뇌-심장 연결성 분석을 이용한 3D 시각피로 평가 기술

DOI: 10.3938/PhiT.22.033

박상인·원명주·황민철

Evaluation Technology of 3D Visual Fatigue Using Brain-Heart Connectivity

Sangin PARK, Myoungju WON and Mincheol WHANG

If the 3D visual fatigue problems that have restrained 3D industry development are to be resolved, a study regarding the methodology on how to quantitatively evaluate visual fatigue must be done. However, because of the current situation, a standardized method to evaluate 3D visual fatigue quantitatively cannot be suggested. Therefore, this paper introduces the trend of technology and a new method that can quantitatively evaluate 3D visual fatigue by using the first and the second components of the HEP (heartbeat-evoked potential) based on the brain-heart connectivity. We identified the ERP(event-related potential) latency and the HEP components to be significant factors that could be used to quantitatively evaluate 3D visual and cognitive fatigue. This paper is significant because it reports on basic research that, through a detailed investigation of fatigue-inducing

factors, can contribute to quantitatively evaluating 3D visual fatigue and to minimizing visual fatigue.

서론

2009년 3D 영화 'Avatar'(Nickelodeon Animation Studios in USA)의 성공 이후로 3D 산업은 급격한 성장을 이루어왔다. 3D 영화는 기존 2D 영화보다 현실감 높은 콘텐츠를 시청자에게 제공함으로써 영화 산업에 크게 자리매김하였다. 또한, 3차원 텔레비전의 보급으로 시청자가 3D 콘텐츠를 다양하게 접할 수 있게 되면서 대중화되기 시작하였다. 이러한 3D 영화의 성공을 기반으로 영화 이외에 교육, 의료 등의 다양한 산업 분야에서 3D 기술 도입이 시도되고 있다.^[1,2]

그러나 3D 기술은 입체감을 통해 높은 현실감과 몰입도를 제공하는 반면, 인체 안전성(Human Factors) 이슈 또한 내포하고 있다. 인체 안전성 문제는 시각피로(visual fatigue)와 영상멀미(VIMS, visually induced motion sickness)가 대표적이다. 3D 콘텐츠를 시청하는 사람들 중에 일부는 3D 콘텐츠를 시청하는 중이나 시청 후에 눈의 피로감과 두통을 느끼거나 심한 경우 통증까지 호소하는 시각피로 증상을 나타낸다. 또한, 어지러움, 구토 등의 영상멀미 증상을 호소하기도 한다.^[3] 이러한 인체 안전성 이슈는 3D 산업 발전의 큰 저해 요인으로 작용할 가능성이 높기 때문에 3D 산업 발전을 위해 선결되어야 할 중요한 문제이다.^[4,5] 특히 시각피로는 영상멀미나 다른 인체 안전성 이슈에 비해 그

저자약력

박상인은 2011년 2월 중부대학교(이학사)를 졸업하고 2013년 2월 상명대학교 감성공학과에서 공학석사 학위를 받았다. 현재 상명대학교 박사과정 중에 있으며 연구분야는 Human Computer Interaction, Emotion Engineering, 3D Human Factors, Bioengineering이다. (ini0630@smu.ac.kr)

원명주는 2011년 2월 평생교육원 멀티미디어학과(공학사)와 2013년 2월 상명대학교 감성공학과(공학석사 수료)를 졸업하고 현재 상명대학교 석사과정 중에 있다. 연구분야는 Human Computer Interaction, Emotion Engineering, 3D Human Factors이다. (dnjsaudwn@smu.ac.kr)

황민철 교수는 Georgia Institute of Technology, Biomedical Engineering MS, PhD.(1990, 1994)로서 한국표준과학연구원 인간공학실 선임연구원(1994-1997)을 거쳐 현재 상명대학교 소프트웨어대학 디지털미디어학부 교수(1998-현재)로 재직 중이다. 대한감성과학회 회장(2010-2012)을 역임하였으며 현재 대한감성과학회 편집위원, 대한인간공학회 홍보이사를 맡고 있다. 연구분야는 Human Computer Interaction, Emotion Engineering, 3D Human Factors, Bioengineering이다. (whang@smu.ac.kr)

REFERENCES

- [1] M. Lambooi, W.-A. IJsselstein and I. Heynderickx, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIV **6490**, 1 (2007).
- [2] M. Lambooi, M. Fortuin, I. Heynderickx and W. IJsselstein, Journal of Imaging Science **53**, 30201 (2009).
- [3] H.-C. O. Li, The Korean Information Display Society **27**(3), 36 (2010).
- [4] E.-C. Lee, H. Heo and K.-R. Park, Consumer Electronics, IEEE Transactions on **56**, 1677 (2010).
- [5] S.-I. Park, M.-C. Whang, J.-H. Kim, S.-C. Mun and S.-M. Ahn, The Journal of Korean Society for Emotion and Sensibility **14**, 653 (2011).

Causes of Human Factors

Viewers' characteristics	Visual contents	Viewing environment	Display	Device
Age - Older People - Infants Children	Movement Patterns of Objects - Zoom - Yaw - Roll - Pitch	Ambient luminance Viewing Position - Viewing Freedom - Viewing Angle - Viewing Distance	Crosstalk Refresh rate Resolution Luminance Color Pseudoscapy	3D Glass Camera - Chromaticity disparity between left and right images - Difference of Optical Characteristics between left and right images - Rotation disparity between left and right images - Size disparity between left and right images - Vertical disparity between left and right images
Sex Viewing Posture - Vertical and horizontal balance between eyes and the screen - 3D glass balance (putting the glass onto one's eyes straight)	Velocity of Objects Color Luminance Contrast Frame Rate Flicker Camera Setting Disparity 3D Information Disparity	Viewing Time Light Transfer	Display Size	

Fig. 1. Cause of 3D Human Factors.

위험도는 낮으나, 가장 빈번하게 보고되고 있는 문제이므로 인체 안전성 이슈 중에서도 가장 시급하게 해결되어야 한다.^[3]

3D 시각피로를 유발하는 요인은 크게 디스플레이, 콘텐츠, 디바이스, 시청자 특성, 시청환경 요인의 다섯 가지로 크게 분류할 수 있으며, 자세한 세부 유발 요인에 대한 정보는 그림 1과 같다.^[3] 3D 시청에 따른 시각피로를 최소화하기 위해서는 세부 유발 요인에 대한 평가를 통해 콘텐츠 및 디스플레이 제작자, 시청자 등에 대한 안전 가이드라인이 제시되어야 한다. 그러나 세부 유발 요인에 따른 시각피로 평가를 위해서는 시각피로를 정량적으로 평가할 수 있는 방법론적 연구가 선행되어야 가능하다.^[4,5] 따라서 시각피로를 정량적으로 평가할 수 있는 객관적이고 신뢰성 있는 방법의 개발이 시급한 실정이다.

시각피로

1. 시각피로 연구동향

3D 시각피로를 정량적으로 평가하기 위해 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 시각피로를 평가하는 방법은 크게 주관적 평가, 영상, 생체신호의 세 가지로 구분할 수 있다.^[6] 주관평가를 이용한 시각피로 평가는 설문문을 통해 주관적으로 느껴지는 시각피로를 평가한다. 대표적으로 LCD와 PDP의 시각피로를 주관평가를 통해 비교한 연구,^[7] HDTV와 3D HDTV의 시각피로를 주관평가를 통해 비교한 연구^[8] 등이 있으며, 그 이외에도 주관평가를 통해 시각피로를 평가하는 다양한 연구들이 진행되고 있다. Li의 연구에서는 주관적 시각피로를 시각적 스트레스(visual stress), 안구 통증(eye pain), 신체통증(body pain), 상 흐림(image blurring factors)의 4 요인으로 평가할 수 있는 설문 항목을 개발하였다.^[9] 그

러나 주관평가를 통한 시각피로 평가방법은 주관적인 모호성과 개인차로 인해 정량적으로 시각피로를 평가하기에는 한계가 있다.

이러한 한계점을 보완하기 위하여 객관적인 방법을 통해서 시각피로를 정량적으로 평가하려는 연구가 진행되어 왔다. 대표적으로 영상과 생체신호를 이용한 방법이 있다. 영상을 이용한 시각피로 평가 연구는 카메라를 통해 눈 영상을 취득하고 분석하여 주로 시각 기능을 통해 시각피로를 평가한다. 눈 영상을 통한 시각피로 연구로는 VDT(visual display terminal) 작업 진행시간의 증가에 따른 눈 깜박임 비교 연구,^[10] 화면 해상도 차이에 따른 눈 깜박임 비교 연구^[11] 등이 있으며, 시각피로도가 증가할수록 눈 깜박임이 증가하는 결과를 확인하였

다. 또한 동공조절속도(pupil accommodation speed)를 통해 시각피로를 평가한 연구들이 진행되어 왔으며, 시각피로가 증가할수록 눈 깜박임이 증가하고 동공조절속도가 감소하는 결과를 보고하였다.^[4,12,13] 그러나 영상을 통한 시각피로 평가방법은 주관적 평가방법에 비해 객관적으로 시각피로를 평가할 수 있는 장점이 있지만 카메라 특성으로 인해 빛 등의 주변 환경적 영향이 크게 작용한다. 또한 시각피로에 대한 생리적 메커니즘이 고려되지 못한 한계점이 있다.

생체신호를 이용한 시각피로 평가는 생체신호를 통해 신뢰성 있고 객관적이며, 정량적으로 시각피로를 평가할 수 있다는 장점이 있다. 시각피로 평가에 이용되는 대표적인 생체신호에는 심전도(ECG, electrocardiogram)와 뇌파(EEG, electroencepharography)가 있다. 심전도에서 R-R 간격을 계산하고, 스펙트럼(spectrum) 분석을 통해 교감과 부교감신경계의 활성도를 평가할 수 있다. 이를 통해 시각피로를 평가하는 연구에

REFERENCES

- [6] Y.-J. Kim, E.-C. Lee, M.-C. Whang and K.-R. Park, The Journal of the Ergonomics of Korea **30**, 195 (2011).
- [7] M. Takahashi, The Korean Display Conference COEX (2006).
- [8] S. Yano, S. Ide, T. Mitsuhashi and H. Thwaites, Displays **23**, 191 (2002).
- [9] H.-C. O. Li, The Korean Society of Broadcast Engineers **15**, 607 (2010).
- [10] M. Miyao, S.-S. Hacisalihzade and I.-S. Allen, Ergonomics **32**, 603 (1989).
- [11] K. Kaneko and K. Skamoto, Perceptual and Motor Skills **92**, 234 (2001).
- [12] E.-C. Lee, S. Lee, C.-S. Won and K.-R. Park, IEEE Transactions on Consumer Electronics **55**, 2294 (2009).
- [13] E.-C. Lee, K.-R. Park, M.-C. Whang and K.-H. Min, International Journal of Industrial Ergonomics **39**, 798 (2009).

Fig. 2. Brain-Heart Connectivity through afferent pathway.

서는 시각피로가 증가할수록 교감신경계의 활성도가 증가하는 연구 결과를 보고하였다.^[5,14] 뇌파 또한 스펙트럼 분석을 통해 각 주파수 대역별 파워 값을 추출할 수 있으며, 이를 시각피로 평가에 이용한 연구가 있다. Trejo 등의 연구에서 시각피로가 증가할수록 theta(6-7 Hz)와 alpha(8-11 Hz) 대역의 파워가 증가하였다.^[15] Li 등의 연구에서는 시각피로가 증가할수록 12 Hz 이상의 대역의 파워가 증가하는 결과를 보고하였다.^[16]

2. 시각피로 & 인지피로

대부분의 3D는 양안의 시차를 이용해 좌안과 우안에 각각의 영상을 투사하고, 두 영상이 융합되는 과정을 통해 입체를 인지하게 된다. 2D에 비해 3D 콘텐츠는 깊이 정보를 내포하고 있어 이를 융합하여 입체로 인지하는 과정에서 인지적 과부하(cognitive load)가 발생할 수 있다. 이처럼 최근 시각피로를 단순한 눈의 피로로 보는 것이 아니라, 시각정보처리 과정의 과부하로 보는 또 다른 견해가 있다. 시각피로는 시각적 불편함보다는 인간의 시각정보 처리과정의 과부하로 인한 인지피로와 관련이 깊다.^[17-19] 따라서, 깊이 정보를 포함한 두 상을 융합하고 입체를 인지하는 능력이 떨어지는 경우(선천적 또는 피로 요인), 대뇌의 시각 정보처리 과정의 과부하를 초래할 수 있다. 이처럼 시각적 불편감은 인지적 로드로 해석할 수 있다는 주장이다.

또한 사람이 인지적 피로를 느끼게 되면 어느 한곳에 집중하기 어려워지고 정보처리 과정의 신경적 리소스(neuronal resources)를 반영하는 유발전위(EP, evoked potential) 성분(ex. P1, P3, P7, and etc.)이 나타난다.^[16,20-22] 사건관련전위(ERP, event-related potential)를 통한 시각피로 연구는 이러한 유발 전위반

Fig. 3. Experimental Environment.

응을 이용해 인지피로를 평가한다. Li 등의 연구에서는 2D와 3D 시청에 따른 'Oddball Paradigm' 태스크 결과, P700 성분이 나타나고 잠복기(latency)가 증가하는 결과를 보고하였다.^[16] Mun 등의 연구에서는 P600 성분이 나타나고 잠복기가 증가하는 결과를 나타내었다.^[22] 일반적인 인지 태스크의 경우 P300 성분이 나타나는 것으로 알려져 있으나, 상기 연구에서 P700과 P600의 후기 성분이 나타난 것은 인지적 로드로 인한 잠복기의 증가로 보고하였다.^[22] 사건관련전위를 이용한 시각피로 평가는 시각피로를 인지적 관점에서 접근함으로써 객관적이고 정량적으로 시각피로를 평가할 수 있는 이점이 있다. 그러나 사건관련전위 측정을 위해 표적자극(target stimulus)을 제시해야 함으로써 실시간 평가에 적용하기에는 한계가 있다. 또한 인지 기능과 관련된 인체 내의 전반적인 매커니즘이 고려되지 않고 뇌의 단편적인 접근을 통해 인지반응을 평가하는 한계가 있다.

뇌-심장 연결성(Heartbeat Evoked Potential)

심장의 미주신경(vagus nervous)은 혈압, 심장박동, 심장리듬

REFERENCES

- [14] K. Sakamoto, S. Asahara, S. Sakashita, K. Yamashita and A. Okada, 2012 IEEE 16th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE), 1 (2012).
- [15] L.-J. Trejo, R. Kochavi, K. Kubitz, L.-D. Montgomery, R. Rosipal and B. Matthews, in *Proceedings of the SPIE* (2006).
- [16] H.-C. O. Li, I. Seo, K. Kham and S. Lee, 3DTV Conference (2008).
- [17] C. Blakemore, *Vision Research* **10**, 43 (1970).
- [18] M. Lambouij, M. Fortuin, I. Heynderickx and W. IJsselstein, *Journal of Imaging Science* **53**, 201 (2009).
- [19] Z. Kapoula, I. Evdokimidis, N. Smyrnis, M.-P. Bucci and T.-S. Constantinidis, *Neuroreport* **13**, 1893 (2002).
- [20] A. Murata, A. Uetake and Y. Takasawa, *International Journal of Industrial Ergonomics* **35**, 761 (2005).
- [21] P. Toffanin, R. Jong, A. Johnson and S. Martens, *International Journal of Psychophysiological* **72**, 289 (2009).
- [22] S. Mun, M.-C. Park, S.-I. Park and M.-C. Whang, *Neuroscience Letters* **525**, 89 (2012).

등과 같은 심장변화의 정보를 구심성 신경로(afferent pathway)를 통해 대뇌에 전달한다. 심장 변화의 정보는 뇌간의 고립로핵(NTS, nucleus of tractus solitarius)에서 통합되고 시상(thalamus), 시상하부(hypothalamus), 그리고 편도체(amygdala)를 거쳐 대뇌피질(cortex)에 전달된다. 뇌와 심장을 연결하는 구심성 신경로는 수행능력(performance)과 인지기능(cognitive function)의 정보를 반영한다.^[23,24] 이처럼, 뇌와 심장의 구심성 신경로를 통한 연결성은 인간의 수행능력과 인지능력을 평가할 수 있는 중요한 신경적 메커니즘이다. 외부로부터 들어오는 감각정보(sensory information)는 심장에서 우선적으로 반응하고 이에 따른 심장 변화의 정보는 구심성 신경로를 통해 대뇌에 전달된다. 그리고 감각기관을 통해 대뇌로 전달된 정보와 통합되어 외부 환경에 대한 정보를 인지하게 된다.^[25] 따라서 뇌의 단편적인 반응이 아닌, 뇌와 심장의 연결성을 통해 인지능력을 평가하는 것이 바람직하다. 뇌와 심장의 연결성을 나타내는 대표적인 현상 중에 하나가 HEP(heartbeat evoked potential) 반응이다.

HEP는 심장박동에서 나타나는 R-peak의 정보(information)가 구심성 신경로를 통해 뇌와 동기화되는 현상으로 뇌파의 알파(alpha) 리듬의 활성도가 증가하는 현상을 나타낸다. HEP는 초기성분(first component)과 후기성분(second component)으로 구분된다. 초기성분은 R-peak 발생 이후, 50 – 250 ms에서 나타나는 유발전위반응(evoked potential)으로 심장에서 뇌로 전달되는 구심성 신호가 도달하는 시간정보를 내포하며, 초기성분의 알파 파워값이(10 Hz 대역) 높을수록 뇌에서 심장으로 가는 신경적 정보의 전달속도가 빠른 것을 의미한다. 후기성분은 R-peak 발생 이후, 250 – 600 ms에서 나타나는 유발전위반응으로 심장에서 뇌로 전달되는 혈류가 도달하는 시간정보를 내포하며, 후기성분의 알파 파워값이(9 Hz, 12 Hz 대역) 높을수록 뇌에서 심장으로 가는 혈류의 전달속도가 빠른 것을 의미한다.^[24,26]

연구: 인지반응 기반 3D 시각피로 평가

1. 연구 방법

본 연구에 참여한 피험자는 시력(또는 교정시력)이 0.8 이상인 28명(여 14명; 평균 나이 24.1±3.1)을 대상으로 하였다. 3D 시청 군의 경우 입체시 테스트를 실시하여 입체시 정상인을 대상으로 실험을 진행하였다. 실험에 참여한 28명의 피험자는 무작위 배정으로 각각 14명씩 2D 또는 3D 시청 군으로 구분하였다. 피험자는 편안한 상태에서 ‘스텝업-3D’(Summit Entertainment, Touchstone Pictures in USA, 2010)를 1시간 동안 시청하였다.

이때 2D와 3D 콘텐츠 시청에 따른 시각피로를 확인하기 위해서 시청 전과 시청 후에 주관평가와 인지피로를 평가할 수

Fig. 4. Experimental procedure.

있는 태스크를 실시하였다. 주관평가는 시각적 스트레스(VS, visual stress), 안구통증(EP, eye pain), 신체통증(BP, body pain), 상 흐림(IBP, image blurring factors)의 4가지 요인으로 구성되었으며, 5점 척도로 보고하게 하였다. 또한 3D 인지 피로를 측정하기 위해서 ‘Heart Lock-In Technique(Heart math)’를 3분간 실시하였으며, 기존의 인지피로 방법의 사건관련전위를 통하여 인지피로 발생 여부를 확인하기 위해 ERP 태스크를 진행하였다. 실험 절차는 그림 4와 같다.

2. 연구 결과

주관평가 결과, 시각적 스트레스(VS), 신체통증(BP), 상 흐림(IBP)의 세 가지 요인에서 2D보다 3D 시청 군의 시각피로가 더 크게 증가하는 패턴을 나타내었으며, 통계적으로 유의한 차이를 확인하였다($p < .05$).

REFERENCES

- [23] C. Wolk, M. Velden, U. Zimmerman and S. Krug, Journal of Psychophysiology 397 (1989).
- [24] R. McCraty, M. Atkinson, D. Tomasino and R.-T. Bradley, Integral Review 5(2), 10 (2009).
- [25] A.-L. Hansen, B.-H. Johnsen and J.-F. Thayer, International Journal of Psychophysiology 48, 263 (2003).
- [26] R. McCraty and A. Watkins, “Autonomic Assessment Report: A Comprehensive Heart Rate Variability Analysis-Interpretation Guide and Instructions”, Boulder Creek, CA, Institute of HeartMath, pp. 1-42 (1996).

Fig. 5. ERP latencies between the 2D & 3D condition.

Fig. 6. Rate of change in HEP first component between the 2D & 3D condition.

ERP latency 분석 결과, 2D 시청 군의 경우 모든 측정지점에서(F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2) ERP latency가 감소하는 패턴을 나타냈으나, 3D 시청 군의 경우 'F4' 지점을 제외한 모든 지점에서 증가하는 패턴을 확인하였다. 이때 'F3', 'P3', 'P4', 'O1', 'O2' 지점에서 두 집단 간의 유의한 차이를 확인하였다 ($p < .05$).

HEP 초기성분의 알파 파워값 분석결과 2D와 3D 시청 군에서 'P4' 지점을 제외한 모든 측정지점의 알파 파워값이(10 Hz) 증가하는 패턴을 나타내었다. 특히 'F3'와 'F4' 지점에서 두 집단 간의 유의한 차이를 확인할 수 있었다 ($p < .05$).

HEP 후기 성분의 알파 파워값 분석결과 2D와 3D 시청 군에서 'P4' 지점을 제외한 모든 측정지점의 알파 파워값이(10 Hz) 증가하는 패턴을 나타내었다. 특히 'F3'와 'F4' 지점에서 두 집단 간의 유의한 차이를 확인할 수 있었다 ($p < .05$).

HEP 초기 성분 및 후기 성분 결과는 그림 6, 7과 같다.

결론 및 논의

상기 연구 결과에 따르면 첫째, 주관평가 결과 2D 시청 군보다 3D 시청 군에서 주관적으로 시각피로를 더 느끼는 것으로 나타났다. 둘째, ERP latency 결과의 경우 ERP 태스크 수행결과에 따라 P600 성분이 나타났고, 2D보다 3D 시청 군의

Fig. 7. Rate of change in HEP second component between the 2D & 3D condition.

ERP latency가 딜레이되는 결과를 확인하였다. 일반적으로 ERP의 P300 성분은 외부 환경으로부터 들어오는 감각정보에 대하여 인간이 인지하는 과정을 반영하는 파라미터이다. 이는 특정 자극에 집중하고 있는 경우에 자극이 제시되면 나타나는 것으로 P300의 latency가 증가하는 것은 자극을 인지하는 과정에서 로드가 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 상기 연구 결과에서 ERP(P600)의 latency가 딜레이되는 현상은 시각정보처리 과정의 인지적인 로드로 해석 가능하며, 고인지 과정(high level cognition)을 반영하는 지표로 제시되는 태스크의 수준이 높을수록 후기 성분이 나타날 수 있다. 즉, 3D 정보를 인지하는 과정에서 나타나는 시각정보 처리 시스템의 과부하 현상으로 정리할 수 있다. 셋째, HEP 초기성분과 후기성분의 분석 결과 2D 시청군보다 3D 시청군의 알파 파워값이 'F3'와 'F4' 지점에서 더 크게 증가하는 것으로 확인하였다. HEP의 초기 성분 결과는 구심성 신경로를 통한 미주신경의 신경적 정보 전달 속도가 3D 시청 군에서 더 빠른 것으로 해석할 수 있다. 이것은 구심성 신경로를 통한 신경적 정보전달이 활발하게 일어나는 것으로 눈을 통해 들어오는 시각정보량이 증가한 것으로 해석할 수 있으며, 이를 통해 대뇌의 시각정보 처리 시스템이 시각정보를 처리하는 과정에 있어서 과부하가 되는 현상으로 볼 수 있다. 또한 HEP의 후기 성분 결과 구심성 신경로를 통한 미주신경의 혈류의 전달 속도가 3D 시청 군에서 더 빠른 것으로 나타났다. 일반적으로 대뇌의 정보 처리량이 증가하게 되면 많은 혈류를 요하게 된다. 이러한 관점에서 혈류 전달속도가 2D에 비해 3D 시청 군에서 빠르게 나타나는 것은 시각정보처리과정이 활발하게 일어나고 있음을 반영한다.

상기 연구 내용을 기반으로 시각피로를 정량적으로 평가할 수 있으며, 3D 시각피로를 유발할 수 있는 다양한 세부유발요인 규명에 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 특히 3D 시각 및 인지 피로는 좌우상을 융합하는 과정의 영향이 크기 때문에 이에 영향을 미칠 수 있는 나이, 입체시력, 수렴, 조절, 동공간 거리, 양안 시차 등의 세부요인에 대한 규명이 이루어져야 할 것이다.