



머리 부분 탑재형 디스플레이를 이용한 입체시검사법

A Prototype of a Stereoacuity Test Using a Head-Mounted Display

조현아¹ · 김효선² · 목랑균² · 박성은³ · 최웅락³ · 한승한³ · 한진우¹

Hyuna Cho, MD¹, Hyosun Kim, PhD², Rang Kyun Mok, MS², Sung Eun Park, MD³, Wungrak Choi, MD³,
Sueng-Han Han, MD³, Jinu Han, MD¹

연세대학교 의과대학 강남세브란스병원 안과학교실 시기능개발연구소¹, 삼성디스플레이 디스플레이연구소²,
연세대학교 의과대학 세브란스병원 안과학교실 시기능개발연구소³

Institute of Vision Research, Department of Ophthalmology, Gangnam Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine¹, Seoul, Korea
R&D Center, Samsung Display², Yongin, Korea

Institute of Vision Research, Department of Ophthalmology, Severance Hospital, Yonsei University College of Medicine³, Seoul, Korea

Purpose: To evaluate the test-retest reliability of a contour-based stereoacuity test using a head-mounted display (HMD) and compare it with other stereotests.

Methods: Thirty-two healthy adults aged 23-47 years were recruited from a tertiary hospital between August 2017 and July 2018. Two separate contour-based circles (crossed disparity: 135-1,350 arcsecs) were generated on a high-resolution phone display (Galaxy S7; Samsung, Seoul, Korea) using an HMD (Galaxy Gear VR). Two images were independently projected to each eye as graded circles with a random dot background. The results of the new HMD stereotest were compared to those of the standard Randot and TNO stereotests. The test-retest reliability was assessed using the Bland-Altman plot and Cohen's kappa statistics.

Results: Among the 32 study participants, 17 (53%) were males and the mean age was 30.1 ± 4.8 years (range: 23-47). The mean stereoacuity was 160.3 ± 53.5 arcsecs in the first HMD stereotest (HMD1), 28.4 ± 12.5 arcsecs in the Randot stereotest, 96.1 ± 83.5 arcsecs in the TNO stereotest, and 143.3 ± 47.7 arcsecs in the second HMD stereotest (HMD2). The Bland-Altman plot showed a mean difference of 0.042 (-0.189 to +0.272, 95% limits of agreement) between HMD1 and HMD2. The reliability analysis showed an intraclass correlation coefficient of 0.499 ($p = 0.022$) and agreement of 81.25% in Cohen's kappa statistics (Cohen's kappa index = 0.119, $p = 0.017$).

Conclusions: The HMD stereotest without monocular cues showed fair test-retest reliability and reproducibility. Further studies using a high resolution display are needed to confirm the validity of the HMD stereotest.

J Korean Ophthalmol Soc 2022;63(3):301-308

Keywords: Head-mounted display, Stereopsis, Virtual reality

■ Received: 2021. 10. 7. ■ Revised: 2021. 12. 1.

■ Accepted: 2022. 2. 23.

■ Address reprint requests to **Jinu Han, MD**

Institute of Vision Research, Department of Ophthalmology,
Gangnam Severance Hospital, #211 Eonju-ro, Gangnam-gu,
Seoul 03722, Korea

Tel: 82-2-2019-3440, Fax: 82-2-312-0541

E-mail: jinuhan@yuhs.ac

* Conflicts of Interest: The authors have no conflicts to disclose.

입체시란 우안과 좌안에서 받아들인 물체 이미지 간의 시차를 통해 얻는 깊이 정보를 말한다. 양안의 동공 중심 사이 거리가 평균 65 mm 존재하고 이로 인해 양안이 한 물체를 볼 때 서로 다른 각도로 상을 받아들여 뇌에서 상을 융합하면서 상대적인 깊이를 인지하게 되는 것이다.¹ 좋은 입체시를 가지기 위해서는 좋은 양안의 시력, 양안 안구 정렬 및 감각융합이 필요하다.² 따라서 단안의 시력이 떨어지는 약시나 부등시, 안구 정렬에 문제가 생기는 사시로 인하여 정상적인 양안 융합이 되지 않는 경우 입체시에 문제가

생기게 된다.³⁻⁵ 그렇기에 영유아에서 사시 환자나 약시 환자에서 입체시검사를 하게 되면 입체시 정도가 정상인 아이보다 떨어져 있게 된다.^{6,7} 입체시는 생후 3개월부터 빠르게 발달하여 생후 6개월이 되면 성인 수준에 도달하며 9세가 되면 일정해진다.⁸ 이것은 시력 발달보다 입체시 발달이 빠른 것을 보여주고 따라서 영아 내사시가 있는 경우 좋은 입체시를 가지기가 힘들다.⁹ 반면에 사시가 성인이 된 후 발생한 경우에는 입체시 상실을 체감하게 된다. 사시수술을 통해 입체시 회복을 목표로 하기도 하고 입체시 회복 정도를 수술 후 경과 관찰에도 사용한다.¹⁰⁻¹² 현대사회에서 영상매체를 통한 교육이 늘어나고 있고, 3D 영화 등 다양한 분야에서 입체시의 필요성이 증가하고 있다. 입체시의 발달은 어릴 때 완성되기에 소아에서 입체시를 통해 안과적 문제를 조기 발견하는 것이 유용하지만, 입체시를 평가하는 다양한 검사 방법이 복잡하고 협조가 어려워 소아에서는 진행하기 어렵다는 단점이 있고 기존의 검사법은 편광안경 혹은 적록안경으로 양안을 분리하나, Randot 입체시검사는 한눈단서가 존재하며 TNO 입체시검사는 입체시가 존재하여도 contour-based가 아닌 random-dot stereogram을 보지 못하는 사람에서는 검사가 제한된다는 단점이 있다.^{13,14}

Head-mounted display (HMD)를 이용한 가상현실의 응용은 현재 다양한 분야에서 연구되고 있다. 가상현실을 이용한 게임, 여행은 이제 흔히 접할 수 있는 것이 되었고, 의학 분야에서도 로봇수술 연습 등으로 사용되고 있다.^{15,16} 안과 영역에서도 HMD를 이용하여 기존의 입체시검사에서는 구현할 수 없었던 3D 영상을 통해 입체시검사를 만들어 보았다. 기존의 입체시검사는 인쇄된 책자와 검사 종류에 따

라 다르지만 편광 혹은 적록안경이 필요하고 인쇄물이기 때문에 입체 영상의 종류나 양안 시차의 크기를 변경시킬 수 없다는 단점이 있었다. 하지만 HMD를 사용하면 다양한 종류의 검사 자극을 사용할 수 있고 검사 결과 또한 바로 입력되어 비교 분석이 쉬워질 것이다. 따라서 본 연구에서는 정상 성인을 대상으로 HMD를 이용한 새로운 입체시검사와 기존 입체시검사들을 시행하여 검사들 간의 결과 값을 비교 분석하여 차이가 있는지 알아보고자 하였다.

대상과 방법

2017년 8월부터 2018년 7월까지 강남세브란스병원에서 정상 성인을 대상으로 전향적으로 모집되었다. 본 연구는 본원 생명윤리심의위원회의 승인을 받았으며(승인 번호: 4-2017-0507), 임상시험등록(www.clinicaltrials.gov: NCT 032234504) 및 헬싱키선언을 준수하여 시행되었다. 이전에 안과 수술력이 있거나 프리즘 교대가립검사를 통하여 어떠한 각도의 수직편위 및 내사시 혹은 10프리즘디옵터 이상

Table 1. The stereo acuity test using head-mounted display

Pixel disparity	Arcsec	Log arcsec
1 pixel disparity	135	2.13
2 pixel disparity	270	2.43
3 pixel disparity	405	2.61
4 pixel disparity	540	2.73
5 pixel disparity	675	2.83
6 pixel disparity	810	2.91
10 pixel disparity	1,350	3.13

Arcsec = seconds of arc.

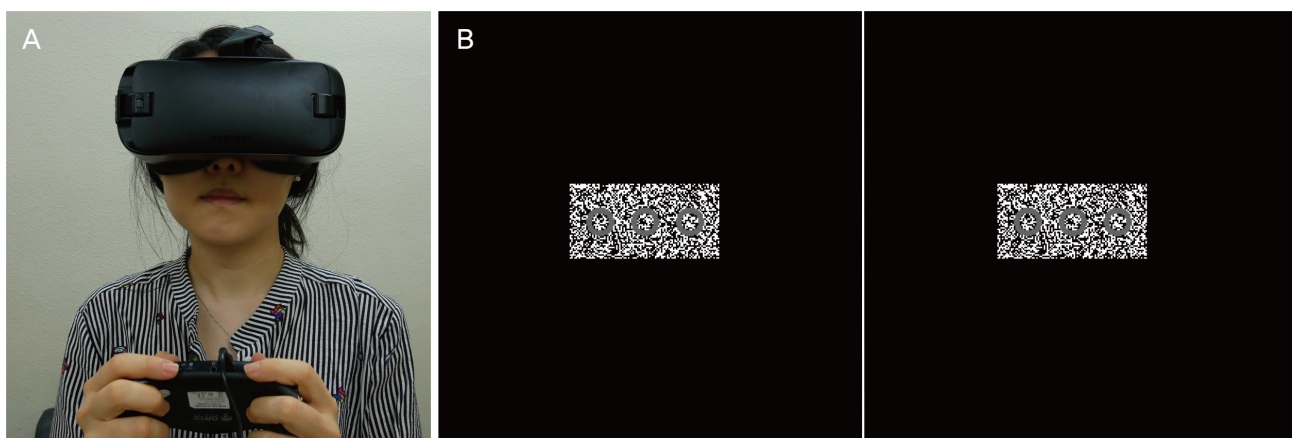


Figure 1. A stereotest using head-mounted display. (A) Representative image of stereotest using head-mounted display. The subject can select the answer using bluetooth joysteeck. (B) Two separate images were shown at each eyes. Among three circles, only one circle has retinal disparity, which induces stereopsis. The one pixel disparity generates 135 seconds of arc. The patient consented to the use of these photographs.

의 외사위 혹은 외사시가 있는 환자는 대상에서 제외되었다. 약시의 과거력이 있거나 한천석시력표상 나쁜 눈의 교정시력이 0.7 이하인 경우는 제외되었다. 입체시검사는 새로 개발한 HMD를 이용한 입체시검사를 진행하고, 편광안경을 이용한 Randot 입체시검사(Stereo optical, Chicago, IL, USA) 그리고 적록안경을 이용한 입체시검사법인 TNO 입체시검사(TNO test, 18th edition, Lameris Ootech B.V., The Netherlands)를 진행하였으며, 마지막으로 다시 HMD를 이용한 입체시검사를 반복하여 시행하였다.

HMD를 이용한 입체시검사

HMD를 이용한 입체시검사는 Galaxy Gear VR (Samsung, Yongin, Korea)를 이용하여 핸드폰(Galaxy S7, Samsung, Yongin, Korea)을 Galaxy Gear VR 전면에 장착하여 머리

에 착용하는 방식으로 검사가 이루어지며, 양안에 각각의 독립된 이미지가 투영되게 된다. Galaxy S7은 AMOLED 방식의 5.1인치 16:9 비율의 Wide Quad High Definition (WQHD [2,560×1,440])의 가로 4.4인치 및 세로 2.9인치 (577 Pixels per Inch [PPI])의 디스플레이로 60 Hz의 주사율을 가진다. Galaxy Gear VR의 내부 렌즈는 6.70의 겹보기 배율을 가진 렌즈로, HMD를 착용하면 핸드폰 디스플레이로 총 96°의 화각을 제공하며, 1픽셀은 0.0375°의 화각 (0.0375 degree×3,600=135 seconds of arc)의 망막시차를 발생시킨다. 따라서 본 연구에서는 1-6픽셀과 10픽셀 시차의 입체적인 원, 총 7단계의 입체시를 구현하였으며 각각은 135, 270, 405, 540, 675, 810, 1,350초각의 입체시 정도를 나타낸다(Table 1). Galaxy S7과 연결된 HMD를 대상자가 머리에 착용한 후 HMD와 블루투스로 연결된 조이스틱을

Table 2. The results of stereoacuity tests using three different stereoacuity tests

Number	Sex/age (years)	PD (mm)	HMD1	Randot	TNO	HMD2
1	F/29	62	270	25	120	135
2	M/38	65	135	20	60	135
3	F/47	65	135	20	120	135
4	F/29	59	135	30	120	135
5	M/30	69	135	30	60	135
6	F/27	58	270	20	120	135
7	M/34	64	135	25	120	135
8	M/29	63	135	30	60	135
9	M/26	63	135	30	60	135
10	F/31	58	270	25	120	135
11	M/29	65	135	25	30	135
12	F/35	61	270	70	120	405
13	M/35	67	135	20	30	135
14	M/24	66	135	20	60	135
15	M/24	65	135	30	60	135
16	F/24	60	135	20	15	135
17	F/30	62	135	20	60	135
18	M/32	62	135	30	120	135
19	F/32	62	135	30	60	135
20	M/31	66	135	30	120	135
21	F/29	61	135	20	120	135
22	F/26	61	270	20	120	135
23	M/27	69	135	30	480	135
24	M/31	62	135	20	120	135
25	M/34	63	135	20	30	135
26	F/30	59	135	20	30	135
27	F/30	58	270	50	240	135
28	M/27	64	135	30	60	135
29	M/35	62	135	25	60	135
30	M/23	63	135	30	60	135
31	F/29	61	135	25	60	135
32	F/25	61	135	70	60	135

The stereoacuity was presented as seconds of arc.

PD = pupillary distance; HMD1 = head-mounted display test (first trial); HMD2 = head-mounted display test (second trial); F = female; M = male.

이용하여 검사를 진행한다(Fig. 1A). 대상자는 2개의 이미지를 각각 보게 되고 각 이미지는 3개의 원이 한 줄로 배열되어 있고 배경에 난점무늬가 있다(Fig. 1B). 안경을 착용하는 대상자의 경우 안경 위에 HMD를 착용하게 된다. 세 개의 원 중 한 개는 무작위적으로 망막시차를 통하여 입체적인 원으로 구현이 되며, 대상자는 화면을 보면서 3개의 원 중에서 튀어나오는 원을 조이스틱을 이용하여 선택하게 된다. 두 번의 연속된 오답이나 무반응이 있기 전 단계를 시차를 대상자의 입체시로 기록하였다. 첫 번째 검사를 시행하고 Randot과 TNO 입체시검사를 시행한 후 두 번째 HMD 입체시검사를 진행하였다.

Randot 입체시검사 및 TNO 입체시검사

Randot 입체시검사는 편광안경을 이용하여 양안 분리한 상태에서 진행하는 검사법으로 난점그림, 동물, 원의 순서로 검사를 진행하였다. 원검사의 경우 원을 세 개씩 한 줄로 배열하고 원검사 부분의 배경에 난점무늬를 이용해 한 눈단서를 피하는 입체시검사로, 10개의 원으로 20-400초각의 시차를 검사할 수 있다. 400초각부터 차례대로 검사하고 HMD와 같은 방법으로 결과를 판정하였다. TNO 입체시검사는 우안에 녹색인 적록안경을 이용한 색분리 입체도(anaglyph) 방식으로 양안을 분리하는 입체시검사법이다. 보색으로 인쇄된 적록난점검사 그림을 사용한다. 스크리닝 검사로 숨어있는 나비, 원, 마름모, 세모, 네모의 도형이 어디에 숨어있는지 찾고, 조각이 빠진 동그라미 모양을 보고 조각이 빠진 방향을 말하는 검사로 15-480초각까지의 정밀한 입체시를 측정할 수 있으며, HMD와 같은 방법으로 결과를 판정하였다.

통계는 STATA 16.1 (StataCorp LLC, College Station, TX, USA)를 사용하여 분석하였으며, 입체시검사의 결과는 통계 처리를 위해 로그함수로 표현하였다. HMD 입체시검사의 반복성은 Bland-Altman plot과 intraclass correlation coefficient (two-way mixed, absolute agreement), Cohen's kappa 통계를 사용하였다. p 값이 <0.05 일 때 통계학적으로 의미 있는 것으로 판단하였다.

결 과

총 32명의 대상자를 모집하였고 그중 남자는 17명(53.1%), 여자는 15명(46.9%)이었다. 평균 나이는 30.1 ± 4.8 세(23-47세)였다. 각 검사들의 평균 입체시 결과를 보면, 1차 HMD의 경우 평균 160.3 ± 53.5 초각(135-270초각)의 입체시를 가졌고 2차 HMD에서는 평균 143.3 ± 47.7 초각(135-405초각)의 입체시를 나타냈다(Table 2, 3). Randot 입체시검사에서는 평균 28.4 ± 12.5 초각(20-70초각)의 입체시를 나타냈으며, TNO 입체시검사에서는 평균 96.1 ± 83.5 초각(15-480초각)의 입체시를 나타냈다(Table 2, Fig. 2). 각 입체시의 로그함수값은 1차 HMD검사서 2.19 ± 0.12 로그초각, 2차 HMD 검사서 2.15 ± 0.08 로그초각의 입체시를 나타냈다. Randot 입체시검사에서는 1.43 ± 0.14 로그초각, TNO 입체시검사서 1.88 ± 0.29 로그초각의 결과를 나타내어, 비록 HMD

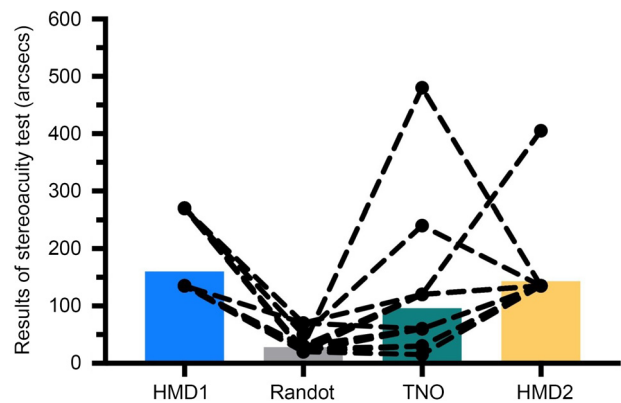


Figure 2. Paired dot and box plot of stereoacuity test using three different stereoacuity tests. Paired dot represents the stereoacuity in each subject. Box plot represents overall the average of stereoacuity in each test. The results of the Randot stereoacuity showed good stereoacuity compared to the other methods ($p < 0.001$, Wilcoxon sign rank test). The results of stereoacuity using head-mounted display showed good test-retest reliability ($p = 0.017$, Cohen's kappa statistics). HMD1 = first trial of stereotest using head-mounted display; HMD2 = second trial of stereotest using head-mounted display.

Table 3. Categorical agreement between the Randot stereotest and the TNO stereotest in normal adult subjects

Randot stereotest (arcsec)	TNO stereotest (arcsec)			
	800-Nil	250-600	70-240	20-60
800-nil	0	0	0	0
250-600	0	0	0	0
70-240	0	0	1	1
20-60	0	1	12	17

The number of subjects represented by each category is embedded in each category.
Arcsec = seconds of arc.

검사에서 135초각 이하의 입체시를 측정할 수 없었으나 전반적으로 Randot검사에서 입체시 결과가 다른 검사에 비하여 양호한 결과를 나타냈다($p < 0.001$, Wilcoxon signed rank test).

본 검사가 한눈단서를 가지고 있는지에 대하여 3명의 대상자(subject No. 1, 2, 3)를 상대로 각각의 눈을 감고 검사를 진행하였을 때, 3명 모두 1,350초각의 가장 낮은 단계의 입체시도 통과하지 못하였다. HMD 입체시검사의 신뢰도를 평가해보면 첫 번째와 두 번째 검사에서 총 32명 중 26명(81.3%)에서 첫 번째와 두 번째 검사의 결과가 일치하였으며, 불일치하는 6명에서 모두 1 disparity 레벨 차이만을 보였다(Table 2). HMD 첫 번째 검사 결과와 두 번째 검사 결과값을 비교하기 위해 Bland-Altman plot을 사용하여 분석하였다.¹⁷ HMD 입체시검사 첫 번째 검사와 두 번째 검사의 평균 차이는 0.042 (-0.189 to +0.272, 95% limits of agreement)였으며 두 검사의 평균값은 2.130-2.519로그초각 사이 값을 가졌다(Fig. 3). Test-retest reliability analysis를 통한 HMD 입체시검사의 신뢰도를 보았을 때, intraclass correlation coefficient (ICC) 0.499였고 통계적으로 보통의 재현성을 보였다($p = 0.022$).¹⁸ Cohen's kappa 통계지수를 통하여 HMD 입체시검사의 신뢰도를 보았을 때, 81.25%의 신뢰도를 보였으며, 기대되는 반복성(expected agreement)은 78.71%로 kappa 지수는 0.119였고 통계학적으로는 유의하였지만 보통 신뢰도를 보였다($p = 0.017$, kappa 해석: below<0.00: poor, 0.00-0.20: slight; 0.21-0.40: fair, 0.41-0.60:

moderate; 0.61-0.80: substantial; 0.81-1.00: almost perfect).^{17,19}

Randot과 TNO 입체시의 결과와 연관이 있는 인자를 알아보기 위해, 다중선행회귀분석을 하였을 때, 나이, 동공 간의 거리, 성별 모두 입체시의 정도와 유의한 상관관계를 보이지 않았다. 전반적으로 Randot 입체시 결과가 TNO 입체시 결과보다 양호하였으나(Table 3), 2명에서는 TNO 입체시의 결과가 Randot 입체시보다 좋은 결과를 보였다(subject No. 16, 32). 또한, 총 32명에서 Randot 입체시 결과는 모든 성인에서 70초각 혹은 그보다 좋은 입체시를 보였으며, TNO 입체시검사에서는 2명을 제외한 30명(93.8%)의 성인에서 120초각 혹은 그보다 좋은 입체시를 보였다.

고 찰

본 연구에서는 한눈단서가 전혀 없는 HMD를 이용한 새로 고안한 입체시검사법과 기존 입체시검사법 간의 비교를 통하여 검사의 통계학적으로 유의한 보통의 재현성을 확인할 수 있었다. 또한, Randot 입체시검사의 결과가 평균적으로 TNO 입체시검사 결과에 비하여 좋은 결과를 보이고 입체시검사 결과에 나이, 동공 사이 거리, 성별 등의 인자가 유의하게 작용하지 않는 것을 확인하였다. 이전의 연구 결과에 의하면 입체시는 나이가 들에 따라 감소하며, 60세 이후에 이러한 현상이 더 두드러진다고 설명하고 있다.^{8,20} 하지만, 본 연구에서는 나이가 들어감에 따라 입체시의 저하가 뚜렷하지 않았다.

양안시의 기능을 평가함에 있어서 입체시검사는 사시 환자의 기능 평가에 기본이 되는 검사이다. 입체시란 양안이 분리된 두 개의 이미지를 보고 각 망막에 이미지가 맺혀서 서로 다른 상이 융합되어 입체적으로 보이는 것을 말한다. 입체시검사는 실제로 원근의 차이를 만들어 검사를 하거나, 편광안경 혹은 적록안경을 이용하여 벡토그래프나 색분리 입체도를 만들게 된다. 벡토그래프는 편광필터를 통해서 각 눈에 다른 상을 만들게 되고, 색분리 입체도는 빨강과 초록의 보색 필터를 이용하여 다른 상을 만든다. 근거리 입체시검사는 티트무스 입체시검사, Randot 입체시검사, TNO 입체시검사 등이 있는데, Randot 입체시검사는 편광안경을, TNO 입체시검사는 적록안경을 사용하여 양안을 분리하는 방법을 사용한다. Randot 입체시검사에서는 한눈단서가 존재하며, TNO 입체시검사 방법은 입체시가 정상인 사람에서도 입체시에 이상이 있는 것처럼 낮은 입체시 결과를 보이는 경우가 있다. 본 연구에서 사용한 HMD 입체시검사는 양안에 각각 이미지를 투영하여 이론적으로 한눈단서가 없는 검사이다. 또한, 3명을 대상으로 단안을 가려 검사를 진행한 결과, 가장 낮은 단계의 입체시인 1,350초각의 입체시

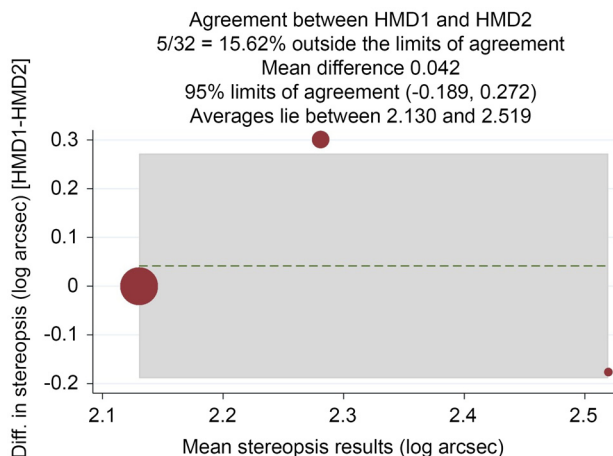


Figure 3. The Bland-Altman plot showing the differences between first trial of head-mounted display stereotest (HMD1) and second trial of head-mounted display stereotest (HMD2) in 32 patients. Among 32 patients, five patients were outside the 95% limits of agreement (-0.189 to 0.272 log arcsec). HMD1 = first trial of stereotest using head-mounted display; HMD2 = second trial of stereotest using head-mounted display.

도 통과하지 못하여 본 검사법은 한눈단서가 전혀 없는 검사법임을 확인하였다.

입체시의 단위는 초각(seconds of arc)으로 표시하는데, 정상인에서 정상 입체시 능력은 Randot 입체시검사를 기준으로 할 때 50초각, TNO 입체시검사를 기준으로 할 때 120초각 이하를 기준으로 삼고 있다.^{2,21,22} Cho et al²¹이 정상 성인 50명을 대상으로 3가지 근거리 입체시검사를 시행한 결과, Titmus-fly 입체시검사서에서 49.0초각, Randot 입체시검사서에서 37.1초각, TNO 입체시검사서에서 113.9초각의 결과를 제시하였다. Shim et al²이 성인 남녀 83명을 대상으로 시행한 근거리 입체시검사서에서 Titmus-fly 입체시검사는 151.2초각, Randot 입체시검사는 116.0초각의 결과를 제시하였다. 본 연구에서 32명의 성인을 대상으로 한 Randot 입체시검사서에서는 28.4초각, TNO 입체시검사서에서는 96.1초각의 결과를 나타내어 이전 다른 연구들과 비슷한 결과를 나타냈다. Cho et al²¹의 연구에서 TNO 입체시검사는 Randot, Titmus-fly에 비해서 상대적으로 정확성이나 임상적 적용성이 떨어진다고 하였다. 본 연구에서도 2명(subject No. 23, 27)은 Randot 및 HMD 입체시검사서에서는 비교적 양호한 입체시를 보였으나, TNO 입체시검사서에서는 각각 240초각 및 480초각의 입체시를 보였다. 그러나, TNO 입체시검사서에서 결과가 좋지 않았던 두 명의 환자에서 HMD를 이용한 검사에서는 모두 135초각을 보여, 입체시검사에 있어 TNO 입체시검사서에서는 양안을 적록안경으로 분리하고 깊이의 차이를 발견하는 방법보다는 깊이를 구별(depth discrimination rather than detection)하는 방법으로 인하여 입체시 검사 결과가 다른 검사에 비하여 낮게 나온 것으로 생각된다.^{23,24}

미디어를 이용한 학습 및 여가생활이 늘어나면서 3D 영상이 사용되는 범위가 과거보다 훨씬 넓어질 것이라 예상되며, 망막수술 및 수련의 교육에서도 3D 영상기법 및 가상현실을 활용한 기구가 널리 쓰이고 있다.²⁵ 이전의 연구에 의하면 Han et al²⁶이 60명의 아동을 대상으로 서티글래스를 사용한 3D 입체시검사서에서 Randot 입체시검사와 좋은 일치도를 보이는 것을 제시하였다. Kim et al²⁷이 편광안경과 3D 화면을 사용해 정상 성인 64명을 대상으로 원거리 입체시를 원거리 Randot 입체시검사 결과와 비교했을 때도 좋은 일치도와 검사 재현도를 보였다. 본 연구에서도 HMD 입체시검사는 ICC 0.499, Cohen's kappa 지수 0.119로 통계학적으로 유의한 보통의 재현성을 보인 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 가상현실을 이용한 HMD 입체시검사로 비록 초기 원형모델에 불과하나, 입체시검사서에서 거리를 일정하게 검사할 수 있으며, 한눈단서가 전혀 없고, 검사 기계가

공간을 많이 차지하지 않아 간편하게 사용할 수 있었으며, 조도를 일정하게 유지할 수 있는 장점이 있을 것으로 생각된다. 또한, 기존 입체시검사와 다르게 입체를 가진 원이 무작위적으로 발생되도록 프로그램을 구성하여 정답을 외울 수 없는 장점이 있을 것으로 생각한다. 본 연구의 한계점으로는 디스플레이를 핸드폰 Galaxy S7을 이용하여 검사를 진행하여 디스플레이에서 1픽셀 간의 망막시차가 구현할 수 있는 최대의 입체시였으며, 이는 HMD인 Galaxy Gear VR의 내부렌즈의 상 확대를 고려하였을 때 135초각에 해당하였다. 현재의 디스플레이 기술로는 HMD와 눈과의 거리를 고려하였을 때 더 적은 초각에 대해서는 검사하지 못하였다. 이것에 대해서는 디스플레이 제조 기술이 발전한다면 보다 정밀한 입체시에 대해서 검사가 가능할 것으로 기대된다. 두 번째로는, 본 연구에서는 정상 성인에 대하여 검사를 진행하여 입체시가 저하되어 있는 환자에서의 입체시검사의 일치도 및 소아에서의 검사 재현성을 검사하지 못하였다. 또한, HMD 착용이 불편하여 기존 입체시검사보다 외래에서 쉽게 사용하기 힘들다는 점과 장기간 검사 시에 눈의 피로가 유발될 수 있다는 단점이 있었다. 상기 이유로 인하여 HMD가 널리 보급이 되지 않고 더 이상 신제품이 나오지 않고 있는 상황이나, 비교적 짧은 시간에 이용하는 특수한 목적의 검사용 기구로는 추후 활용을 기대해 볼 수 있을 것이다.

결론적으로, HMD 입체시검사는 한눈단서가 없는 입체시검사로써 보통의 재현성을 보였다. 입체시를 확인하는 다양한 검사 방법이 있지만 환자의 이해도가 필요하며 소아의 경우 협조가 어려운 경우가 많다. 본 연구에서 HMD 입체시검사법은 상대적으로 단순하고 편리하게 검사를 진행할 수 있고 실제 가상환경과 유사한 입체시 환경을 제공하며, 애플리케이션 개발을 통하여 검사자와 상호작용 없이 결과를 낼 수 있고, 한눈단서가 없으며, 셔플 기능으로 정답을 외울 수 없는 장점이 있다. 본 연구에서는 비록 정밀한 입체시 구현을 하지 못하였으나, 후속 연구를 통하여 고해상도 디스플레이를 이용한 HMD로 입체시검사의 타당도를 평가한다면, 실제 진료실에서 간편하게 사용할 수 있는 HMD를 이용한 정밀한 입체시검사 도구를 개발할 수 있을 것으로 생각한다.

REFERENCES

- 1) Guo DD, Wu JF, Hu YY, et al. Stereoacuity and related factors: The Shandong Children Eye Study. PLoS One 2016;11:e0157829.
- 2) Shim HS, Kim SH, Kim YC. Correlation of near stereoacuity and phoria, and refractive error. J Korean Ophthalmic Opt Soc 2015;20:67-73.

- 3) Ancona C, Stoppani M, Odazio V, et al. Stereo tests as a screening tool for strabismus: which is the best choice? *Clin Ophthalmol* 2014;8:2221-7.
- 4) Lee SY. Comparison of distance and near stereoacuity in normal and intermittent exotropic children. *J Korean Ophthalmol Soc* 2001;42:624-9.
- 5) Chung YW, Park SH, Shin SY. Distant stereoacuity in children with anisometropic amblyopia. *Jpn J Ophthalmol* 2017;61:402-7.
- 6) Ciner EB, Ying GS, Kulp MT, et al. Stereoacuity of preschool children with and without vision disorders. *Optom Vis Sci* 2014;91:351-8.
- 7) Ohlsson J, Villarreal G, Abrahamsson M, et al. Screening merits of the Lang II, Frisby, Randot, Titmus, and TNO stereo tests. *J AAPOS* 2001;5:316-22.
- 8) Lee SY, Koo NK. Change of stereoacuity with aging in normal eyes. *Korean J Ophthalmol* 2005;19:136-9.
- 9) Youm DJ, Chang HR. Long-term binocularity in accommodative esotropia. *J Korean Ophthalmol Soc* 2015;56:759-63.
- 10) Kim EJ, Yeon DY, Ha SG, Kim SH. Relationship between early postoperative stereoacuity and surgical outcome in intermittent exotropia. *J Korean Ophthalmol Soc* 2017;58:1087-91.
- 11) Suh WJ, Lee UK, Kim MM. Change of postoperative distance stereoacuity in intermittent exotropic patients. *J Korean Ophthalmol Soc* 2000;41:758-63.
- 12) Kim HY, Lee SY, Lee YC. The usefulness of Titmus test and distance stereoacuity using B-VAT(R) in intermittent exotropes. *J Korean Ophthalmol Soc* 2004;45:1330-5.
- 13) Lee BH, Kim MM. Comparisons of the Lang, Randot, TNO and new stereo tests in screening and office use in children. *J Korean Ophthalmol Soc* 1990;31:651-60.
- 14) Simons K. A comparison of the Frisby, Random-Dot E, TNO, and Randot circles stereotests in screening and office use. *Arch Ophthalmol* 1981;99:446-52.
- 15) Mukai S, Egi H, Hattori M, et al. Omnidirectional camera and head-mount display contribute to the safety of laparoscopic surgery. *Minim Invasive Ther Allied Technol* 2020 Dec 3. doi:10.1080/13645706.2020.1851725. [Epub ahead of print]
- 16) Rahman R, Wood ME, Qian L, et al. Head-mounted display use in surgery: a systematic review. *Surg Innov* 2020;27:88-100.
- 17) Kong KA. Statistical methods: reliability assessment and method comparison. *The Ewha Medical Journal* 2017;40:9-16.
- 18) Cicchetti DV. Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology. *Psychol Assess* 1994;6:284.
- 19) Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 1977;33:159-74.
- 20) Zaroff CM, Knutelska M, Frumkes TE. Variation in stereoacuity: normative description, fixation disparity, and the roles of aging and gender. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2003;44:891-900.
- 21) Cho YA, Cho SW, Roh GH. Evaluation of criteria of stereoacuity for Titmus, Randot & TNO stereotests. *J Korean Ophthalmol Soc* 1999;40:532-7.
- 22) Simons K. Stereoacuity norms in young children. *Arch Ophthalmol* 1981;99:439-45.
- 23) Wilmer JB, Backus BT. Self-reported magic eye stereogram skill predicts stereoacuity. *Perception* 2008;37:1297-300.
- 24) Vancleef K, Read JCA, Herbert W, et al. Overestimation of stereo thresholds by the TNO stereotest is not due to global stereopsis. *Ophthalmic Physiol Opt* 2017;37:507-20.
- 25) Forslund Jacobsen M, Konge L, Alberti M, et al. Robot-assisted vitreoretinal surgery improves surgical accuracy compared with manual surgery: a randomized trial in a simulated setting. *Retina* 2020;40:2091-8.
- 26) Han SB, Yang HK, Kim J, et al. New stereoacuity test using a 3-dimensional display system in children. *PLoS One* 2015;10:e0116626.
- 27) Kim J, Yang HK, Kim Y, et al. Distance stereotest using a 3-dimensional monitor for adult subjects. *Am J Ophthalmol* 2011;151:1081-6.e1.

= 국문초록 =

머리 부분 탑재형 디스플레이를 이용한 입체시검사법

목적: 머리 부분 탑재형 디스플레이(head-mounted display, HMD)를 이용한 새로운 입체시검사의 신뢰도 및 기존 입체시검사와 결과 차이를 평가해 보았다.

대상과 방법: 2017년 8월부터 2018년 7월까지 32명의 정상 성인을 모집했다. HMD (Galaxy Gear VR, Samsung, Yongin, Korea)를 착용하면, 양안에 각각 난점 배경의 3개의 원 이미지가 보이고, 이 중 한 개의 원에 7단계의 망막시차(135–1,350 arcsec)로 입체 원을 구현했다. Randot 입체시검사와 TNO 입체시검사를 시행하여, 결과를 비교하고 HMD를 통한 입체시검사의 신뢰도를 평가했다.

결과: 대상자 총 32명, 남자 17명(53%), 평균 나이 30.1 ± 4.8 세였다. 1차 HMD검사에서 평균 160 ± 54 초각, Randot 입체시검사 평균 28 ± 13 초각, TNO 입체시검사 평균 96 ± 84 초각, 2차 HMD검사 평균 143 ± 48 초각의 입체시를 보였다. 두 번의 HMD검사를 Bland–Altman plot으로 분석하면 평균 차이 0.042 (–0.189 to +0.272, 95% limits of agreement)로 양호한 일치도를 보였고, 신뢰도 검사에서 0.499 intraclass correlation coefficient ($p=0.022$), Cohen’s kappa 통계 81.25%의 일치도(Cohen’s kappa 지수=0.119, $p=0.017$)로 보통의 재현성을 보였다.

결론: HMD검사는 한눈단서가 없는 새로운 입체시검사법으로 보통의 재현성을 보였다. 고해상도 디스플레이를 이용한 HMD검사를 통하여 정밀 입체시 측정 추가 연구가 필요하다.

〈대한안과학회지 2022;63(3):301–308〉

조현아 / Hyuna Cho

연세대학교 의과대학 강남세브란스병원 안과학교실 시기능개발연구소
Institute of Vision Research, Department of Ophthalmology,
Gangnam Severance Hospital,
Yonsei University College of Medicine

