingdom, F. A. A., & Prins, N. (2016). *Psychophysics: A practical introduction*. Academic Press.
- Krajancich, B., Kellnhofer, P., & Wetzstein, G. (2021). A perceptual model for eccentricity-dependent spatio-temporal flicker fusion and its applications to foveated graphics. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 40(4), 1-11.
- Landis, C. (1954). Determinants of the critical flicker-fusion threshold. *Physiological Reviews*, 34(2), 259-286.
- Lee, M. D., & Wagenmakers, E. J. (2014). *Bayesian cognitive modeling: A practical course*. Cambridge university press.
- Lichtenstein-Vidne, L., Henik, A., & Safadi, Z. (2007). Task-relevance modulates the effects of peripheral distractors. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(9), 1216-1226.
- Lin, M. W., Hsieh, P. H., Chang, E. C., & Chen, Y. C. (2014). Flicker-glare and visual-comfort assessments of light emitting diode billboards. *Applied Optics*, 53(22), E61-E68.
- Nixon, K. W., Chen, X., Zhou, H., Liu, Y., & Chen, Y. (2014). Mobile GPU power consumption reduction via dynamic resolution and frame rate scaling. In *6th Workshop on Power-Aware Computing and Systems (HotPower 14)*. USENIX Association.

- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision, 10*(4), 437-442.
- Pinson, M. H., & Wolf, S. (2003). Comparing subjective video quality testing methodologies. In *Visual Communications and Image Processing 2003* (Vol. 5150, pp. 573-582). SPIE.
- Raninen, A., Franssila, R., & Rovamo, J. (1991). Critical flicker frequency to red targets as a function of luminance and flux across the human visual field. *Vision Research, 31*(11), 1875-1881.
- Sawaki, R., & Luck, S. J. (2010). Capture versus suppression of attention by salient singletons: Electrophysiological evidence for an automatic attend-to-me signal. *Attention, Perception, & Psychophysics, 72*(6), 1455-1470.
- Simonson, E., & Brozek, J. (1952). Flicker fusion frequency: background and applications. *Physiological Reviews, 32*(3), 349-378.
- Treisman, A. (2006). How the deployment of attention determines what we see. *Visual Cognition, 14*, 411-443.
- Tyler, C. W., & Hamer, R. D. (1993). Eccentricity and the Ferry-Porter law. *Journal of the Optical Society of America A, 10*(9), 2084-2087.
- Waldin, N., Waldner, M., & Viola, I. (2017). Flicker observer effect: Guiding attention through high frequency flicker in images. *Computer Graphics Forum, 36*(2), 467-476.
- Waldner, M., Le Muzic, M., Bernhard, M., Purgathofer, W., & Viola, I. (2014). Attractive flicker-guiding attention in dynamic narrative visualizations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 20*(12), 2456-2465.
- You, B., Nam, H., & Lee, H. (2020). 46-3: Image adaptive refresh rate technology for ultra low power consumption. *SID Symposium Digest of Technical Papers, 51*(1), 676-679.

비과제 창의 주사율 저하가 과제 창의 시간적, 공간적 해상도에 미치는 영향

여운수¹, 정다운², 김청일¹, 박정현³, 조지은¹, 최정환¹, 정상철^{1,4}

¹연세대학교 인지과학협동과정

²연세대학교 문헌정보학과

³연세대학교 인지과학연구소

⁴연세대학교 심리학과

최근 디스플레이 기술의 발전으로 인하여 하나의 큰 화면을 여러 영역으로 나누어 사용하거나 여러 화면 기기들을 연결하여 함께 사용하는 경우가 증가하고 있다. 이와 같은 환경에서는 현재 수행 중인 작업과 관련성이 높은 과제 창과 그렇지 않은 비과제 창으로 화면이 나누어질 수 있고, 이때 에너지 효율성을 높이기 위해 비과제 창의 주사율을 선택적으로 줄일 수 있다. 하지만 비과제 창의 주사율 저하가 과제 창의 작업 수행에 영향을 미치는지에 대해서는 아직 충분히 검증되지 않았다. 이에 본 연구는 실험 1과 2에서 각각 점멸 지각 역치 측정 과제와 화질 저하 탐지 과제를 이용하여 비과제 창의 주사율 저하가 과제 창의 시간적, 공간적 해상도에 영향을 미치는지 검증하였다. 실험 결과, 비과제 창의 주사율 저하는 과제 창의 시간적 해상도에는 영향을 미치지 않지만 공간적 해상도에는 영향을 미치지 않는 것으로 드러났다. 이러한 결과는 실제 디스플레이 사용 환경에서 비과제 창의 주사율을 낮추고자 할 때에는 과제 창에서 수행되고 있는 작업의 특성이 고려되어야 한다는 것을 시사한다.

주제어: 분할 화면, 시간 주파수, 점멸 지각 역치, 주의 포획, 방해 자극 억제