무안경식 디스플레이에서의 초점 조절 연구

DOI: 10.3938/PhiT.22.029

김 영 민

Accommodation Analysis of Autostereoscopic Displays

Youngmin KIM

Subjective and objective methods for visual fatigue are reviewed. Among the methods, objective evaluation results obtained by using an optometric device to measure accommodative responses in viewing a real object and integral imaging are introduced. The results show the participants do not recognize a mismatch between the accommodative response and the convergence of the eye, which in the past, was believed to be one of the major factors causing visual fatigue when viewing near-distance integral images.

우리가 현실 세계에서 실제 사물을 바라볼 때는 사물에 반사된 빛을 통해 시각적으로 그 형태를 인지하며, 오랜 시간을 통해 학습되어 온 경험을 통해 공간의 깊이나 사물의 형태를 잘 인식하게 된다. 현실에서 인간이 사물의 형태나 공간상의 깊이를 인지하는 요소는 크게 심리적인 단서(psychological cue: 그림 1)와 생리적인 단서(physiological cue)로 나눌 수 있다. 심리적인 단서는 원근법(linear perspective), 중첩(overlapping), 음영(shade and shadows), 결 구배(texture gradient) 등 주로 영상 처리를 통해 깊이 단서를 인식하게 하는 방법으로 인간의 경험적 학습 능력에 의해서 습득이 된 경우다. 반면 생리적인 단서는 안구의 움직임을 통해서 깊이를 지각하는 실질적인 단서를 의미하며, 초점 조절(accommodation), 수렴(convergence), 양안 시차(binocular parallax), 운동 시차(movement parallax) 등이 있다. 일반적으로 우리가 현실 세계에서 인지하는 깊이 정보는 위

저자약력

김영민 박사는 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사(2011)로서 서울대학교 BK 박사 후 연구원(2011)을 거쳐 2011년부터 현재 전자부품연구원 선임 연구원으로 재직 중이다. (rainmaker@keti.re.kr)

Fig. 1. Psychological cues in Botticelli's painting (cestello annunciation).

Fig. 2. Coupling mechanism between accommodation and convergence.

의 모든 단서들을 종합하여 판단하게 되며(그림 2: coupling mechanism), 이 중 심리적인 단서와 초점 조절, 운동 시차는 단안(monocular eye)으로 깊이 정보를 판단할 수 있는 단서이고 수렴과 양안 시차가 두 눈을 모두 사용하는 깊이 단서이다.^[1]

반면 3차원 디스플레이를 주시할 때는 이러한 모든 깊이 단서

REFERENCES

- [1] M. Lambooi, W. IJsselstein, M. Fortuin and I. Heynderickx, J. Imaging Sci. Technol. **53**, 030201-030201-14 (2009).

를 사용하여 깊이를 인식하는 것만은 아니다. 바로 이 점이 현실 세계와 3차원 디스플레이의 공간 인식 측면에서 다른 점이며, 이 부분에서 가장 많은 피로감을 느낄 수 있는 요인이 생길 수 있는 여지가 있다. 3차원 디스플레이를 분류하는 방식은 아직도 많은 논란의 여지가 있지만 현재 가장 많이 사용되고 있는 방식은 안경식 디스플레이 방식과 무안경식 디스플레이로 나누는 것이다. 안경식 디스플레이는 깊이 단서 중 양안 시차를 이용한 방법으로 양 눈에 서로 다른 시차(parallax)의 영상을 투사하고 깊이 단서를 임의로 조절하여 3차원 영상을 제공하는 방법이다. 무안경식 디스플레이는 방식상의 분류가 매우 다양하다. 시차 격벽(parallax barrier)이나 렌티큘러 렌즈(lenticular lens), 집적 영상(integral imaging) 방식 등은 광학 소자가 평판형 디스플레이 앞 쪽에 배치되어 시차가 다른 방향별 영상을 제공한다. 스크린을 회전시키거나 임의의 3차원 공간상에 직접 빛을 발현시켜서 3차원 영상을 표현하는 체적형 디스플레이(volumetric display)나 3차원 물체 본연의 광파를 그대로 재현하는 홀로그래피(holography) 방식 또한 무안경식 디스플레이 방식의 일부이다. 이 중 체적형 디스플레이나 홀로그래피 방식을 제외하면 일반적인 안경식 또는 무안경식 3차원 디스플레이 방식의 경우 인간이 인지할 수 있는 깊이 단서 중 일부만 제공하기 때문에 눈의 피로를 야기할 수 있다고 알려져 왔다. 따라서 안경식 3차원 디스플레이 방식은 최근 흥행한 영화 ‘아바타’ 이후에 많은 연구와 시도를 거듭하여 자연스러운 입체감을 느낄 수 있도록 콘텐츠를 제작하는 것이 이슈이며, 무안경식 디스플레이는 아직까지는 실제의 물체를 볼 때와는 달리 시각 피로가 야기될 수 있는 가능성이 많아 주로 일본이나 유럽을 중심으로 많은 연구가 진행되어 왔으며 최근 국내에도 원인을 규명하기 위한 연구가 진행 중이다.^[2,3]

시각 피로 연구에 있어 가장 어려운 점은 눈의 피로를 객관적으로 측정할 수 있는 방법이 없다는 점이다. 일반적으로 피로의 정도를 정의하는 척도도 없을 뿐더러 눈의 피로를 측정하는 것, 특히 3차원 영상을 주시할 때 눈의 피로를 측정하는 방법은 정량화되어 있지 않기 때문에 간접적으로 피로도에 대한 연구를 진행하다보니 그 정확도는 상대적으로 높지 않다. 현재까지 진행된 3차원 영상 관측 시에 안정 피로에 관한 연구는 주로 안경식 디스플레이 장치에 초점이 맞추어져 있었는데, 3차원 디스플레이의 발전 흐름에서 그 이유를 찾을 수 있다. 1838년 휘트스톤(Wheatstone)에 의해 처음으로 안경식 3차원 디스플레이가 제안되고, 1950년대에 TV의 상업적인 성공에 대응하기 위한 영화 보급사의 대안으로 안경식 3차원 영화가 보급되었지만, 양질의 콘텐츠를 보급하는데 실패하여 2000년대에 와서야 영화 ‘아바타’의 성공으로 안경식 디스플레이가 상업적으로 큰 성공에 이르게 되었다. 즉, 처음 3차원 디스플레이를 제안한 이래 오랜 시간이 지난 후에야 안경식 디스플

Table 1. Subjective assessment for visual fatigue.

Experimental condition	Features	Number of participants	Reference
HMD/TV	• Questionnaire with 28 items • Before and after 20 min of playing games	30	[5]
HMD	• Visual reality symptom questionnaire • 23 items	16	[6]
HMD/Video/Projector	• 28 items based on SSQ • Five factors for assessment of visual fatigue	104	[5]
HDTV	• Five subjective scores • Before and after reading stereoscopic test targets	6	[7]
1 LCD projector/ 2 DLP projectors	• Visual fatigue caused by color breakup • Before and after 15 min of viewing movie	5	[8]
Visual display terminals (VDT)	• 30 symptoms included in the questionnaire	30	[9]
Mobile stereoscopic game	• SSQ and visual symptoms questionnaire • Before and after taking stereoscopic puzzle game for 40 min	150	[10]

레이가 비로소 성공적인 상업화가 되었다는 점을 생각해 볼 때, 안정 피로의 대다수 연구 성과는 주로 안경식 3차원 디스플레이에 초점이 맞추어질 수밖에 없었던 것이다.

현재까지는 앞서 언급된 안경식 3차원 디스플레이를 관측할 때 시각 피로의 원인을 분석하기 위한 연구로서 공학 분야가 아닌 의학과 심리학 분야에서 많은 연구가 이루어져 왔으나, 연구 기술의 특수성 때문에 3차원 디스플레이 방법에 따른 시각 피로의 연구에 초점이 맞추어진 것이 아니라 방법론적인 관점에서의 연구가 진행되어 설문 조사를 통한 경험론적인 연구가 주를 이루었다. 1993년 케네디(Kennedy)에 의해서 simulator sickness questionnaire(SSQ)가 제안되어 평가 지표로서 설문 조사 방법에 대한 연구가 진행되었다.^[4] 이후 이 방법이 효시가 되어 다양한 분야(의학, 심리학, 사회과학 등)에서 변형된

REFERENCES

- [2] Y. Kim, J. Kim, K. Hong, H. K. Yang, J.-H. Jung, H. Choi, S.-W. Min, J.-M. Seo, J.-M. Hwang and B. Lee, *Journal of Display Technology* **8**, 70 (2012).
- [3] T. Inoue and H. Ohzu, *Appl. Opt.* **36**, 4509 (1997).
- [4] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum and M. G. Lillenthal, *Int. J. Aviat. Psychol.* **3**, 203 (1993).
- [5] J. Kuze and K. Ukai, *Displays* **29**, 159 (2008).
- [6] S. L. Ames, J. S. Wolffsohn and N. A. McBrien, *Optometry Vis. Sci.* **82**, 168 (2005).
- [7] S. Yano, S. Ide, T. Mitsuhashi and H. Thwaites, *Displays* **23**, 191 (2002).
- [8] M. Ogata, K. Ukai and T. Kawai, *J. Display Technol.* **1**, 314 (2005).
- [9] K. Murata, S. Araki, N. Kawakami, Y. Saito and E. Hino, *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **63**, 109 (1991).
- [10] J. Häkkinen, M. Pölönen, J. Takatalo and G. Nyman, "Simulator sickness in virtual display gaming: A comparison of stereoscopic and nonstereoscopic situations," in *Proc. 8th Conf. Human-Comput. Interaction With Mobile Devices and Services*, New York, 227-230 (2006).

Table 2. Objective assessment of visual fatigue.

Types of measurement tools	Implementation tools	Number of participants	Reference
Comprehensive biological signal analysis	• EEG, MEG, EMG, ECG	3, 15, 52, 34	[11-14]
	• Clinical demonstration (Chromogranin A)	24	[15]
Direct indicator measurement	• Refractometer	3, 9	[3, 16]
	• Eye tracker	10, 47	[17, 18]

SSQ의 방법이 소개되었다. 예를 들어 안경을 착용한 상태에서 일정 시간 동안 3차원 영상을 관측한 뒤에 절제된 형식의 설문조사 방법을 통해 피로도를 간접 측정함으로써 3차원 영상과 기존의 2차원 영상의 차이를 분석한 사례도 있었으며, 안경을 착용한 상태에서 3차원 영상을 관찰할 때 특정 구간에서 영상의 깊이감을 다르게 조정함으로써 일부 구간에서 느끼는 피로도를 간접적으로 설문 조사한 사례도 있다. 표 1에서와 같이 이런 방법들은 주로 주관적 피로 측정이라고 분류하며, 설문 조사 방법론에서 많은 연구가 이루어져 왔고 실험에 참여하는 피험자 수도 상당히 많은 편에 속한다.

이와는 달리 객관적인 피로 측정이라 불리는 방법은 주로 의학적인 장비 혹은 생리적인 실험을 통해 피로도를 측정하는 방법이다(표 2). 물론 이 방법 또한 피로도를 직접적으로 측정하는 것이 아니기 때문에 정확한 의미에서 객관적인 피로 측정이라 부르기 어렵지만, 설문 조사로 행해지는 주관적인 피로 측정 방법에 비해 의학적/생리적 실험을 통해 얻어진 데이터를 분석하여 피로도를 측정하는 방법이기 때문에 이를 객관적인 피로 측정 방법이라 부른다. 이 방법은 피로도를 측정하는 장비나 방법에 따라 몇 가지로 나눌 수 있다. 먼저 전기 자극 장치(electrode labeling devices)를 이용하여 생체 신호의 분석을 통해 시각 피로를 추정하는 방법들은 Electroencephalography (EEG), Magneto-encephalography (MEG), Electromyography (EMG), Electrocar-

diography (ECG) 등이 있다. 실험은 주로 전기 자극 장치를 피험자에게 부착한 상태에서 3차원 영상을 관측하기 전/후의 생체 신호 분석이나 3차원 영상을 관측하면서 생기는 생체 신호의 분석을 통해 피로를 역추적하는 방법이 사용된다. 이 방법들은 피로에 해당하는 생체 신호를 정확히 추출해 내었을 때 효과적이지만, 일반적으로는 그 신호가 매우 복잡한 형태를 가지고 있어 정확한 분석을 하기 힘들다는 단점이 있다. 유사한 방법으로는 fMRI(functional magnetic resonance imaging)를 이용한 방법이 있으며, 장비가 매우 고가이고 전기 장치를 이용한 장비를 실험에 동원할 수 없다는 단점을 가지고 있지만 뇌의 혈류량을 측정하여 가장 원초적인 생체 신호를 분석할 수 있다는 측면에서 최근 활발한 연구가 진행되고 있다. 일본에서는 피로를 측정하는 다른 방법으로 입안의 단백질 분비 상태를 검출하여 판별하는 방법을 사용하기도 했다. 이 방법은 신체 분비물 중 시각 피로의 척도로 특정 단백질이 분비되는 것에 착안하여 3차원 영상을 관측하기 전/후의 단백질 변화를 모니터링하여 시각 피로를 역추적하는 방법이다. 마지막으로 눈의 움직임 측정을 통해 직접적인 눈의 피로를 측정하는 방법이 있다. 3차원 영상 관찰 시에 눈의 피로가 누적되었을 때 눈의 움직임/깜박임이 평상시와는 다르다는 전제 하에 눈의 움직임/깜박임을 측정하는 eye tracker 방식, 시각 피로가 누적되었을 때에 눈의 초점 조절 반응이 잘 이루어지지 않는다는 점에 착안하여 3차원 영상의 관측 전/후에 초점 조절 반응의 차이로 시각 피로를 추정해 내는 방식은 눈의 움직임에 한정하여 피로를 추정하는 방법들이다. 생리적 방법이나 의학적인 장비를 이용하여 눈의 피로를 추정하는 방법은 실험상의 어려움 때문에 많은 피험자를 대상으로 실험하기가 매우 어렵다.

무안경식 3차원 디스플레이에서 시각 피로의 원인에 대해서는 아직 많은 연구가 필요하며 정확한 규명이 이루어지지 않았지만, 그 중에서 가장 대표적으로 주목받는 요인은 초점조절-수렴 불일치(accommodation-convergence mismatch)로 알려져 있다.^[2,3] 이는 3차원 물체의 깊이를 인지하는 생리학적 요소인 눈의 초점조절과 수렴이 실제 물체를 볼 때와는 달리 3차원 영상을 볼 때 일치하지 않아서 피로를 일으킬 수 있다는 주장으로 2000년대 초반 일본에서 많은 연구가 이루어졌다. 최근 국내에서도 눈의 피로를 측정하기 위한 방법의 일환으로 검안기를 사용한 연구가 소개되었다. 그 동안은 무안경식 3차원 디스플레이에서 눈의 피로를 측정하는 시험은 대부분 시차 격벽이나 렌티큘러 렌즈 방식을 사용한 경우였지만, 집적 영상 방식¹⁾에서 검안기를 사용한 연구는 최초로 시행되었으며 실제

REFERENCES

- [11] K. Murata, S. Araki, K. Yokoyama, K. Yamashita, T. Okumatsu and S. Sakou, *Industrial Health* **34**, 61 (1996).
- [12] S. Yamamoto and S. Matsuoka, *Brain Topogr.* **2**, 257 (1990).
- [13] B. T. Jap, S. Lal, P. Fischer and E. Bekiaris, *Expert Syst. Applic.* **36**, 2352 (2009).
- [14] A. Zhang, Z. Zhao and Y. Wang, "Estimating VDT visual fatigue based on the features of ECG waveform," in *Proc. Int. Workshop Inf. Security Applic.*, F. Gao and X. Zhu, Eds., Oulu, 446-449 (2009).
- [15] S. Fujimoto, M. Nomura, M. Niki, H. Motoba, K. Ieishi, T. Mori, H. Ikefuji and S. Ito, *J. Med. Invest.* **54**, 140 (2007).
- [16] T. Shibata, T. Kawai, K. Ohta, M. Otsuki, N. Miyake, Y. Yoshihara and T. Iwasaki, *J. Soc. Inf. Disp.* **13**, 665 (2005).
- [17] M. Miyao, S. S. Hacısalihzade, J. S. Allen and L. W. Stark, *Ergonomics* **32**, 603 (1989).
- [18] H. T. Nguyen, D. M. Isaacowitz and P. A. D. Rubin, *Ophthalmology* **116**, 355 (2009).

1) 집적 영상 방식은 시차 격벽이나 렌티큘러 렌즈 방식에서 사용하는 1차원 광학 소자 배열이 아닌 2차원으로 배열된 렌즈 어레이 혹은 핀홀 어레이를 사용하기 때문에 수평 시차뿐만 아니라 수직 시차도 제공하며, 일정 시야각 내에서는 자유롭게 시청이 가능한 차세대 디스플레이 방식 중에 하나로 주목받는 방식이다.

Fig. 3. Experimental setup and results. (a) Experimental setup. (b) Participant numbers that have different accommodative response from a real object at the position of 80 cm when they saw a 3D image (integrated 3D images at the position of 60, 70, 90, and 100 cm). (c) Accommodative response distribution of participants when they see the integrated 3D image (real and virtual case).

물체를 관찰할 때와 3차원 영상을 관찰할 때 초점 조절의 차이를 확인하는 실험이 수행되었다.^[2]

검안기는 본래 안과에서 사용되는 용도로 피험자 눈의 굴절률이나 각막 곡률, 동공의 크기 등을 측정하는 기계이다. 일반적인 검안기는 피험자가 가로막혀진 사각형 통 안의 준비된 컴퓨터 영상을 보고 눈의 굴절률을 측정하는 목적으로 사용되지만, 최근 일본에서 반투과 거울(half mirror)과 피험자 앞 쪽이 트여진 구조로 피험자가 임의의 3차원 물체를 볼 때 눈의 굴절률과 동공의 움직임 등을 측정하는 검안기가 개발되었다. 그러나 일반적인 용도의 검안기와는 달리 상기 검안기는 눈의 굴절률을 측정하는데 제약이 있다. 예를 들어, 피험자들의 눈의 굴

절률은 각기 다른데 실제 물체를 바라볼 때 위의 검안기로 측정하면 실제 물체의 위치를 정확히 반영하는 눈의 굴절률 측정이 어렵다. 이를 해결하기 위해 피험자가 일정 구간 간격으로 위치한 실제 물체와 일정 구간 간격으로 재생된 3차원 영상을 바라볼 때 측정된 굴절률 값을 바탕으로 외삽법과 보간법을 이용해 피험자가 주시하고 있는 위치를 추정한다. 이 결과를 분석하면 3차원 영상 관측 시에 피로도의 주요 요인 중에 하나로 언급되는 초점조절-수렴 불일치를 확인할 수 있다.

실험은 약 100여 명의 피험자를 대상으로 진행되었다. 각 피험자는 50 cm부터 110 cm까지 10 cm 간격으로 놓여진 실제 물체를 주시하고 검안기로 눈의 굴절률을 반복 측정하였다. 이와 유사한 실험 조건을 충족하기 위해 3차원 영상은 60 cm부터 100 cm까지(80 cm 제외) 10 cm 간격으로 영상을 재생하여 각 영상을 주시하였을 때의 눈의 굴절률을 반복 측정하였다. 실제 물체는 자발광(self-illuminant)하는 electroluminescence film(EL film)을 잘라서 사용하였고, 3차원 영상 또한 EL film과 렌즈 어레이를 이용하여 재생하였다. 유효한 실험값은 71명의 피험자로부터 얻을 수 있었으며, 각 굴절률 값의 비교는 Independent T-test와 Welch's corrected T-test를 이용하여 수행하였다($p < 0.05$).

그림 3에서 볼 수 있듯이 근거리(1 m 이내)에서 집적 영상 관찰 시에 렌즈 어레이 앞쪽으로 돌출된 3차원 영상을 볼 때는 피험자들의 약 73% 이상이 3차원 영상을 관찰하는 것을 알 수 있었으며, 렌즈 어레이 뒤쪽으로 결상된 3차원 영상을 관찰할 때에는 약 62%의 피험자가 3차원 영상을 주시하는 것을 알 수 있었다. 이 결과를 통해 집적 영상 방식에서는 피험자가 실제 물체를 주시할 때와 유사한 패턴, 즉 실제 물체를 보는 것처럼 3차원 영상을 주시하고 있음을 알 수 있다. 본 방법은 무안경식 3차원 디스플레이에서 피험자가 영상을 관측할 때 피로도의 원인이라고 언급되는 초점조절-수렴 불일치를 검증할 수 있는 한 방법이 될 수 있음을 증명하였다. 집적 영상 방식이나 초다시점 디스플레이(super multi-view display)는 단안으로도 3차원 영상을 확인할 수 있는 방식 중의 하나로 알려져 있어 눈의 굴절을 측정을 통해 초점 조절 특성을 얻어내어 수렴에 대한 측정 없이 위의 불일치를 검증할 수 있다. 그러나 단안으로 조정할 수 있는 초점 조절의 한계가 매우 근거리에서 이루어진다고 알려져 있기 때문에 제한된 범위 내에서 검안기를 이용한 깊이 인식 실험이 이루어져야 한다는 단점을 가지고 있다.

시각 피로를 측정하는 방법은 매우 다양하지만 역설적이게도 아직 어느 방법도 정확히 피로를 측정한다고 보기는 어렵다. 그만큼 아직 많은 연구가 필요한 분야이며, 이러한 연구는 궁극적으로는 피로도가 최소화된 3차원 디스플레이를 개발하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.