《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 31, No. 2, April 2020, pp. 88-95
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2020.31.2.088
ISSN : 1225-6285(Print)
ISSN : 2287-321X(Online)

Optical System Design for a Head-up Display through Analysis of Distortion and Biocular Parallax

Kum-Ho Kim and Sung-Chan Park†

Department of Physics, Dankook University, 119, Dandae-ro, Dongnam-gu, Cheonan 31116, Korea

(Received February 29, 2020; Revised March 6, 2020; Accepted March 6, 2020)

In this study, we present methods to quantitatively analyze and correct the distortions and biocular parallaxes in a head-up display (HUD). To analyze asymmetrical distortions, five kinds of distortions are proposed and evaluated at five eye positions of an eyebox. The differences between distortions evaluated at the four corners of the eyebox and that at the center are defined as the relative distortions, which occur due to head motion of the driver. We also define the convergence and divergence parallaxes at six biocular positions in the eyebox to quantitatively analyze them. Using these analytical methods, we constrain the degree of biocular parallaxes and distortion changes with eye position to be small, so that an optical system nearly free from them can be obtained by optimization design for HUD optics.

Keywords: Head-up display, Distortion, Biocular parallax
OCIS codes: (080.4035) Mirror system design; (080.2740) Geometric optical design; (220.3620) Lens system design

왜곡수차 및 양안시차 분석을 통한 헤드업 디스플레이용 광학계 설계

김금호 · 박성찬†

단국대학교 물리학과
㊞ 31116 충청남도 천안시 동남구 단대로 119

(2020년 2월 29일 받음, 2020년 3월 6일 수정본 받음, 2020년 3월 6일 게재 확정)

본 연구에서는 헤드업 디스플레이에서 발생하는 왜곡수차와 양안시차를 정량적으로 분석 및 보정하는 방법을 제시한다. 비대칭적인 왜곡수차를 분석하기 위해 다섯 종류의 왜곡수차를 제시하고, 이를 아이박스의 중심부에서 측정된 왜곡수차로부터 다른 4개의 가장자리에서 측정된 왜곡수차의 변화량을 상대적인 왜곡으로 정의하였다. 또한 아이박스 내 6개의 양안 위치에서 수렴 양안시차 및 발산 양안시차에 대해 정의하고 평가하였다. 이런 분석 방법을 이용하여 아이박스 내 눈의 위치에 따른 양안시차 및 왜곡수차 변화량을 제한조건으로 두어 최적설계를 진행하여 왜곡수차 및 양안시차가 보정 된 헤드업 디스플레이용 광학계를 구성하였다.

Keywords: 헤드업 디스플레이, 왜곡수차, 양안시차
OCIS codes: (080.4035) Mirror system design; (080.2740) Geometric optical design; (220.3620) Lens system design

I. 서 론

헤드업 디스플레이(head-up display, HUD)는 차량의 대시보드 위 또는 내부에 장착되어, 디스플레이로부터 나온 정보들을 윈드실드 앞에 띄워줌으로써 운전자가 전방을 주시하면서 동시에 다양한 정보들을 인식할 수 있어 안전성과 편리성을 확보할 수 있는 광학장치이다[1,2]. 헤드업 디스플레이는 일반적으로 컴바이너형(combiner type)과 윈드실드형(windshield type)이 있다. 컴바이너형의 헤드업 디스플레이는 디스플레이로부터 나온 이미지를 대시보드 위의 별도의 거울에 투영하여 전방에 허상을 결상시키는 방식으로서, 차량의 윈드실드 특성에 관계없이 다양한 종류의 차량에 적용 가능하다. 반면에 컴바이너의 크기에 제한이 있어 허상을 확대하는 데에 어려움이 있으며, 윈드실드를 고려하지 않기 때문에 성능 저하가 다소 발생한다. 윈드실드형의 경우 별도의 컴바이너 없이 윈드실드에 직접 투사하여 전방에 허상을 결상시키는

†E-mail: scpark@dankook.ac.kr, ORCID: 0000-0003-1932-5086
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

방식으로서 윈드실드도 하나의 광학부품으로 고려하기 때문에 광학적인 구성 및 성능 구현에 있어서 더욱 효과적이다.

헤드업 디스플레이 광학계는 일반적으로 비축 반사광학계로 구성되며, 또한 차량의 윈드실드는 운전자석을 기준으로 비대칭한 형태 및 배치를 갖기 때문에 비대칭적인 수차가 발생한다. 따라서 헤드업 디스플레이의 비축 광학계 구성 방법과 비대칭적인 수차를 보정하기 위해 자유곡면 거울을 사용한 연구들이 많이 진행되어 왔다[3,4]. 그러나 이러한 방법들은 헤드업 디스플레이의 전반적인 설계에 대해서만 다루고 있으며, 가장 문제시되는 운전자의 머리 이동에 따른 왜곡수차 및 양안시차에 대한 분석 및 보정 방법에 대한 상세한 설명이 부족하다.

본 연구에서는 헤드업 디스플레이에서 발생하는 비대칭적인 형태의 왜곡수차를 분석하기 위해 다섯 종류의 상의 왜곡(수평 방향 왜곡, 수직 방향 왜곡, 수평-대칭 왜곡, 수직-대칭 왜곡, 회전 왜곡)을 정량적으로 다룬다. 그리고 아이박스의 중심위치와 가장자리에서 바라본 허상의 차이를 분석하기 위해 상대적인 왜곡수차를 규정하고 평가하는 방법을 제시한다[5-7]. 다음으로, 헤드업 디스플레이의 아이박스 내에서 양안의 위치에 따라 수렴 양안시차(convergence parallax)와 발산 양안시차(divergence parallax)에 대한 분석방법을 다룬다[8-10]. 본 논문에서 정의한 왜곡수차 및 양안시차에 대한 물리량을 최적화 설계 과정에서 고려함으로써 기준사양을 만족하면서도 왜곡수차 및 양안시차가 보정된 헤드업 디스플레이용 광학계를 얻었다.

II. 헤드업 디스플레이의 구조

일반적인 헤드업 디스플레이의 경우 그림 1과 같이 윈드실드, 자유곡면 거울, 평면 거울, 그리고 디스플레이로 구성되어 있으며, 디스플레이로부터 나온 이미지가 광학계를 거쳐 윈드실드 앞에 확대된 허상을 형성하는 방식이다. 대부분의 헤드업 디스플레이는 부피 및 무게에 제약을 받기 때문에 소형화에 적합한 비축 광학계로 구성되며, 광학소자는 거울을 주로 사용한다. 이때, 일반적인 차량의 윈드실드는 운전자석을 기준으로 수평, 수직 방향 모두 비대칭적인 형태를 갖게 되기 때문에 이를 보정하기 위해 비대칭적인 면 형상이 구현 가능한 자유곡면을 주로 사용한다. 또한 주행 시 운전자의 머리 이동이 있더라도 요구 성능을 만족하도록 적절한 크기의 아이박스(eyebox)를 확보해야 한다. 따라서 광학계의 조리개(stop)를 아이박스로 설정하여 지름이 최대 8 mm인 눈의 동공이 아이박스 내의 어느 위치에 있더라도 HUD용 광학계는 요구사양을 만족하도록 설계되어야 한다[1-4].

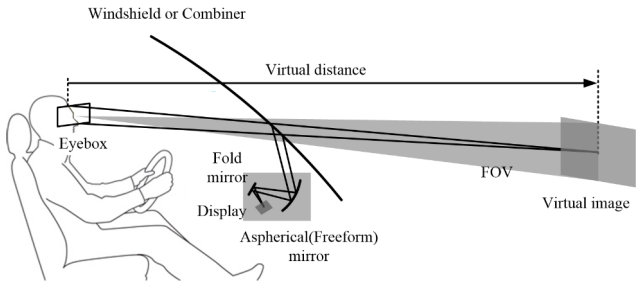

Fig. 1. Schematic diagram of a typical head-up display.

III. 헤드업 디스플레이의 왜곡수차 및 양안시차 분석

헤드업 디스플레이는 비축 광학계로 구성되기 때문에 허상이 비대칭적인 형태를 갖는 왜곡이 발생하게 된다. 또한 아이박스 내에서 운전자의 머리 이동에 따라 허상이 다른 형태를 가지며, 이는 운전자의 좌안과 우안에 상이한 형태의 이미지가 인식되어 양안시차가 발생하게 된다. 본 절에서는 비축 광학계인 헤드업 디스플레이에서 왜곡수차 및 양안시차를 효과적으로 분석하는 방법을 제안한다.

3.1. 헤드업 디스플레이의 왜곡수차 분석

그림 2는 비축 광학계인 헤드업 디스플레이에서 왜곡이 없는 기준 상(reference image)과 실제 상(real image)을 각각 9개 필드(field)에서 나타낸 것이다[5-7]. 그림 2(a)는 수평 방향의 왜곡(horizontal distortion)과 수직 방향의 왜곡(vertical distortion)에 대한 그림이다. 우선, 수평 방향의 왜곡은 기준이 되는 상의 수평 길이(x_o)와 실제 상의 수평 길이(x_j)에 대한 차이를 이용하여 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_{Hj} = x_j - x_o, \tag{1}$$

단, $j = 1, 2, \cdots, 9.$

여기서 Δ_{Hj}는 중심(0, 0)을 기준으로 각 필드에서 기준 상의 수평 길이와 실제 상의 수평 길이와의 차이, j는 실제 상에서 각 필드를 나타내며 2, 5, 8번째 필드는 중심 축에 있으므로 제외한다. 이를 이용하여 상의 중심을 기준으로 6개의 필드에서 측정된 값의 평균을 구하여 다음과 같이 수평 방향의 왜곡(D_H)에 대해 정의할 수 있다.

$$D_H(\%) = \frac{1}{n}\sum_j \left(\frac{\Delta_{Hj}}{x_o} \times 100 \right), \tag{2}$$

단, $j = 1, 3, 4, 6, 7, 9.$

여기서 n은 측정하고자 하는 필드의 개수이다. 같은 방법으로 수직 방향의 왜곡(D_V)에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_{Vj} = y_j - y_o, \tag{3}$$

$$D_V(\%) = \frac{1}{n}\sum_j \left(\frac{\Delta_{Vj}}{y_o} \times 100 \right), \tag{4}$$

단, $j = 1, 2, 3, 7, 8, 9$.

다음으로, 그림 2(b)와 같이 비대칭인 상의 구부러진 정도를 분석하기 위해 수평-대칭 왜곡(horizontal-symmetric distortion)과 수직-대칭 왜곡(vertical-symmetric distortion)에 대한 정의가 필요하다. 우선, 상점 $V_3(x_3, y_3)$와 상점 $V_9(x_9, y_9)$을 잇는 직선의 방정식을 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[7]:

$$y = \frac{y_9 - y_3}{x_9 - x_3}(x - x_3) + y_3. \tag{5}$$

식 (5)에 $(x', 0)$을 대입하여 기준 상의 중심으로부터 두 점 (V_3, V_9)을 잇는 직선까지의 수평 길이(x')를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{y_9 - y_3}{x_9 - x_3} x' = \frac{(y_9 - y_3)x_3 - (x_9 - x_3)y_3}{x_9 - x_3}, \tag{6}$$

$$x' = \frac{x_3 y_9 - x_9 y_3}{y_9 - y_3}. \tag{7}$$

식 (7)의 x'과 기준 상의 수평 길이(x'_o)와의 차이를 이용하여 수평-대칭 왜곡을 나타내면 다음과 같다.

$$D'_H(\%) = \frac{x' - x'_o}{x'_o} \times 100. \tag{8}$$

마찬가지로, 수직 방향에 대한 수직-대칭 왜곡은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D'_V(\%) = \frac{y' - y'_o}{y'_o} \times 100. \tag{9}$$

식 (8)과 식 (9)에서 $x'_o = x_o$, $y'_o = y_o$로서 수평과 수직 방향의 기준 상의 크기를 각각 나타낸다. 유도한 식 (8)과 식 (9)를 이용하면 수평 및 수직 방향에 대한 가장자리 시야들의 대칭 왜곡을 평가할 수 있다.

다음으로, 그림 2(c)와 같이 상의 기울어진 정도를 분석하기 위해 상점 V_6와 V_4의 수평 및 수직 방향 차이를 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{RV} = y_6 - y_4, \tag{10}$$

$$D_{RH} = x_6 - x_4. \tag{11}$$

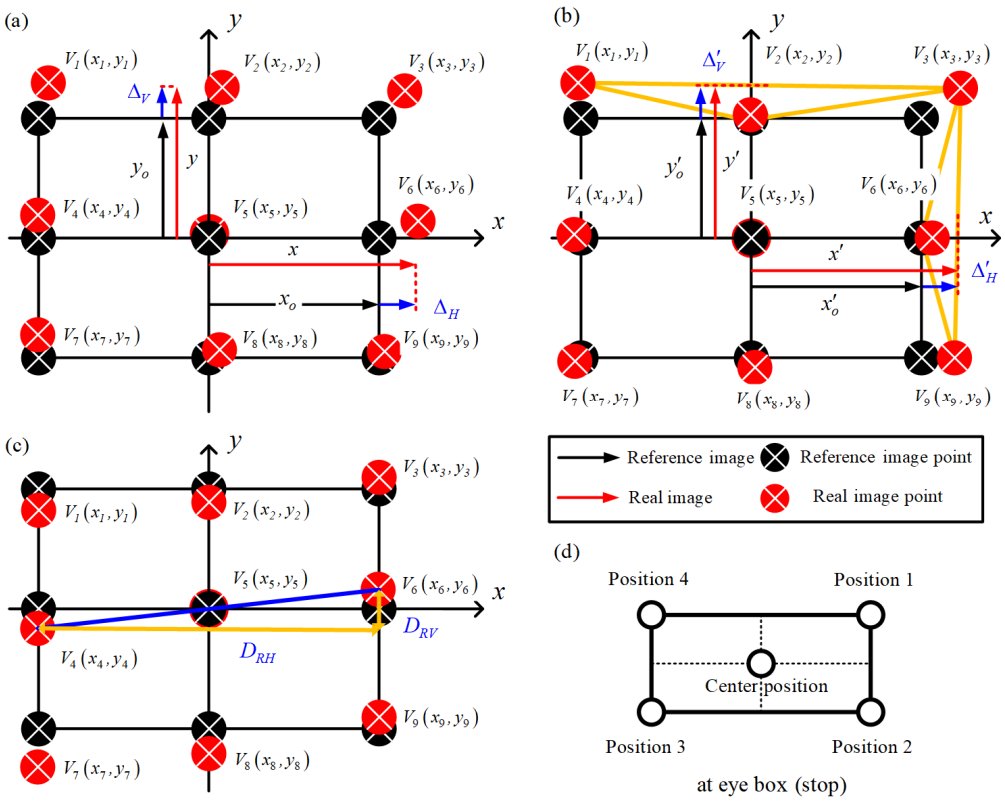

Fig. 2. Distortion types. (a) Horizontal and vertical distortions. (b) Horizontal- and vertical- symmetric distortions. (c) Rotational distortion. (d) Five eye positions in the eyebox.

여기서 D_{RV}는 상점 $V_6(x_6, y_6)$와 상점 $V_4(x_4, y_4)$ 사이의 수직 거리 차이, D_{RH}는 수평 거리 차이를 각각 나타낸다. 위의 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 회전 왜곡(rotational distortion, D_{ROT})을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D_{ROT} = \arctan\left(\frac{D_{RV}}{D_{RH}}\right) = \arctan\left(\frac{y_6 - y_4}{x_6 - x_4}\right). \tag{12}$$

마지막으로, 운전자의 피로감을 줄이기 위해서는 아이박스 내의 머리 위치 이동에 따른 허상의 왜곡 변화가 작아야 한다. 따라서 그림 2(d)와 같이 아이박스 내에서 운전자 머리 이동에 따라 앞서 구한 왜곡수차들이 얼마나 변하는지를 분석하기 위해 상대적인 왜곡수차(relative distortion)를 다음과 같이 정의한다.

$$\text{Relative distortion } (\Delta D) = D_i - D_c, \tag{13}$$

단, $i = 1, 2, 3, 4$.

여기서 ΔD는 상대적인 왜곡수차이고, D_c는 아이박스의 중심점에서 측정된 왜곡수차, i는 아이박스 내의 4개 지점에서 눈의 위치, 그리고 그 지점에서 왜곡수차를 D_i로 나타낸다. 식 (13)과 같이 아이박스 내 중심 위치에서 바라본 허상을 기준으로 4개의 가장자리에서 바라본 허상과의 차이를 상대적인 왜곡수차 또는 왜곡수차의 변화량으로 정의하여 머리 위치 이동에 따른 HUD 광학계의 왜곡수차 변화를 모든 시야에서 정량적으로 분석할 수 있다.

3.2. 헤드업 디스플레이의 양안시차 분석

헤드업 디스플레이는 양안을 사용하는 광학계이므로 아이박스 내 눈의 위치에 따라 상이한 이미지가 들어오고 양안에 인식되는 이미지 차이로 인해 시차가 발생하게 된다. 이때 발생하는 양안시차는 그림 3과 같이 수렴 양안시차(convergence parallax)와 발산 양안시차(divergence parallax)로 구분할 수 있다. 수렴 양안시차는 $x-z$평면에서 양안으로부터 기준이 되는 허상의 한 점을 잇는 두 직선 사이의 각도(inherent angle, $\theta_{inherent}$)와 실제 허상이 맺히는 점을 잇는 두 직선 사이의 각도(real angle, θ_{real}) 차이이며, 발산 양안시차는 $y-z$평면에서 양안으로부터 실제 허상이 맺히는 점까지의 각도 차이로 표현할 수 있다[9,10].

우선, $x-z$평면에서 수렴 양안시차에 대해 정의하기 위해 아이박스 내의 좌안과 우안으로부터 실제 허상점까지의 위치를 다음과 같이 각각 벡터 $\boldsymbol{L_V}$과 $\boldsymbol{R_V}$로 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{L_V} = (x_i - x_L, z_i), \tag{14}$$

$$\boldsymbol{R_V} = (x_i - x_R, z_i). \tag{15}$$

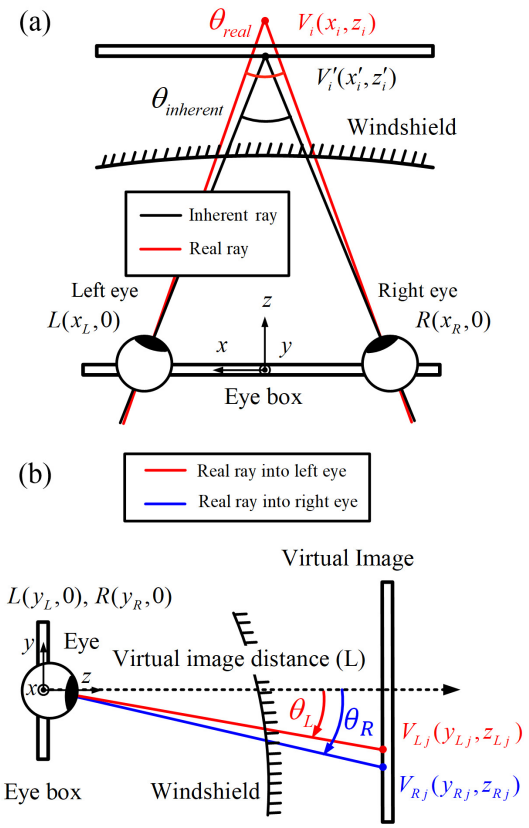

Fig. 3. Schematic diagram of biocular parallaxes in an HUD. (a) Convergence parallax. (b) Divergence parallax.

여기서 x_i는 실제 허상점의 x축 좌표, x_L은 아이박스 내 좌안의 위치, x_R은 우안의 위치, z_i는 양안으로부터 실제 허상점까지의 z축 방향 길이이다. 벡터의 내적을 이용하여 양안 사이의 실제 수렴각(θ_{real})을 구하면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{L_V} \cdot \boldsymbol{R_V} = |\boldsymbol{L_V}||\boldsymbol{R_V}|\cos\theta_{real}, \tag{16}$$

$$\theta_{real} = \cos^{-1}\left(\frac{\boldsymbol{L_V} \cdot \boldsymbol{R_V}}{|\boldsymbol{L_V}||\boldsymbol{R_V}|}\right) = \cos^{-1}\left[\frac{\{(x_i - x_L)(x_i - x_R) + z_i^2\}}{\{\sqrt{(x_i - x_L)^2 + z_i^2}\}\{\sqrt{(x_i - x_R)^2 + z_i^2}\}}\right]. \tag{17}$$

같은 방법으로 양안 사이의 거리로 인해 필연적으로 생기는 고유 수렴각($\theta_{inherent}$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{inherent} = \cos^{-1}\left(\frac{\boldsymbol{L'}_V \cdot \boldsymbol{R'}_V}{|\boldsymbol{L'}_V||\boldsymbol{R'}_V|}\right) = \cos^{-1}\left[\frac{\{(x'_i - x_L)(x'_i - x_R) + z'^2_i\}}{\{\sqrt{(x'_i - x_L)^2 + z'^2_i}\}\{\sqrt{(x'_i - x_R)^2 + z'^2_i}\}}\right]. \tag{18}$$

수렴 양안시차는 식 (17)의 실제 수렴각(θ_{real})과 식 (18)의 고유 수렴각($\theta_{inherent}$)의 차이로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_{con} = \theta_{real} - \theta_{inherent}, \tag{19}$$

$$= \cos^{-1}\left[\frac{\{(x_i - x_L)(x_i - x_R) + z_i^2\}}{\{\sqrt{(x_i - x_L)^2 + z_i^2}\}\{\sqrt{(x_i - x_R)^2 + z_i^2}\}}\right] - \cos^{-1}\left[\frac{\{(x'_i - x_L)(x'_i - x_R) + z'^2_i\}}{\{\sqrt{(x'_i - x_L)^2 + z'^2_i}\}\{\sqrt{(x'_i - x_R)^2 + z'^2_i}\}}\right]. \tag{20}$$

다음으로, 그림 3(b)와 같이 발산 양안시차는 $y-z$평면에서 양안 사이의 각도 차이로 표현할 수 있다. 광축을 기준으로 좌안으로부터 허상점까지의 각도(θ_L)와 우안의 각도(θ_R)는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_L = \tan^{-1}\left(\frac{y_{Lj}}{z_{Lj}}\right), \tag{21}$$

$$\theta_R = \tan^{-1}\left(\frac{y_{Rj}}{z_{Rj}}\right). \tag{22}$$

여기서 y_{Lj}은 좌안으로 입사하는 허상의 y축 좌표, y_{Rj}은 우안으로 입사하는 허상의 y축 좌표, 첨자$j(=1, 2, \cdots, 9)$는 허상점의 위치를 나타낸 것이며, z축 방향으로 허상까지의 거리는 좌안과 우안에서 모두 같은 값을 갖는다($z_{Lj} = z_{Rj} = z_{im}$). 식 (21)과 식 (22)를 이용하여 발산 양안시차(θ_{div})에 대해 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\theta_{div} = \theta_R - \theta_L = \tan^{-1}\left(\frac{y_{Rj}}{z_{im}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_{Lj}}{z_{im}}\right). \tag{23}$$

IV. 왜곡수차 및 양안시차가 보정된 헤드업 디스플레이용 광학계 설계

4.1. 윈드실드형 헤드업 디스플레이용 광학계 설계

윈드실드형 헤드업 디스플레이의 구성 요소로는 윈드실드와 자유곡면 거울, 평면 거울, 디스플레이(PGU)로 구성되며 일반적인 HUD의 사양은 표 1과 같다. 아이박스의 크기는 80×40 mm, 허상거리(virtual image distance)는 2.7 m, 허상의 크기는 10.5인치, 디스플레이의 크기는 1.8인치이다.

우선, Wei가 제안한 윈드실드 형상은 다음의 식 (24)와 같이 $x-y$ 다항식으로 표현되고, 이를 본 연구의 윈드실드에 대한 기준 데이터로 사용한다[3]:

$$Z(x, y) = \frac{c(x+y)^2}{1+\sqrt{1-c^2(x^2+y^2)}} + \sum_i A_i x^m y^n. \tag{24}$$

Table 1. Optical specifications of an HUD optical system

Parameters	Values (mm)
Virtual image distance	2700
Virtual image size	240 × 120
Display size	40 × 20
Eyebox	80 × 40
Eye pupil diameter	8

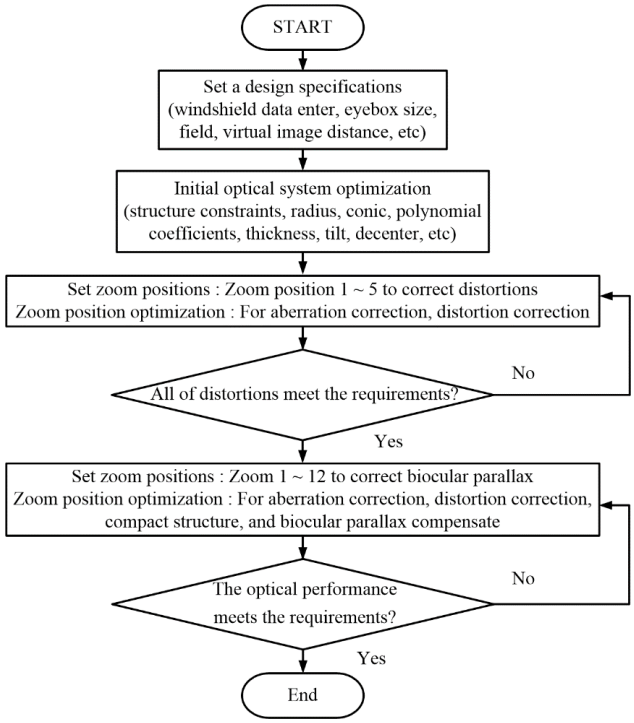

Fig. 4. Flow chart of optimization design for an HUD optics.

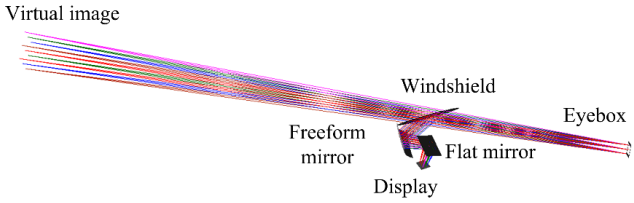

Fig. 5. Layout of a final designed optical system for an HUD.

Table 2. Surface data of a final designed optical system for an HUD (in mm)

Surface name	Surface type	Radius	Thickness
Object (virtual image)	-	-	2700.00
Stop (eyebox)	-	-	-900.00
Windshield	XY polynomial		-37.86
Freeform mirror	XY polynomial	-530.50	-120.00
Flat mirror	Sphere	Infinity	-120.46
Image (display)	-	-	-

여기서 c는 광축 부근에서 면의 곡률이고, x, y는 광선의 입사고이다. 다음으로, 비대칭적인 윈드실드로 인해 발생하는 비대칭형 수차를 자유곡면 거울을 이용하여 보정하고 광학계의 크기를 줄이기 위해 평면 거울을 사용하여 광로를 조절한다.

최적화 설계는 그림 4와 같은 순서로 진행한다. 우선, 헤드업 디스플레이의 광학계를 구성하기 위해 목표사양에 맞도록 광학계를 설정한 후 최소한의 설계변수와 제한조건으로 초기 최적화를 진행한다. 그 다음 아이박스 내의 중심부와 4개의 가장자리에서 왜곡수차를 다루기 위해 5개의 줌 위치를 설정한다. 그리고 3.1절에서 정의한 왜곡수차들을 제한조건으로 두고 자유곡면 계수의 4차항까지 사용하여 최적설계를 진행한다. 아이박스 내 모든 위치에서 광학계의 성능 및 왜곡수차가 목표하는 사양에 도달하면, 양안시차를 다루기 위해 아이박스 내에서 좌안과 우안의 위치를 각각 6개 설정한다. 따라서 총 12개의 줌 위치가 필요하다. 그리고, 6개의 머리 위치에서 3.2절에서 정의된 수렴 양안시차 및 발산 양안시차를 제한조건으로 설정하고 자유곡면의 6차항까지 비구면 계수를 설계변수로 사용하여 최적화 설계를 진행한다. 그림 5와 표 2는 최종 설계된 윈드실드형 헤드업 디스플레이의 구성도와 설계 제원이다.

4.2. 최종 설계된 헤드업 디스플레이용 광학계의 성능 분석

그림 6은 아이박스의 중심과 가장자리에서 평가된 MTF 및 스폿 다이어그램이다. 아이박스 내 중심 위치에서 MTF는 공간주파수 14 lp/mm에서 30.0% 이상이고, 가장자리(position 2)에서 MTF는 8 lp/mm에서 34.3% 이상이다. 다음으로, 아이박스 내 중심 위치에서 스폿의 RMS 크기는 최대 33 μm이며, 가장자리 부근에서는 61 μm보다 작다.

다음으로, 그림 7은 아이박스 내 중심 위치와 가장자리(position 2)에서 기준 광선과 실제 광선이 형성하는 상의 형태를 나타낸 그리드형 왜곡수차이다. 그림 8(a)는 아이박스 내 5개 눈의 위치에서(그림 2(d) 참조) 다섯 종류의 왜곡수차에 대해 분석한 그래프이며 수평축은 아이박스 내 눈의 위치, 수직축은 각각의 왜곡수차량(%)을 나타낸 것이다. 그래프의 빨간색 막대는 수평 방향의 왜곡, 파란색 막대는 수직 방향의 왜곡, 분홍색 막대는 수평-대칭 왜곡, 상아색 막대는 수직-대칭 왜곡, 그리고 갈색 막대는 회전 왜곡이다. 모든 위치에서 전반적으로 수직 방향의 왜곡이 가장 크며, 특히 4번째 눈의 위치에서 최대 5.22% 정도 발생하지만 허용범위 이내이다.

그림 8(b)는 아이박스의 중심 위치에서 측정된 허상의 왜곡수차를 기준으로 가장자리에서 측정된 허상의 왜곡수차 변화량을 나타낸 그래프로서, 가장 큰 왜곡수차 변화량은 1.38%이고, 이는 수직방향의 왜곡이다. 따라서 아이박스의 중심을 지나 형성된 허상에 비해 아이박스 내의 다른 위치를 지나 형성된 허상과의 차이가 작아 머리 이동에 따른 상의 왜곡 변화가 작음을 확인할 수 있다.

마지막으로, 그림 9는 아이박스 내 양안의 위치에 따른 수렴 양안시차와 발산 양안시차를 분석한 그래프이다. 그래프의

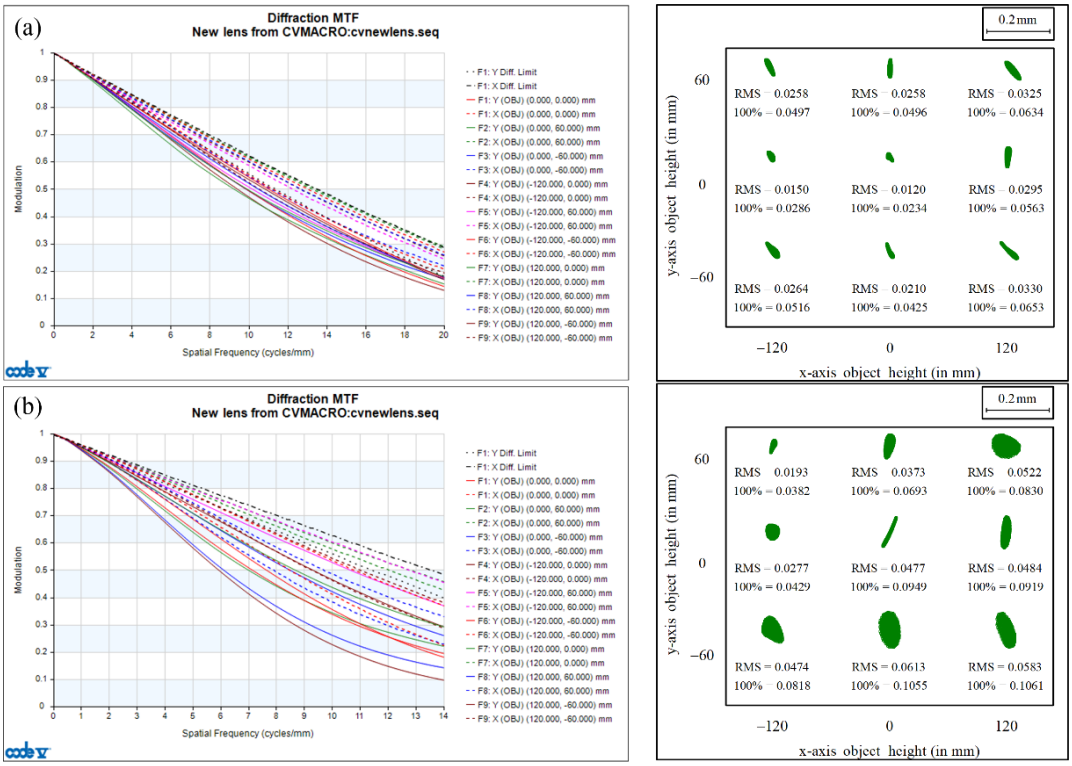

Fig. 6. MTF graphs and spot diagrams of a final HUD optical system at each eye position of the eyebox. (a) Center position. (b) Corner position (position 2).

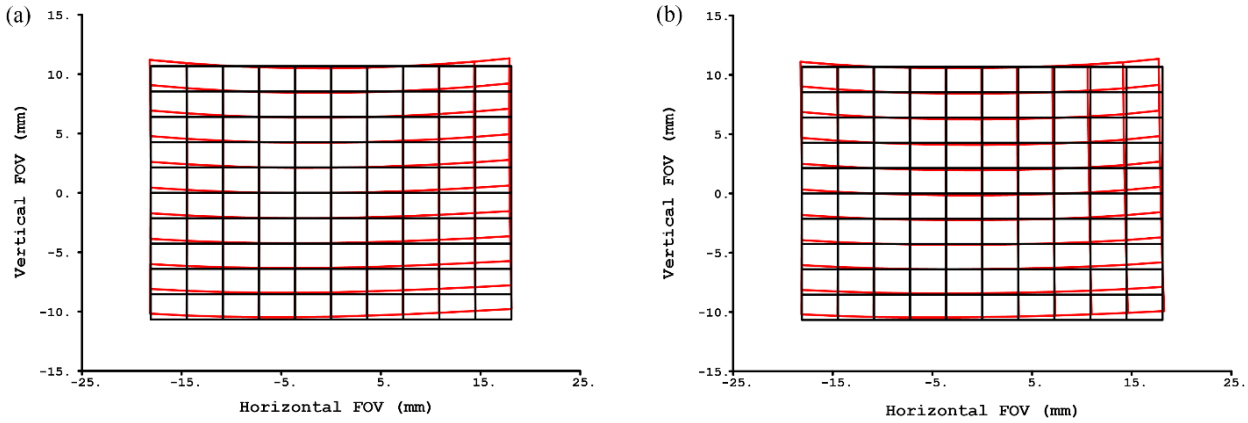

Fig. 7. Grid distortions of a final designed HUD system at two eye positions of the eyebox. (a) center position. (b) corner position (position 2).

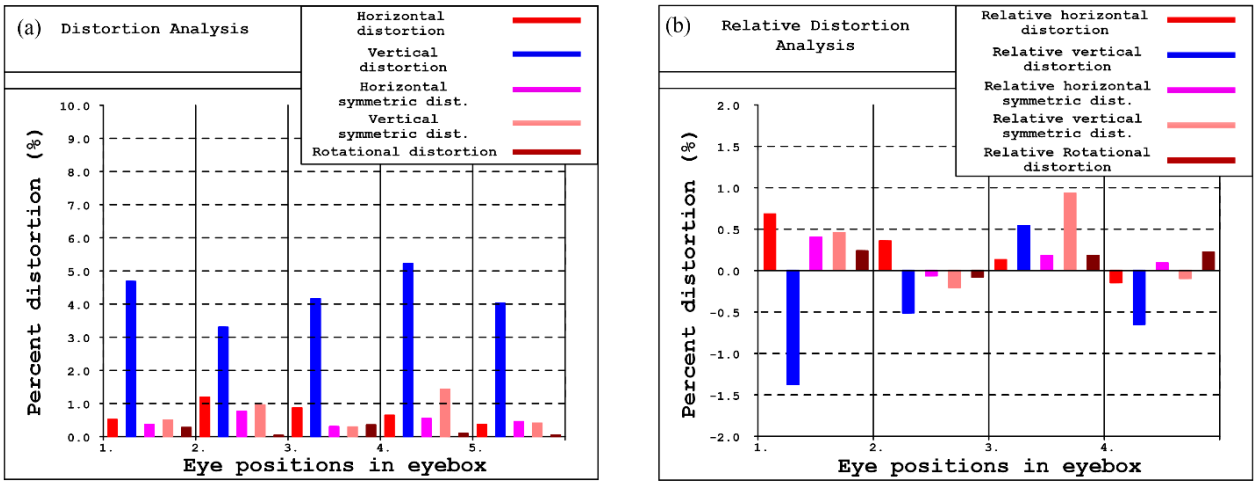

Fig. 8. Distortion analysis. (a) Distortions at five eye positions. (b) Relative distortions due to head motions.

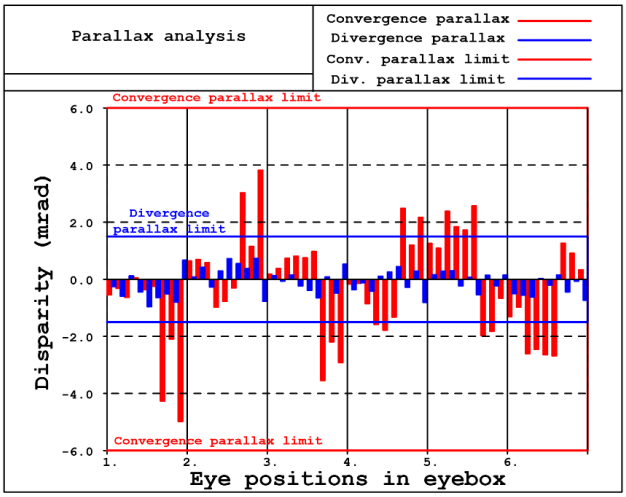

Fig. 9. Convergence parallax and divergence parallax of a final designed HUD optical system.

수평축은 아이박스 내 양안의 위치로서 가장자리 부근인 6개 위치에서 분석을 하였고, 수직축은 각각의 양안시차량이며 그래프의 빨간색 막대는 수렴 양안시차, 파란색 막대는 발산 양안시차이다. 가장 큰 수렴 양안시차는 첫번째 눈의 위치에서 발생하며, 그 값은 4.98 mrad으로 허용범위 이내이다. 또한 발산 양안시차는 최대 0.96 mrad로 모든 위치에서 충분히 작아 요구 사양을 만족시킨다.

V. 결　　론

본 논문에서는 윈드실드형 헤드업 디스플레이에서 발생하는 왜곡수차 및 양안시차를 정량적으로 평가하고 보정하는 방법을 제안하였다. 왜곡수차를 분석하기 위해 아이박스 내 5개 위치에서 각각 다섯 종류의 왜곡수차를 정의하였으며, 이를 이용하여 중심부의 왜곡 이미지와 가장자리에서 왜곡 이미지의 차이, 즉 상대적인 왜곡을 분석하는 방법을 제안하였다. 또한 양안시차를 평가하기 위해 발산 양안시차와 수렴 양안시차를 아이박스 내 6개의 양안위치에 대해 각각 다루었다. 본 논문에서 제시한 왜곡수차 및 양안시차 분석 방법을 이용하여 아이박스 기준 전방 2.7 m 앞에 약 10.5인치 크기의 허상을 형성하는 HUD용 광학계를 설계하였다. 아이박

스의 크기는 80 × 40 mm, 아이박스 내 모든 위치에서 MTF는 공간주파수 8 lp/mm에서 34% 이상이며, 스폿의 크기는 61 μm 이내이다. 또한 아이박스 내의 5개 위치에서 측정된 모든 종류의 왜곡수차는 최대 5.22% 이내이며, 상대적인 왜곡수차는 1.38%보다 작다. 또한 수렴 양안시차는 최대 4.98 mrad, 발산 양안시차는 최대 0.96 mrad 이내로서 안정적인 성능을 갖는 헤드업 디스플레이를 설계하고 평가하였다.

References

1. B. H. Kim and S. C. Park, "Optical system design for a head-up display using aberration analysis of an off-axis two-mirror system," J. Opt. Soc. Korea **20**, 481-487 (2016).
2. K. H. Kim and S. C. Park, "Design of confocal off-axis two-mirror system for head-up display," Appl. Opt. **58**, 677-683 (2019).
3. S. Wei, Z. Fan, Z. Zhu, and D. Ma, "Design of a head-up display based on freeform reflective systems for automotive applications," Appl. Opt. **58**, 1675-1681 (2019).
4. A. Hofmann, J. Unterhinninghofen, H. Ries, and S. Kaiser, "Double tailoring of freeform surfaces for off-axis aplanatic systems," Proc. SPIE **8550**, 855014 (2012).
5. A. A. Burtseva, K. V. Ezhova, and O. V. Trifanov, "Compensation of optical system distortion and image perspective deformations for the projection lens," Proc. SPIE **10329**, 103294 (2017).
6. K. Ezhova and A. Chukhlamov, "Methods of entering of compensation distortions into images for projection on nonplanar surfaces by development of systems of augmented reality," Proc. SPIE **10679**, 1067921 (2018).
7. Society of Automotive Engineers International, "Standard - Optical System HUD for Automotive," SAE Standard No. J**1757**-2 (2018).
8. Z. Qin, F. C. Lin, Y. P. Huang, and H. P. D. Shieh, "Maximal acceptable ghost images for designing a legible windshield-type vehicle head-up display," IEEE Photon. J. **9**, 7000812 (2017).
9. Z. Zhao, D. Cheng, T. Yang, Q. Wang, Q. Hou, L. Gu, and Y. Wang, "Design and evaluation of a biocular system," Appl. Opt. **58**, 7851-7857 (2019).
10. A. H. Tunnacliffe, *Introduction to Visual Optics* (Association of British Dispensing Opticians, UK, 1993).