

Full-field Distortion Measurement of Virtual-reality Devices Using Camera Calibration and Probe Rotation

Dong-Geun Yang^{1,2}, Pilsong Kang^{1†}, and Young-Sik Ghim^{1,2†}

¹Space Optics Team, Advanced Instrumentation Institute, Korea Research Institute of Standards and Science, 267, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

²Department of Science of Measurement, University of Science and Technology, 217, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

(Received October 31, 2019; Revised November 5, 2019; Accepted November 5, 2019)

A compact virtual-reality (VR) device with wider field of view provides users with a more realistic experience and comfortable fit, but VR lens distortion is inevitable, and the amount of distortion must be measured for correction. In this paper, we propose two different full-field distortion-measurement methods, considering the characteristics of the VR device. The first is the distortion-measurement method using multiple images based on camera calibration, which is a well-known technique for the correction of camera-lens distortion. The other is the distortion-measurement method by measuring lens distortion at multiple measurement points by rotating a camera. Our proposed methods are verified by measuring the lens distortion of Google Cardboard, as a representative sample of a commercial VR device, and comparing our measurement results to a simulation using the nominal values.

Keywords: Virtual reality, Full field distortion, Curvature of field, Camera calibration

OCIS codes: (110.3000) Image quality assessment; (080.1010) Aberrations; (160.4760) Optical properties; (120.3940) Metrology

카메라 교정 및 측정부 회전을 이용한 가상현실 기기의 전역 왜곡 측정법

양동근^{1,2} · 강필성^{1†} · 김영식^{1,2†}

¹한국표준과학연구원 첨단측정장비연구소 우주광학팀
☎ 34113 대전광역시 유성구 가정로 267

²과학기술연합대학원대학교 측정과학과
☎ 34113 대전광역시 유성구 가정로 217

(2019년 10월 31일 받음, 2019년 11월 5일 수정본 받음, 2019년 11월 5일 게재 확정)

가상현실 기기의 렌즈는 사용자의 편의성을 위한 적은 부피와 높은 현실감을 위한 넓은 시야각을 동시에 만족시켜야 하기 때문에 왜곡 수차가 필연적으로 발생하는데, 일반적인 렌즈보다 시야각이 넓고 왜곡 수차가 크기 때문에 측정이 어렵다. 본 논문에서는 가상현실 기기의 특성을 고려한 두 가지 왜곡 측정 방법을 제안하였다. 하나는 카메라 교정 방법 기반의 다중 이미지를 이용한 왜곡 측정법이며, 또 다른 하나는 카메라를 포함한 측정부를 직접 회전시켜 왜곡을 측정하는 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법이다. 제안된 방법들의 검증에 위해 시판된 가상현실 기기인 Google Cardboard 제품의 왜곡을 측정하고 설계 데이터를 통한 시뮬레이션 결과와 비교하였으며, 두 방법으로 측정된 왜곡 값은 시뮬레이션 결과와 비교했을 때 잘 부합하는 것으로 나타났다.

Keywords: 가상현실, 전역 왜곡, 상면만곡, 카메라 교정

OCIS codes: (110.3000) Image quality assessment; (080.1010) Aberrations; (160.4760) Optical properties; (120.3940) Metrology

†E-mail: pskang@kriss.re.kr, ORCID: 0000-0002-2618-9249

E-mail: young.ghim@kriss.re.kr, ORCID: 0000-0002-4052-4939

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

최근 디스플레이와 센서, 전자부품 산업의 발전으로 가상 현실 분야의 시장이 급성장하고 있다. 그동안 가상현실이 크게 부흥하지 못했던 기술적인 제약으로는 높은 해상도로 넓은 시야각을 제공할 수 있는 디스플레이 성능 부족과 사용자가 착용 시 편안하도록 작은 크기와 적은 무게를 위한 전자 부품 및 센서 기술의 부족을 들 수 있다. 그러나 최근 고성능의 컴퓨터, 빠른 통신기술, 디스플레이 및 전자부품 기술이 발달하면서 산업화의 장벽이 낮아졌고, 가상현실에 대한 개발 및 연구가 활발하게 진행되고 있다.

가상현실의 원리는 양안시차를 이용해 사용자가 입체감을 느끼는 것이다. 먼저 양안시차만큼 다른 이미지를 사용해야 하며, 서로 다른 이미지는 렌즈를 통해 디스플레이에 주사된 이미지가 허상이 되어 먼 위치에 큰 화면으로 확대된다.

가상현실의 핵심은 사용자가 몰입할 수 있도록 더 현실감과 몰입감이 있는 환경을 제공하는 것이다. 가상현실 기기의 몰입감에 관련된 대표적인 요인으로는 시야각과 광학 수차, 무게, 부피 등이 있다. 기본적으로 가상현실 기기의 렌즈는 광시야각의 양볼록렌즈를 사용하며, 무게와 부피를 줄이기 위해 프레넬 렌즈 또는 볼록렌즈와 프레넬렌즈를 혼합한 하이브리드 렌즈 등을 사용하고 있다. 위 조건들을 만족하기 위해 가상현실 기기에 사용되는 렌즈는 설계 시 몇 가지 광학적 성능을 양보한다. 대표적인 요소로는 상면만곡(curvature of field)과 왜곡(distortion)이 있다. 상면만곡은 광축에서 초점이 맞을 때 비축에서 초점이 맞지 않는 현상으로, 사람의 망막 자체가 구형이고 안구의 재초점이 빠르기 때문에 영향이 비교적 적다. 왜곡은 그림 1과 같이 이미지의 전체적인 형상이 찌그러지는 현상을 말한다. 왜곡의 형태에 따라 실패형(pincushion) 왜곡과 원통형(barrel) 왜곡으로 분류되며, 제한된 디스플레이 영역을 큰 시야각으로 보는 가상현실 기기의 렌즈는 실패형 왜곡을 가진다. 렌즈에 의한 왜곡은 이미지 처리를 통해 왜곡이 없는 영상을 사용자가 볼 수 있도록 보정 가능하지만 보정 과정에서 비축 이미지의 해상도 저하가 발생하게 된다.

따라서 왜곡의 올바른 보정과 비축 이미지의 품질 저하 분석을 위해 가상현실 기기의 렌즈의 왜곡의 측정은 필수적이다. 하지만 현재 렌즈의 왜곡 측정에 대한 표준 측정법은 무한 물체 거리, 유한 상 거리의 공액(conjugate) 관계를 기준으로 되어 있어 실제 가상현실 기기 렌즈의 공액 관계의 역으로 기술되어 있으며 비점수차(astigmatism)와 코마(coma),

상면만곡 등의 수차에 의해 측정이 어렵다. 또한 기존의 렌즈의 왜곡 측정 방식은 비축 왜곡 측정 시 기준이 되는 회전 중심이 측정 렌즈의 제 2주점으로, 렌즈 자체의 성능만을 평가한다. 하지만 가상현실 기기의 렌즈는 사람이 직접 사용하는 접안렌즈로서 비축 왜곡 측정 시 회전 중심이 사람의 눈의 동공인 경우와 안구의 회전 중심인 경우에 대해 각각 평가되어야 하기 때문에 측정 방법이 달라져야 한다.

현재 왜곡에 대한 표준 측정 방법은 상면만곡을 고려하지 않는 점 측정 방식이기 때문에 초점이 흐려진 경우 측정이 불가능하며, 비축 측정을 위한 회전 중심이 측정 렌즈의 제 2주점이기 때문에 측정 방법을 달리해야 한다^{1,2)}. 가상현실 기기의 왜곡 측정에 대해서는 최근 John Penczek 외 5명이 왜곡을 측정 시 회전 중심이 사람의 눈의 동공인 경우와 안구의 회전 중심인 경우에 대해 전역 측정이 아닌 60~70% 영역에 대해 각각 측정하여 좌/우안 결과를 비교한 결과가 있다³⁾.

본 논문에서는 두 가지 방법으로 가상현실 기기의 전역 왜곡을 측정하였다. 첫 번째로 사람 눈과 유사한 넓은 시야각을 가진 렌즈와 이미지 센서를 사용하여 기존의 카메라 렌즈의 왜곡 보정에서 사용하는 카메라 교정(camera calibration) 방법을 통해 왜곡을 측정하였다. 두 번째로는 왜곡에 대한 표준 측정 방법과 원리는 동일하나 상면만곡에 대한 보정을 수행하여 시야각 전역에 대해 측정하는 방법으로, 긴 초점거리를 가진 렌즈와 회전 스테이지를 통해 왜곡을 측정하였다. 측정결과를 광학 설계 소프트웨어인 Zemax 시뮬레이션 결과와 비교한 결과 잘 부합하는 것으로 확인되었다.

II. 측정 방법

본 논문에서는 가상현실 기기의 전역 왜곡 측정을 위해 두 가지 방법을 제안한다. 첫 번째 방법은 카메라 교정(camera calibration) 방법 기반의 다중 이미지를 이용한 왜곡 측정법으로, 광각 카메라 렌즈를 사용하는 방법이다. 이 측정법은 광각 렌즈를 사용하여 가상현실 기기 렌즈를 통해 보이는 이미지의 전체 시야 영역을 한 번에 획득할 수 있기 때문에 빠르게 왜곡을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 두 번째 방법은 카메라를 포함한 측정부를 회전함으로써 왜곡을 직접 측정하는 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법으로, 표준 왜곡 측정 방법을 가상현실 기기의 특성에 맞추어 응용한 방법이다. 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법은 시간이 다소 오래 걸리지만 정확한 측정값을 얻을 수 있는 장점이 있다.

2.1. 다중 이미지를 이용한 왜곡 측정법(Method 1)

첫 번째 방법은 다중 이미지를 이용한 왜곡 측정법으로, 왜곡 보정에 사용되는 카메라 교정 방법을 사용한다. 카메라 교정 방법은 큰 왜곡을 가진 이미지의 보정에서 사용되거나 스테레오 카메라의 위치 및 자세 추적이 많이 사용되는 방법이다. 대표적인 방법은 Z. Zhang이 제안한 카메라 교정 방법으로 체스판의 교차점 간격을 기지값으로 사용하여 카메라



Fig. 1. Checkerboard images without distortion (left), with barrel distortion (center) and pincushion distortion (right).

의 위치와 자세, 왜곡을 추정하여 교정한다. 정확한 교정을 위해서는 5장 이상의 각기 다른 자세와 위치의 체스판 이미지들이 필요하다⁴⁾.

다중 이미지를 이용한 가상현실 기기의 왜곡 측정법에서는 그림 2에 나타난 바와 같이 가상현실 기기의 설계된 눈의 동공 위치와 카메라 렌즈의 입사동의 위치가 일치해야 한다. 카메라 렌즈의 입사동은 측정 기준이 되는 사람의 눈의 동공 위치를 의미하며, 이 두 지점이 일치하지 않는 경우 시야가 달라져 부정확한 측정 결과를 얻을 수 있다. 사용하는 카메라 렌즈의 왜곡이 측정값에 영향을 주지 않도록 측정 전 왜곡 교정을 해야한다. 또한 이미지 전역 획득을 위해 카메라 렌즈의 시야각은 가상현실 기기의 렌즈의 시야각보다 넓어야 한다. 본 연구에서는 광학적으로 렌즈의 왜곡이 교정되어 있는 렌즈인 Theia ML183M 렌즈를 사용하였다. 이 렌즈의 시야각은 1/2.5인치 이미지 센서를 사용했을 때 100°이며, 최대 왜곡은 1% 이하이다. 하지만 실제 환경에서 이 방법을 사용하려면 가상현실 기기를 분해하여 디스플레이를 제거하고 물리적인 작은 체스판을 움직이면서 여러 장의 이미지를 얻어야 한다. 이 경우 중간에 정렬이 흐트러질 수 있으며 허상의 위치와 크기가 큰 폭으로 변하여 초점이 맞지 않는 문제점이 발생할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 Unity3D 프로그램을 이용하여 가상 환경에서 위치 및 자세 변경이 가능한 체스판을 구현하고 왜곡 측정에 필요한 여러 장의 이미지를 획득하였다. 이 방법을 사용할 경우 가상현실 기기를 분해할 필요가 없으며, 체스판의 위치 및 자세를 가상 환경에서 변경할 수 있으므로 정렬이 흐트러질 염려가 없다. Lei Tan 등의 연구에서 가상 환경을 이용한 카메라 교정과 물리적인 체크판을 이용한 카메라 교정 결과는 미세한 차이를 가진 것으로 알려진 바 있다⁵⁾.

광각 카메라 렌즈를 사용하는 경우 자연적인 비네팅(natural vignetting) 효과에 의해 측정 영역에 대해 균일한 조도를 갖지 못하기 때문에 교차점 검출에 어려움이 발생한다⁶⁾. 따라서 본 연구에서는 자연적인 비네팅을 보정하여 전체 측정영역에서 균일한 밝기를 얻을 수 있도록 하였다.

2.2. 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법(Method 2)

두 번째 방법은 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법이다.

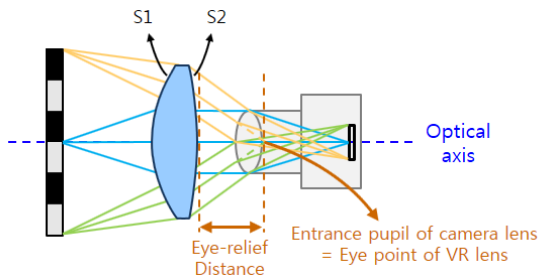


Fig. 2. Optical configuration of method 1: the distortion measurement method by multiple images.

가상현실 기기용 렌즈의 공액 관계는 유한 물체거리-유한 상거리이므로 광학계의 왜곡 측정 표준인 KS B ISO 9039의 측정법 중 유한 물체 거리-무한 상 거리 공액 관계 조건에 대한 왜곡 측정 방법이 적용 가능하다. 이 표준 왜곡 측정 방법은 그림 3과 같이 측정부를 측정 렌즈의 제 2주점을 중심으로 회전시키면서 물체의 높이를 측정하고 회전각 값을 이용하여 왜곡을 도출하는 방법이다. 이 방법을 이용하여 상대적 왜곡(V_r)을 표현하면 다음과 같다.

$$V_r = \frac{a \cdot \tan\theta - h}{h} \times 100(\%) \tag{1}$$

식 (1)에서 h 는 물체 높이, θ 는 회전된 각도, a 는 측정 렌즈의 제 2주점으로부터 물체까지의 거리이다. 이미지 센서로 확인된 물체의 위치 $a \cdot \tan\theta$ 는 왜곡이 없을 때 물체 높이 h 와 같은 값을 가진다.

다중 측정점을 이용한 가상현실 기기용 렌즈의 왜곡 측정에서는 사람의 눈 동공 위치를 기준으로 측정을 수행하여야 하며 회전 중심이 렌즈의 제 2주점이 아닌 눈의 동공 위치여야 한다. 이를 위해 카메라 렌즈의 입사동과 측정부의 회전 중심, 가상현실 기기의 설계된 눈의 동공 위치가 일치되어야 한다. 그러나 일반적으로 가상현실 기기에서 렌즈-동공 간 거리(가상현실 기기의 렌즈 뒷면의 정점으로부터 사람 눈 동공까지의 거리)는 약 15 mm 내외인 반면 각분해능이 높은 카메라 렌즈를 사용할 경우 초점거리가 길고 카메라 렌즈의 정점으로부터 입사동까지의 거리가 길기 때문에 사람 눈의 동공 위치와 카메라 렌즈의 입사동 위치를 일치시키기에는 구조적인 어려움이 있다. 또한 측정부 회전 시 카메라 렌즈 경통과 가상현실 기기용 렌즈와 물리적인 간섭이 발생할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 그림 4와 같이 카메라 렌즈를 충분히 멀리 위치시키고 시야각이 좁은 카메라 렌즈를 사용하여 광축에 매우 가까운 중심 이미지만 사용하였다. 경통의 크기가 작고 초점거리가 긴 Fujinon HF8XA-35M 렌즈를 사용하였으며 Visual Studio C#으로 자체 제작한 프로그램을 통해 측정부 회전을 제어하고 왜곡값을 측정하였다. 기지값으로 디스플레이의 픽셀 간 거리가 사용되었다. 회전 모터 스테이지의 분해능은 0.6 arcmin/step이

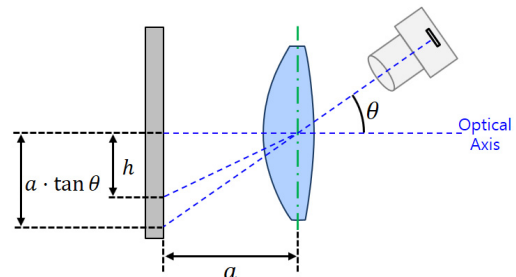


Fig. 3. Optical configuration of distortion measurement with finite-infinite conjugate.

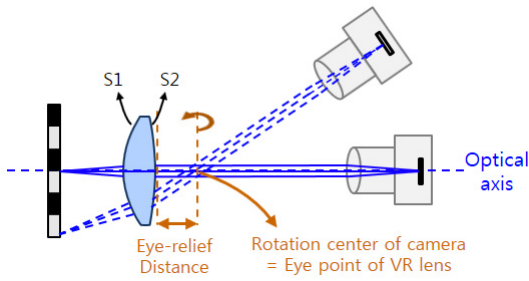


Fig. 4. Optical configuration of method 2: the distortion measurement method by multiple measuring points.

며, 이력 현상(hysteresis)에 의한 오차를 피하기 위해 단방향으로만 사용되었다.

측정 전 카메라 렌즈는 평행광을 통해 무한 초점에 맞추고 디스플레이는 가상현실 기기 렌즈의 초점 위치에 배치하였다.

측정 순서는 다음과 같다.

- 가. 측정부의 회전 모터 스테이지(θ_x, θ_y)의 회전 중심이 설계된 눈의 동공 위치와 일치되도록 정렬한다.
- 나. 카메라에서 확인한 이미지의 중심이 디스플레이 중앙 픽셀의 중심과 일치하도록 디스플레이의 위치를 조정한다.
- 다. 20픽셀 간격의 단색 광원 이미지를 디스플레이에 주사한다.
- 라. 각 단색 광원인 픽셀이 카메라로 확인한 이미지의 중심에 나타나도록 측정부를 회전한다.
- 마. 디스플레이의 위치를 앞뒤로 미세조정하면서 카메라로 확인한 이미지에서 광원의 밝기가 최대가 되는 지점을 찾는다.
- 바. (라)~(마) 단계를 최대 시야각까지 디스플레이의 위치 변화량 Δa , 회전된 각도 θ 를 기록하며 반복한다.

가상현실 기기용 렌즈의 경우 시야각이 매우 넓고 렌즈의 상면만곡이 심하기 때문에 비축 측정 시 초점이 심하게 흐려져 앞서 설명한 방법을 그대로 적용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 아래와 같이 상면만곡을 보정하여 전역 왜곡을 더욱 정확하게 측정할 수 있는 방법을 사용하였다.

동일 초점면 상의 비축 측정 과정에서 상면만곡에 의한 초점 흐려짐 발생 시 through focus MTF 방식을 통해 초점이 가장 선명하도록 디스플레이 위치를 조정한다. 초점이 잘 맞게 되어 정확한 회전각 값을 찾을 수 있지만 디스플레이와 렌즈 간 거리가 달라졌기 때문에 물체 높이는 원래 초점면의 물체 높이와 달라지게 된다. 따라서 원래 초점면 상의 물체 높이로 보정을 하여 식 (1)을 적용해야 올바른 왜곡을 계산할 수 있다.

그림 5는 상면만곡에 의한 초점 흐려짐 보정 시 물체 높이의 변화를 나타낸다. 점 C는 가상현실 기기의 렌즈의 제 2주점이며, 점 B는 설계된 눈의 동공 위치, 디스플레이의 중심을 나타낸다. 점 A는 회전된 각도가 θ 일 때, 빛의 경로가 제

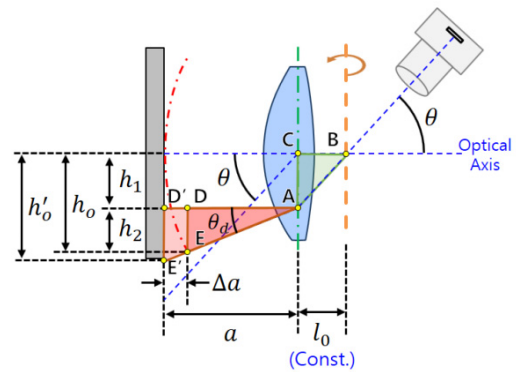


Fig. 5. Optical configuration for correction of an object height considering the curvature of field.

2주요면을 지나는 지점이며, 렌즈의 상면만곡 평면을 지나는 점은 점 E, 상면만곡이 없을 때 디스플레이를 지나는 점은 점 E' 이다. 점 D, D'는 광축과 평행하고 점 A를 지나는 선과 점 E, 점 E'의 수선의 발로, 삼각형의 닮음을 통해 서술하기 위해 표현된 가상의 점이다.

왜곡값 계산을 위해 상면만곡에 의해 변화된 물체 높이(h_o')가 필요하다. 그림 5에서 기지값으로 사용되는 변수는 디스플레이 픽셀 위치에 따른 물체 높이 h_o , 회전된 각도 θ , 디스플레이의 위치 변화량 Δa 이며, 추가적으로 측정해야 하는 변수는 설계된 눈의 동공 위치(eye-point)에서 측정 렌즈의 제 2주점까지의 거리 l_0 와 물체 거리 a 이다. 물체 거리 a 는 카메라 렌즈의 초점이 무한 거리에 있을 때 유효초점거리(effective focal length)로 한국표준과학연구원에 있는 표준 초점거리 측정 장비로 측정하였으며, 측정 결과 43.2 mm인 것으로 확인되었다.

그림 6은 l_0 및 h_o' 측정 과정을 나타낸다. 점 A에서의 입사각 θ_d 를 측정함으로써 특정 각도에서 l_0 를 측정할 수 있다. 측정된 l_0 는 모든 회전각도에 대한 왜곡 측정에 상수로서 사용될 수 있다.

먼저 θ_d 는 그림 6(a)와 같이 $\triangle AD'E'$ 과 $\triangle A'D'E'$ 의 닮음을 이용해 구할 수 있다. θ_d 를 구하기 위해 디스플레이에 막대 차트 이미지를 주사한 상태로 디스플레이를 광축과 평행하게 앞뒤로 움직인다. 이 때, 카메라의 중심점을 통해 보이는 물체 높이의 변화량 Δh 는 점 A에서의 입사각 θ_d 와 디스플레이의 변위량 Δd 의 함수가 된다. 정확한 측정을 위해 중심점의 밝기가 최대가 되는 두 지점의 위치를 측정함으로써 θ_d 를 측정한다.

$\triangle ADE$ 의 높이 h_2 는 그림 6(b)의 물체 거리 a , 가상현실 기기의 렌즈의 상면만곡에 의한 디스플레이 변위값 Δa , 측정된 θ_d 를 통해서 구할 수 있다.

$$h_2 = (a - \Delta a) \cdot \tan\theta_d \quad (2)$$

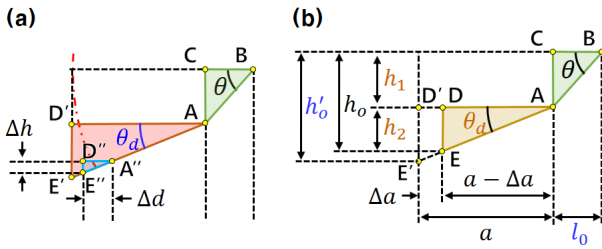


Fig. 6. The schematic diagram for the measurement of l_0 and calculation of the corrected object height (h'_0).

$\triangle ABC$ 의 밑변인 l_0 는 회전된 각도 θ 와 앞서 구한 물체 높이 h_o , 측정된 h_2 를 통하여 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$l_0 = \frac{h_1}{\tan\theta} = \frac{h_o - h_2}{\tan\theta} \quad (3)$$

물체 높이의 상면만곡에 의한 변화값 h'_o 는 왜곡이 포함된 광경로를 두 개의 삼각형 $\triangle ABC$ 와 $\triangle AD'E'$ 로 분리함으로써 얻을 수 있다. $\triangle ABC$ 에서 l_0 와 θ 를 통해 h_1 를 구할 수 있으며, h_o 를 알고 있기 때문에 h_2 를 구할 수 있다. 또한, $\triangle ADE$ 와 $\triangle AD'E'$ 은 세 각이 같으므로 닮음이기 때문에, 비례식을 통해 $D'E'$ 의 길이를 구할 수 있다. 최종적으로 상면만곡에 의해 변화된 물체 높이(h'_o)와 식 (4)를 통해 계산된다.

$$h_2 = h_o - h_1 = h_o - l_0 \cdot \tan\theta$$

$$h'_o = h_1 + h_2 \cdot \frac{a}{a - \Delta a} \quad (4)$$

최종 측정값인 상대적 왜곡(V_r)은 식 (1)의 물체 높이(h)를 상면만곡에 의해 변화된 물체 높이(h'_o)로 대체함으로써 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$V_r = \frac{a \cdot \tan\theta - h'_o}{h_o} \times 100(\%) \quad (5)$$

III. 결과 및 분석

제안한 측정 방법이 유효한 지 확인하기 위해 시판된 가상현실 기기인 Google Cardboard 제품에 대해 측정을 수행하였다. 이 제품의 경우 특정 디스플레이가 아닌 임의의 스마트폰을 디스플레이로 사용 가능하며, 하우징 및 렌즈 제작에 대한 가이드라인 및 설계 데이터를 제조사에서 공개하여 검증이 매우 용이하다^[7]. 이 제품의 렌즈를 앞서 제안한 두 방법을 통해 측정하고 광학 설계 소프트웨어인 Zemax 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 제조사 가이드라인에서 이 제품의

Table 1. Design values of a lens in Google Cardboard

Surface	S1	S2
Curvature	3.38E-02	-1.74E-02
Thickness	8.79 mm	
Conic	-7.00E+00	-1.46E+01
2nd Order Term	0	0
4th Order Term	2.65E-05	-4.14E-06
6th Order Term	-4.61E-08	1.95E-09
8th Order Term	4.10E-11	0.00E+00

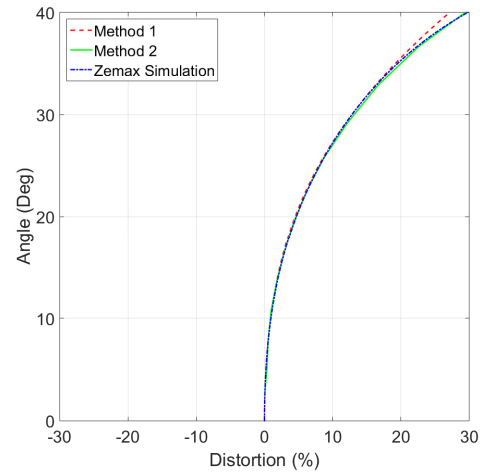


Fig. 7. Distortion measurement results by method 1, method 2, and simulation with Zemax.

시야각은 80, 렌즈-동공 간 거리는 18 mm이며, 그림 2와 4에서 표현된 렌즈 양면(S1, S2)의 곡률 및 코닉 계수(conic coefficient)는 표 1과 같다.

그림 7은 앞서 제시된 두 방법을 통해 왜곡을 측정한 결과와 광학 설계 프로그램인 Zemax 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과에 비교해볼 때, 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법이 외곽부에서 더 정확한 것으로 나타났다. 다중 이미지를 이용한 왜곡 측정법이 외곽부에 정확도가 떨어지는 원인은 심한 왜곡으로 인한 부정확한 체스판 교차점 검출에 있는 것으로 여겨진다. 또한 카메라 왜곡 모델을 사용해서 왜곡을 추정하기 때문에, 측정 대상 렌즈의 결함으로 비선형적인 왜곡이 있는 경우 정확한 측정이 어렵다. 반면 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법은 점 단위로 측정하기 때문에 왜곡량이 비선형적인 경우라도 정확한 측정이 가능하다.

그림 8은 동일한 제품의 다른 렌즈 2개를 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법을 통해 왜곡을 측정한 결과이다. 그림 9는 2개의 렌즈에 대한 측정 결과를 시뮬레이션과 비교했을 때 오차를 나타낸다. 2번의 측정에서 최대 오차는 0.4%이며, RMS 오차는 0.20%, 0.14%로 나타남으로써 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법을 통한 전역 왜곡 측정이 유효한 것이 확인되었다.

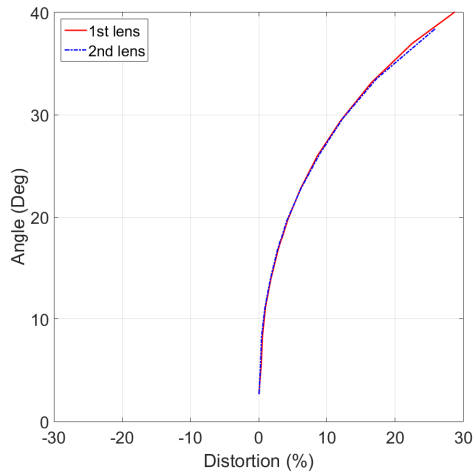


Fig. 8. Distortion measurement results of two lenses with the same design value using method 2.

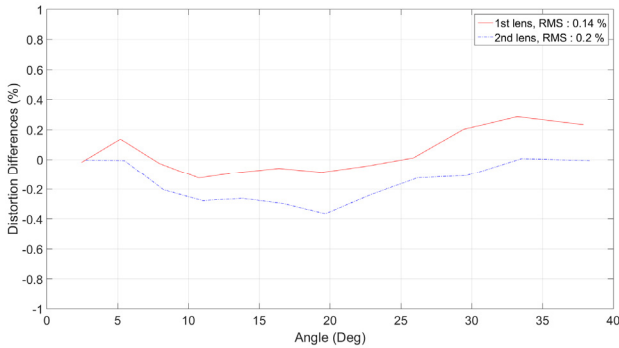


Fig. 9. Difference between the distortion simulation with the design value and the distortion measurement of two lenses.

IV. 결 론

현재 가상현실 기기의 전역 왜곡 측정 방법이 정립되지 않은 상황에서, 정밀한 전역 왜곡 측정을 위해 가상현실 기기의 특성에 맞추어 측정 시스템을 설계하고 구축하였다. 본

연구에서 제안한 두 방법을 통해서 왜곡을 측정하고 시뮬레이션 결과와 비교했을 때 잘 부합하는 것으로 나타났다. 다중 이미지를 이용한 왜곡 측정법은 측정이 빠르지만 왜곡이 심한 영역에서 정확도가 떨어지는 것으로 나타났고, 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법은 측정시간이 오래 걸리지만 전역에서 높은 정확도를 나타냈다. 본 연구에서 제안한 다중 측정점을 이용한 왜곡 측정법은 기존 표준 측정 방법의 측정 방법과 동일한 원리를 사용하나 측정 시 발생하는 어려움을 극복하여 더 높은 정확도를 가짐으로써 가상현실 기기의 측정 표준 정립에 기여할 수 있을 것으로 보인다.

References

1. International Organization for Standardization, "Optics and photonics - Quality evaluation of optical systems - Determination of distortion," ISO 9039 (2008).
2. International Organization for Standardization, "Photography - Digital cameras - Geometric distortion (GD) measurements," ISO 17850 (2015).
3. J. Penczek, M. Hasan, B. S. Denning, R. Calpito, R. L. Austin, and P. A. Boynton, "31-2: Measuring interocular geometric distortion of near-eye displays," *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **50**, 430-433 (2019).
4. Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **22**, 1330-1334 (1999).
5. L. Tan, Y. Wang, H. Yu, and J. Zhu, "Automatic camera calibration using active displays of a virtual pattern," *Sensors* **17**, 685 (2017).
6. S. B. Kang and R. Weiss, "Can we calibrate a camera using an image of a flat textureless Lambertian surface?," in *Proc. Computer Vision - ECCV 2000* (Ireland, Dublin, June, 2000), pp. 640-654.
7. Google, "Google Cardboard I/O 2015 Technical Specification," (Google Cardboard, 2015), <https://arvr.google.com/cardboard/manufacturers> (2018).