

## 비대칭 오차요인이 있는 편심 광학계에서의 종수차 계산

류재명<sup>1</sup> · 조재홍<sup>2†</sup> · 강건모<sup>1</sup> · 이해진<sup>1</sup> · 요네야마 슈지<sup>1</sup>

<sup>1</sup>삼성전자(주) 디지털이미징사업부 렌즈개발그룹  
 ④ 443-742 경기도 수원시 매탄3동 416번지

<sup>2</sup>한남대학교 이과대학 광·전자물리학과  
 ④ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133

(2010년 5월 31일 받음, 2010년 8월 3일 수정본 받음, 2010년 8월 10일 게재 확정)

줌렌즈에서 특정 렌즈군을 이동하여 손떨림 보정을 하는 광학적 방법에서는 광학계 설계단계에서 디센터(decenter)를 고려하여 설계한다. 이 때 여러 가지 광학설계 소프트웨어들은 디센터를 포함한 비대칭 오차요인이 있는 경우에 여러 가지 광학 성능들을 쉽게 계산할 수 있지만, 편심 광학계에 대한 정확한 분석이 부족하여 종수차 계산시에는 일부 계산오차가 생긴다. 특히 왜곡의 경우에는 비정상적으로 계산되는데, 이는 비대칭 오차요인이 있는 편심 광학계에서는 근축광선 추적이 제대로 되지 않기 때문이다. 본 논문에서는 이러한 손떨림으로 인한 디센터나 틸트(tilt)와 같은 비대칭 요인이 발생하는 줌렌즈에서 편심 광학계에 대한 근축광선 추적식을 새로이 유도하고, 이를 이용하여 비대칭 요인을 갖는 결상계의 종수차를 정확히 계산하는 방법을 제안한다. 이러한 편심 광학계에 대한 종수차 계산 방법은 줌렌즈의 손떨림 보정에 실제로 사용할 수 있다.

## Calculation of Longitudinal Aberrations in Decentered Optical System with Non-symmetrical Elements

Jae Myung Ryu<sup>1</sup>, Jae Heung Jo<sup>2†</sup>, Geon Mo Kang<sup>1</sup>, Hae Jin Lee<sup>1</sup>, and Suji Yoneyama<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*R&D Team, Digital Imaging Business, Samsung Electronics Co., LTD., Suwon 443-742, KOREA*

<sup>2</sup>*Department of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University, Daejeon 306-791, KOREA*

(Received May 31, 2010; Revised manuscript August 3, 2010; Accepted August 10, 2010)

When the optical image stabilization is implemented by moving one of the lens groups in a zoom system, decentration should be considered in the optical design process. Although it is partially possible to calibrate optical performances in an optical system with non-symmetrical elements by using a lot of commercial software, the results of calibrating longitudinal aberrations have some calibration errors because of the lack of precise consideration of decentered optical systems. In particular, the amount of distortion in paraxial ray tracing is different from the experimental value because paraxial ray tracing in the optical system is not useful. In this paper, in order to solve this problem being from various commercial lens design software, the set of equations of paraxial ray tracing in a zoom lens system with the non-symmetrical elements like decentration or tilt are theoretically induced. Then, the methods to calibrate the equations of longitudinal aberrations by using these equations in a non-symmetrical optical system are presented. The method of calibrating longitudinal aberrations can in practice be used to correct hand shaking effects in a zoom lens system.

Keywords: Geometrical optics, Aberration theory

OCIS codes: (110.0110) Imaging systems; (220.1010) Aberration theory; (220.3620) Lens design; (220.2740) Geometrical optics, optical design

<sup>†</sup>E-mail: jhjo@hnu.kr

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

## I. 서 론

최근 디지털 카메라에 적용되는 광학 기술이 계속 진화되어 여러 가지 기능들이 추가되고 있다. 과거의 카메라 또는 캠코더 등으로 사진 촬영할 때 손떨림 현상으로 인해 카메라 광학계의 충분한 성능에도 불구하고 촬영된 사진의 질이 떨어지는 경우가 있다. 특히 초점거리가 긴 망원단에서 이러한 현상이 두드러지게 나타난다. 이러한 손떨림에 의한 화질 저하의 원인은 손떨림의 진동이 카메라에 전달되어 상이 제대로 맺히지 못하기 때문이다.

이를 방지하는 방법으로는 사진촬영할 때 수동모드에서 필름이나 촬상소자의 노출감도인 ISO(international standard organization) 감도를 높이는 방법과 셔터속도를 높이는 방법이 있다. 이 방법들 중에서 ISO 감도를 높이는 방법은 신호대잡음비가 나빠지고, 셔터속도를 높이는 방법은 실내 촬영시 충분한 광량 확보가 되지 않으므로 이 방법들은 모두 불완전한 해결책인 것이다. 이를 보완하기 위해 카메라 제조사들은 여러 가지 기술을 내 놓고 있으며, 크게 전자적인 방법과 광학적인 방법이 있다. 전자적인 방법은 카메라의 화상처리 알고리즘을 이용하여 손떨림 현상을 방지하는 기술로서 국산 카메라에서도 이미 적용되고 있는 기술이다.

광학적인 방법은 전자적인 방법보다 적극적인 방법으로서 손떨림 현상에 의한 화각 변화를 손떨림 진동의 반대 진동을 줌으로서 손떨림 효과를 보정하는 방식이다. 이러한 방식은 촬상소자를 횡이동시키는 방법과 특정 렌즈군을 횡이동시키는 두 가지 방법이 있다. 이 때 렌즈의 횡이동 방식의 손떨림 보정의 원리는 특정 렌즈군의 광축에 수직인 방향의 디센터에 의해 축상 주광선의 근축 입사각이 바뀌는 것을 이용하는 것이다.

한편 광학계를 구성하는 렌즈는 여러 가지 오차요인들에 의해서 가공 및 조립 시에도 오차가 발생한다. 이 오차요인은 대칭성 오차요인과 비대칭 오차요인으로 나눌 수 있다. 대칭형 오차요인은 발생된 오차가 광축에 대해 회전 대칭성을 갖는 오차로서 뉴턴 링, 두께 오차, 굴절률 오차 등이 있으며, 이러한 오차에 의해 주로 광축 방향의 상면 위치 변화가 발생한다<sup>[1]</sup>. 비대칭 오차요인은 광축에 대해 대칭성이 없는 오차요인으로서 디센터(decenter), 틸트(tilt) 등이 있다.

일반적인 광학계에서는 조립오차가 발생하여 디센터와 틸트가 발생하기는 하나, 목표로 하는 해상력 성능을 만족하는 경우에는 조립 단계에서 발생한 디센터와 틸트에 의한 왜곡 변화는 크지 않아 무시할 수 있다. 그러나 광학계의 일부분의 디센터를 발생시켜 손떨림 보정을 하는 카메라 또는 캠코더의 줌광학계에서는 편심에 의한 종수차량을 정확히 계산할 필요가 있다.

또한 최근 광학설계 소프트웨어(software; S/W)의 발전으로 손떨림 현상이나 조립시 발생하는 이러한 비대칭 오차 요인에 따른 광선팬(ray fan)과 같은 횡수차 및 MTF(modulation transfer function)와 같은 해상력 성능 등을 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 일부 S/W에서는 이러한 비대칭 오차요인에 의한 종수차 계산이 제대로 계산되지 않는다. 비대칭 오차요인

이 발생한 회전 비대칭 광학계에서 이러한 종수차는 일반적으로 대칭적이지 않다. 따라서 광학계의 비대칭성을 감안하여 종수차를 계산해야 하며, 특히 왜곡의 경우에는 비대칭 오차 요인에 의한 근축 주광선이 제대로 계산되지 않아 계산 결과를 신뢰할 수 없다. 물론 국내에서 많이 사용하고 있는 광학설계 S/W 중 하나인 Code V의 일부 버전부터 이를 개선했으나, 최적화 설계시 field option으로 유한광선 상고를 사용하는 경우 문제가 발생하기 때문에 많은 경우 현업에서는 이러한 비대칭 오차에 따른 종수차 계산 오류가 있는 하위 버전 S/W를 사용하는 경우가 있다. 특히 편심에 의한 공차분석을 하는 경우에 종수차량이 정확하게 계산되지 않는다면, 편심에 의한 수차변화량이 편심 자체에 의한 것인지, 계산 오류에 의한 것인지 판단이 되지 않을 수 있다. 또한 왜곡보정을 해야만 하는 계측기용 광학계 또는 카메라 광학계에서는 이 문제가 더 심각해질 수도 있다.

한편 광학설계 단계에서 H. Hamano<sup>[2]</sup>나 S. Hayakawa<sup>[3]</sup>의 연구결과들과 같이 편심 광학계에 대해 3차 수차량을 계산한다면 기초 설계에서는 유용할 수 있다. 그러나 3차 수차는 광학 수차의 근사값이므로 광학계의 최종 성능 평가 방법으로는 적절하지 않다. 또한 K. Tanaka가 1985년에 편심 광학계에 대한 근축 추적식을 가우스 괄호법으로 유도했다<sup>[4]</sup>. 그러나 이 논문은 왜곡을 포함한 구면수차와 비점수차와 같은 나머지 종수차 계산에 관한 언급은 전혀 없다. 즉 참고문헌 [4]에서도 가우스 괄호법을 이용하여 편심 광학계 전체에 대한 광선 추적식을 유도했으나, 본 논문에서는 이와 다르게 광학계의 편심이 각 면에 독립적으로 계산되도록 유도했다. 물론 결과는 같을 것이나, 앞서 언급한 바와 같이 근축 추적식 뿐만 아니라 종수차 계산까지 고려하여 광학계의 최종 평가 방법에 대해서도 다루고자 한다.

종수차 계산 문제를 해결하고자 본 논문에서는 손떨림 보정을 위한 촬상소자 및 렌즈군의 최대 횡이동량을 구하고, 렌즈군의 비대칭 오차요인에 의한 종수차를 계산하고자 하며, 특히 왜곡계산을 위해서 비대칭 오차요인이 고려된 새로운 근축광선 추적식을 유도하고자 한다. 그리고 이 방법과 왜곡의 정의에 따라 광학적 왜곡을 정확히 계산하고자 한다.

## II. 편심 광학계의 종수차 계산 이론

그림 1은 종수차 계산의 이해를 위한 그림이다. 구면수차의 경우가 그림 1(a)이고, 비점수차의 경우가 그림 1(c)이다. 편심이 없는 회전대칭 광학계의 종구면 수차와 비점수차는 아래 식으로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 LSA &= -Y_h \cdot \frac{M_h}{L_h} \\
 YFO &= -\frac{Y_t - Y_p}{\frac{L_t}{M_t} - \frac{L_p}{M_p}} \\
 XFO &= -X_s \cdot \frac{M_p \sqrt{(1 - K_s^2)}}{K_s}
 \end{aligned} \tag{1}$$

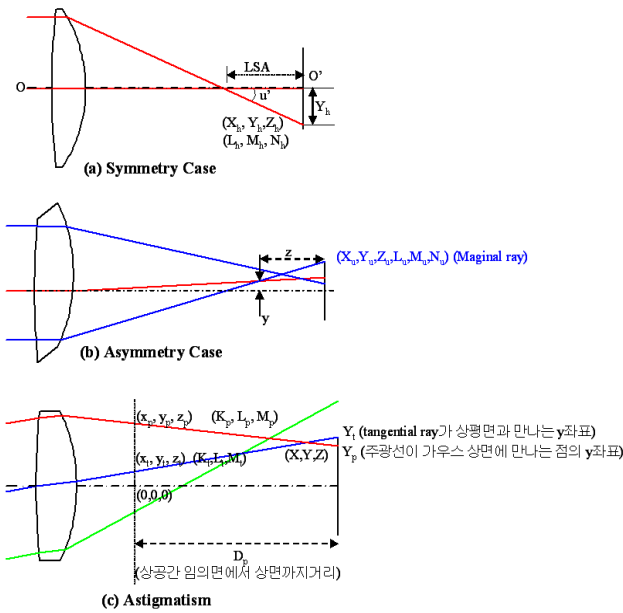


FIG. 1. Schematic diagram showing the longitudinal spherical aberration and the tangential astigmatism.

여기서  $X, Y$ 는 상점에서 유한 광선의 좌표값이고,  $K, L, M$ 은 유한 광선의 방향 코사인(directional cosine)이다. 이때 각 좌표값과 방향 코사인에 붙어있는 첨자 ‘ $h$ ’는 축상 주변광선, ‘ $i$ ’는 구결면의 비축광선, ‘ $s$ ’는 자오면의 비축광선, ‘ $p$ ’는 주광선을 의미한다. 또한 LSA는 종구면수차, YFO와 XFO는 각각 구결 비점수차와 자오 비점수차를 의미한다.

편심이 발생하여 그림 1(b)와 같이 되는 경우에는 축상 주광선이 광축과 일치하지 않으므로 종구면수차 계산은 구결 비점수차 계산과 동일해진다. 특별히 구결 비점수차 YFO에서 광학계의 편심이 없으면, 축상 주변광선이 광축과 일치하므로  $Y_p$ 와  $L_p$ 가 각각 0이 되며, 이때, YFO가 LSA가 됨을 쉽게 알 수 있다.

한편 편심이 있는 광학계에서는 위에서 언급한 바와 같이, 종구면수차와 비점수차의 경우에 유한광선추적만 하게 되면 수차계산이 가능하나, 왜곡은 유한광선추적 결과뿐만 아니라 무수차를 가정한 주광선의 상고(image height)값을 알아야 계산이 가능하다. 따라서 디센터나 틸트가 있는 광학계의 근축광선 추적식이 필히 필요하다.

디지털 스틸 카메라의 줌렌즈 광학계에 손떨림에 의한 진동이 전달되면, 진동에 의해서 EFL이 긴 줌렌즈 광학계가 흔들려서 화각 변화가 발생하게 된다. 이것은 광학계가 고정되고 화각이 바뀌는 형태로 상대적으로 해석할 수 있다. 그러나 손떨림 진동에 의해 렌즈의 곡률, 두께, 굴절률, 렌즈간 간격 등의 광학변수는 거의 바뀌지 않으므로 EFL은 바뀌지 않는다. 따라서 손떨림에 의한 화각 변화에 따라 바뀌는 변수는 최대 화각에서 주광선 입사각이다. 이때 촬상소자 종이동 방식의 손떨림 보정은 변화되는 주광선의 입사각 만큼 촬상소자를 같은 방향으로 종이동시켜서 보정하는 것이다. 이러한

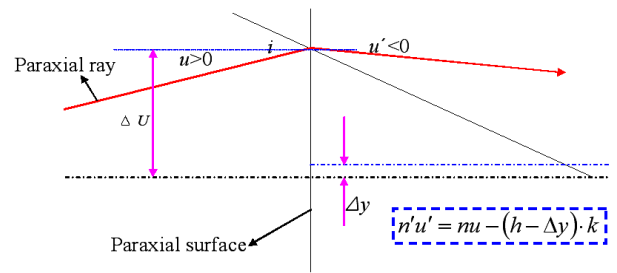


FIG. 2. Refraction of a paraxial ray in an optical system with the decenter and without the tilt.

손떨림 보정을 위한 촬상소자의 종이동량(떨림량)  $\Delta y$ 는 광학계의 초점거리에 따라 비례하며, 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\Delta y = f \cdot \tan \Delta \theta \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 광학계의 초점거리이며,  $\Delta \theta$ 는 손떨림에 의한 화각 변화를 의미한다.

렌즈 횡이동 방식의 경우는 식 (2)에서 주어지는 화면에서의 떨림 양을 특정 렌즈군의 이동으로 떨림 양을 막는 방법이다. 이와 같이 비대칭 오차요인이 포함된 광학계에서는 별도로 광선 추적식을 세울 필요가 있다.

그림 2는 디센터만 발생한 광학계에서 근축광선의 굴절 전후를 나타낸다. 그림에서 보는 것처럼 굴절이 발생하는 광학면을 직선으로 표시했는데, 이는 근축광학에서 광학면의 sag 값을 0으로 근사하기 때문이다. 따라서 근축광선 입장에서 보면 입사각과 굴절각의 변화는 없고, 디센터양( $\Delta y$ )만큼의 입사각만 낮아졌다고 볼 수 있으므로 굴절 전후의 입사각에 대한 광선 추적식은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$n'u' = nu - (h - \Delta y) \cdot k \quad (3)$$

여기서 프리임 기호는 굴절 후를 의미하며,  $n$ 은 굴절률,  $u$ 는 광선의 입사각,  $h$ 는 광선의 입사고,  $\Delta y$ 는 해당 굴절면의 디센터양,  $k$ 는 그 면의 굴절능을 의미한다.

그림 3은  $\theta$ 만큼 틸트만 발생한 광학계의 굴절 전후를 나타낸다. 그림 3(b)는 그림 3(a)에서 광선의 교점 부근을 확대한 그림이다. 그림 3(b)에서 점 A는 굴절면이 광축과 만나는 점으로 디센터가 없는 회전대칭곡면일 경우에는 면의 정점이 된다. 또한 점 A는 굴절면의 틸트 중심점이다. 붉은 실선 AP는 굴절면을 의미하며, 그림 3(a)와 마찬가지로 근축광학에서는 곡면이 아닌 평면으로 근사된다. 붉은 점선 AP<sub>1</sub>는 틸트된 굴절면이다. 그리고 가는 점선 NN<sub>1</sub>은 틸트된 굴절면과 근축광선의 교차점인 P<sub>1</sub>에서의 법선이고, 가는 실선 NN'은 틸트 이전의 굴절면과 근축 광선의 교차점인 P에서의 법선이다. 이 때 근축광선과 광축이 이루는 굴절각  $u$ 는 CodeV 또는 OSLO와 같은 광학설계 소프트웨어에서는 양수로 처리한다. 근축광선과 틸트된 굴절면의 P<sub>1</sub>에서의 법선과 이루는 입사각과 굴절각은 각각  $i$ 와  $i'$ 이며, 점 P<sub>1</sub>에서 광축까지의 수

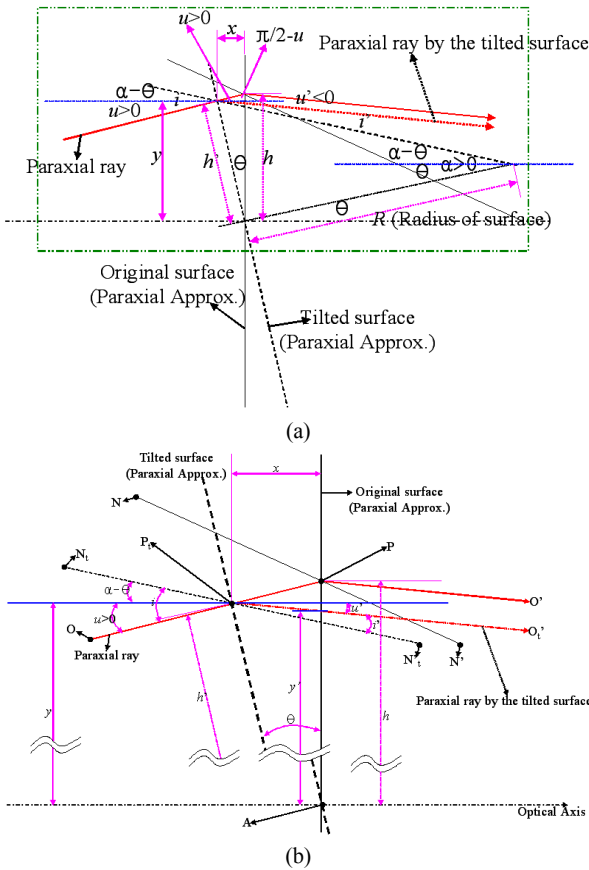


FIG. 3. (a) Refraction of a paraxial ray in an optical system with the decenter and without the tilt, (b) a magnified figure near the refraction surface of the paraxial ray at Fig. 3 (a).

선의 길이는  $y$ , 점  $P_i$ 에서 틸트된 굴절면의 정점  $A$ 까지의 거리를  $h'$ , 점  $P_i$ 와 점  $P$ 까지 광축 방향의 거리는  $x$ 이다.

입사 전후의 굴절각  $i, i'$ 을 근축광선의 굴절각  $u$ , 굴절면의 틸트량  $\theta$ ,  $P_i$ (굴절면의 중심)와 굴절면의 정점  $A$ 가 이루는 각  $\alpha$ 로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} i &= u + \alpha - \theta \\ i' &= u' + \alpha - \theta \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 근축광선에 대한 스넬의 법칙  $ni = n'i'$ 에 대입하면 다음과 같은 굴절 방정식이 유도된다.

$$n'u' = nu - h'k + (n' - n)\theta \quad (5)$$

여기서  $k$ 는  $(n' - n)/R$ 로 정의되는 굴절면의 굴절능을 의미한다. 식 (5)에서  $h'$ 은 근축광선과 굴절면의 교점  $P_i$ 에서 광축까지의 수직 거리가 아니므로 따로 계산을 해야 한다. 한편  $h$ 는 굴절면의 틸트가 없을 때의 근축광선의 입사고이므로 쉽게 계산이 되며,  $h'$ 과  $h$ 는 그림 3(b)의 삼각형  $AP_iP$ 에서의 사인 법칙으로 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

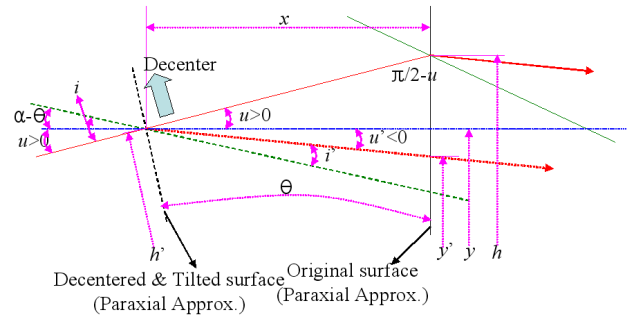


FIG. 4. Refraction of a paraxial ray in the optical system with the decenter and the tilt, simultaneously.

$$\begin{aligned} \frac{h'}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} u\right)} &= \frac{h}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \tan^{-1} u\right)} \\ \therefore h' &= h \cdot \frac{\cos(\tan^{-1} u)}{\cos(\theta - \tan^{-1} u)} \end{aligned} \quad (6)$$

점  $P_i$ 에서 출발한 근축광축이 틸트 이전의 굴절면에 해당하는 위치까지 전환 방정식을 구하면, 그 다음 면까지의 입사고는 기존에 알려진 전환 방정식을 그대로 사용하면 된다. 따라서 그림 3(b)에서  $x$ 만큼 이동했을 때, 즉 굴절 이후 틸트 이전의 굴절면에서의 입사고  $y'$ 은  $x = h' \sin \theta$ ,  $y = h \sin \theta$ ,  $y' = y + ux$ 의 관계를 이용하여 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$y' = h \cdot \frac{\cos(\tan^{-1} u)}{\cos(\theta - \tan^{-1} u)} \cdot (\cos \theta + u' \cdot \sin \theta) \quad (7)$$

따라서 틸트된 굴절면에 대한 굴절 방정식은 식 (5)의  $h'$ 에 식 (6)을 대입하고, 식 (7)의 결과에 따라 식 (8)과 같이 정리할 수 있다. 만약 여기서 틸트가 없어서  $\theta = 0$ 인 경우,  $n'u' = nu - hk$ ,  $y' = h$ 가 되어 기존의 굴절 방정식과 동일해진다.

$$\begin{aligned} n'u' &= nu - hk \cdot \frac{\cos(\tan^{-1} u)}{\cos(\theta - \tan^{-1} u)} + (n' - n)\theta \\ y' &= h \cdot \frac{\cos(\tan^{-1} u)}{\cos(\theta - \tan^{-1} u)} \cdot (\cos \theta + u' \cdot \sin \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 프라임 기호는 굴절 후를 의미하며,  $n$ 은 굴절률,  $u$ 는 광선의 입사각,  $h$ 는 광선의 입사고,  $\theta$ 는 해당 면의 틸트량,  $k$ 는 면의 굴절능,  $h$ 는 틸트가 발생하지 않은 면의 입사고,  $y'$ 은 틸트된 면을 지나 광학면의 정점에서 광축의 수선과 만나는 교점을 의미한다.

그림 4는 디센터와 틸트가 동시에 발생한 편심 광학계의 굴절을 나타내고 있다. 광학면과 광선이 이루는 각은 그림 4에서와 동일하며, 틸트만 있는 경우에 대해 디센터를 추가하면 된다. 따라서 유사한 방법으로 식 (8)에 식 (3)과 같이 디센터를 고려하면 식 (9)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 n'u' &= nu - \left\{ h \cdot \frac{\cos(\tan^{-1} u)}{\cos(\theta - \tan^{-1} u)} - \Delta y \right\} \cdot k + (n' - n)\theta \\
 y' &= h \cdot \frac{\cos(\tan^{-1} u)}{\cos(\theta - \tan^{-1} u)} \cdot (\cos \theta + u' \cdot \sin \theta) \\
 h'_{next} &= y' + d' \cdot u'
 \end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)는 비대칭 오차요인인 디센터와 틸트가 고려된 새로운 근축광선 추적식이다. 여기서 프라임 기호는 굴절 후를 의미하며,  $n$ 은 굴절률,  $u$ 는 광선의 입사각,  $h$ 는 광선의 입사고,  $\theta$ 는 해당 면의 틸트량,  $k$ 는 면의 굴절능,  $h$ 는 틸트가 발생하지 않은 면의 입사고,  $y'$ 은 틸트된 면을 지나, 광학면의 정점에서 광축의 수선과 만나는 교점,  $h'_{next}$ 는 다음 면에서의 입사고,  $d'$ 은  $P_1$ 를 포함한 굴절면 다음 광학면까지의 거리를 의미한다. 식 (9)는 식 (3) 및 식 (8)을 모두 포함한 것으로 면의 틸트가 없다면 ( $\theta = 0$ ) 식 (3)과 같아지며, 면 디센터가 없다면 ( $\Delta y = 0$ ) 식 (8)과 같아지는 것을 확인할 수 있다.

여기에서 설명한 모든 수식은 C, C++ 등의 프로그래밍 언어로 계산이 가능하지만, 여기에서는 실무적 편리성을 위하여 Code V의 내부 언어인 MACRO-PLUS로 작성하였다.

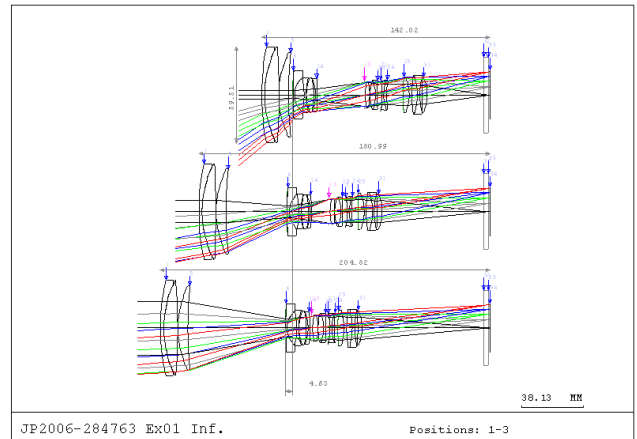
### III. 예제로 사용한 광학계의 특징 및 기존 광학설계 S/W에 의한 수차 계산의 문제점.

이 장에서는 JP2006-284763의 제1실시예<sup>[5]</sup>에서 주어진 광학계를 사용하여 기존 광학설계 S/W로 왜곡수차를 확인하고, 이에 대한 S/W 상의 문제점을 살펴보고자 한다. 이 광학계는 디지털 일안 반사식 카메라(digital single lens reflection : DSLR)용 고배율 광학계로서 참고문헌 7에 언급한 광학계와 유사하며, 이 특허와 참고문헌에서 보듯이 광각단에서 손떨림 보정각은 0.5도임을 알 수 있다.

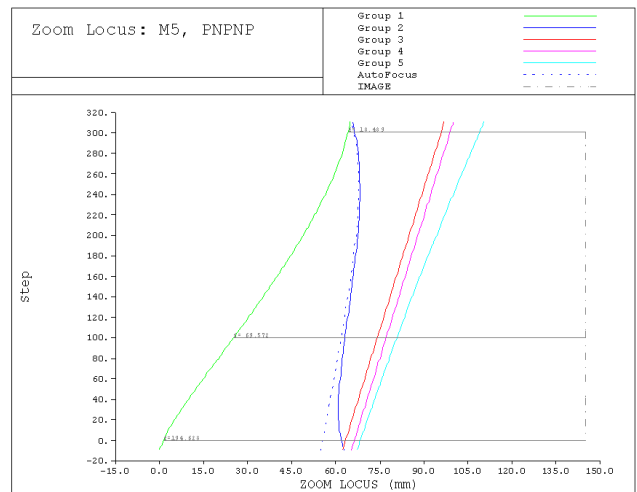
한편 이 광학계에서 군의 이동에 따른 배율 변화가 가장 큰 군인 변배자(variator)<sup>[6]</sup>는 2군이다. 일반적인 콤팩트 카메라 광학계에서는 보상자(compensator)를 focusing 군으로 사용하거나<sup>[1]</sup>, DSLR용 교환렌즈 광학계에서는 제1군을 focusing 군으로 사용한다. 그러나 이 광학계는 제2군인 변배자를 focusing

군으로 사용하여 focusing시에도 광학계의 전장이 바뀌지 않도록 했다. 또한 제3-2군의 비구면은 손떨림 보정을 위해 광축의 수직으로 움직였을 때 발생하는 비대칭 수차를 보정하기 위한 목적으로 사용되었다<sup>[7]</sup>.

표 1은 이 광학계의 대략적인 광학 사양들로서 유효초점거리(effective focal length, EFL), 반화각(half field of view, HFOV), F수(F/#), 센서(sensor), 줌비(zoom ratio), 줌형태(zoom type), Focusing group, 손떨림 보정군, 렌즈매수 등이 열거되어 있다. 센서는 APS-C format(Advanced Photo System type-C)의 센서로, 이는 35 mm film의 약 0.67배 정도 작은 크기를 갖는 센서를 의미한다. 센서의 최대 반대각 크기는 제조사, 총 화소수 등에 따라 약간의 차이가 있으나, 대략 14.1 mm 이다. 줌형태에서 'PNPP'라 함은 1군이 양의 굴절능(Positive Power), 2군은 음의 굴절능(Negative Power), 3군 및 4군은 양의 굴절능(Positive Power)임을 의미한다. 또한 그림 5는 광학계의 광로도(위)와 줌궤적(아래)이다. 그림 5(b)는 상면에서 각 군의 첫 면까지의 거리를 그린 것이며, 가장 오른쪽의 1점 파선은 고정된 상면을 의미한다. 그림 5(b)의 줌 궤적



(a)



(b)

TABLE 1. Specifications of the first example in the patent JP2006-284763

	JP2006-284763
EFL	18.49mm ~ 193.63mm
HFOV	39.57° ~ 4.17°
F/#	3.54-5.88
Sensor	APS-C
Zoom Ratio	10.5
Zoom Type	PNPP(4군)
Focusing group	2군 (Inner Focus)
손떨림 보정군	3-2군
렌즈 매수	16매(비구면 3매 포함)

FIG. 5. Optical layout (upward figure) and zoom locus (downward figure) for the first example in the patent JP2006-284763.



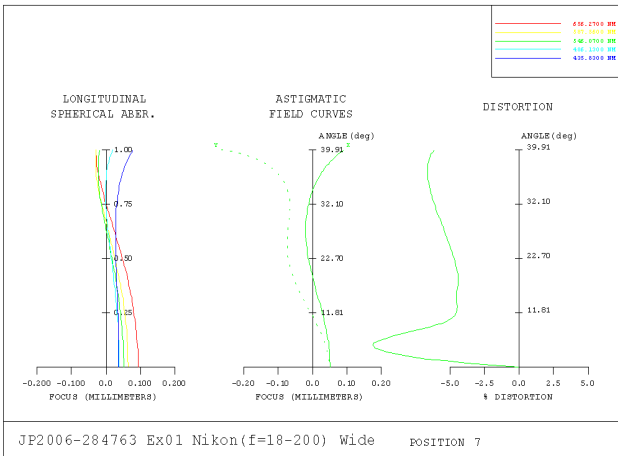


FIG. 6. Calculated diagrams of the longitudinal aberrations in the full-field at wide status according to the maximum movement of image stabilization group for the first example in the patent JP2006-284763 (by using Code V<sup>[8]</sup>).

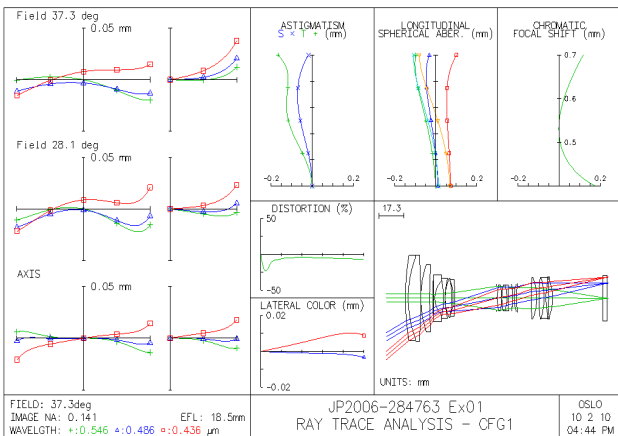


FIG. 7. Calculated diagrams of the various aberrations in the full-field at wide according to the maximum movement of image-stabilizing group for the first example in the patent JP2006-284763 (by using OSLO<sup>[9]</sup>).

에서 다섯 개 실선은 왼쪽부터 차례로 1군, 2군, 3-1군, 3-2군, 4군을 의미하고, 점선은 렌즈 첫 면에서 1 m 거리에 위치한 물체의 상을 맺기 위한 focusing군의 위치를 의미한다.

그림 6은 JP2006-284763의 제1실시에 대해서 광학설계 S/W인 CodeV로 계산한 wide 위치인 position 7에서의 중수차로서 가장 오른쪽 그래프가 왜곡수차이다. 또한 그림 7은 같은 광학계에 대한 수차를 또 다른 광학설계 S/W인 OSLO로 계산한 결과이며, 가운데 굵은 상자 안의 그래프가 왜곡수차이다. 그림 6과 그림 7의 광학적 왜곡 계산 결과에서 보는 것처럼 촬상 소자의 중심 근처에서 왜곡이 매우 급격하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 실제 회전 대칭성을 갖는 광학 제품에서 디센터 또는 틸트가 있더라도 화면 중심부에서 화면 주변부보다 급격하게 큰 왜곡이 발생하는 경우는

TABLE 2. EFLs and magnifications of each group for the first example in the patent JP2006-284763

Group	EFL	Magnification		
		Wide (cfg 1)	Normal (cfg 2)	Tele (cfg 3)
1 <sup>st</sup>	101.141199	0.000000	0.000000	0.000000
2 <sup>nd</sup>	-14.926878	-0.196520	-0.369879	-0.838959
3 <sup>rd</sup> -1	27.767048	-0.985434	-2.227566	-2.785875
3 <sup>rd</sup> -2	-39.383124	-5.502011	-0.945612	-0.689108
4 <sup>th</sup>	39.575562	-0.171567	-0.882879	-1.194783

없다. 따라서 이러한 현상은 광학 설계 S/W에서 왜곡을 제대로 계산하지 못하기 때문이다. 그러나 디센터 또는 틸트가 있는 경우에 횡수차 및 MTF 등의 광학성능은 제대로 계산이 되므로, 유한광선추적에 의한 오류보다는 근축광선 추적에 따른 오류로 판단된다. 따라서 편심이 있는 경우 근축광선 추적에 관한 새로운 수식이 필요함을 알 수 있다.

#### IV. 편심에 의한 중수차 계산 결과

표 2는 본 광학계를 구성하는 각 군에 대한 초점거리와 배율로서 e-line (파장 546.1 nm)에서 계산한 값이다. 광학계의 초점거리가 주어져 있고, 손떨림에 의한 화각 변화를 참고문헌 7에서 언급한 대로 0.5도로 가정하면, 참고문헌 3의 실시예1의 광각단에서의 초점거리가 18.489 mm이므로, 상면에서의 떨림량은 식 (2)에 따라 약 0.161 mm가 된다. 이 때 참고문헌 3의 실시예1의 방진계수가 1.115이므로 손떨림 보정군으로 사용된 제3-2군의 손떨림 보정량은 약 0.145 mm가 된다. 실제로 CodeV를 이용하여 첫번째 면의 중심오차 0.5도 각도로 입사시킨 유한광선의 상면에서의 상고는 약 0.162 mm가 된다. 또한 손떨림 보정군을 광축 위로 0.145 mm만큼 디센터시키고, 같은 계산을 하면 상면에서의 상고는 약 0.0003 mm로 거의 0과 같다. 따라서 식 (2)에 의해 근사적으로 계산한 상면의 떨림량은 잘 맞는 것을 알 수 있다.

실제 손떨림 보정군이 줌렌즈 내에 내장된 actuator에 의해 흔들리면 디센터가 발생하며, 렌즈를 조립하는 과정에서도 틸트가 생기고, 렌즈 단품 가공시에도 디센터와 틸트는 발생한다. 본 논문에서는 이러한 모든 원인을 고려하여 손떨림 보정군에서 디센터와 틸트가 한꺼번에 발생했을 때, 중수차를 구하고자 하기 때문에 디센터와 틸트를 단순하게 입력하여 계산한다.

표 3은 손떨림 보정군을 구성하는 면의 디센터는 광축 위로 모두 0.145 mm(0.5도 화각 변화 보정에 해당), 틸트는 모두 6분만큼 시계방향으로 생겼다고 가정하여 식 (9)를 이용하여 CodeV로 계산한 축상광선의 광선추적 결과이다. 여기서 사용한 편심 좌표계는 절대 좌표계로서 CodeV의 경우, 'DAR(Decenter And Return)' 명령어를 사용했다. 표 3에서 첫번째 열(No.)은 면번호, 두번째 열(YDE)은 각 면의 디센터 값, 세번째 열(ADE)은 각 면의 틸트양, 네번째 열(HMY)은

식 (9)로 계산한 근축 광선의 입사각, 다섯번째 열(UMY)은 식 (9)로 계산한 근축 광선의 굴절각, 여섯번째 열(Y\_F0)은 유한광선추적으로 계산한 광학계의 입사각이 0도인 축상광선의 입사각, 일곱번째 열(TAN(Y)\_F0)은 유한광선추적으로 계산한 광학계의 입사각이 0도인 축상광선의 굴절각에 관한 값으로, 축상광선의 Y축 방향 코사인을 Z축(광축) 방향 코사인으로 나눈 값이다. 또한 면번호 1은 광학계의 첫번째 면, 면번호 34는 촬상소자에 해당하는 상면이다. 또한 면번호 21부터 면번호 24까지가 손떨림 보정군(제3-2군)이다. 식 (9)를 이용하여 표 3에서 구한 상면에서의 근축광선추적 결과는 CodeV를 이용하여 구한 유한광선추적 결과와 잘 일치하는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 편심 광학계에 대한 근축 추적식인 식 (9)가 타당함을 알 수 있다

JP2006-284763의 제1 실시예에서 손떨림 보정군이 이동되

었을 때, 광각단(wide 상태로 position 1)에서 화면 중심의 왜곡은 아래 식 (9)에 따라 계산된 표 3의 결과로서 다음과 같이 계산이 가능하다.

$$DIY (\%) \equiv \frac{Y - y}{y} \times 100 \tag{10}$$

식 (10)에서 Y는 유한광선추적에 의한 주광선의 상고이며, y는 근축광선 추적에 의한 주광선의 상고이다. 본 광학계의 광각단의 경우, 표 3에서 보는 것처럼 Y는 -0.161194 mm이고, y는 -0.161317 mm이다. 따라서 식 (10)으로 계산되는 광학적 왜곡은 -0.076%이다.

주광선의 왜곡을 계산하기 위해서는 주광선에 대한 식 (9)의 근축광선 추적과 일반적인 유한광선 추적을 해야만 한다.

**TABLE 3.** Comparative results between the paraxial ray tracing (HMY columns and UMY columns) and the finite ray tracing (Y\_F0 columns and TAN(Y)\_F0 columns) by using Eq. (9) when the 3-2rd group (from 21st to 24th surfaces) is decentered by 0.146 mm, tilted by 6 minutes clockwise in the condition of zero field being incident to the vertex of the first surface for the first example in the patent JP2006-284763.

No.	YDE	ADE	근축광선추적		유한광선추적	
			HMY	UMY	Y_F0	TAN(Y)_F0
1	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
17	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
19	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
20	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
21	0.1450	0.1000	-0.145000	-0.000565	-0.145000	-0.002311
22	0.1450	0.1000	-0.145028	-0.000690	-0.145028	-0.002436
23	0.1450	0.1000	-0.145719	-0.000525	-0.145720	-0.002271
24	0.1450	0.1000	-0.146664	-0.003663	-0.146665	-0.005409
25	0.0000	0.0000	-0.038298	-0.001986	-0.038296	-0.001986
26	0.0000	0.0000	-0.046240	-0.002355	-0.046239	-0.002355
27	0.0000	0.0000	-0.049773	-0.001364	-0.049772	-0.001364
28	0.0000	0.0000	-0.054683	-0.001364	-0.054681	-0.001364
29	0.0000	0.0000	-0.056593	-0.003527	-0.056592	-0.003527
30	0.0000	0.0000	-0.062941	-0.002395	-0.062940	-0.002395
31	0.0000	0.0000	-0.069646	-0.002406	-0.069645	-0.002406
32	0.0000	0.0000	-0.154158	-0.001584	-0.154158	-0.001584
33	0.0000	0.0000	-0.158911	-0.002406	-0.158911	-0.002406
34	0.0000	0.0000	-0.161317	-0.002406	-0.161194	-0.002406

여기서의 주광선은 최대 화각일 경우이며, 예제로 사용된 광학계의 최대 화각은 39.57도이다. 표 4는 JP2006-284763의 제1실시예에서는 제3-2군을 표 3과 같이 광축 위쪽 방향으로 0.145 mm만큼 디센터와 손떨림 보정군의 각 면이 모두 시계 방향으로 6분만큼 틸트시켰을 때의 주광선에 대한 식 (9)를 이용한 근축광선 추적과 일반적인 유한광선 추적의 결과이다.

표 3과 비슷하게 첫번째 열(No.)은 면 번호, 두번째 열(YDE)은 각 면의 디센터값, 세번째 열(ADE)은 각 면의 틸트양, 네번째 열(HCY)은 식 (9)로 계산한 근축 주광선의 입사고, 다섯번째 열(UCY)은 식 (9)로 계산한 근축 주광선의 굴절각, 여섯번째 열(HCY\_CodeV)은 디센터가 없다고 가정했을 때 계산되는 근축 주광선의 입사고, 일곱번째 열(UCY\_CodeV)

은 디센터가 없다고 가정했을 때 계산되는 근축 주광선의 굴절각, 여덟번째 열(Y\_F0)은 광학계의 입사각이 0도인 축상광선의 입사고, 아홉번째 열(TAN(Y)\_F0)은 광학계의 입사각이 0도인 축상광선의 굴절각에 관한 값으로, 축상광선의 Y축 방향 코사인을 Z축(광축) 방향 코사인으로 나눈 값, 열번째 열(Y\_FF)은 광학계의 주광선의 입사고, 열한번째 열(TAN(Y)\_FF)은 광학계의 주광선의 굴절각에 관한 값으로, 축상광선의 Y축 방향 코사인을 Z축(광축) 방향 코사인으로 나눈 값이다. 디센터가 있을 때 식 (9)로 계산한 근축 주광선의 상면에서의 입사고는 15.302158 mm이며, 주광선의 유한광선추적에 의한 상면에서의 입사고는 14.497660 mm이므로 식 (10)을 이용하여 왜곡을 계산하면 약 -5.26%이다. 같은 방

**TABLE 4.** Comparative results between the paraxial ray tracing and the finite ray tracing results for the chief ray of the full-field with wide angle using Eq. (9) when the 3-2rd group (from 21st to 24th surfaces) is decentered by 0.146 mm upward, tilted by 6 minutes clockwise in the condition of the chief ray of the full- field being incident to the vertex of the first surface for the first example in patent JP2006-284763.

No.	종래근축광선추적						유한광선추적			
	YDE	ADE	HCY	UCY	HCY_CodeV	UCY_CodeV	Y_F0	TAN(Y)_FO	Y_FF	TAN(Y)_FF
1	0.0000	0.0000	-26.362949	0.537424	-26.362949	0.537424	0.000000	0.000000	-27.456836	0.493204
2	0.0000	0.0000	-25.288102	0.574726	-25.288102	0.574726	0.000000	0.000000	-25.333934	0.513168
3	0.0000	0.0000	-20.287984	0.886623	-20.287984	0.886623	0.000000	0.000000	-23.805690	1.044246
4	0.0000	0.0000	-20.199322	0.680279	-20.199322	0.680279	0.000000	0.000000	-19.530614	0.716780
5	0.0000	0.0000	-16.049622	1.055311	-16.049622	1.055311	0.000000	0.000000	-17.123000	1.864540
6	0.0000	0.0000	-13.516877	0.687312	-13.516877	0.687312	0.000000	0.000000	-12.987240	0.758198
7	0.0000	0.0000	-13.379414	0.594506	-13.379414	0.594506	0.000000	0.000000	-12.907159	0.615620
8	0.0000	0.0000	-12.666007	0.391140	-12.666007	0.391140	0.000000	0.000000	-9.996897	0.427337
9	0.0000	0.0000	-10.358284	0.126281	-10.358284	0.126281	0.000000	0.000000	-9.468338	0.127992
10	0.0000	0.0000	-10.206746	0.047648	-10.206746	0.047648	0.000000	0.000000	-9.088724	0.068225
11	0.0000	0.0000	-10.201981	0.182432	-10.201981	0.182432	0.000000	0.000000	-9.048527	0.180741
12	0.0000	0.0000	-9.362795	0.497147	-9.362795	0.497147	0.000000	0.000000	-8.603235	0.570595
13	0.0000	0.0000	-8.865649	0.148951	-8.865649	0.148951	0.000000	0.000000	-8.316403	0.131681
14	0.0000	0.0000	-8.716697	0.297498	-8.716697	0.297498	0.000000	0.000000	-8.044842	0.272945
15	0.0000	0.0000	0.000000	0.297498	0.000000	0.297498	0.000000	0.000000	0.000000	0.272945
16	0.0000	0.0000	0.148749	0.179448	0.148749	0.179448	0.000000	0.000000	0.136546	0.160776
17	0.0000	0.0000	0.687092	0.282926	0.687092	0.282926	0.000000	0.000000	0.618009	0.258106
18	0.0000	0.0000	0.715384	0.180548	0.715384	0.180548	0.000000	0.000000	0.646991	0.161176
19	0.0000	0.0000	1.365357	0.156336	1.365357	0.156336	0.000000	0.000000	1.221249	0.139301
20	0.0000	0.0000	1.521693	0.296842	1.521693	0.296842	0.000000	0.000000	1.365373	0.271689
21	0.1450	0.1000	2.266854	0.209829	2.412220	0.210404	-0.145000	-1.002311	2.020598	0.187196
22	0.1450	0.1000	2.277264	0.190620	2.422740	0.191323	-0.145028	-0.002436	2.029935	0.169495
23	0.1450	0.1000	2.467858	0.184858	2.614063	0.185394	-0.145720	-0.002271	2.225874	0.164085
24	0.1450	0.1000	2.801493	0.358343	2.947772	0.362039	-0.146665	-0.005409	2.513840	0.333560
25	0.0000	0.0000	6.529922	0.180134	6.568166	0.182139	-0.038296	-0.001986	6.073198	0.165997
26	0.0000	0.0000	7.250457	0.148770	7.296723	0.151158	-0.046239	-0.002355	6.589242	0.136322
27	0.0000	0.0000	7.473612	0.068120	7.523460	0.269505	-0.049772	-0.001364	6.928023	0.060888
28	0.0000	0.0000	7.718843	0.091203	7.773679	0.092586	-0.054681	-0.001364	7.090352	0.082778
29	0.0000	0.0000	7.846527	0.308774	7.903298	0.312337	-0.056592	-0.003527	7.306280	0.303622
30	0.0000	0.0000	8.402319	0.218757	8.465506	0.221176	-0.062940	-0.002395	7.604954	0.209754
31	0.0000	0.0000	9.014840	0.165031	9.084799	0.167469	-0.069645	-0.002406	8.008923	0.165753
32	0.0000	0.0000	14.811135	0.108664	14.966723	0.110270	-0.154158	-0.001584	14.015467	0.108301
33	0.0000	0.0000	15.137128	0.165031	15.297532	0.167469	-0.158911	-0.002406	14.340369	0.165753
34	0.0000	0.0000	15.302158	0.165031	15.456451	0.167469	-0.161194	-0.002406	14.497660	0.165753



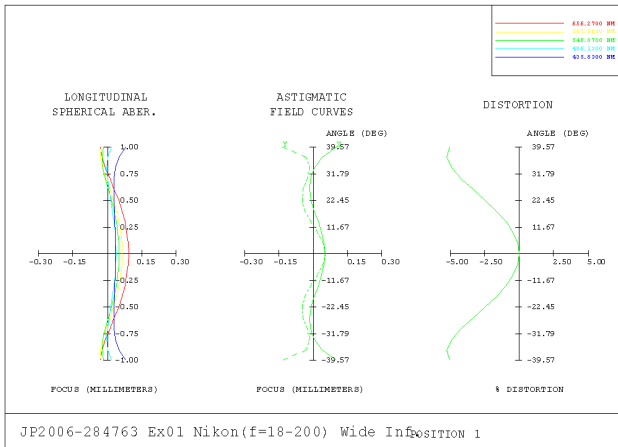


FIG. 8. Calculated results of the longitudinal aberrations in the full-field without the decenter and the tilt for the first example in the patent JP2006-284763.

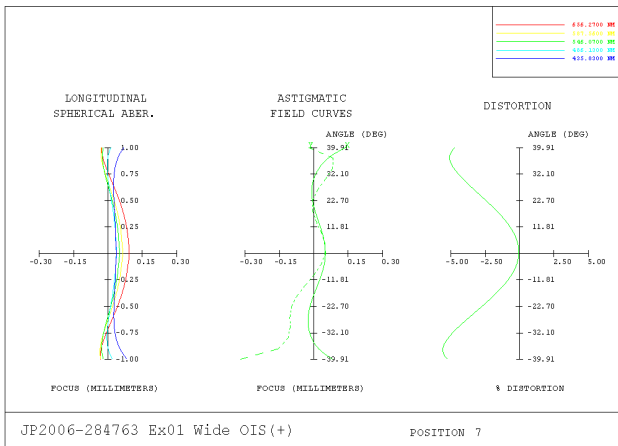


FIG. 9. Calculated results of the longitudinal aberrations in the full-field according to the maximum movement of a image-stabilizing group for the first example in the patent JP2006-284763.

법을 적용하면 마찬가지로 각 field별 왜곡을 계산할 수 있다. 편심이 없는 경우에는 기존 광학설계 S/W에서 쉽게 계산하는 명령어를 제공하고 있으며, CodeV에서 계산한 최대 화각에서의 왜곡은 -5.05%이다. 만약 기존 광학설계 S/W에서 계산한다면 근축 주광선의 상고 y가 15.544620 mm이므로 식 (10)에 따라 -6.20%가 되어 왜곡 값에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 실제로 카메라 광학계에서 손떨림 보정량이 최대가 되어도 왜곡의 실측값은 설계치와 거의 같다. 그림 8은 디센터가 없는 광학계에서의 종수차 계산 결과이고, 그림 9는 광각단에서 제3-2군이 표 3 및 표 4와 같은 편심이 생겼을 때의 종수차에 대한 그래프이다. 그림 8에서 보는 것처럼 광학계가 광축에 대해 회전 대칭성을 가지는 경우에는 ‘+’ 최대 화각에서의 수차량과 ‘-’ 최대 화각에서의 수차량이 같아 그래프의 x축에 대해 대칭성을 갖지만, 디센

터를 가지는 경우 광학계가 비대칭이 되므로 ‘+’ 최대 화각에서의 수차량과 ‘-’ 최대 화각에서의 수차량 역시 비대칭이 되며, 이는 그림 9에서도 확인할 수 있다. 그림 8과 그림 9에서 각각 가장 왼쪽 그래프는 식 (1)의 LSA로 계산된 종구면 수차이며, 가운데 그래프는 식 (1)의 YFO 및 XFO로 계산된 비점수차, 가장 오른쪽 그래프는 식 (9)와 식 (10)으로 계산한 왜곡 계산 결과이다.

그림 8과 그림 9를 비교해 보면 근축광선에 대해서 식 (9)를 사용하여 보면 디센터가 생긴 경우에도 이미 손떨림에 대해서 잘 보정하여 설계한 JP2006-284763의 제1 실시예는 손떨림 보정군에 최대 디센터가 생겨도 중요한 수차들과 왜곡이 거의 변화가 없다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 비대칭 오차요인인 디센터와 틸트가 수반된 경우의 근축광선 추적을 제대로 실행하지 못하면서 구한 왜곡수차를 보여주는 그림 6 및 그림 7과는 완전히 다르다는 것을 알 수 있다. 즉 비대칭 오차요인이 발생한 경우 근축광선 추적식이 새로이 수정되어 적용되어야 함을 알 수 있다.

## V. 결 론

일반적인 광학계에서는 조립 오차가 발생하여, 디센터 및 틸트가 발생하기는 하나, 목표로 하는 해상력 성능을 만족하는 경우에는 조립 단계에서 발생한 디센터 및 틸트에 의한 왜곡 변화는 크지 않아 무시할 수 있다. 하지만, 광학계의 일부 부분의 디센터를 발생시켜 손떨림 보정을 하는 카메라 또는 캠코더와 같은 결상 광학계에서는 편심에 의한 종수차를 정확히 계산할 필요가 있다.

손떨림 보정 기능이 있는 사진 광학계에 대해 편심이 있는 경우, 종구면수차와 비점수차는 기존의 유한광선 추적으로부터 쉽게 계산이 가능하다. 하지만 왜곡을 계산할 때는 주광선에 대한 근축광선 추적이 새로이 필요함을 알 수 있다. 그러나 여러 가지 광학설계 소프트웨어들은 디센터와 편심 비대칭 오차요인이 있는 경우에 여러 가지 광학 성능들을 쉽게 계산할 수 있지만, 종수차 계산시에는 일부 계산오차가 있다. 특히 왜곡의 경우에는 비정상적으로 계산되는데, 이는 비대칭 오차요인이 있는 편심 광학계에서는 근축광선 추적이 제대로 되지 않기 때문이다.

본 논문에서는 디센터와 틸트와 비대칭 오차요인들이 수반된 편심 광학계에 대해서 디센터만의 경우(식 (7)), 틸트만의 경우(식 (8)) 및 디센터와 틸트를 동시에 갖는 경우(식 (9))에 대한 근축광선 추적식을 새로이 유도하였으며, 유한광선 추적과의 비교를 통하여 이 식들이 타당함을 증명하였다. 그리고 이 식들을 이용하여 왜곡을 계산했으며, 손떨림 보정량과 비교함으로써 근축광선 추적식을 검증하여 왜곡 계산을 수행했다. 따라서 본 논문에서 유도한 수식을 바탕으로 편심 광학계에 대해 왜곡을 포함한 모든 종수차를 계산할 수 있음을 보였다.

### 감사의 글

이 논문은 2010년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었습니다.

### References

1. J. M. Ryu, G. M. Kang, H. J. Lee, H. K. Lee, and J. H. Jo, "Correction method for the variation of the image plane generated by various symmetric error factors of zoom lenses of digital still cameras and estimation method of defect rate due to the correction," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **15**, 420-429 (2006).
2. H. Hamano, "Image stabilizing optical system," *Proc. SPIE* **4487**, 94-102 (2001).
3. S. Hayakawa, "Design of image stabilizing optical system," *Proc. SPIE* **3482**, 240-251 (1998).
4. K. Tanaka, "Paraxial theory of decentered optical system by means of Gaussian brackets," *J. Optics (Paris)* **16**, 251-255 (1985).
5. G. Suzuki, A. Shibayama, and T. Ito, "Zoom lens with vibration insulation," Japan Patent 2006-284763 (2006).
6. K. Yamaji, "Design of zoom lenses," in *Progress in Optics VI*, E. Wolf, ed. (North-Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1971), Chap. 4.
7. T. Suzuki and K. Usui, "Development of the 18-200mm high zoom ratio lens system," *Optics Design Group of Opt. Soc. Japan (Japanese ed.)*, No. 35, 2006.
8. "CodeV" is a registered trademark of ORA, <http://www.opticalres.com/>.
9. "OSLO" is a registered trademark of Lambda Research Co. [http://www.lambdare.com/software\\_products/oslo](http://www.lambdare.com/software_products/oslo).