

시각적 피로도에 영향을 미치는 시청거리와 깊이방향의 운동속도*

The effect of viewing distance and the speed of motion-in-depth on visual fatigue

감기택*† · 이형철** · 이승현***

Keetaek Kham*† · Hyung-Chul O. Li** · Seunghyun Lee***

강원대학교 사회과학대학 심리학과*

Department of Psychology, Kangwon National University*

광운대학교 사회과학대학 산업심리학과**

Department of Industrial Psychology, Kwangwoon National University**

광운대학교 정보디스플레이학과***

Department of Information Display, Kwangwoon University***

Abstract

The present study have investigated the effect of the characteristics of stereoscopic images and viewing environment on visual fatigue. We manipulated the speed of stereo images with motion-in-depth and viewing distance, which were used as representative variables of the characteristics of stereo image and viewing environment, respectively. Visual fatigue was evaluated with use of a subjective questionnaire which is consisting of 5 different and independent factors: "Eye pain", "Visual stress," "Nauseousness", "Body stiffness", and "Blurriness". In general, when viewing time increased from 10 minutes to 20 and 40 minutes, observers felt severe visual fatigue. Among other factors, only the factor score of "Nauseousness" was significantly increased as the speed of object moving in depth became faster. When viewing distance was increased, the score of "Blurriness" was decreased. These results suggest that different kind of the visual fatigue might be induced depending on characteristics of the stereo images and viewing environment.

Keywords : Emotion Design, Web Interface, User's Emotion, Image Scale

요 약

본 연구에서는 입체 영상이 가지는 특성과 시청환경의 특성에 따라 입체 영상을 시청할 때 발생할 수 있는 시각적 피로도를 체계적으로 살펴보기 위해 깊이방향의 운동속도와 응시거리 각각을 입체 영상과 시청환경의 대표적인 특성으로 삼고 각 요인에 의해 발생하는 시각적 피로도를 측정하였다. 시각적 피로도는 눈통증 요인, 시각적 스트레스, 어지러움 요인, 신체 통증 요인, 상호립 요인으로 구성된 피로도 측정도구를 이용하여 주관적인 시각적 피로도를 측정하였다. 실험 1에서는 깊이 방향의 운동속도를 변화시킨 자극을 40분간 제시하면서 10분, 20분, 40분에 시각적 피로도를 측정하였다. 측정결과 전체 피로도 점수는 시청시간이 증가함에 따

* 이 논문은 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT신성장 동력 핵심기술개발사업(2007-F-037-02)의 지원을 받아 수행하였음.

† 교신저자 : 감기택 (강원대학교 심리학과)

E-mail: kham@kangwon.ac.kr

TEL: 033-250-6857

FAX: 033-257-6850

라 높아졌지만 운동 속도에 따른 차이를 보이지 않았다. 다섯 개의 하위척도들 중 어지러움 하위척도 점수에 서만 운동 속도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 실험 2에서는 동일한 입체 영상을 응시거리만 변화 시켜가면서 시각적 피로도를 측정하였다. 전체 피로도 점수는 시청시간이 증가함에 따라 높아졌지만 응시거리에 따른 차이는 발견되지 않았다. 다섯 개의 하위 척도들 중 상호림 하위척도 점수에서만 응시거리가 멀어질수록 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 입체 영상의 특성이나 시청환경에 따라 시각피로도가 변화될 수 있음을 보여주며, 시각피로도를 발생시키는 요인에 따라 각기 다른 종류의 시각피로도가 발생할 수 있음을 보여준다.

주제어 : 시각피로도, 입체영상의 특성, 시청환경, 3D 디스플레이

1. 서론

과거 입체 영상을 제시하는 장치는 주로 입체 영화와 같은 오락분야에 한정되어 활용되었지만, 하드웨어가 발전함에 따라 그 활용 범위는 원격 조정이나 외과수술 훈련과 같은 전문 분야뿐만 아니라 일반인들을 대상으로 하는 3차원 방송까지 확장될 가능성이 있다¹⁾. 입체 영상을 일회적이며 단시간에 시청하는 오락분야와는 달리 3차원 방송은 일회 시청시간도 상대적으로 길어질 뿐만 아니라 장기간에 걸친 반복 시청이 수반될 것을 예상할 수 있다.

입체 영상 디스플레이 장치 중 가장 대중적인 관심을 얻었던 분야는 입체 영화이다. 하지만 영상 투사 장치의 조잡함으로 인해 삼차원 영상을 관람할 때 발생하는 두통이나 눈의 불편감²⁾에 의해서 20세기 중반 이후 일반인들의 관심에서 멀어져 갔다. 일회적이고 단기간의 관람에 한정되는 입체 영화가 관람시에 발생하는 불편감 때문에 대중의 관심을 잃게되었다는 사실은 장시간 시청과 반복 시청이 예상되는 3차원 방송을 상용화하는 데 우선적으로 고려해야 할 중요한 요인들 중 하나가 바로 시각적 피로도를 최소화하는 것임을 보여준다.

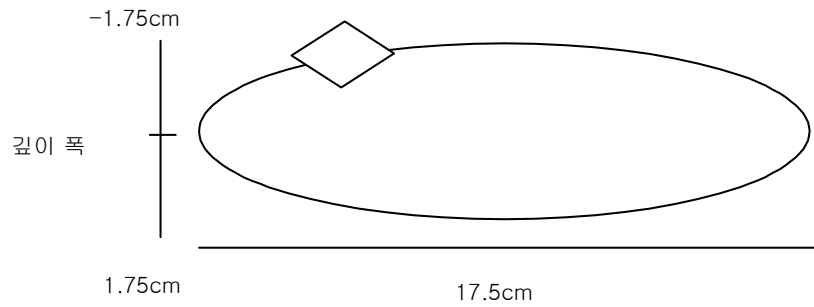
입체 영상을 제시하는 다양한 방법들이 제안되고 있지만, 그 기본적인 원리는 양안 시차를 가진 두 영상을 화면에 제시한 후 각 영상을 각각의 눈에 분리되어 투사되게 하여 우리의 시각기체가 해당 영상으

로부터 입체 깊이를 지각하도록 하는 것이다. 이와 같은 입체영상 제시방식은 사람이 실제 환경에서 장면들을 두 눈으로 보는 것과는 근본적으로 다르다. 보다 구체적으로 인간의 눈은 응시하는 대상까지의 거리가 바뀔때 따라 수정체의 두께를 변화시키는 조절작용을 통해 망막에 초점이 맞는 상을 형성시킨다. 이와 함께 각 눈은 대상과의 응시거리에 따라 수렴(convergence)과 개산(divergence)의 눈운동을 발생시켜 동일한 대상으로부터 투사된 영상을 각 눈의 중심화로 투사시킨다. 실제 환경에서 수렴이 발생하는 깊이와 조절이 발생하는 깊이는 동일하므로 이 두 과정은 밀접하게 연결되어 있지만³⁾⁴⁾⁵⁾, 입체영상 제시 시스템으로부터 대상을 관찰하는 경우 조절작용은 영상이 제시된 화면까지의 깊이에 맞추어야하지만 두 눈의 수렴 정도는 양안시차에 따라 영상이 제시된 화면과는 다른 깊이에 맞추어야 한다. 이 과정에서 수렴과 조절작용의 불일치가 발생하며, 이러한 불일치가 입체 영상을 볼 때 발생하는 여러 시각적 불편감이나 피로도의 원인으로 추정되고 있다⁶⁾.

이러한 추정에 근거하여 실사 입체 영상⁷⁾이나 인공

1) IJsselsteijn, W. A. (2003). Being There: Concepts, Effects and Measurement of User Presence in Synthetic Environments Ios Press Amsterdam, The Netherlands chapter presence in the Past : What can we learn from media history?, pp. 18-40.
 2) Lipton, L. (1982). Foundations of the stereoscopic cinema- A study in depth. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, USA.

3) Martens, T. G., & Ogle, K. N. (1959). Observations on accommodative convergence; especially its nonlinear relationships. American Journal of Ophthalmology, 47, 455-463.
 4) Polak, N. A., & Jones, R. (1990). Dynamic interactions between accommodation and convergence. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 37, 1011-1014.
 5) Schor, C. (1999). The influence of interactions between accommodation and convergence on the lag of accommodation. Ophthalmic and Physiological Optics, 19, 134-150.
 6) 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): 33, 1-30.
 7) Yano, S., Ide, S., Mitsuhashi, T., & Thwaites, H. (2002). A study of visual fatigue and comfort for 3D HDTV/HDTV images. Display, 23, 191-201.



타원궤도의 장폭길이

그림 1. 실험 1에 사용된 입체 영상의 운동궤적을 보여주는 도식적 그림. 그림의 타원은 정육면체(마름모로 표시되어 있음)가 깊이 방향으로 운동할 때 이를 위에서 바라본 모양을 나타낸다. 타원궤도의 장폭길이는 육면체가 화면상에서 움직이는 좌우거리를 나타내며, 깊이 폭은 육면체가 가장 멀리있을 때(음수로 표시)와 가장 가까이 있을 때(양수로 표시)의 화면상에서의 양안 시차를 나타낸다. 이를 100cm의 거리에서 보았을 때 타원궤도의 장폭길이와 깊이폭은 시각(visual angle)으로 각각 약 10도와 1도였다. 육면체의 운동속도는 타원궤도의 깊이폭(시각으로 2도)을 타원궤도를 1회전 하는데 걸린 시간으로 나누어 구하였다. 그림에 제시된 타원은 육면체의 운동궤도를 나타내기 위한 것으로 실제 화면에는 제시되지 않았다.

적으로 만들어진 입체 영상을 이용하여 다양한 입체 영상 제시시스템에 따른 시각피로도의 발생 여부를 살펴보는 여러 연구들이 수행되었다. 입체영상 제시 시스템에 의한 시각피로도의 문제들은 하드웨어가 발달함에 따라 제거될 수 있지만, 인간의 입체시 기제는 개선하거나 바꿀 수 없기 때문에 입체 영상에 의한 입체시 기제의 반응특성 때문에 발생하는 시각피로도는 완전히 제거할 수 없다. 가장 최선의 방법은 입체 영상에 대한 인간의 입체시 기제의 반응특성을 파악하여 이를 최소화할 수 있는 입체 영상을 제공하는 것이다. 입체 영상이 가지고 있는 여러 변인들 중에서 시각피로도에 영향을 미칠 수 있는 것들은 다양하다. 예를 들어, 영상이 제시되는 기준 깊이, 영상에 포함되어 있는 깊이 폭(양안시차의 폭), 중심 대상의 입체감, 깊이 방향에서의 운동 폭과 속도 등은 다양한 형태의 수렴 눈운동을 발생시킬 수 있으므로 시각피로도와 관련이 있을 가능성이 있다. 특히, 수렴과 조절작용의 불일치의 관점에서 볼 때, 깊이 방향으로 운동하는 대상을 포함하고 있는 입체 영상과 움직임이 없는 입체 영상을 바라보는 상황은 아주 상이하다. 조절작용은 두 상황에서 공통적으로 입체 영상이 제시된 화면깊이에 맞춰져야 하지만 눈의 수렴과 개산 운동의 경우는 두 조건에서 달라진다. 정지된 입체 영상에서는 특정한 수렴각을 가지는 눈 운동이 한 번만

일어나면 되지만, 깊이 방향으로 운동하는 대상을 입체 영상으로 볼 때에는 지속적으로 수렴과 개산운동이 발생되어야 한다. 그리고 대상의 수렴각도와 실제 눈의 수렴각도는 정확히 일치하지 않는데⁸⁾, 이러한 오차는 깊이 방향의 운동 속도가 빨라질수록 더 커질 수 있다. 따라서 시각적 피로도에 영향을 미치는 주된 요인이 수렴과 조절작용의 불일치라고 한다면 정지된 입체 영상보다 깊이 방향으로 운동하는 입체 영상을 볼 때 시각적 피로도가 증가할 가능성이 있으며, 운동 속도가 빨라질수록 수렴과정과 조절작용의 불일치의 정도는 더 커질 가능성이 있기 때문에 시각적 피로도도 더 크게 발생할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 입체 영상의 여러 변수들 중 깊이 방향의 운동 속도가 시각적 피로도에 어떤 영향을 주는 지를 살펴 보았다.

시각피로도에 영향을 주는 요인에는 입체 영상 제시시스템의 특성과 입체 영상 자체의 특성이외에 시정환경도 포함될 수 있다. 시정환경과 관련해서 주변 밝기, 응시거리 등 여러 요인들이 시각피로도에 미치는 영향에 대한 연구들은 많이 이루어져 왔지만 이들

8) Collewijn, H., Erkelens, C. J., & Regan, D. (1986). Absolute and relative disparity: a re-evaluation of their significance in perception and oculomotor control. In *Adaptive Processes in Visual and Oculomotor Systems*. eds. Keller, E. L., & Zee, D. S. pp. 177-184.

연구들은 대부분 이차원 영상 표시장치(video display terminal: VDT)에 노출된 환경에서 많이 다루어졌다(9)10)11). 입체 영상을 시청하는 과정에서 이차원 영상과 다른 시각적 피로도가 발생할 가능성이 큰 요인은 응시거리이다. 사람의 입체시 기제에는 단일상을 형성할 수 있는 양안시차의 범위는 망막의 이심률¹²⁾이나 대상의 움직임 여부¹³⁾에 따라 차이를 보이지만, 시각도(visual angle)로 표시된 그 범위는 특정한 자극 상황에서는 항상 일정하다. 시각으로 표현된 양안시차의 범위가 고정되어 있다는 말은 다른 말로 표현하면 응시거리가 멀어질수록 일정한 크기의 양안시차에 해당되는 물리적 시차(영상에서의 시차)는 커진다고 할 수 있다. 또한 일정 범위내에서 깊이 방향으로 운동하는 대상의 경우 응시거리가 멀어질수록 수렴에 필요한 눈운동의 양은 적아지게 된다. 따라서 동일한 영상을 보는 경우에도 응시거리가 멀어질수록 수렴과 조절과정의 불일치의 정도는 작아지게 되므로 이에 따른 시각적 피로도도 감소할 가능성이 있다. VDT를 사용할 때 시각피로도에 영향을 미칠 수 있는 응시거리의 효과를 살펴본 연구들은 주로 사무실 환경을 가정하고 수행되었기 때문에 응시거리는 1m 혹은 그 이하였지만 TV시청환경에서 응시거리는 일반적으로 이보다 더 멀기 때문에 본 연구에서는 더 먼 응시거리를 연구에 포함시켰다.

본 연구의 목적을 요약하면 입체 영상이 가지는 특성과 시청환경의 특성에 따라 입체 영상을 시청할 때 발생할 수 있는 시각적 피로도를 체계적으로 살펴보기 위해 실험 1에서는 깊이방향의 운동속도를 실험 2에서는 시청환경 중 응시거리를 변화시켜가면서 입체 영상을 시청할 때 발생하는 시각적 피로도 효과를 측정하였다.

2. 실험 1. 시각적 피로도에 영향을 미치는 운동속도와 시청시간의 효과

2.1. 실험 방법

관찰자. 무선점 입체그림을 이용하여 입체시 지각의 이상 유무를 판단하였다. 그 결과 입체 깊이를 지각하는 데 이상이 없는 남녀 대학생 10명이 실험에 참가하였으며, 이들의 교정시력은 0.8 이상이였다.

시각피로도 측정도구. 입체영상을 시청하는 과정에서 발생하는 시각적 피로도를 측정하기 위해 사용한 도구들은 크게 관찰자들에게 주관적 피로도를 직접 질문하는 주관적 측정 도구와 주관적 피로도와 연관 있을 것이라고 추측되는 생체 신호를 측정하는 객관적 측정도구로 나눌 수 있다. 주관적 측정도구의 가장 단순한 예는 “시각적 피로를 얼마나 느꼈는가”라는 한 가지 질문에 대해 자신의 주관적 피로도를 5점 척도 상에서 평가하는 방법을 사용한 것이다¹⁴⁾¹⁵⁾. 이러한 주관적 측정도구는 일반적으로 연구자에 의해 임의적으로 선정된 문항이 사용되므로 문항의 타당성이 확보되지 않았으며, 또한 단일 문항의 질문만 주어지므로 시각적 피로도의 다양한 특징들을 세분화하기 어렵다는 단점이 있다. 이와 달리 수렴이나 조절 반응과 같은 신체 신호를 시각적 피로도를 측정하는 객관적 지표로 사용할 수도 있지만¹⁶⁾¹⁷⁾ 이러한 신체신호가 관찰자들이 느끼는 시각적 피로도와 직접적으로 연관되어 있다는 경험적 자료는 드물다. 본 연구에서는 요인분석을 통해 28 개의 문항을 5개의 하위 요인으로 나눈 주관적 척도¹⁸⁾를 이용하여 입체 영상을 시청할 때 발생할 수 있는 시각적 피로도를 측정하였다.

9) Chi, C.F., & Lin, F.T. (1998). A comparison of seven visual fatigue assessment techniques in three data-acquisition vdt tasks. *Human Factors*, 40(4), 577 - 590.

10) Gur, S., Ron, S., & Hecklen-Klein, A. (1994). Objective evaluation of visual fatigue in VDU workers. *Occupational Medicine*, 44(4), 201 - 204.

11) Jaschinski-Kruza, W. (1988). Visual strain during VDT work: The effect of viewing distance and dark focus. *Ergonomics*, 31, 1449-1465.

12) Mitchell, D. E. (1966). A review of the concept of Panum's fusional area. *American Journal of Optometry*, 43, 387-401.

13) Fender, D., & Julesz, B. (1967). Extension of Panum's fusional area in binocularly stabilized vision. *Journal of the Optical Society of America*, 57, 819-830.

14) Kooi, F. L., & Toet, A. (2004). Visual comfort of binocular and 3D displays. *Displays*, 25, 99-108.

15) Yano, S., Ide, S., Mitsuhashi, T., & Thwaites, H. (2002). A study of visual fatigue and comfort for 3D HDTV/HDTV images. *Display*, 23, 191-201.

16) Emoto, M., Nojiri, Y., & Okano, F.(2004). Changes in fusional vergence limit and its hysteresis after viewing stereoscopic TV. *Displays*, 25, 67-76.

17) Yano, S., Emoto, M. & Mitsuhashi, T. (2004). Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images. *Displays*, 25, 141-150.

18) Li, H. O., Kham, K., & Lee, S. (In submission). Development of a tool to measure subjective 3-D visual fatigue: a four-factor model, *Displays*.

이 척도에서는 “눈이 뻑뻑하였다”와 같은 10개의 문항들로 구성된 눈통증 요인, “피곤하다”, “스트레스를 받았다”와 같은 8개의 문항으로 구성된 시정중단 욕구 요인, “어지러웠다”, “속이 울렁거렸다”와 같은 4개의 문항들로 구성된 어지러움 요인, “목이 빠근했다”와 같은 3개의 문항으로 구성된 신체 통증 요인, “이 중상이 보였다”와 같은 3개의 문항으로 이루어진 상호림 요인으로 구성되어 있었다. 각 문항에 대해서 피로도의 정도에 따라 7점 척도 상에서 평가하였다.

자극 및 장치. 시각적 피로도를 측정하기 위한 입체 영상은 그림 1에 제시되어 있는 것과 같이 깊이를 가진 타원 궤도를 따라 대각선의 길이가 16.3cm인 육면체가 지속적으로 운동하는 것이었다. 관찰자들은 1920 x 1200 해상도를 가지는 애플 LCD 모니터에 제시된 자극을 150cm 거리에서 관찰하였다. 타원 궤도의 좌우 폭은 17.6cm 이었고, 깊이 방향의 양안 시차는 가장 멀리 있을 때와 가장 가까이 있을 때의 양안 시차는 각각 1.75cm 이었다. 실제 운동의 경우 육면체까지의 깊이가 변화되면 양안시차 이외에 상의 크기 등도 여러 가지 깊이 단서들도 동시에 변화되지만 양안시차 변화 이외의 변인의 효과를 통제하기 위해서 육면체의 깊이가 달라지는 경우에도 그 크기는 항상 일정하였다. 또한, 상대적인 깊이를 비교할 수 있는 프레임이나 응시점이 제시되지 않는다면 양안시차가 변화함에도 깊이 방향의 운동을 지각할 수 없는 경우가 많기 때문에¹⁹⁾, 각기 다른 깊이를 가진 12개의 작은 육면체들이 화면의 무선적인 위치에 제시되었으며 시행이 끝날 때까지 움직임 없이 제시되었다. 각 눈에 투사될 두 자극은 각각 붉은색과 파란색으로 구분하여 화면에 제시되었고, 관찰자들은 이 자극을 붉은색과 푸른색 필터가 있는 안경을 통해 관찰하였다. 이를 통해 두 영상이 각각 양 눈에 분리되어 투사되었다. 자극의 운동속도는 깊이 방향의 거리를 운동 시간으로 나눈으로써 구했다. 즉 타원궤도에서 가장 가까운 점과 가장 먼 지점의 양안시차 차이(시각으로 2도)를 깊이 방향의 거리로 결정했으며, 이 궤도를 일 회전하는데 걸린 시간을 운동시간으로 삼았다. 각 운동 속도조건에서 육면체가 타원궤도를 1회전 하는 데 걸린 시간인 13.4초, 2.5초, 1.4초, 1초, 0.8초이었기 때문에 실

험에 포함된 운동 속도는 0.15도/초, 0.8도/초, 1.4도/초, 2도/초, 2.5도/초 조건들이었다.

절차. 실험의 절차에 익숙해지도록 첫 실험이 시작되기 전 5회 이상의 연습시행을 실시하였다. 입체 영상 시청 후 발생하는 피로도를 비교하기 위해 각 실험 조건을 실시하기 전 먼저 양안시차가 없는 이차원 영상을 2분 동안 시청한 후 피로도를 측정하기 위한 척도에 응답하도록 하였다. 본 실험에서는 색깔 필터를 가진 안경을 통해 입체 영상을 제시하였으므로 안경에 의한 피로도의 효과를 측정하기 위해 이차원 영상을 안경을 낀 채 이분동안 이차원 영상을 시청한 후 피로도 척도에 응답하도록 하였다. 이 응답이 끝나면 0.15도/초, 0.8도/초, 1.4도/초, 2도/초, 2.4도/초를 포함하는 운동 속도 조건들 중 무선적으로 선정된 한 운동 속도 조건에 해당되는 입체 영상이 제시되었다. 자극부분에서 설명한 것과 같이 큰 육면체가 타원 방향으로 운동하는 것으로 지각되는 입체 영상이 제시되었으며, 관찰자들이 해당 육면체를 지속적으로 응시하도록 하기 위해 육면체의 회전 방향은 평균적으로 일분에 일회꼴로 바뀌도록 만들어져 있었고 관찰자들은 회전 방향이 바뀔 때마다 특정키를 누르도록 지시를 받았다. 각 조건의 입체 영상을 본 10분 후 다시 시각피로도를 측정하였는데(입체 영상의 피로도의 첫 번째 측정), 이 경우 입체 영상을 지속적으로 볼 수 있도록 하기 위해 실험보조자가 척도를 불러주고 관찰자들은 입체 영상을 보고 있으면서 해당 질문에 대해 반응하도록 하였다. 자극이 제시된 20분 후에 첫 번째 측정과 동일한 방식으로 두 번째 시각피로도를 측정하였으며, 자극이 제시된 40분 후 자극 제시가 완료되었을 때 세 번째 시각피로도를 측정하였다. 이 측정을 끝으로 해당 운동 속도조건의 수행이 완료되었다. 한 조건을 수행하는데 약 50분의 시간이 걸렸으며 측정치가 시각피로도였기 때문에 각 실험 조건은 각기 다른 날에 실시되었다.

2.2. 실험 결과

운동 속도와 시청시간에 따라 전체 시각피로도와 다섯 개의 시각피로도 하위척도의 결과가 그림 2에 제시되어 있다. 전체 시각피로도 점수를 보면 이차원 영상을 필터 안경을 낀 채 볼 때의 시각피로도(그림의 삼각형표식)보다 삼차원 영상을 시청한 15개의 모든

19) Erkelens, C. J., & Collewijn, H. (1985). Motion perception during dichoptic viewing of moving random-dot stereograms. *Vision Research* 25, 583-588.

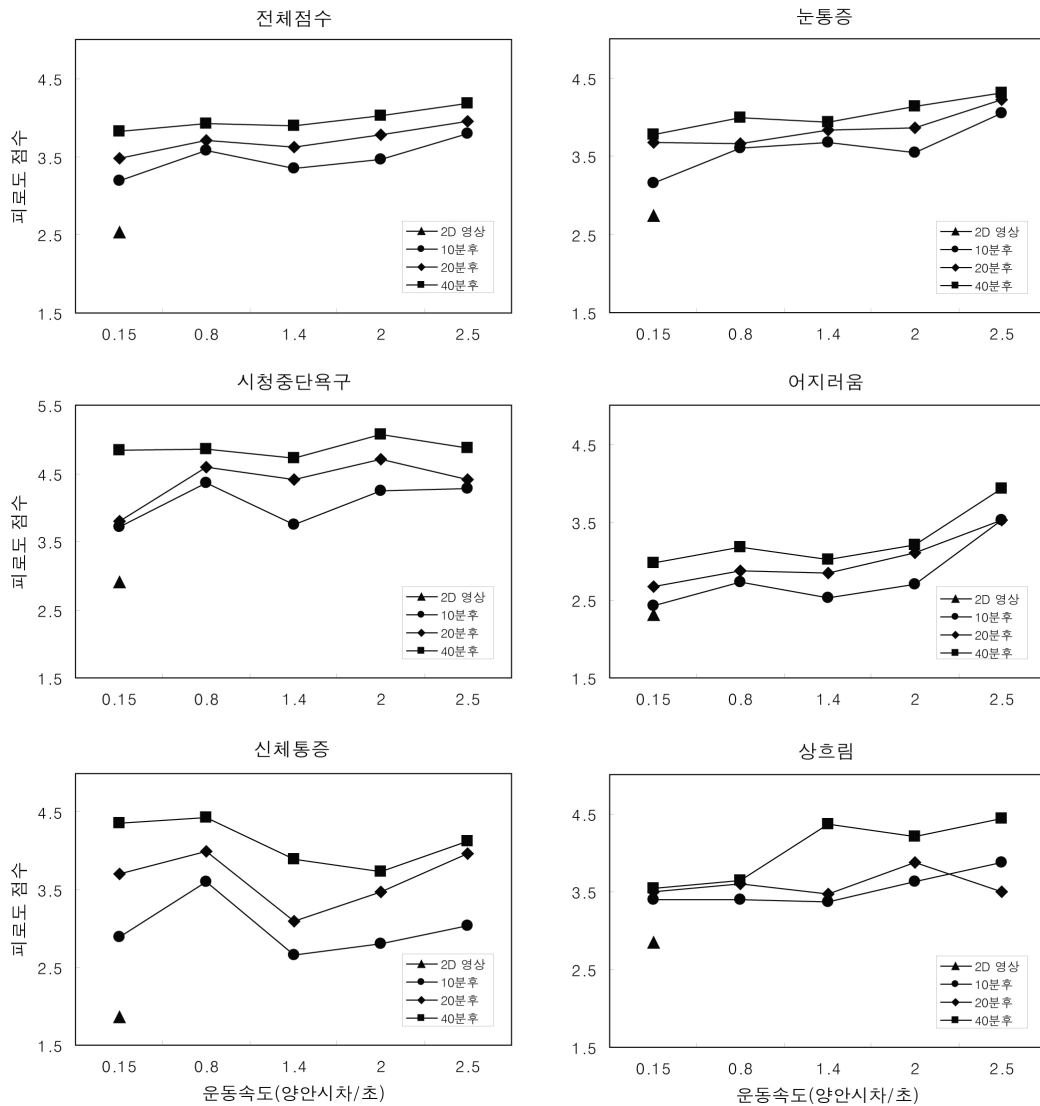


그림 2. 운동속도와 시청시간에 따라 전체 시각피로도도와 다섯 개의 하위 시각피로도도가 제시되어 있다. 삼각형은 필터안경을 낀 채 이차원 영상을 이분동안 시청한 후 측정된 시각피로도 점수를, 원, 마름모, 사각형 각각은 입체 영상의 시청 10분후, 20분후, 40분후에 측정된 시각피로도 점수를 나타낸다.

실험 조건에서 측정된 시각피로도도가 더 높음을 알 수 있다. 시청시간이 10분(원), 20분(마름모), 40분(사각형)으로 증가할수록 시각피로도도는 더 높게 나타났으며($F(2,18)=9.87, p<.01, MSE=.31$), 운동 속도가 빨라짐에 따라 시각피로도도는 증가하는 패턴을 보여주었지만 통계적으로 유의하지는 않았다($F(4,36)=1.70, p=.17$). 그리고 운동속도와 시청시간 두 변인들 사이의 상호작용도 유의하지 않았다. 전반적으로 시각피로도도의 각 하위 척도도 전체 시각피로도 점수와 유사한 형태를 보여주었다. 눈통증, 시청중단욕구, 어지러움, 신체통증, 그리고 상흐림의 다섯 개의 하위 척도 모두에서 시청시간이 증가할수록 시각피로도도가 증가하는 것을

보여주었다. 운동 속도 변인에 따른 각 하위 척도별 시각피로도도의 차이에서 어지러움은 운동 속도가 증가할수록 높은 것으로 나타났지만($F(4,36)=3.40, p<.05, MSE=1.27$) 눈통증, 시청중단 욕구, 신체통증이나 상 흐림 하위척도에서는 유의한 차이가 발견되지 않았다. 그리고 모든 하위척도에서 운동속도와 시청시간 변인 사이의 상호작용 효과도 유의하지 않았다.

시청시간이 증가할수록 시각적 피로도가 증가하는 것으로 나타난 위의 결과는 놀라운 것은 아니다. 그러나 본 실험에서 얻어진 값들이 3차원 방송에 적용되거나 가이드라인으로 사용되기 위해서 필수적으로 해결해야 할 부분은 시각적 피로도도의 측정치들이 가지

는 절대적인 값의 실용적인 의미이다. 즉, 시정 시간이 긴 조건과 짧은 조건을 비교할 때 상대적인 피로도에서 차이가 난다고 해도 사람들이 견디기 힘든 시각적 피로도 수준이 어느 정도인지에 대한 기준이 필요하다. 이러한 기준이 주어져야만 사람을 대상으로 얻어진 자료로부터 허용할 수 있는 시정시간과 같은 기준을 제공해 줄 수 있기 때문이다. 한 가지 가능한 대안적인 방법은 동일한 영상을 이차원으로 제시하고 시정시간을 동등하게 한 후 시각적 피로도를 측정 비교하는 방법이 있을 수 있다.

전체 피로도 점수는 운동 속도에 따라 차이를 보이지 않았으며, 여러 하위척도들 중에서 어지러움 하위척도에서만 운동 속도에 따른 차이를 보였다. 이러한 결과는 본 연구와 같이 시각피로도를 여러 개의 하위척도로 분리하여 살펴볼 수 있는 측정도구를 사용했기 때문에 발견할 수 있는 것으로 단일한 문항으로 시각피로도를 측정²⁰⁾하거나 여러 문항으로 구성된 시각피로도 측정도구를 사용하는 경우에도 이들 문항들의 단순한 합산 점수만을 고려한다면 발견하기 어려운 것이다.

여러 하위척도들 중 어지러움 척도에서만 운동 속도에 따른 차이가 발견된 것은 흥미롭다. 배 멀미, 항공기 멀미, 혹은 시각자극에 의해 발생하는 어지러움을 통칭하는 운동 멀미는 전정기관에서 오는 정보, 자세 등과 같은 자기신체에 관한 정보, 시각정보, 눈운동 정보등의 불일치에서 발생된다고 고려되어 왔다²¹⁾. 최근 운동멀미에 대한 대안적인 이론으로서 눈운동 가설이 제안되었다²²⁾. 이 이론에 따르면 운동멀미는 눈운동때 발생하는 눈 근육의 수축이 구심성(afferent) 신호를 발생시키며 이 신호들이 미주신경을 직, 간접적으로 활성화시킴으로써 발생된다고 설명한다. 이 이론은 운동 멀미가 발생하는 다양한 상황에서 눈을 한 대상에 고정시키거나 눈을 감으면 안신체 반사(optokinetic reflex)가 감소되며, 궁극적으로 운동멀미가 감소된다는 현상적인 사실에서도 지지를 받고 있

다. 실험 1에서 포함된 각 운동 속도 조건들간에는 눈운동의 양이 차이가 있었다. 동일한 시간동안 자극을 시정하였기 때문에 느린 속도조건보다 빠른 속도조건에서의 눈운동의 양은 더 많았다. 눈운동이 운동멀미의 가능한 원인이 된다면 빠른 속도조건에서 운동멀미에 의한 어지러움이 더 많이 발생했을 가능성이 있다.

운동 멀미에 대한 눈운동 가설은 운동 속도에 대한 구체적인 예측을 포함하고 있지 않지만, 단순히 눈운동의 양뿐만 아니라 눈운동 속도도 영향을 미칠 가능성이 충분히 있다. 어떤 시스템이라도 변화의 속도가 느리면 변화의 속도가 빠른 조건과 비교해 볼 때 환경이나 입력변화에 더 쉽게 적응할 수 있기 때문이다. 입체 영상을 시정할 때 발생하는 어지러움을 설명할 수 있는 이론으로 눈운동 가설을 가정할 때 한 가지 더 고려해야 할 사항이 있다. 입체 영상은 일반적인 이차원 영상과 달리 수렴 눈운동이 발생한다는 점이다. 눈운동 가설이 운동 멀미를 잘 설명한다고 하더라도 이차원 운동 자극과 깊이 방향의 운동 자극에 따른 눈운동이 운동멀미에 미치는 효과를 다르게 나타날 가능성이 있다. 시선 수렴의 정도가 아주 강할 경우 양안간 압력(interocular pressure)이 증가하며, 이 신호가 눈근육의 수축정보와 함께 운동멀미를 발생시킬 수 있음을 제기한 한 연구²³⁾는 두 다른 운동자극으로부터 에 대한 눈운동이 운동 멀미에 각기 다른 효과를 발생시킬 수 있음을 시사하기 때문이다.

어지러움을 제외한 안구통증, 시정중단욕구(혹은 스트레스), 신체 통증, 상호립 하위 요인에서는 운동 속도가 변화에도 불구하고 통계적으로 유의미한 결과를 발견하지 못했다. 이러한 결과로부터 이들 네 요인들은 입체 영상 시정과는 무관하다는 것을 시사하는 것은 아니다. 즉 시정 시간이 증가함에 따라 이러한 하위 요인들에서의 불편감들 역시 증가하는 것으로 나타난 결과를 고려해 볼 때, 신체 통증이나 시정중단욕구(혹은 스트레스)²⁴⁾, 눈 건조등과 같은 눈의 불편감²⁵⁾은 일반적인 영상제시장치(video display terminal:

20) Yano, S., Ide, S., Mitsuhashi, T., & Thwaites, H. (2002). A study of visual fatigue and comfort for 3D HDTV/HDTV images. *Display*, 23, 191-201.

21) Reason, J.T., & Brand, J. J. (1975). *Motion sickness*. Academic Press: London.

22) Ebenholtz, S. M., Cohen, M. M., & Linder, B. J. (1994). The possible role of nystagmus in motion sickness: A hypothesis. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 65 (11), 1032-1035.

23) Gupta, V. K. (2005). Motion sickness is linked to nystagmus-related trigeminal brain stem input: a new hypothesis, *Medical Hypotheses*, 64, 1177-1181.

24) Ong, C. N. (1984). VDT workplace design and physical fatigue. In E. Grandjean (Ed.), *Ergonomics and health in modern offices* (pp. 484-494). London: Taylor & Francis

25) Nakaishi, H., & Yamada, Y. (1999). Abnormal tear dynamics and symptoms of eyestrain in operators of visual display terminals, *Occupational and Environmental Medicine*, 56, 6-9.

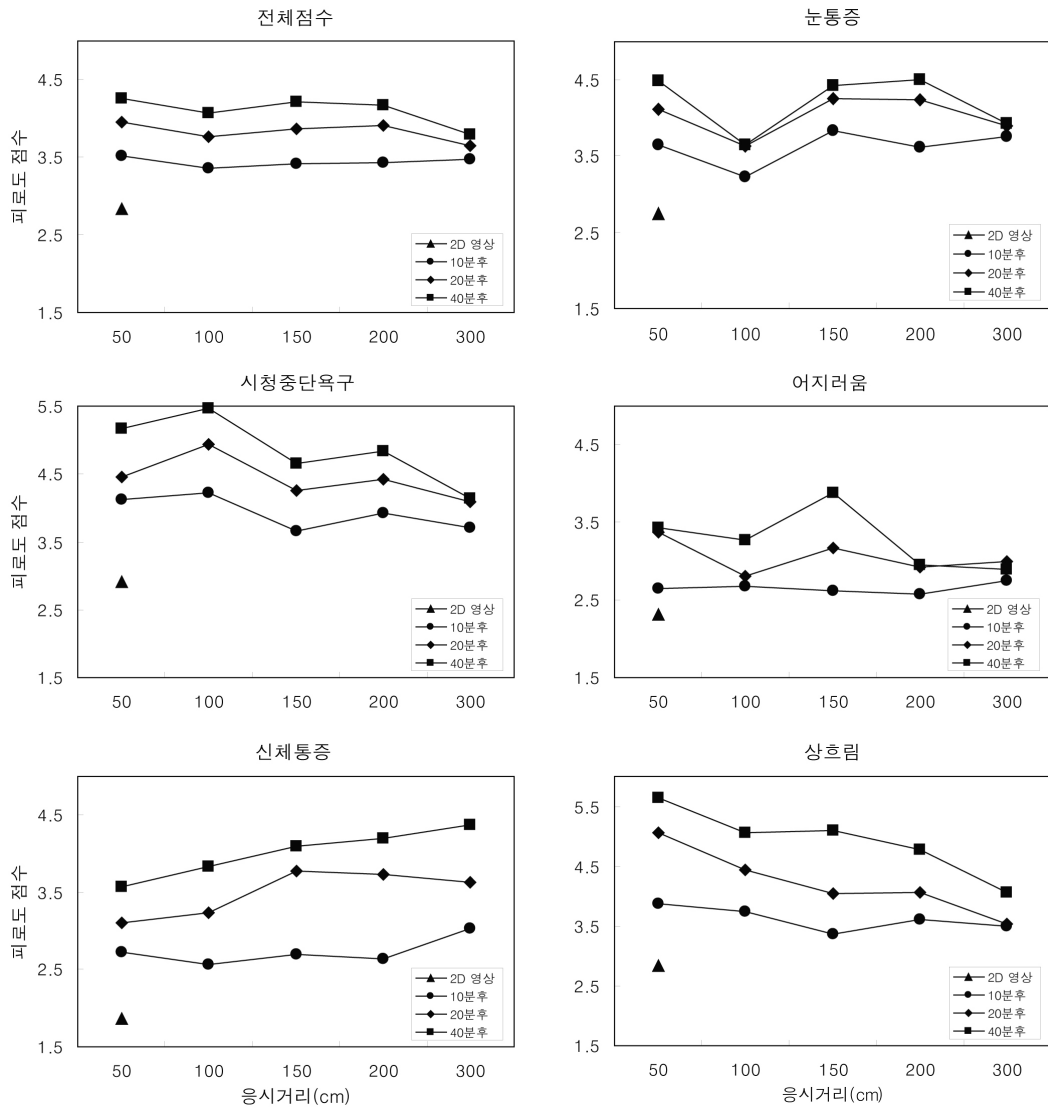


그림 3. 응시거리와 시청시간에 따라 전체 시각피로도 및 다섯 개의 하위 시각피로도가 제시되어 있다. 삼각형은 필터안경을 낀 채 이차원 영상을 이분동안 시청한 후 측정된 시각피로도 점수를, 원, 마름모, 사각형 각각은 입체 영상의 시청 10분후, 20분후, 40분후에 측정된 시각피로도 점수를 나타낸다.

VDT)를 사용하여 이차원 영상을 제시한 상황에서도 발생하는 것으로, 깊이 방향의 운동이 포함된 입체영상 특이적인 불편감이 아니라 일반적으로 컴퓨터 화면등과 같은 VDT에 제시된 자극을 볼 때 발생하는 불편감일 수 있다.

본 연구를 해석하는 데 있어서 한 가지 주의해야 할 점은 운동 속도가 각기 다른 입체영상들에서 깊이 방향의 속도 차이뿐만 아니라 좌우측면으로의 속도차이도 함께 일어난다는 것이다. 따라서 본 연구의 결과가 반드시 깊이 방향의 운동 속도의 차이만으로 해석하는 데 한계가 있을 수 있으며, 측면운동과 깊이 방향의 운동속도에 따른 효과를 분리하기 위해서는 각

운동 정보를 독립적으로 조작한 자극을 사용하여야 할 것이다.

3. 실험 2. 시각적 피로도에 영향을 미치는 응시거리와 시청시간의 효과

3.1. 실험 방법

관찰자. 실험 1에 참가한 관찰자 10명 모두가 실험 2에 참가하였다.

자극 및 장치. 실험 1에 사용된 자극과 동일한 입체 영상을 사용하였다. 운동 속도를 변화시킨 실험 1과는 달리 본 연구에서는 운동 속도는 실험 1에서 포함된 5 수준의 운동 속도들의 중간 값인 1.4도/초로 고정되어 있었다. 입체 영상의 다른 변수는 실험 1과 동일하였다.

절차. 본 실험의 절차도 실험 1과 유사하였다. 응시 거리는 50cm, 100cm, 150cm, 200cm, 300cm으로 선정되었고 관찰자들은 5개의 응시거리 조건들 중 무선적으로 선정된 거리에서 입체 영상을 시청하였다. 실험 1에서와 같이 각 실험 조건을 실시하기 전 먼저 양안 시차가 없는 이차원 영상을 2분 동안 필터 안경없이 시청한 후 피로도 척도에 응답하도록 하였고, 이후 이차원 영상을 필터 안경을 낀 채 이분동안 시청한 후 피로도 측정 척도에 응답하도록 하였다. 이 응답이 끝나면 5 개의 응시거리 조건들 중 무선적으로 선정된 거리에서 입체 영상을 시청하였으며, 실험 1과 동일하게 입체 영상 시청 후 10분, 20분, 40분 후에 시각피로도가 측정되었다.

3.2. 실험 결과 및 논의

응시거리와 시청시간에 따라 전체 시각피로도와 다섯 개의 하위 척도 시각피로도 결과가 그림 3에 제시되어 있다. 전체 시각피로도 점수를 보면 이차원 영상을 볼 때의 시각피로도(그림의 삼각형표식)보다 삼차원 영상을 시청한 15개의 모든 실험 조건에서 측정된 시각피로도가 더 높음을 알 수 있다. 시청시간이 10분(원), 20분(마름모), 40분(사각형)으로 증가할수록 시각피로도는 더 높게 나타났으며($F(2,18)=13.92, p<.01, MSE=.39$), 응시 거리가 길어짐에 따라 전체 시각피로도 점수는 유의한 차이를 보이지 않았다($F(4,36)=1.37, p>.05, MSE=.88$). 그리고 응시거리와 시청시간 두 변인들 사이의 상호작용도 유의하지 않았다.

실험 1에서와 유사하게 시각피로도의 각 하위 척도에서도 전체 시각피로도 점수와 유사하게 나타나 시청 시간에 따른 시각피로도는 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 시청 거리에 따른 시각피로도의 하위 척도의 차이를 살펴본 결과 눈통증, 시청중단욕구, 어지러움, 신체통증의 하위척도들에서는 응시거리에 따른 유의한 차이를 발견할 수 없었으며, 응시거리와 시청시간 두 변인 사이의 상호작용도 유의하지 않았다. 하위척도들 중 응시거리에 따른 차이를 보인 것은 상

호림 척도값이다. 상호림은 응시거리가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며($F(4,36)=5.27, p<.01, MSE=1.02$), 응시거리와 시청시간간의 상호작용도 유의한 것으로 나타났다($F(8,72)=2.56, p<.05, MSE=.30$). 상호 작용효과를 자세히 알아보기 위해 세 시청시간 각각에 대해 응시거리에 따른 상호림 척도에서 차이가 있는지를 살펴보았다. 입체 영상 시청 10분 후에는 응시거리에 따른 차이가 발견되지 않았지만($F(4,36)=.88, p>.05$), 시청 20분후($F(4,36)=5.38, p<.01, MSE=.60$)와 40분 후($F(4,36)=5.58, p<.01, MSE=.59$)에서는 응시거리에 따른 유의미한 차이가 나타났으며, 사후분석 결과 응시거리가 50cm 조건과 300cm 조건간에 상호림 정도의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 응시거리에 따라 발생할 수 있는 상호림의 효과를 최소화하기 위해서는 최소 300cm 정도의 응시거리가 보장되어야 함을 시사한다. 그림 3의 상호림 결과를 보면 시청시간이 많아질수록 응시거리의 효과는 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 응시거리와 상호림 변인 사이의 포괄적인 관계를 이해하기 위해서는 응시시간을 더 증가시켜가면서 이에 따른 상호림 정도의 변화를 파악하는 것이 필요하다.

응시거리가 짧아질수록 시각피로도가 증가한다는 결과는 이차원 영상을 시청한 관찰자들로부터도 보고된 바 있으며 이는 가까운 대상을 응시하는 경우 조절과정에 필요한 모양근의 과도한 긴장에 의한 것으로 해석할 수 있다²⁶). 입체 영상을 시청하는 경우에도 시청거리가 가까우면 모양근의 과도한 긴장을 유발시키기 때문에 상호림 요인은 입체 영상 특징적인 불편감으로 해석하는 데 유의해야 한다.

상호림을 제외한 나머지 하위척도들, 즉 눈통증, 시청중단 혹은 스트레스, 어지러움, 신체통증들은 응시거리가 변화하는 경우에도 통계적으로 유의한 결과를 얻지 못했다. 시청중단 혹은 스트레스요인과 신체통증요인의 경우 실험 1에서 논의한 바와 같이 화면제시 장치를 통해 장시간 시청하는 경우 일반적으로 발생할 수 있는 불편감으로 응시거리와 같은 시청환경과 보다는 시청시간과 보다 관련있는 요인으로 해석할 수 있다.

물리적 자극이 동일함에도 불구하고 시청거리가 증가하면 눈으로 입력되는 자극의 다양한 차원에서의

26) Jaschinski-Kruza, W. (1988). Visual strain during VDT work: The effect of viewing distance and dark focus. *Ergonomics*, 51, 1449-1465.

크기는 감소한다. 예를 들어 시각도로 표현된 양안시차의 크기는 거리의 제곱에 반비례하고, 시각도로 표현된 특정 대상의 크기는 거리에 반비례 하므로 시정거리가 증가할수록 망막으로 투사된 운동 자극의 망막상 궤적의 길이는 감소하게 된다. 실험 1의 결과에서 논의했듯이 눈운동이 운동멀미를 발생시키는 한 원인이라면 시정거리가 변함에 따라 물리적으로 동일한 자극에 대한 눈운동의 정도도 차이가 나게 되므로, 시정거리에 따라 어지러움의 정도도 차이가 날 것을 예상할 수 있다. 이러한 예측과는 달리 본 실험에서는 시정거리가 각기 다른 경우에도 어지러움에서는 통계적으로 유의한 차이를 발견하지 못했다. 한 가지 가능한 이유는 실험 2에서 사용된 입체 영상의 운동 속도는 모든 시정거리조건에서 실험 1에 포함된 운동 속도의 중간 값인 초당 1.4도의 동일한 값으로 결정되었다. 실험 1에서 어지러움은 실험에 포함된 운동 속도 중 가장 빠른 초당 2.5도일 조건에서 큰 차이를 보인다는 것을 고려한다면, 어지러움을 발생시키기에 충분치 않은 운동 속도 자극이 실험 1에 사용된 것이 원인일 가능성을 배제할 수 없다.

마지막으로 눈통증과 상하림 요인은 눈과 직접적으로 연관되어 있다는 측면에서 유사한 요인이지만 시정거리에 따라 통계적으로 유의한 결과가 나타난 것은 상하림 요인뿐이었다. 각 요인에 속한 문항들을 살펴보면 눈통증 요인에는 ‘눈이 충혈된 느낌이었다’, ‘눈물이 고이는 느낌이었다’, ‘눈이 건조해지는 듯한 느낌이었다’와 같이 관찰자들의 주관적인 평가에 의존한 문항들로 구성된 반면, 상하림 요인은 ‘상이 흐리게 보였다’, ‘원하는 곳에 초점을 맞추기 힘들었다’와 같이 눈의 조절작용과 직접적으로 연관되어 있는 지각적 판단에 근거한 질문 문항들로 구성되어 있었다. VDT 시정 후 불편감에 대한 관찰자의 주관적 평가와 생리적 지표들(예를 들어, 조절, 동공크기, 눈운동 속도등)을 비교해보면 두 값의 일관성은 떨어질 뿐만 아니라²⁷⁾(Chi & Lin, 1998), 지각적 판단에 근거한 측정치(예를 들어 사위값: heterophoria)들의 변화폭이 큰 경우에도 관찰자들의 주관적인 평가값들은 큰 변화가 없었다²⁸⁾. 이는 주관적 평가치들의 경우 관찰자

들이 보다 큰 값으로 평가하기를 꺼려하기 때문에, 상의 흐림과 같은 직접적으로 관찰할 수 있는 요인의 평가치보다 조건들 간 차이가 작은 것으로 나타날 가능성이 있다.

한 가지 추가적으로 고려해야 할 사항은 응시거리에 따른 상하림 정도의 차이가 이차원 영상을 볼 때와 어떠한 차이가 있는 지 혹은 어떤 유사점이 있는지에 대한 연구도 추가적으로 필요할 것으로 생각된다. 이러한 연구를 바탕으로 해서 응시거리에 따른 상하림 정도의 차이가 모든 디스플레이를 시청하는 상황에서는 항상 발생하며 그 정도도 모두 유사하게 나타난다면, 본 연구의 결과가 비록 입체 영상을 사용하여 얻은 것이지만 그 효과는 입체 영상의 시청환경에 특징적인 효과로 받아들이기 어렵다.

4. 결론

본 연구에서는 깊이 방향의 운동 속도와 응시거리에 따라 시각적 피로도가 변화되는지, 만약 변화된다면 시각적 피로도의 하위 요인들 중 어떤 요인이 더 영향을 많이 받을 것인지를 실험 1과 2를 통해 살펴 보았다. 실험 결과 운동속도는 시각적 피로도의 하위 요인들 중 어지러움과 관련이 있으며, 응시거리는 상의 흐림과 관련이 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과에서 흥미로운 점은 전체 피로도 점수에서는 영상에서의 운동 속도와 응시 거리에 따른 차이를 보이지 않았지만 특정 하위 척도에서만 유의미한 차이를 보였다는 것이다. 주관적인 시각적 피로도를 측정하는 척도들은 단일문항으로 이루어져 있거나 다문항으로 이루어진 경우에도 하위요인으로 구분하는 예는 거의 없다. 이러한 척도를 본 연구에 이용했다면 유의미한 차이를 발견하기 어려웠을 것이다. 본 연구에서는 저자들이 이미 개발한 하위 요인들을 가진 시각적 피로도 측정 척도를 사용하였다. 이러한 척도의 유용성은 시각적 피로도를 유발한다고 가정할 수 있는 다양한 영상 요인이나 시청환경 요인의 영향을 평가하는데 적용한다면 특정 요인들이 시각적 피로도를 유발하는 지 여부뿐만 아니라 여러 시각적 피로도들 중 어떤 특정한 요인의 피로도를 유발하는 지를 특정하는 데 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구의 결과들이 삼차원 방송 장면에서 직접 가이드라인으로 적용되기 위해서는 선결되어야 할 문제들

27) Chi, C.F., & Lin, F.T. (1998). A comparison of seven visual fatigue assessment techniques in three data-acquisition vdt tasks. *Human Factors*, 40(4), 577 - 590.

28) Howarth, P. A.(1996, December) Empirical studies of accommodation, convergence, and HMD use, presented at the Hoso-Bunka Foundation Symposium, Tokyo.

이 있다. 첫째, 본 연구에 사용된 척도값에서 허용될 수 있는 시각적 피로도의 한계가 얼마인지를 결정하는 것이다. 절대적인 기준값을 마련하는 것이 쉽지는 않지만 앞선 논의에서도 밝힌 것과 같이 이차원 영상에서 발생하는 시각적 피로도의 값을 기준값으로 결정할 수 있다. 둘째, 삼차원 영상의 특성들 중 시각적 피로도에 영향을 줄 가능성이 있는 요인들은 다양하다. 예를 들어 영상들이 가지는 양안시차의 폭, 중심영상이 제시되는 깊이, 대상들의 운동 속도뿐만 아니라 양안 시차이외에 상의 크기변화나 광학적 흐름 패턴과 같은 다른 깊이 단서들이 고려될 수 있다. 또한 이들 요인들의 조합을 고려한다면 입체 영상의 특성과 시각적 피로도와와의 관계에 대한 자료집(database)이 필요하다.

입체 영상을 시청하는 환경에서 시각적 피로도는 입체영상 제시 방법을 포함한 하드웨어의 특성, 입체영상의 특성, 그리고 시청환경의 특성으로 구분할 수 있다. 이중 하드웨어의 문제점들은 기술의 발달함에 따라 개선될 여지가 충분히 있다. 이와 달리 입체영상의 특성에 따른 피로도의 효과는 해당 영상에 대한 인간의 시각기체의 반응 특성을 반영하는 것이다. 따라서 입체영상의 특성에 따른 시각적 피로도는 시각기체를 수정하거나 개선할 수 없기 때문에 시각기체가 수용할 수 있을 정도의 입체 영상을 만듦으로써 피로도를 최소화하는 방안을 발견하는 것이 최선의 방향이다. 이를 위해서는 입체영상의 다양한 특성과 시각적 피로도 사이의 관계를 밝혀낼 수 있는 심리학적 연구가 요구된다.

참고문헌

- Chi, C.F., & Lin, F.T. (1998). A comparison of seven visual fatigue assessment techniques in three data-acquisition vdt tasks. *Human Factors*, 40(4), 577 - 590.
- Collewijn, H., Erkelens, C. J., & Regan, D. (1986). Absolute and relative disparity: a re-evaluation of their significance in perception and oculomotor control. In E. L. Keller, & D. S. Zee (Eds.) *Adaptive Processes in Visual and Oculomotor Systems* (pp. 177-184). Oxford, UK: Pergamon
- Emoto, M., Nojiri, Y., & Okano, F.(2004). Changes in fusional vergence limit and its hysteresis after viewing stereoscopic TV. *Displays*, 25, 67-76.
- Erkelens, C. J., & Collewijn, H. (1985). Motion perception during dichoptic viewing of moving random-dot stereograms. *Vision Research* 25, 583-588.
- Fender, D., & Julesz, B. (1967). Extension of Panum's fusional area in binocularly stabilized vision. *Journal of the Optical Society of America*, 57, 819-830.
- Gur, S., Ron, S., & Heicklen-Klein, A. (1994). Objective evaluation of visual fatigue in VDU workers. *Occupational Medicine*, 44(4), 201 - 204.
- 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):33, 1-30.
- Howard, I. P. (1986). The perception of posture, self motion and the visual vertical. In *Handbook of Perception and Human Performance*. Vol. 2. eds. Boff, K. R., Kaufman, L., & Thomas, J. P. New York: Wiley Interscience.
- IJsselsteijn, W. A. (2003). Presence in the Past : What can we learn from media history? In F. David, G. Riva., & W. A. IJsselsteijn (Eds.) *Being There: Concepts, Effects and Measurement of User Presence in Synthetic Environments* (pp. 18-40). Amsterdam: IOS Press.
- Jaschinski-Kruza, W. (1988). Visual strain during VDT work: The effect of viewing distance and dark focus. *Ergonomics*, 51, 1449-1465.
- Kooi, F. L., & Toet, A. (2004). Visual comfort of binocular and 3D displays. *Displays*, 25, 99-108.
- Li, H. O., Kham, K., & Lee, S. (In submission). Development of a tool to measure subjective 3-D visual fatigue: a four-factor model, *Displays*.
- Lipton, L. (1982). *Foundations of the stereoscopic cinema- A study in depth*. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, USA.
- Martens, T. G., & Ogle, K. N. (1959). Observations on accommodative convergence; especially its nonlinear relationships. *American Journal of Ophthalmology*, 47, 455-463.
- Mitchell, D. E. (1966). A review of the concept of Panum's fusional area. *American Journal of Optometry*,

43, 387-401.

- Polak, N. A., & Jones, R. (1990). Dynamic interactions between accommodation and convergence. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 37, 1011-1014.
- Rempel, D., Willms, K., Anshel, J., Jaschinski, W., & Sheedy, J. (2007). The Effects of Visual Display Distance on Eye Accommodation, Head Posture, and Vision and Neck Symptoms. *Human Factors*, 49, 830-838.
- Schor, C. (1999). The influence of interactions between accommodation and convergence on the lag of accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 19, 134-150.
- Yano, S., Emoto, M., & Mitsuhashi, T. (2004). Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images. *Displays*, 25, 141-150.
- Yano, S., Ide, S., Mitsuhashi, T., & Thwaites, H. (2002). A study of visual fatigue and comfort for 3D HDTV/HDTV images. *Display*, 23, 191-201.

원고접수 : 09.04.17

수정접수 : 09.06.08

게재확정 : 09.06.19